

남극 CM 콘드라이트 황산염 광물의 in-situ  
동위원소 분석을 통한 소행성 물의 조성  
탐색을 위한 기획 연구

Research Planning for the Study of Water on  
C-type asteroids by In-Situ Isotopic Analysis of  
Sulfate Minerals in Antarctic CM Chondrites



2025. 11.

극지연구소

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극 CM 콘드라이트 황산염 광물의 in-situ 동위원소 분석을 통한 소행성 물의 조성 탐색을 위한 기획 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



연구책임자: 박 창 근

참여연구원: 김 화 영  
강 필 모  
김 지 애

## 보고서 초록

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                |                                                                   |                               |             |                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------|---------------------------------|
| 과제관리번호                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | PE25560        | 해당단계<br>연구기간                                                      | 2025. 4. 1. ~<br>2025. 9. 30. | 단계 구분       | 1단계 / (총1단계)                    |
| 연구사업명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 중 사 업 명        | 정책·지원과제(유형2)                                                      |                               |             |                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 세부사업명          |                                                                   |                               |             |                                 |
| 연구과제명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 중 과 제 명        |                                                                   |                               |             |                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 세부(단위)과제명      | 남극 CM 콘드라이트 황산염 광물의 in-situ 동위원소 분석을<br>통한 소행성 물의 조성 탐색을 위한 기획 연구 |                               |             |                                 |
| 연구책임자                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 박창근            | 해당단계<br>참여연구원수                                                    | 총 : 4 명<br>내부 : 4 명<br>외부 : 명 | 해당단계<br>연구비 | 정부: 5,000 천원<br>기업: 천원<br>계: 천원 |
| 연구기관명 및<br>소속부서명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 극지연구소 빙하지권연구본부 |                                                                   | 참여기업명                         |             |                                 |
| 국제공동연구                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 상대국명 :         |                                                                   | 상대국연구기관명 :                    |             |                                 |
| 위 탁 연 구                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 연구기관명 :        |                                                                   | 연구책임자 :                       |             |                                 |
| 요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                |                                                                   |                               |             | 보고서<br>면수 99                    |
| <div><div></div><div><div><div></div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div><div></div></div></div><div><div></div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div><div></div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div></div> |                |                                                                   |                               |             |                                 |

# 요 약 문

## 1. 서 론

남극에서 발견된 CM 콘드라이트는 태양계 초기의 수성 변질 기록을 보존한 운석으로, 물과 유기물의 기원을 이해하는 핵심 시료이다. 이 운석에서 산출되는 황산염 광물(특히 석고,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )은 그 기원에 대해 논란이 있다. 많은 연구에서 지구 풍화 과정의 산물로 해석하고 있으나, 동위원소 분석 결과는 일부 황산염이 소행성 모천체 기원임을 시사한다. 본 연구는 in-situ 동위원소 분석을 통하여 석고의 기원을 규명하고, 나아가 소행성 물의 조성을 밝히기 위한 타당성을 검토하는 것을 목적으로 수행되었다.

## 2. 연구개발의 필요성 및 목적

과학적으로는 CM 콘드라이트 석고의 기원을 밝힘으로써 태양계 초기의 물-광물 반응 및 화학적 진화를 이해할 수 있다. 기술적으로는 석고의 in-situ 동위원소 분석 사례가 세계적으로 거의 없기 때문에, 본 연구는 새로운 분석 기법을 정립하는 학문적 돌파구가 된다. 사회·산업적으로는 향후 화성 시료 회수(MSR) 및 소행성 탐사 미션 분석에 직접 기여할 수 있다.

## 3. 연구개발의 주요 결과

### 3.1. 사전 연구 결과

기존 연구는 CM 콘드라이트 황산염을 지구 풍화 산물로 보는 견해와 소행성 수성 변질 산물로 보는 견해가 대립하였다. 본 과제의 사전 연구에서 남극 CM 콘드라이트에서 추출한 황산염의 O, S 동위원소 조성은 남극 빙하의 값과 뚜렷이 구분되었으며, 일부는 기존 CM 콘드라이트 황산염 연구 결과와 일치하였다. 따라서 석고는 일부 지구 풍화의 영향을 받았으나 대체로 소행성 기원일 가능성이 높다고 해석된다.

### 3.2. 시료 전처리 방법

CM 콘드라이트 박편 제작 과정에서, 시료의 수분 손실과 외부 오염을 최소화하기 위해 무수 에탄올 기반 연마와 저속 절단을 사용하였다. 또한 에폭시 몰딩 후 반복 경화 과정을 통해 석고와 점토 광물의 보존성을 확보하였다. 박편 연마시에는



완전 건조 연마(dry polishing) 방법을 시도하였다.

### 3.3. 석고 탐색 및 산출 특성

주사전자현미경(SEM) 및 전자현미분석기(EPMA) 관찰 결과, 석고는 시료 내부에서 산출되거나, 균열부 또는 공극에서 발견되는 등 산출 양상이 달랐다. 용융각(fusion crust) 인근에서는 발견되지 않았는데, 이는 운석이 대기권 통과시 마찰열에 의해 용융각 근처의 석고가 모두 탄산염으로 변환된 것으로 보인다. 시료 내부에 존재하는 석고는 모천체 내부의 수성 변질 산물일 가능성을 지지하며, 균열부 또는 공극에서 산출되는 석고는 지구 풍화에 의한 것으로 보인다.

### 3.4. 정량 분석

EPMA 분석에서는 석고의 탈수 반응과 전자빔 손상을 최소화하기 위해 낮은 전류밀도( $\leq 0.5 \text{ nA}/\mu\text{m}^2$ )와 넓은 빔 크기( $\geq 10 \mu\text{m}$ )를 사용하였다. 이를 통해 석고의 이상적인 물 함량(20.9 wt%)이 안정적으로 측정되었다. 남극 CM 콘드라이트 EET 15007 시료에서 석고의 Ca/S 몰비는 0.976,  $\text{H}_2\text{O}$  함량은 20.85 wt%로 분석되었다.

### 3.5. 석고 생성 기작의 이론적 접근

CM 콘드라이트 석고는 황화광물(pyrrhotite 등)의 산화 반응에 의해 황산염이 생성되고, 이어서  $\text{Ca}^{2+}$ 와 반응하여 석고로 침전될 수 있다. 이러한 반응은 저온( $-2 \sim 50^\circ\text{C}$ ), 중성~약염기성(pH 7-9), 환원 조건( $E_h \sim -0.3 \text{ V}$ )에서 안정적인 것으로 보인다. 이는 Ryugu 소행성 시료에서 보고된 조건과도 유사하다.

### 3.6. CM 콘드라이트에서 발견된 석고의 분석 기법

석고의 기원을 규명하기 위해 다양한 분석 기법이 적용될 수 있다.

- 1) IRMS 연계 분석: 석고 탈수 과정에서 방출되는 구조수를 포집하여  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ 를 측정함으로써, 물-석고 간 동위원소 평형 조건을 역추적할 수 있는 가능성이 있음
- 2) Raman 분광법: 석고 특유의 진동 모드를 이용하여 빠르고 정확하게 석고 분포 파악
- 3) XANES (S K-edge): 황의 산화 상태를 규명하여 산화-환원 조건 추적
- 4) NanoSIMS: 수 마이크로미터 이하 크기의 석고 결정에 대해 H, O, S 동위원소를 초고해상도로 분석 가능. 특히 구조수의 H/D 비와  $\text{SO}_4$  이온내 산소 동위원소를 동시에 측정함으로써, 석고 생성 당시 모천체의 물 조성을 정밀하게 추적할 수 있을 것으로 기대
- 5) Large-geometry SIMS (LG-SIMS): 대형 이차이온 질량분석기를 통해

석고의 산소 및 황 동위원소를 고정밀도로 측정 가능. 이 방법은 기질효과(matrix effect)를 보정하기 용이하며, 표준물질(gypsum, anhydrite, barite)의 적용을 통해 석고의 O, S 동위원소 분석 정확도를 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대

### 3.7 종합 전략 및 로드맵

향후 신규 연구(3+2년) 계획은 다음과 같다.

- 1) Cryo-NanoSIMS 또는 Cryo-LG-SIMS를 활용한 H-O-S 동위원소 동시 분석법 확립
- 2) 저온 수성 변질 실험(hydrothermal alteration)을 통한 석고·탄산염 생성 모사
- 3) 소행성 Ryugu, Bennu 회수 시료와의 비교 분석을 통해 태양계 초기 물-광물 반응 모델 정립

## 4. 연구개발 성과의 활용 방안

본 연구는 소행성 및 태양계 초기 물의 분석으로 국제 공동연구의 기초를 구축하였으며, 향후 화성 시료 회수 프로그램 참여 기반을 마련하였다. 또한 우리나라 달 탐사에서 달의 물 존재 확인 및 분석 기술 확보, 그리고 이를 통한 차세대 연구자 양성에도 기여할 것이다.

## 5. 결론

본 연구는 남극 CM 콘드라이트 석고의 기원을 규명하기 위한 기초 연구로, in-situ 동위원소 분석으로 석고의 소행성 기원 여부를 확인함은 물론 소행성 물의 조성을 직접 분석할 수 있다는 가능성을 보였다. 이차이온질량분석기를 이용한 in-situ 동위원소 정밀 분석 기법은 기존 분석 한계를 극복하고, 태양계 초기 물을 직접 정밀하게 추적할 수 있는 새로운 방법론으로서 중요한 의의를 가진다.

# S U M M A R Y

## 1. Introduction

CM chondrites collected from Antarctica are meteorites that preserve records of early solar system aqueous alteration and serve as key materials for understanding the origin of water and organic compounds. Sulfate minerals occurring in these meteorites, particularly gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), remain the subject of debate regarding their origin. Some studies have interpreted them as products of terrestrial weathering, while isotope analyses suggest that at least a portion of the sulfates are derived from the asteroidal parent body. The objective of this study is to determine the origin of gypsum through in-situ isotope analyses and to evaluate the feasibility of constraining the composition of water on asteroids.

## 2. Necessity and Objectives of the Research

From a scientific perspective, identifying the origin of gypsum in CM chondrites enables a deeper understanding of early solar system water-mineral interactions and chemical evolution. From a technical perspective, since in-situ isotopic analyses of gypsum are extremely rare worldwide, this study provides an academic breakthrough by establishing new analytical methodologies. From a societal and industrial perspective, the research can directly contribute to the analysis of Martian Sample Return (MSR) materials and asteroid exploration missions.

## 3. Main Research Results

### 3.1. Preliminary Results

Previous studies have presented two opposing views: sulfate minerals in CM chondrites are either products of terrestrial weathering or of asteroidal aqueous alteration. In this study, the O and S isotopic compositions of sulfates extracted from Antarctic CM chondrites were clearly distinct from Antarctic ice values, and some were consistent with previous CM sulfate studies. Therefore, although some influence of terrestrial weathering is evident, the sulfates are largely interpreted as being of asteroidal origin.

### 3.2. Sample Preparation

During the preparation of thin sections from Murchison and Antarctic CM chondrites, anhydrous ethanol-based polishing and low-speed cutting were applied to minimize water loss and external contamination. In addition, repeated curing after epoxy embedding was carried out to ensure the preservation of gypsum and clay minerals.

### 3.3. Occurrence and Distribution of Gypsum

SEM and EPMA observations revealed that gypsum exhibits different occurrence modes depending on its setting: it was found in the interior of the sample, as well as along fractures and pores. Gypsum was absent near the fusion crust, likely because frictional heating during atmospheric entry caused gypsum in that zone to transform into carbonates. Gypsum preserved in the interior supports an origin from asteroidal aqueous alteration, whereas gypsum along cracks or voids appears to result from terrestrial weathering.

### 3.4. Quantitative Analysis

EPMA analyses require caution regarding dehydration reactions and electron-beam damage. Under conditions of low current density ( $\leq 0.5 \text{ nA}/\mu\text{m}^2$ ) and broad beam size ( $\geq 10 \mu\text{m}$ ), the ideal water content of gypsum (20.9 wt%) was measured stably. In the Antarctic CM chondrite EET 15007, gypsum was reported with a Ca/S molar ratio of 0.976 and  $\text{H}_2\text{O}$  content of 20.85 wt%.

### 3.5. Theoretical Approaches to Gypsum Formation

Gypsum in CM chondrites may form through the oxidation of sulfide minerals (e.g., pyrrhotite), producing sulfate that subsequently reacts with  $\text{Ca}^{2+}$  to precipitate gypsum. Such reactions appear to be stable under low-temperature conditions ( $-2$  to  $50^\circ\text{C}$ ), near-neutral to slightly alkaline pH (7–9), and reducing redox states ( $E_h \sim -0.3 \text{ V}$ ). These conditions are similar to those reported for the Ryugu asteroid samples.

### 3.6. Analytical Techniques for Gypsum

Multiple analytical techniques can be applied to constrain the origin of gypsum:

- Raman spectroscopy: to identify characteristic vibrational modes and assess micro-scale distributions.
- XANES (S K-edge): to determine sulfur oxidation states and reconstruct redox conditions.
- NanoSIMS: enables ultra-high-resolution measurements of H, O, and S isotopes in gypsum crystals smaller than a few micrometers. In particular, it allows simultaneous measurement of the H/D ratio of hydration water and the oxygen isotopic composition of SO<sub>4</sub> groups, providing precise constraints on the isotopic composition of water on the parent body at the time of gypsum formation.
- Large-geometry SIMS (LG-SIMS): allows high-precision analysis of O and S isotopes in gypsum using a large-geometry secondary ion mass spectrometer. This method is well suited for correcting matrix effects, and the application of standards such as gypsum, anhydrite, and barite significantly improves the accuracy of O and S isotope determinations.
- IRMS coupled analysis: by collecting hydration water released during gypsum dehydration,  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  values can be measured, enabling reconstruction of water-gypsum isotopic equilibrium conditions.

This combined approach provides critical evidence for distinguishing asteroidal from terrestrial origins of gypsum and represents a direct method to probe the isotopic composition of water in asteroidal environments.

### 3.7. Integrated Strategy and Roadmap

A mid- to long-term (3+2 years) plan has been proposed:

- Establishing simultaneous H-O-S isotope analyses using NanoSIMS and LG-SIMS.
- Conducting low-temperature hydrothermal alteration experiments to replicate gypsum and carbonate formation.
- Comparative analyses with samples from Ryugu and Bennu to establish models of early solar system water-mineral interactions.

## 4. Utilization of Research Outcomes

This study has laid the foundation for entering international joint research collaborations and increased the potential for participation in the

upcoming Martian Sample Return program. It also contributes to the expansion of domestic analytical infrastructure and the training of the next generation of researchers.

## 5. Conclusion

This study represents a foundational effort to determine the origin of gypsum in Antarctic CM chondrites. Through in-situ isotope analyses, it has been shown that gypsum is largely of asteroidal origin, and the possibility of directly analyzing the isotopic composition of asteroidal water has been demonstrated. The application of NanoSIMS and LG-SIMS overcomes previous analytical limitations and provides a powerful new methodology for precisely tracing the composition of water in the early solar system.



# C O N T E N T S

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introduction .....                                                                                        | 14 |
| 1.1. Research Background and Necessity .....                                                                 | 14 |
| 1.2. Debate on the Origin of Gypsum in CM Chondrites .....                                                   | 16 |
| 1.3. Research Trends and Technological Level .....                                                           | 20 |
| 1.4. Research Objectives .....                                                                               | 21 |
| 1.5. Basis for Establishing the Objectives of This Study .....                                               | 22 |
| 1.6. Research Content and Scope .....                                                                        | 23 |
| 2. Research Methods and Implementation Strategies .....                                                      | 24 |
| 2.1. Strategies and Research Framework .....                                                                 | 24 |
| 3. Results .....                                                                                             | 25 |
| 3.1. Summary of Preliminary Research Results .....                                                           | 25 |
| 3.2. Improvement of CM Chondrite Sample Pretreatment Methods .....                                           | 29 |
| 3.3. Gypsum Identification and Its Characteristics .....                                                     | 38 |
| 3.4. Quantitative Chemical Analysis of Gypsum .....                                                          | 40 |
| 3.5. Theoretical Approach to the Mechanism of Gypsum Formation .....                                         | 57 |
| 3.6. Strategy for Isotopic Analysis of Structural Water and Sulfate Ions<br>in Gypsum .....                  | 66 |
| 3.7. Analysis of Gypsum in CM Chondrites Using Raman Spectroscopy .....                                      | 70 |
| 3.8. Gypsum Analysis Method Using XANES .....                                                                | 71 |
| 3.9. Gypsum Analysis using SIMS .....                                                                        | 74 |
| 3.10. Estimation of Oxygen Isotopic Composition of Asteroidal Water<br>Through SIMS Analysis of Gypsum ..... | 76 |
| 4. Comprehensive Strategy and Mid- to Long-Term Roadmap .....                                                | 78 |
| 4.1. Request for Proposal(RFF) .....                                                                         | 78 |
| 5. Utilization of Research and Development Outcomes .....                                                    | 86 |

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1. Future Research Projects and Technology Advancement .....                                     | 86 |
| 5.2. Potential for Participation in International Joint Research and<br>Exploration Missions ..... | 86 |
| 5.3. Academic and Educational Impacts and Standardized Outputs .....                               | 87 |
| 6. Expected Effects and Future Research Directions .....                                           | 88 |
| 6.1. Expected Technical and Industrial Impacts .....                                               | 88 |
| 6.2. Expected Scientific Impacts .....                                                             | 89 |
| 6.3. Expected Policy and Strategic Impacts .....                                                   | 90 |
| 6.4. Future Research Directions and Plans .....                                                    | 90 |
| 7. Summary and Conclusion .....                                                                    | 93 |
| 7.1. Summary .....                                                                                 | 93 |
| 7.2. Scientific and Technological Significance .....                                               | 93 |
| 7.3. National R&D Impacts .....                                                                    | 93 |
| 7.4. Conclusion and Recommendations .....                                                          | 94 |
| References .....                                                                                   | 95 |



# 목 차

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| 제 1 장 서론 .....                                   | 14 |
| 제 1 절 연구 배경과 필요성 .....                           | 14 |
| 제 2 절 CM 콘드라이트 내 석고의 기원 논쟁 .....                 | 16 |
| 제 3 절 연구의 국내·외 동향과 기술 수준 .....                   | 20 |
| 제 4 절 연구 목표 및 내용 .....                           | 21 |
| 제 5 절 본 연구의 목표 수립 근거 .....                       | 22 |
| 제 6 절 연구 내용 및 범위 .....                           | 23 |
| 제 2 장 연구 수행 방법 및 추진 전략 .....                     | 24 |
| 제 1 절 추진 전략 및 연구 체계 .....                        | 24 |
| 제 3 장 연구개발 결과 .....                              | 25 |
| 제 1 절 사전 연구 결과 정리 .....                          | 25 |
| 제 2 절 CM 콘드라이트 시료 전처리 방법 개선 .....                | 29 |
| 제 3 절 석고 탐색 및 산출 특성 .....                        | 38 |
| 제 4 절 석고의 정량 화학 분석 .....                         | 40 |
| 제 5 절 석고 생성 기작의 이론적 접근 .....                     | 57 |
| 제 6 절 석고의 구조수 및 황산염 이온의 동위 원소 분석 전략 .....        | 66 |
| 제 7 절 Raman을 이용한 CM 콘드라이트 내 석고 분석 .....          | 70 |
| 제 8 절 XANES를 이용한 석고 분석법 .....                    | 71 |
| 제 9 절 이차이온질량분석기(SIMS)를 이용한 분석 방법 .....           | 74 |
| 제 10 절 석고의 SIMS 분석을 통한 소행성 물의 산소동위원소 조성 추정 ..... | 76 |
| 제 4 장 종합 전략 및 중장기 로드맵(5년) .....                  | 78 |
| 제 1 절 연구과제제안서(안) .....                           | 78 |
| 제 5 장 연구개발 성과의 활용 방안 .....                       | 86 |
| 제 1 절 향후 연구 과제 연계 및 기술 고도화 .....                 | 86 |

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 제 2 절 국제 공동연구 및 탐사 미션 참여 가능성 .....   | 86 |
| 제 3 절 학문적 · 교육적 파급효과 및 표준화 산출물 ..... | 87 |
| 제 6 장 기대효과 및 향후 연구 방향 .....          | 88 |
| 제 1 절 기술적 · 산업적 측면의 기대효과 .....       | 88 |
| 제 2 절 과학적 측면의 기대효과 .....             | 89 |
| 제 3 절 정책 · 전략적 측면의 기대효과 .....        | 90 |
| 제 4 절 향후 연구 방향 및 계획 .....            | 90 |
| 제 7 장 결론 .....                       | 93 |
| 제 1 절 연구 요약 .....                    | 93 |
| 제 2 절 과학적 · 기술적 의의 .....             | 93 |
| 제 3 절 국가 R&D 파급효과 .....              | 93 |
| 제 4 절 결론 및 제언 .....                  | 94 |
| 참고문헌 .....                           | 95 |



## 제 1 장 서론

### 제 1 절 연구 배경과 필요성

#### 1. 지구 물의 기원 문제

지구를 비롯한 내행성에 물이 어떻게 공급되었는지는 행성과학에서 오랫동안 제기되어 온 핵심적인 의문이다. 유력한 가설 중 하나는 C형 소행성과 같이 물이 풍부한 천체들로부터 물이 공급되었다는 것으로, 실제 카보네이셔스 콘드라이트 운석들이 지구 해양과 유사한 수소 동위원소 조성(D/H)을 보이는 점이 근거로 제시되어 왔다. 카보네이셔스 콘드라이트의 평균적인 수소 동위원소비( $D/H \approx 1.01 \times 10^{-4}$ ,  $\delta D \approx -350\text{‰}$ )는 지구 해양( $\approx 1.56 \times 10^{-4}$ )보다 가볍지만, 혜성과 같은 외부 태양계 천체의 극단적으로 무거운 수소 조성보다는 낮은 값을 보여 지구 물과의 부분적 연관성을 시사한다. 이러한 수치는 C형 소행성의 물이 태양계 외곽이나 원시 태양 성운의 얼음에서 유래했음을 암시하며, 지구 물의 기원을 규명하기 위해 소행성 기여도의 정량적 평가가 필요함을 보여준다.

최근 소행성 류구(Ryugu)에서 회수한 시료의 Lu-Hf 동위원소 연구에서 태양계 형성 10억년 후에도 소행성 내부에 다량의 얼음이 존재했을 가능성이 있음을 제시하였다(Iizuka et al., 2025). 이는 지구형 행성을 만든 물질들이 기존에 생각했던 것보다 훨씬 더 오래까지 많은 물을 지구로 공급했을 가능성을 시사하는 것이어서 의미가 크다. 하지만 아직까지 소행성의 물을 직접 분석한 사례는 없어 지구의 물의 기원을 명확히 하는데 제약이 있어 왔다.

#### 2. CM 콘드라이트의 중요성

CM 콘드라이트는 물과 유기물이 풍부한 C형 소행성에서 기원한 것으로 알려진 운석이며, 그 광물학적·화학적 조성은 초기 태양계에서 암석과 물이 상호작용한 역사를 기록하고 있다. 이 운석들은 모천체 내부에서 액체 물에 의해 광범위한 수성 변질을 겪었고, 그 결과 필로규산염(phylllosilicate), 탄산염(carbonate), 마그네타이트(magnetite) 등의 2차 광물이 생성되었다. 또한 석고( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 역시 소량(<1 vol%)이나마 CM 콘드라이트에서 보고된 바 있다.

CM 콘드라이트는 전체 운석의 약 0.7%, 카보네이셔스 콘드라이트의 약 25%에 해당하여 비교적 많이 발견되는 운석이며, 따라서 지구를 포함한 행성의 물의 기원으로도 주목받고 있다. 극지연구소는 5g 이상의 남극 CM 콘드라이트 17개를 보유

하고 있어, 다양한 연구에 활용되고 있다.



그림 1. 내부에서 석고가 발견된 남극 CM 콘드라이트 EET 15007.

### 3. 석고의 물 저장소 역할

석고는 결정 구조 내에 두 개의 구조수를 포함하고 있어 지질학적인 물 저장소 역할을 한다. 화성 암석에서 석고와 같은 황산염 광물이 발견된 것도 같은 맥락에서 중요하다. 따라서 운석이나 화성 암석 내 석고의 존재는 과거 해당 천체에 액체 상태의 물이 존재했음을 보여주는 증거이다. 더 나아가 석고에 포함된  $H_2O$ 와  $SO_4$ 의 산소 동위원소 및 수소 동위원소(D/H) 조성을 해독하면 그 물이 해당 천체 고유의 것인지, 혹은 외부에서 유입된 것인지를 판별할 수 있다. 따라서 CM 콘드라이트의 석고는 소행성의 물을 간직하고 있을 가능성이 크고, 따라서 석고를 분석하면 소행성의 물을 직접 분석하는 것과 다를 바 없다. 본 연구는 바로 이 점, 즉 석고의 동위원소가 담고 있는 물의 기원 정보를 밝히는 데 초점을 두었다.

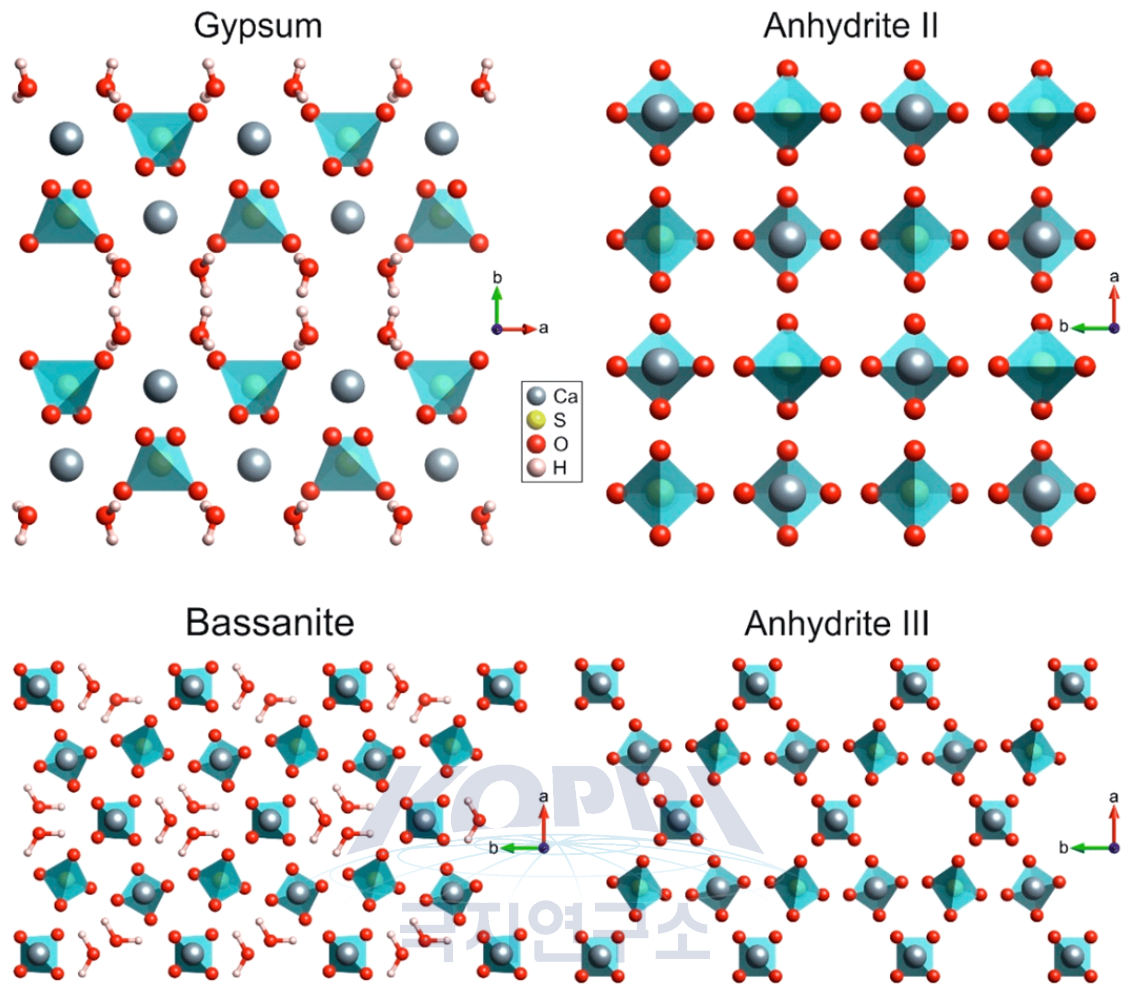


그림 2. 석고와 유사 황산염 광물들의 결정 구조.

## 제 2 절 CM 콘드라이트 내 석고의 기원 논쟁

### 1. 지구 풍화 기원설

CM 콘드라이트의 석고는 주로 미세한 균열이나 충전맥 속에서 섬유상 결정 형태로 산출되는 것으로 보고되어 왔다. 예를 들어 대표적 CM2 콘드라이트인 Cold Bokkeveld에서는 수십  $\mu\text{m}$  폭의 균열에 섬유(satin spar) 형태의 석고가 맥상으로 충전된 것이 관찰되었다. 이러한 미세 섬유상의 석고는 지구 환경에서 염수가 증발하여 생성되는 석고와 유사하며, 모천체 내부의 공극에서 염수 용액이 증발·침전하여 생성된 결과로 해석되기도 하였다(Lee, 1993). 그러나 이후 다수의 연구에서



는 운석에서 발견된 석고를 포함한 황산염을 지구 대기 기원의 오염 물질 혹은 남극에서 생성된 2차 풍화 산물로 간주해 왔다. 실제로 카보네이셔스 콘드라이트 중심하게 풍화된 사례에서는 황산염의 산소 동위원소 조성이 지구 황산염과 구분되지 않는 경우가 보고되었다. 예컨대 CI 콘드라이트 Orgueil과 Ivuna의 황산염은  $\delta^{17}\text{O}$  값 등에서 육상 황산염과 차별성이 없었으며, 이는 이들 황산염이 운석 낙하 후 지구 환경에서 생성된 2차 광물임을 시사한다. 또한 Fuchs 등(1973)은 Cold Bokkeveld 조각의 표면에서 석고가 발견되었음을 보고하였으며, 이는 큐레이션 과정에서 생성되었을 가능성이 제기되기도 하였다. 따라서 지구 환경 노출에 따른 황산염 생성 가능성은 충분하며, 석고의 지구 기원설을 뒷받침하는 사례로 해석될 수 있다.

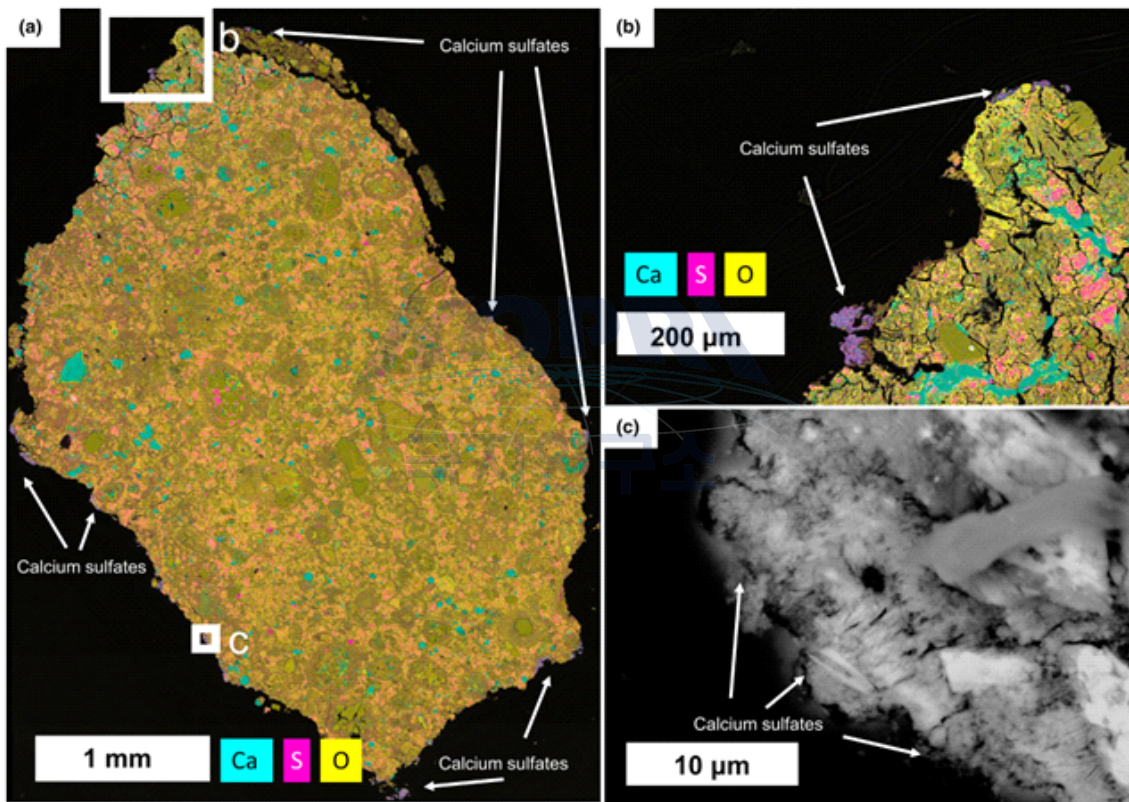


그림 3. 낙하 CM 콘드라이트 Winchombe에서 시료의 테두리를 따라 발견되는 석고 (Jenkins et al. 2024). 이는 지구 낙하 후 빠른 시간 내에 석고가 생성될 수 있음을 보여주는 증거임.

남극 지역에서 발견되는 운석의 경우, 기후·지리·운석 종류 등에 따라 증발 광물(evaporite)이 생성될 수 있음이 논의되었다. 남극의 연평균 기온은  $0^{\circ}\text{C}$  이하이지만, 여름철 동안 운석이 국소적으로 가열되며 주변 빙하를 녹여 물을 발생시킬 수 있다. 실제로 탄산염 광물의 탄소 동위원소를 기반으로 추정된 증발 광물 생성 온도가  $-2 \pm 4^{\circ}\text{C}$ 로 보고된 바 있다(Losiak & VelBel, 2011).

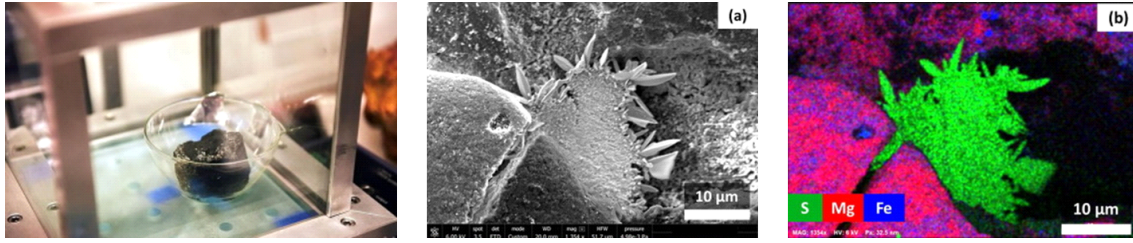


그림 4. 런던 자연사박물관에서의 CI 유기탄소질 콘드라이트 큐레이션 및 층상규산염 기질 위의 황산염 광물에 대한 SE 영상 및 XRF 맵 (King et al., 2020)

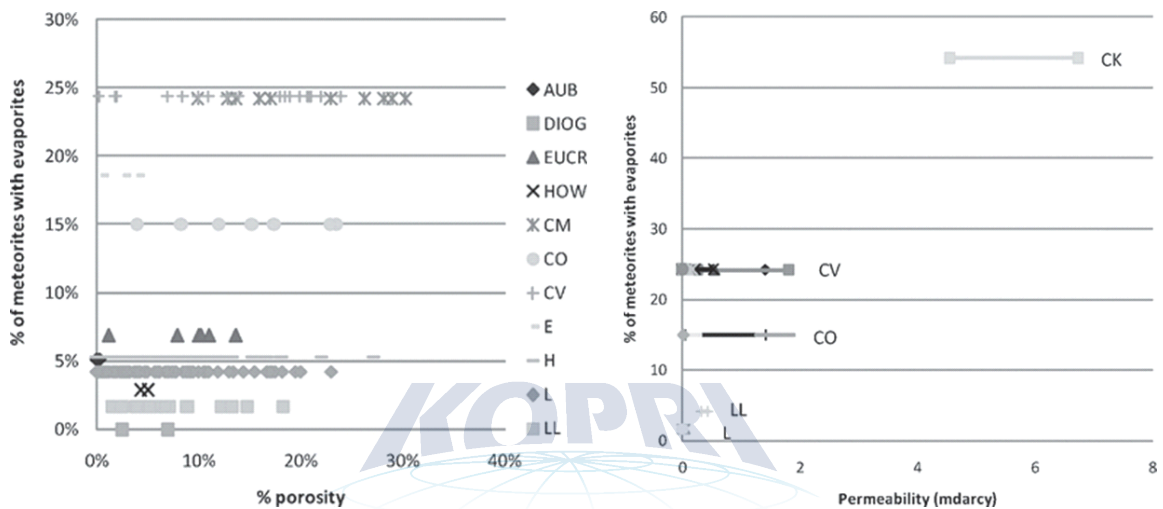


그림 5. 증발암 광물 산출과 운석 시편의 (좌) 공극률 및 (우) 투수도 간의 상관관계. (Losiak and Velbel, 2005)

## 2. 모천체 내 생성설

반면 최근 연구들은 운석 내 황산염의 동위원소 이상(anomaly)을 통해 이들이 모천체 기원임을 지지하고 있다. CM 콘드라이트 시료 6개에서 추출한 수용성 황산염의 산소 동위원소 분석 결과, 모든 시료의 황산염이 지구 황산염 범위를 벗어나 있었으며, 오히려 각 운석의 전암 산소 조성과의 편차 정도와 연관된 경향을 보였다. 특히  $^{17}\text{O}$  초과( $\Delta^{17}\text{O}$ )가  $+1\text{‰}$  수준으로 측정되어, 해당 황산염이 암석 지배적 모천체 환경에서 생성되었으며 지구 대기와의 교환이 제한적이었음을 나타낸다. 이는 황산염(및 그 결합수)이 모천체 물의 동위원소 기록을 지니고 있음을 시사한다. 또한 낙하 후 신속히 회수된 운석(fall)의 경우, 외래 오염이 최소화되어 수화 광물이 본래의 외계 동위원소 신호를 잘 보존하고 있음이 확인되었다.

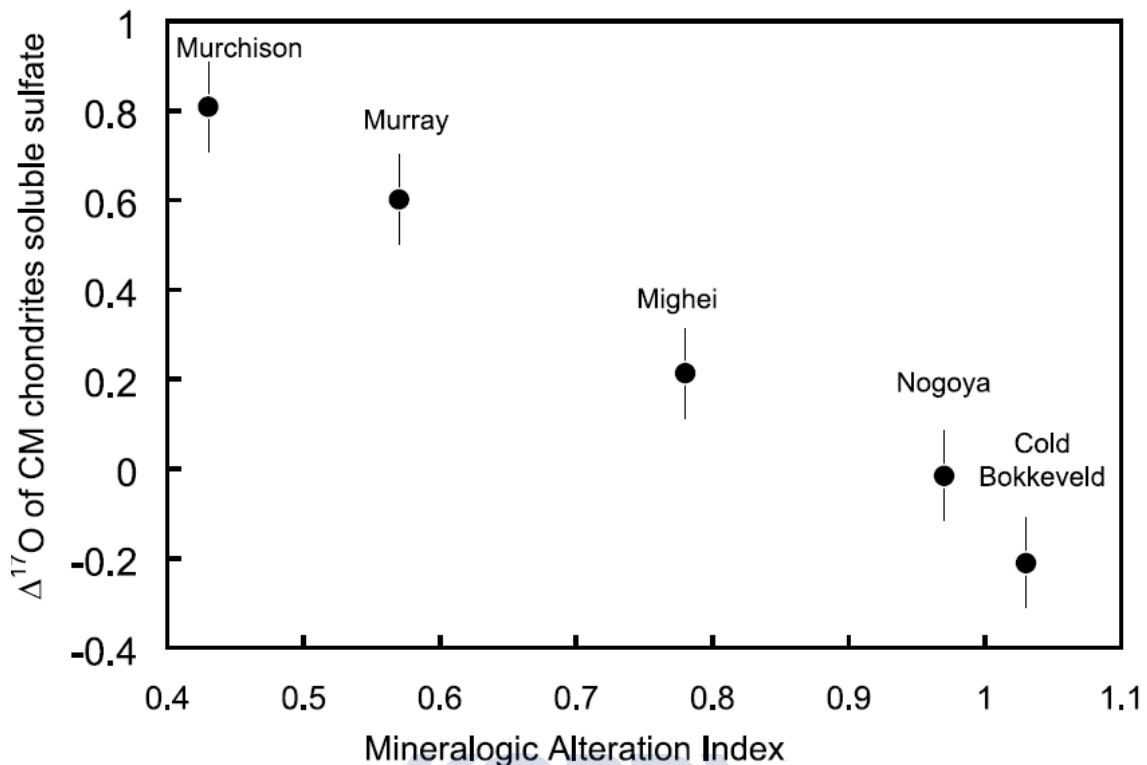


그림 6. 지구의 산소 동위원소 조성( $\Delta^{17}\text{O}$ )과는 확연히 다른 값을 보이는 CM 콘드라이트의 산소 동위원소 조성 (Airieau et al., 2005)

### 3. 논쟁의 쟁점

결국 논쟁의 핵심은 “CM 콘드라이트의 석고가 지구에서 생성되었는가, 아니면 소행성 모천체에서 생성되었는가”에 있다. 이를 해결하기 위해서는 결정적인 동위원소 증거가 필요하다. 핵심은 석고 내 물( $\text{H}_2\text{O}$ )과 황산( $\text{SO}_4$ )이 각각 어떤 산소 동위원소 조성을 가지는지를 파악하는 것이다. 만약 두 성분이 동일하게 양의  $\Delta^{17}\text{O}$  값을 보인다면, CM 콘드라이트 석고의 물과 황산이 지구 밖에서 만들어졌음을 의미하므로 석고의 외계 기원을 강력히 뒷받침한다. 반대로  $\text{SO}_4$ 의 산소 동위원소 조성은 지구 밖의 값을 보이지만  $\text{H}_2\text{O}$ 의 산소 동위원소 조성이 지구와 유사하다면, 이는 지구 물이 침투하여 기존 황산염을 재수화하거나 낙하 후 탄산염 광물이나 무수석고(anhydrite;  $\text{CaSO}_4$ )를 수화시켰음을 의미한다. 그러나 현재까지는 개별 성분의 동위원소 비교 데이터가 부족하여 명확한 결론이 내려지지 않았으며, 이에 따라 혁신적 동위원소 분석 기법의 필요성이 제기되었다.



## 제 3 절 연구의 국내·외 동향과 기술 수준

### 1. 국제 연구 동향

미국, 유럽, 일본 등은 우주 물질 분석 기술을 국가 차원에서 발전시켜 왔다. 미국은 Apollo 월석, ANSMET 남극 운석, OSIRIS-REx 소행성 시료를 대상으로 다양한 동위원소 분석 연구를 수행해 왔으며, 이미 CM 콘드라이트 탄산염 광물의 산소 동위원소 미소 분석(in-situ) 사례도 축적하였다. 유럽의 영국, 프랑스, 독일은 Hayabusa2 Ryugu 시료의 전암 산소 동위원소를 측정하고, CM 콘드라이트 탄산염의 미소 분석에도 참여하였다. 특히 2024년에는 독일과 중국이 공동으로 석고를 포함한 황산염 광물의 산소·황 동위원소 분석용 표준시료를 개발하였다. 일본은 하야부사2 임무를 통해 확보한 Ryugu(Ryugu) 소행성 시료의 탄산염에 대한 미소 분석을 수행하여 초기 성과를 발표하였으며, 향후 JAXA의 MMX(포보스 샘플) 임무에서도 유사한 분석이 예정되어 있다. 중국은 Chang'e 미션으로 달 시료를 수집하고 대형 SIMS를 이용하여 연대 측정과 안정 동위원소 분석을 활발히 진행하고 있으며, 황산염 동위원소 표준물질 개발에도 주도적으로 참여하고 있다. 최근 NanoSIMS를 이용해 소행성 류구 회수 시료를 분석한 연구에서 황산염(석고는 아니고 Mg-sulfate로 보임)에 대한 산소, 황 동위원소를 in-situ로 분석하여 보고하였다. 산소동위원소 조성( $\delta^{17}\text{O} = -11.0 \pm 4.3 \text{ ‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -7.8 \pm 2.3 \text{ ‰}$ )은 류구 시료 내의 규산염 광물과 유사한 조성으로 황산염( $\text{SO}_4$ )의 산소는 규산염 광물에서 기원하였을 가능성을 시사하였다. 다만 아직 CM 콘드라이트내 석고의 분석은 시도한 사례는 찾지 못했다.

### 2. 국내 연구 현황

우리나라는 극지연구소(KOPRI)가 국내 유일의 남극 운석 탐사 및 큐레이션 기관으로서 다년간 운석 수집과 연구를 주도해 왔다. 극지연구소는 레이저 불화 산소 동위원소 분석 시스템을 보유하여 운석, 암석, 광물의 산소 동위원소비( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ )를 세계적 수준의 정밀도로 측정해 왔다. 또한 CM 콘드라이트에서 황산염을 추출한 뒤 바라이트( $\text{BaSO}_4$ )로 침전시키고 이를 산소 동위원소 분석에 활용하는 기법을 확립하여,  $\text{SO}_4$  부분의  $\delta^{17}\text{O}$ 가 약  $+1\text{ ‰}$  수준임을 확인하였다. 그러나 이 방법은 구조수  $\text{H}_2\text{O}$ 의 산소 조성을 측정할 수 없는 한계를 지니고 있다. 국내에서는 한국기초과학지원연구원(KBSI) 등 연구기관에 SIMS 장비가 구축되어 있으나, 황산염 광물의 산소 동위원소를 마이크로미터 규모에서 분석한 선례는 존재하지 않는다.

### 3. 기술적 격차와 도전

석고와 같은 황산염을 in-situ 방법으로 동위원소를 분석하기 위해서는 표준 물질과 보정 기법이 필수적이다. SIMS는 기질 효과(matrix effect)로 인해 측정된 동위원소비가 편차를 보일 수 있으므로, 분석 대상과 화학적 조성이 유사한 표준시료를 이용한 보정이 요구된다. 또한 석고는 초고진공 SIMS 챔버에서 탈수 반응(석고→무수석고)이 일어날 가능성이 있으며, 이를 방지하기 위해 시료를 냉각 상태에서 분석하는 초저온 스테이지(Cryo stage)의 도입이 제안되고 있다. 이러한 기술적 난제로 인해 전 세계적으로 아직 개별 황산염 광물의 산소 동위원소를 in-situ로 측정하는 사례는 보고되지 않았다. 본 연구는 바로 이러한 분석을 위한 개념정립 단계에 해당하며, 자체 기술 개발을 통해 난제를 극복한다면 우주물질 분석뿐만 아니라 지구환경 시료 연구에도 폭넓게 활용될 수 있는 획기적 방법론으로 발전할 수 있을 것이다.

## 제 4 절 연구 목표 및 내용

### 1. 연구개발의 최종 목표

본 연구의 최종 목표는 “남극 CM 콘드라이트 내 석고를 in-situ 동위원소 분석하여 소행성 물의 조성을 규명하고, 지구형 행성의 물의 기원을 탐색하는 연구의 타당성을 평가하는 것”이다. 이를 통해 향후 연구재단의 중견연구 등 보다 규모가 큰 후속 연구에서 중장기적 연구 방향성을 정립하고, 국가 우주탐사 연구과제 제안을 위한 과학적 근거를 마련하고자 한다.

### 2. 연구개발의 구체적 목표

첫째, CM 콘드라이트 내 석고의 존재를 확인하고 기원을 판별하는 것이다. 이를 위해 남극에서 채집된 CM2 운석 시료를 대상으로 석고의 분포와 산출 양상을 파악하고, SEM, EPMA 등의 분석법을 활용하여 석고의 특성을 규명한다. 이 결과를 바탕으로 석고가 모천체 기원인지 남극 기원인지를 평가한다.

둘째, 석고의 in-situ 분석 기법을 확립하는 것이다. 국내외 보유 장비를 활용하여 석고의 산소 동위원소를 미세 규모에서 직접 측정할 수 있는 방법론을 개발한다. 특히 대형 SIMS 장비를 활용하여 석고의  $\text{SO}_4$ 와  $\text{H}_2\text{O}$  부분을 분리 측정하는 절

차를 수립하고, 표준시료를 통한 보정 및 기질 효과 보정 방안을 마련한다.

셋째, 동위원소 데이터를 통해 소행성 물의 조성을 추정하는 방법을 모색한다. 소행성에서 석고 생성에 기여한 모천체 유체의 산소 동위원소 조성을 추산하는 실험적 방법에 대해 구상한다.

## 제 5 절 본 연구의 목표 수립 근거

본 연구는 “CM 콘드라이트 석고는 지구 풍화 산물”이라는 기존 패러다임에 도전하여, 석고가 소행성 내부 물-암석 상호작용의 결과임을 검증하는 것을 핵심 목표로 한다. 이를 위해 석고의 미세 분포 특성을 분석하고, in-situ 동위원소 정밀 분석을 통한 석고 생성 환경(온도, 산화·환원 상태 등)을 재구성하는 연구를 구체화하고자 한다.

연구 가설은 “CM 콘드라이트 석고의  $\text{SO}_4$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 에 기록된 산소 동위원소 조성이 모두 외계 기원을 보일 것”이다. 이는 석고가 모천체에서 물과 광물의 상호작용으로 만들어졌다면 두 성분의 산소가 동일한 소행성 물의 특징을 나타내리라는 가정에 기반한다. 이 가설이 확인된다면 소행성 내부 유체의 산소 동위원소 값을 직접 지시하는 것이며, 지구형 행성 물질의 기원 연구에 새로운 접근법을 제공할 수 있다. 반대로 두 성분의 동위원소가 상이하다면 석고 생성과정에 외부 물질, 예를 들어 지구 물 침투가 개입되었음을 의미하며, 이는 운석 풍화 메커니즘에 대한 새로운 이해를 필요로 한다.

본 연구의 필요성은 세 가지로 요약된다. (1) 학문적 측면에서는 초기 태양계 물질의 진화와 지구 물의 기원을 규명하기 위한 새로운 분석 대상으로 석고 동위원소 연구가 전례 없는 정보를 제공한다. (2) 기술적 측면에서는 SIMS 기반 동위원소 분석 기법 개발이 소행성 샘플뿐만 아니라 향후 화성 샘플 등 다양한 우주·지구 시료 연구에 응용 가능한 원천기술 확보로 이어진다. (3) 정책·전략적 측면에서는 국내 연구진이 해당 기술을 선도할 경우 국제 공동연구를 주도하고, Mars Sample Return 등 주요 탐사 프로젝트에서 주도적 참여 기회를 확보할 수 있다.

## 제 6 절 연구 내용 및 범위

본 연구는 6개월간 수행된 단기 기획연구이며, 문헌 조사·분석, 실험 연구, 자문 및 기획의 세 부분으로 구성된다.

### 1. 문헌 조사 및 국내외 연구 동향 분석

연구 초반 2개월 동안 CM 콘드라이트 내 황산염의 기원에 대한 찬반 논문을 폭넓게 조사하고, 카보네이셔스 콘드라이트 및 소행성 시료(Ryugu, Bennu)의 수성 변질 연구 사례를 분석하였다. 또한 SIMS 등 함수광물 동위원소 연구 동향과 기술 수준을 정리하였다. 이 과정에서 도출된 핵심 지식은 석고 생성 메커니즘 모델과 온도에 따른 물-석고 간 동위원소 분배 메커니즘으로, 후속 실험 해석에 반영될 것이다.

### 2. 운석 시료 실험 분석

연구 중반 3개월 동안 남극 CM 콘드라이트 시료를 선정하여 실험 분석을 수행하였다. SEM과 EPMA로 Ca-S 원소 지도를 작성하여 석고의 미세 분포를 파악하였으며, 석고의 산출 양상에 따른 조직적 차이를 비교하였다.

### 3. 연구 범위 한계

본 연구는 탐색적·기획적 성격상 단일 혹은 소수의 시료에 국한되었기 때문에 전체 CM 콘드라이트의 보편적 특성을 논하기에는 한계가 있다. 또한 SIMS를 통한 산소와 수소 동위원소(D/H) 분석은 장비 제약으로 수행하지 못하여 문헌값에 의존하였으며, 향후 과제로 남았다. 이러한 한계는 연구 보고서의 후속 연구 방향에서 구체적으로 제시된다.

## 제 2 장 연구 수행 방법 및 추진 전략

### 제 1 절 추진 전략 및 연구 체계

본 과제는 짧은 기간 내 핵심 목표를 달성하기 위해 3단계로 구성되었다. 1단계(1~2개월차)에서는 문헌 조사와 시료 준비를 완료하고, 국내외 연구 동향과 분석 가능 장비를 파악하였다. 2단계(3~5개월차)에서는 실험실 분석을 진행하는 동시에 전문가 자문회의를 개최하여 초기 성과를 공유하고 기술적 조언을 수렴하였다. 3단계(6개월차)에서는 종합적인 자료 해석을 수행하고 최종 자문회의를 거쳐 결과를 확정된 뒤, 이를 보고서와 신규 과제 제안서 형태로 정리하였다.

세부 전략은 다음과 같다. 1개월차에는 국내외 문헌을 조사하고 연구팀 킥오프 미팅을 개최하였다. 2개월차에는 남극 운석 보유 시료 중 분석 대상을 선정하고 박편 제작 등 시료 전처리를 완료하였으며, 1차 전문가 자문회의를 통해 연구 필요성과 계획을 검토하였다. 3개월차에는 SEM-EDS와 같은 광물학적 분석과 1차 자문의견을 반영하여 석고를 온전히 보존할 수 있는 전처리 방법을 찾기 위해 다양한 테스트를 수행하였다. 4개월차에는 EPMA를 이용한 정량 분석을 수행하였다. 이 시점에서 2차 전문가 자문회의를 개최하여 중간 성과를 검토하고 기술적 조언을 수렴하였다. 5개월차에는 완전 건식 연마 방식을 도입한 시료 전처리 절차를 개선하였고, EPMA 점검을 비롯한 추가 실험을 수행하였다. 6개월차에는 3차 전문가 자문회의를 통해 최종 결과를 평가하고 향후 연구계획을 논의하였다. 이후 기획연구 최종보고서와 신규 과제 제안서 초안을 작성하고 내부 검토를 거쳐 과제를 종료하였다.

연구 조직은 극지연구소 내부 연구팀과 외부 자문단의 협력 구조로 운영되었다. 연구책임자를 중심으로 내부 연구원 3명이 실험과 분석을 분담하였으며, 자문단은 광물계산 전문가, 저온 변질광물 전문가, 동위원소 지화학자 등 총 3명으로 구성되었으며, 주요 단계별로 자문을 제공하고 성과의 객관적 평가를 담당하였다. 이러한 교차 검증과 협의 과정을 통해 연구 결과의 신뢰성과 향후 계획의 완성도를 높일 수 있었다.

## 제 3 장 연구개발 결과

### 제 1 절 사전 연구 결과 정리

#### 1. CM 콘드라이트 내 석고 산출 관찰

본 연구를 통해 남극 CM 콘드라이트 내에 석고( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )가 존재함을 다양한 분석을 통해 입증하였다. 전자현미경 관찰에서 석고 특유의 섬유상 맥 구조가 식별되었다. 균열과는 거리상으로 떨어져 있는 시료의 내부에 원형으로 단독으로 존재하거나 탄산염 광물을 치환하는 형태로 존재하는 경우와 폭 수십  $\mu\text{m}$  규모의 균열을 채우며 산출되는 경우로 다르게 산출된다. 또한 용융각 영역에는 석고가 존재하지 않는 것이 확인되었는데, 이는 석고가 남극에서 물이 표면 침투하여 생성된 것이 아니라 운석 내부에서 기원했음을 강하게 지시한다. 만약 석고가 남극에서의 풍화로 생성되었다면 운석 표면이나 균열 입구 등 외부에 가까운 부분에서 우선적으로 발견되었어야 하나, 본 시료에서는 오히려 내부 매트릭스에 국한되어 분포하는 것이 관찰되었다. 이러한 관찰은 석고의 모천체 기원설을 지지하는 강력한 증거로 해석된다. Cold Bokkeveld 등 기존 보고 사례의 석고 맥과 유사한 경우는, 석고의 형태가 지구에서 관찰되는 증발잔류 석고와 유사해, 남극에서 유체의 증발·침전에 의해 생성되었음을 시사한다.

EDS 분석을 통해 석고와 공존하는 광물을 조사한 결과, 석고 주변에서 방해석( $\text{CaCO}_3$ ), 스멕타이트류 점토(Fe, Mg 함유 규산염; tochilinite-cronstedtite intergrowth; TCI), 자철석( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )이 확인되었다. 이는 CM 콘드라이트의 전형적인 수성변질 광물 조합이며, 석고가 모천체 내 수성반응의 최종 산물임을 뒷받침한다. 즉, 먼저 점토, 탄산염, 산화물이 생성된 이후, 잔류 유체가 최종적으로 황산염(석고)을 침전시켰다는 시나리오와 부합한다. 이러한 광물의 상관관계는 석고 기원과 생성환경을 해석하는 중요한 근거가 된다.



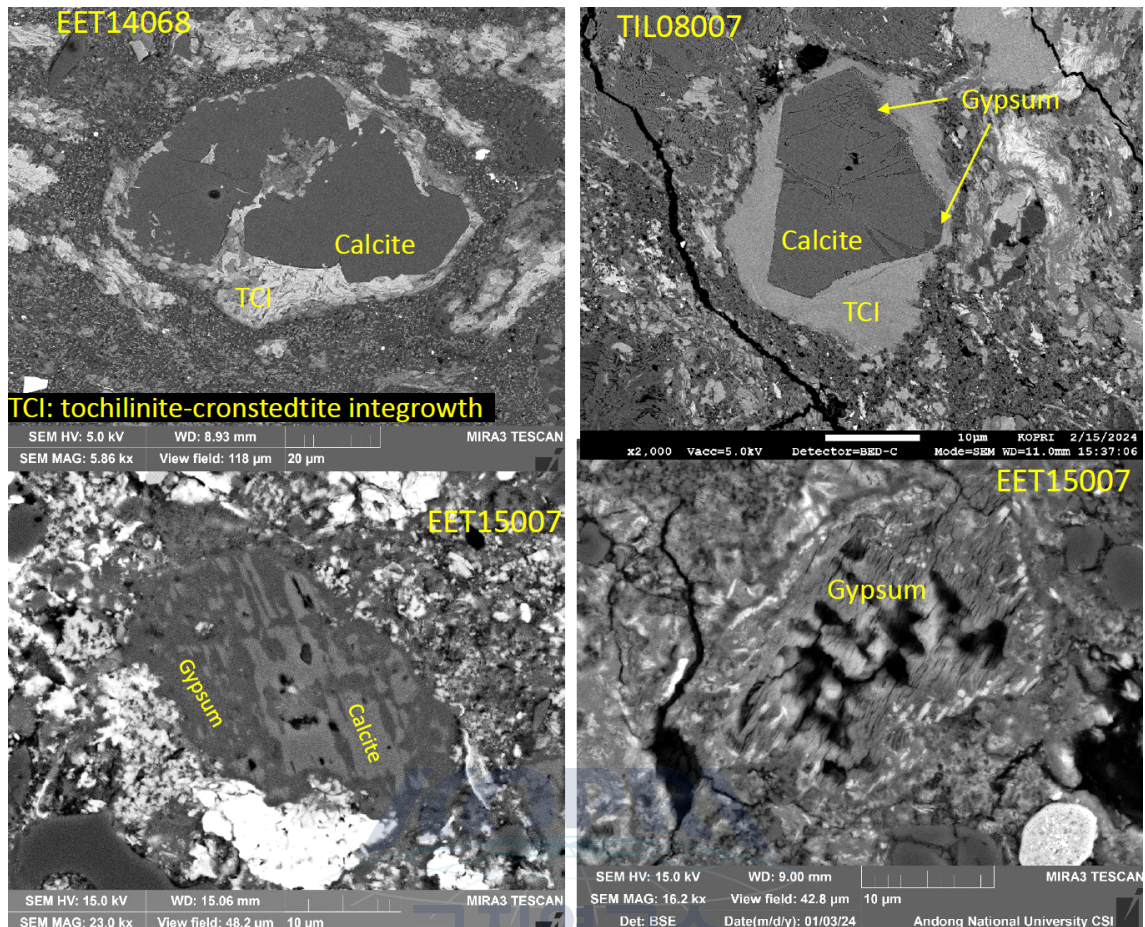


그림 7. 남극 CM 콘드라이트내 존재하는 다양한 석고의 산출 양상. 방해석을 치환하는 형태로 종종 관찰되며 석고 단독으로 산출되는 경우도 있다.

## 2. 산소 동위원소 IRMS 분석 결과

화학 추출-IRMS 기법으로 얻은 석고 황산기의 산소 동위원소 조성은  $\delta^{18}\text{O} \approx +11\text{‰}$ ,  $\delta^{17}\text{O} \approx +6\text{‰}$  (SMOW)이며, 질량 비의존 산소 동위원소 지표인  $\Delta^{17}\text{O}$ 는  $+1.2\text{‰}$  수준으로 측정되었다. 이 값은 지구 수권·대기에서 생성된 황산염( $\Delta^{17}\text{O} \approx 0\text{‰}$ )과 뚜렷이 구분되며, 오히려 운석 모천체의 수성변질 산물들과 유사성을 보이는 일관된 특성을 보여준다. 참고로 이전 연구에서 보고된 Murchison, Murray 등 CM 콘드라이트 황산염 추출물의  $\Delta^{17}\text{O}$  범위는  $+0.5 \sim +3 \text{‰}$  수준인데(Airieu et al., 2005), 본 연구 결과는 이 범위 내에 위치하여 CM 모천체 기원 황산염의 전형적 특성에 해당한다. 또한  $\Delta^{17}\text{O}$ 가 모천체 내 변질 정도와 상관성을 보인다는 기존 문헌과 본 연구 결과를 종합하면, EET 15007 운석은 중간 정도의 수성변질을 겪었으며 이 과정에서 황산염이 생성되었음을 시사한다. 만약 이 황산염이 지구 풍화 기원이었다면  $\Delta^{17}\text{O}$  값은  $0\text{‰}$ 에 근접했을 것이므로, 전암 산소 동위원소 분석

만으로도 지구 기원이 아님을 분명히 할 수 있다.

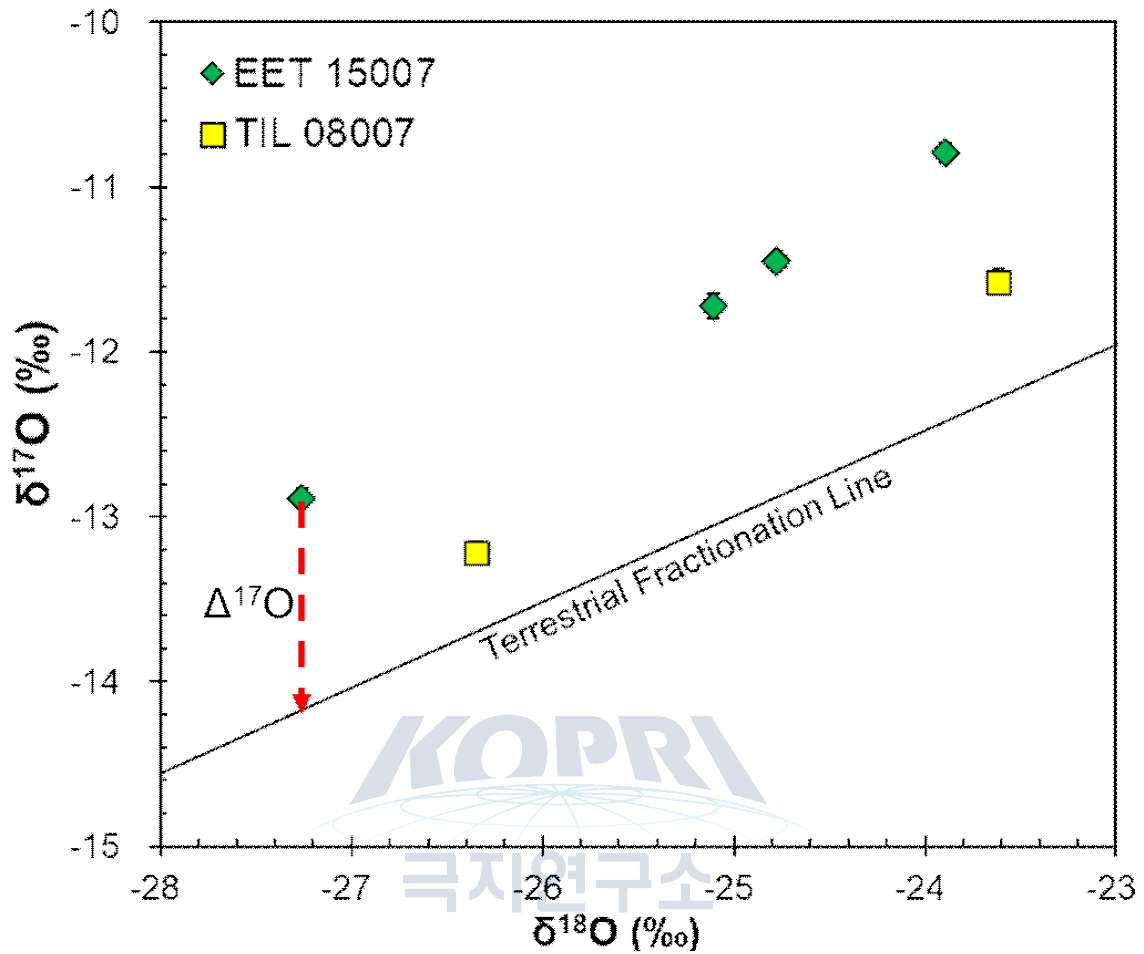


그림 8. 남극 CM 콘드라이트에서 추출한 황산염의 전암 산소동위원소 조성



표 1. CM/CI 및 산출 환경별 수용성 황산염의 산소 동위원소 경향

| 시료군      | 대표 시료                                                                    | $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$<br>(‰) | $\Delta^{17}\text{O}_{\text{SO}_4}$<br>(‰) | 경향 · 해석 요약                                                                                                                                          |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CM       | Murchison,<br>Murray,<br>Mighei,<br>Nogoya,<br>Cold Bokkeveld,<br>Banten | 4.5 ~<br>9.7 <sup>†</sup>                  | -0.23 ~<br>+1.18                           | $\Delta^{17}\text{O}$ 값이 TFL(지구 분별<br>선)과 다르며, 전암 $\delta^{18}\text{O}$ 및<br>변질지수(MAI)와 상관을 보<br>임 → 암석 지배적 모천체<br>유체에서 황화물 산화로 생<br>성된 황산염 해석이 타당함 |
| CI       | Orgueil, Ivuna                                                           | (4.8 ~<br>5.4) <sup>‡</sup>                | -0.12 ~<br>-0.08                           | TFL 부근으로 지구 기원/풍<br>화 가능성 큼(단, 소행성 기<br>원 완전 배제는 어려움)                                                                                               |
| C2       | Essebi                                                                   | 9.3                                        | -0.07                                      | TFL 부근(지구/모천체 혼합<br>혹은 오염 가능성)                                                                                                                      |
| 남극<br>CC | 다수                                                                       | (사례<br>제한)                                 | (사례<br>제한)                                 | 공개된 황산염 산소동위원소<br>데이터가 제한적. 남극 빙하<br>유래 황산염은 $\delta^{18}\text{O}$ 가 매우<br>음의 값을 가질 수 있음 →<br>운석 석고가 이들과 유사하<br>면 지구 풍화 기여 의심 필<br>요                |

주: † Airieau et al.(2005)의 TCEA 측정 범위(일부 시료는 레이저 불화 산소동위원소 값  
별도 표기). ‡ 괄호 값은 레이저 불화 방식으로 얻은 값.  $\Delta^{17}\text{O}$  값은 다음과 같이 정의된  
다.  $\Delta^{17}\text{O} = \delta^{17}\text{O} - 1000 \cdot [(1 + \delta^{18}\text{O}/1000)^{0.5248} - 1]$

### 3. 황 동위원소 IRMS 분석 결과

남극 CM 콘드라이트에서 추출한 황산염의 황 동위원소의 경우  $\delta^{34}\text{S}$  값으로 황산  
염의 생성 온도를 간접 추정하거나,  $\Delta^{33}\text{S}$  이상치를 통해 황의 기원을 추적할 수 있  
다. 예를 들어 소행성 Ryugu 시료의 황산염에서  $\Delta^{33}\text{S} \approx +0.3\text{‰}$ 의 양(+)의 이상  
이 발견되어, 황 원자가 태양계 생성 이전의 분자운 기원임이 확인되었다(Bose et  
al., 2024). 만약 남극 운석 석고에서도 이와 유사한 S 동위원소 이상이 검출된다  
면, 소행성들이 어떻게 원시 성운 물질을 보존했는지에 대한 중요한 정보가 될 것  
이다. 이러한 추가 in-situ 황 동위원소 연구는 현재 기술 개발 및 협력 계획이 진  
행 중이며, 새로운 연구 과제의 주요 내용으로 포함될 예정이다.

## 제 2 절 CM 콘드라이트 시료 전처리 방법 개선

수화광물·황산염의 보존성을 극대화하기 위해, 박편 제작 및 연마 프로토콜을 구축하였다. 구체적으로 (i) 무수 용제 기반의 단계적 연마, (ii) 저속 절단 및 열 발생 최소화, (iii) 에폭시 몰딩 후 반복 경화로 미세 공극 봉합, (iv) 코팅·진공 단계에서의 수분 관리 및 전처리 등을 표준화하였다. 이러한 절차는 전자빔 손상·탈수를 유발하는 요인을 사전 차단하고, 내부 보존상(균열과 무관한 기질 내 석고)과 균열/공극 부착상(2차 변질 가능성)의 동위원소·미세조직 차이를 온전하게 반영하도록 설계된 것이다.

표 2. 시료 준비-박편 제작-코팅-저장 단계별 위험요인 및 대응 체크리스트

| 단계      | 주요 위험요인                    | 권장 대응법                                          |
|---------|----------------------------|-------------------------------------------------|
| 시료 절단   | 마찰열 → 석고 탈수/상변환            | 저속 절단, 냉각 유지(에탄올·물 접촉 최소화), 열 누적 회피             |
| 연마/세정   | 수분·용제 오염, 미세공극 내 수분 잔류     | 고순도 에탄올 이용, 초음파 세정 시간 최소화, 건조 챔버 보관             |
| 에폭시 몰딩  | 휘발성/수분 방출 → NanoSIMS 진공 불량 | 고진공용 에폭시/인덱스 사용, 경화 반복(미세공극 봉합), 완전 건조 후 투입     |
| 코팅      | 과도 가열·오염, 표면 거칠기 증가        | 탄소/금 코팅 시 저온·박막 유지, 표준과 동일 조건 코팅                |
| 보관/이송   | 대기 흡습, 표면 염류 재석출           | 저습 데시케이터, 진공 데시케이터 사용, 급격한 온·습도 변화 회피           |
| EPMA 분석 | 빔 손상/탈수(석고 민감), 매트릭스 효과    | 저전류·큰 빔·짧은 분석 시간, 프리-스캔 최소화, TDI 활용, 표준-시료 교차분석 |
| SIMS 분석 | 진공 불량, 표면 기록 → 이온 영상 왜곡    | 평탄연마(저 거칠기), 표준 동시 장착(10 mm 내), 초저온 스테이지 활용 모색  |

## 1. 완전 건식 연마

CM 콘드라이트의 함수광물과 황산염 광물이 전처리 단계에서 소실되거나 생성되는 것을 방지하기 위해 완전 건식 연마(dry polishing)을 위한 박편과 연마편 제작 방법을 새롭게 시도하였다. Murchison을 이용하였으며, 사용된 전체 시료의 무게는 6.67 g이며, 절단 과정에서 약 0.05 g이 손실되었다. 이 가운데 2.83 g(전체 시료의 약 40%)을 박편 제작에 사용하였고, 3.79 g은 보존하였다. 따라서 귀중한 시료를 보존하면서 동시에 분석을 위한 박편을 확보하였다.

다이아몬드 와이어 톱날을 사용하여 시료를 절단하였다. 절단 톱은 #170 규격으로 폭 3 mm, 두께 0.3 mm, 길이 2170 mm의 다이아몬드 톱날을 사용하였다. 절단 조건은 200 RPM에서 5분간 진행되었으며, 이를 통해 시료 손상을 최소화할 수 있었다.

에폭시 몰딩은 Struers EpoFix를 사용하였으며, 수지와 경화제를 무게 비율 25:7로 혼합하였다. 혼합 시 기포 발생을 억제하기 위해 한 방향으로 천천히 교반하였다. 시료는 투명 테이프 위에 올리고 1인치 원통형 플라스틱 링으로 덮어 고정 한 뒤, 혼합된 에폭시를 시료가 잠길 정도로 주입하였다. 이후 상온에서 24시간 동안 경화시켜 안정적인 몰딩을 완료하였다.

연마편 표면 처리는 Polisher(GLP-S20/25)를 이용하여 수행하였다. 냉각과 윤활에는 물 대신 94.5% 에틸알코올을 사용하였다. 1차 연마에서는 SiC 연마지 #800을 이용하여 시료 표면의 에폭시를 제거하고, 시료가 드러날 때까지 연마하였다. 이후 표면에 에폭시를 추가 도포하여 24시간 동안 경화시켜 주요 광물의 이탈을 방지하였다. 2차 연마에서는 SiC 연마지 #1200과 #2400을 사용하여 표면을 다듬고 박편유리 부착 전 단계를 마무리하였다.

박편유리 부착에는 아랄다이트 에폭시를 사용하였다. 박편유리는 두께  $1.690 \text{ mm} \pm 5 \mu\text{m}$ , 직경 1 inch 규격이었다. 시료 표면과 박편유리 표면은 알코올로 세척하여 깨끗하게 처리하였다. 이후 35 °C로 가열된 핫플레이트 위에서 아랄다이트를 1:1 비율로 혼합한 뒤, 연마편 표면에 도포하고 박편유리를 올려 프레스로 눌러 24시간 동안 경화하였다.

박편 절단은 BUEHLER사의 저속 톱(low speed saw)을 사용하여 수행하였다. 절단 톱날은 직경 5인치, 두께 0.5T, #100 규격이었다. 연마편은 전용 홀더에 장착되었으며, 박편유리 안쪽에서 300  $\mu\text{m}$  지점에 톱날을 위치시켜 30 RPM으로 절단을 시작하였다. 절단이 절반까지 진행되면 시료를 180° 회전시켜 나머지를 절단하였다. 절단이 완료된 후에는 박편 표면에 에폭시를 다시 도포하고 24시간 동안 경화하였다.

박편 연마의 최종 목표 두께는 시료 두께 50  $\mu\text{m}$ 이며, 이를 포함한 전체 두께는 1.760 mm(박편유리 1.690 mm + 에폭시 약 30  $\mu\text{m}$  + 시료 50  $\mu\text{m}$ )였다. 연마 과정은 SiC 연마지 #800  $\rightarrow$  #1200  $\rightarrow$  #2400  $\rightarrow$  #4000 단계로 순차적으로 진행되었으며, 주기적으로 두께를 확인하였다. 최종적으로 전체 두께가 1.760 mm에 도달했을 때 연마를 종료하였다.

최종 완전 건식 연마(dry polishing)는 3M Trizact 다이아몬드 필름(입도 9  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 0.5  $\mu\text{m}$ )을 사용하여 수행하였다. 일반적인 다이아몬드 현탁액 대신 무회전 방식으로 직선 방향 연마만을 적용하여 표면 손상을 최소화하였다. 0.5  $\mu\text{m}$  단계까지 진행하여 광물 표면의 평탄도를 확보하였다. 최종적으로 광학현미경 반사 이미지를 확인하여 굵은 스크래치가 존재하지 않음을 점검하였으며, 문제가 없음을 확인하였다.





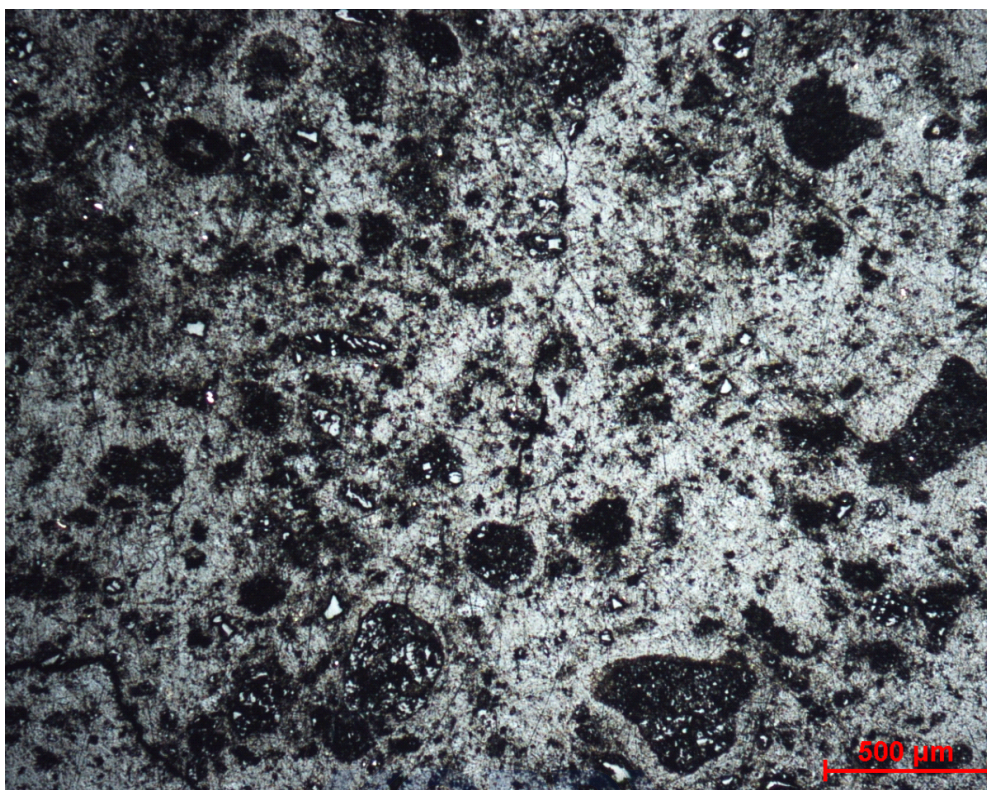


그림 9. SiC 연마지 #4000 완료 후 시료 표면 반사현미경 이미지 (40 배율)

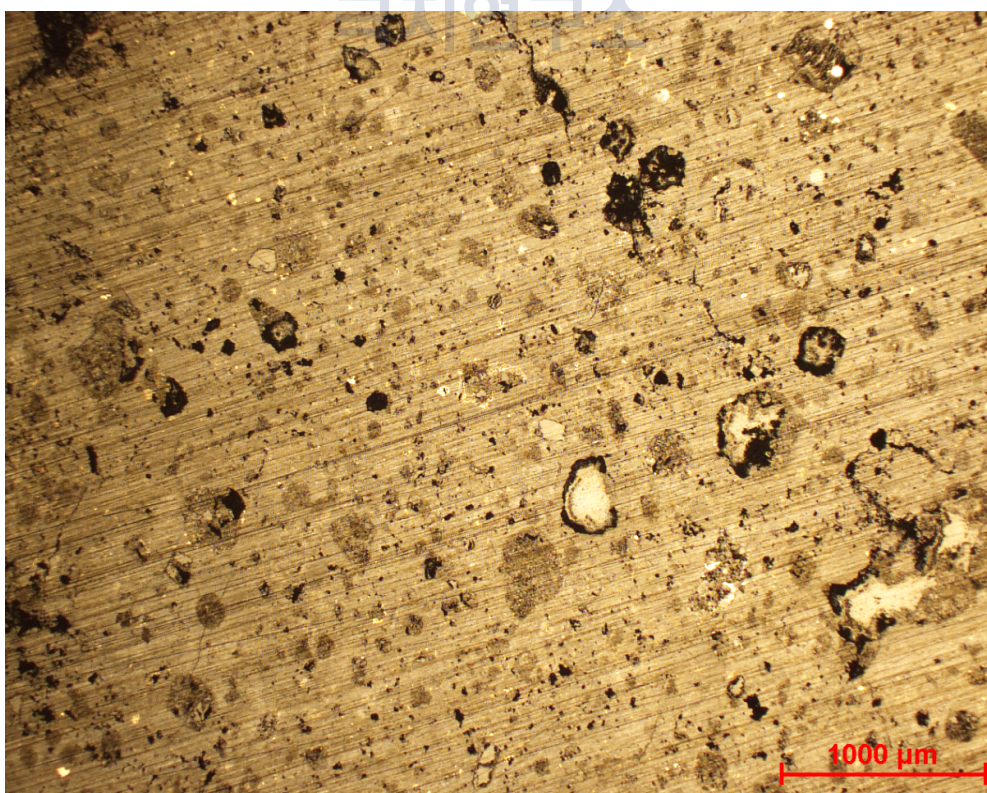


그림 10. 3M Trizact 9  $\mu\text{m}$  사용 후 시료 표면 반사현미경 이미지 (40 배율)



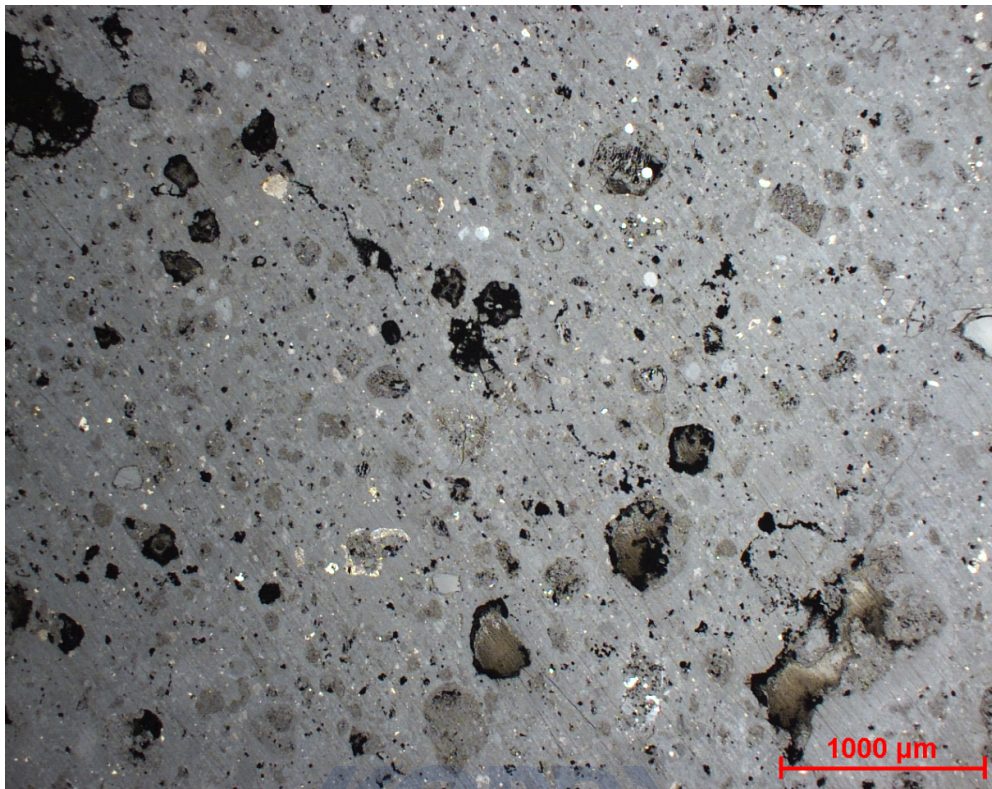


그림 11. 3M Trizact 2  $\mu\text{m}$  사용 후 시료 표면 반사현미경 이미지 (40 배율)

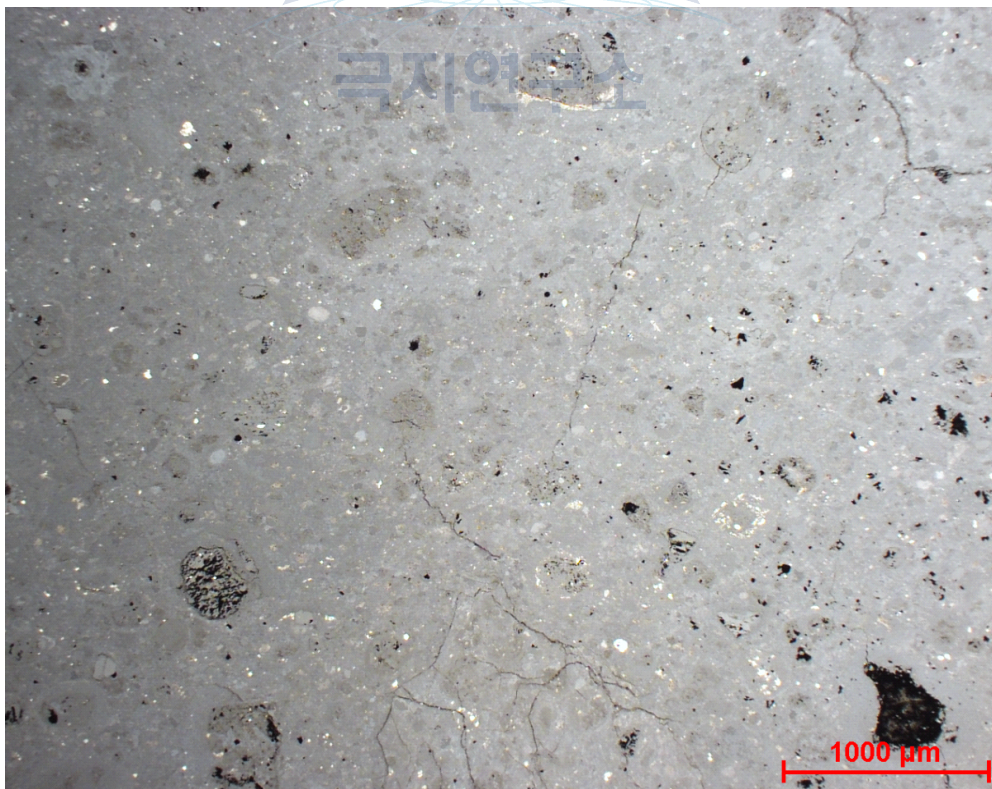


그림 12. 3M Trizact 0.5  $\mu\text{m}$  사용 후 시료 표면 반사현미경 이미지 (40 배율)

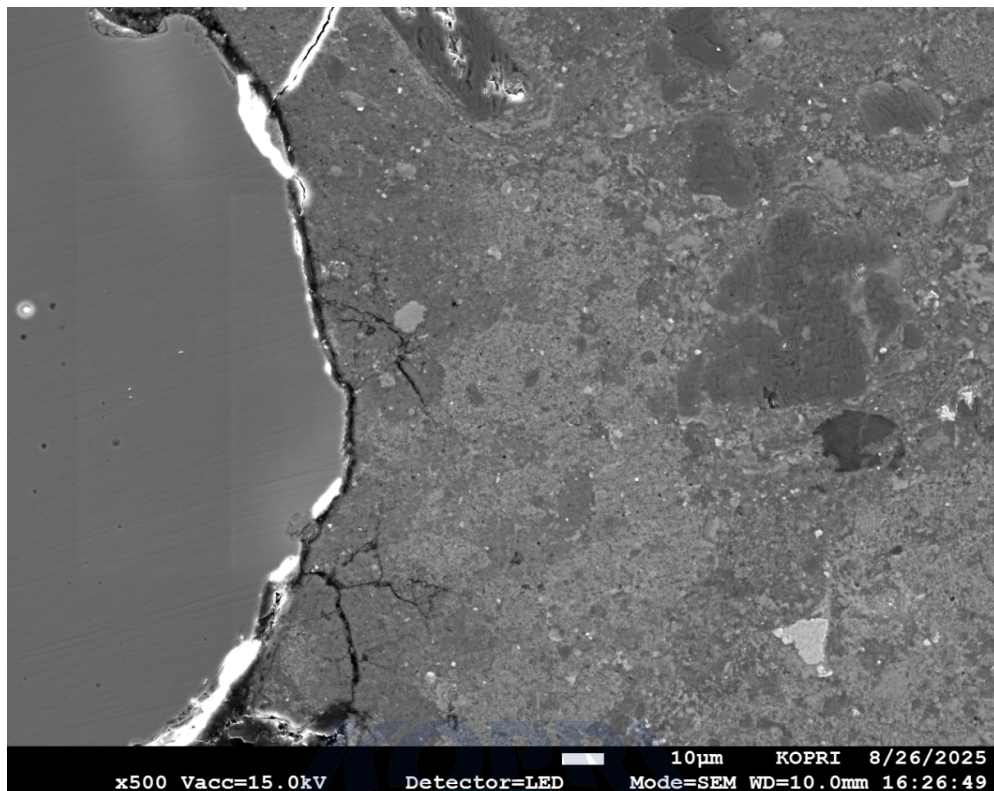


그림 13. FE-SEM에서 이차전자(SE) 이미지

극지연구소



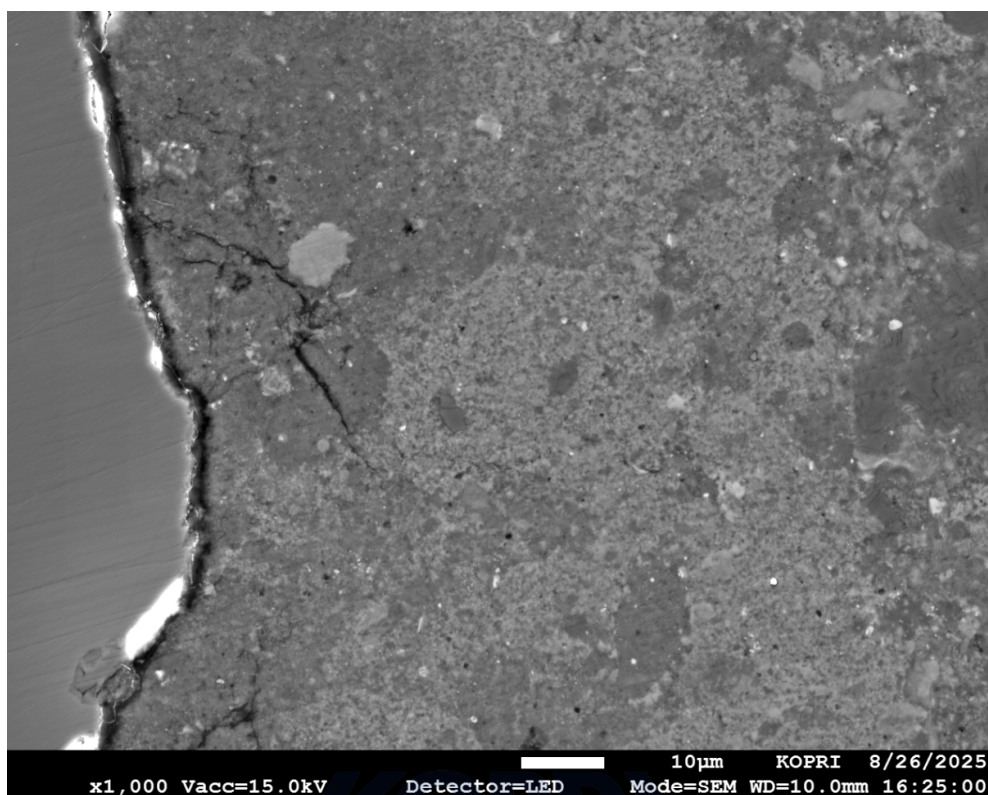


그림 14. FE-SEM에서 후방산란전자(BSE) 이미지



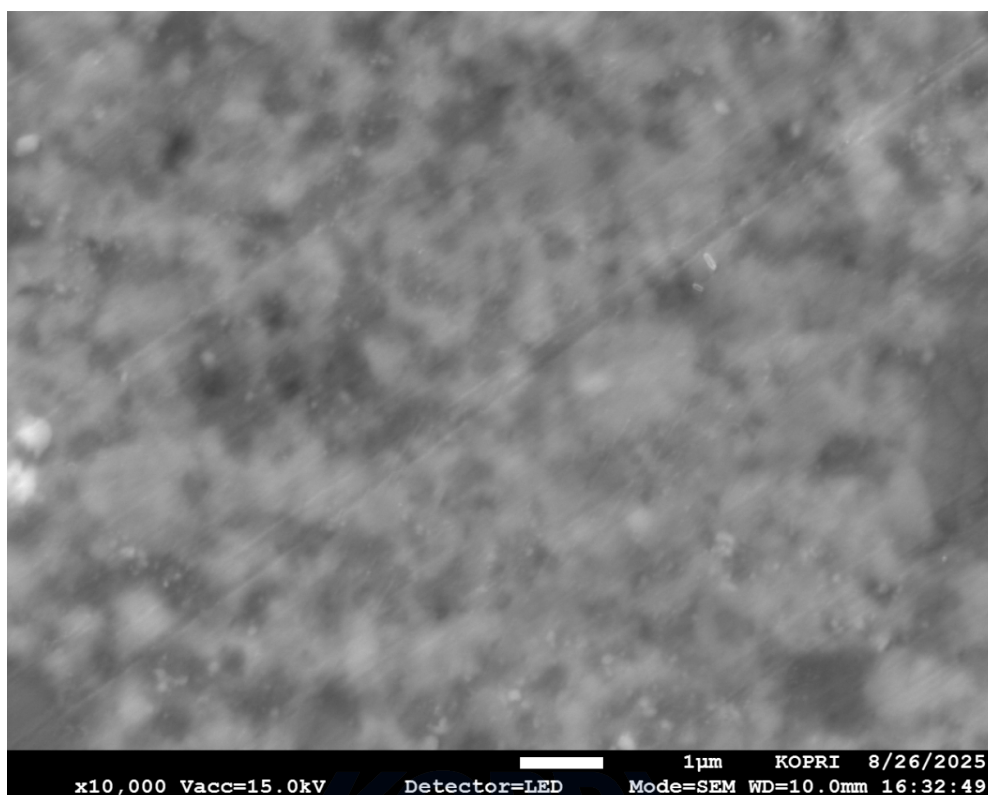


그림 15. Murchison 박편의 기질부(matrix) 이차전자(SE) 이미지

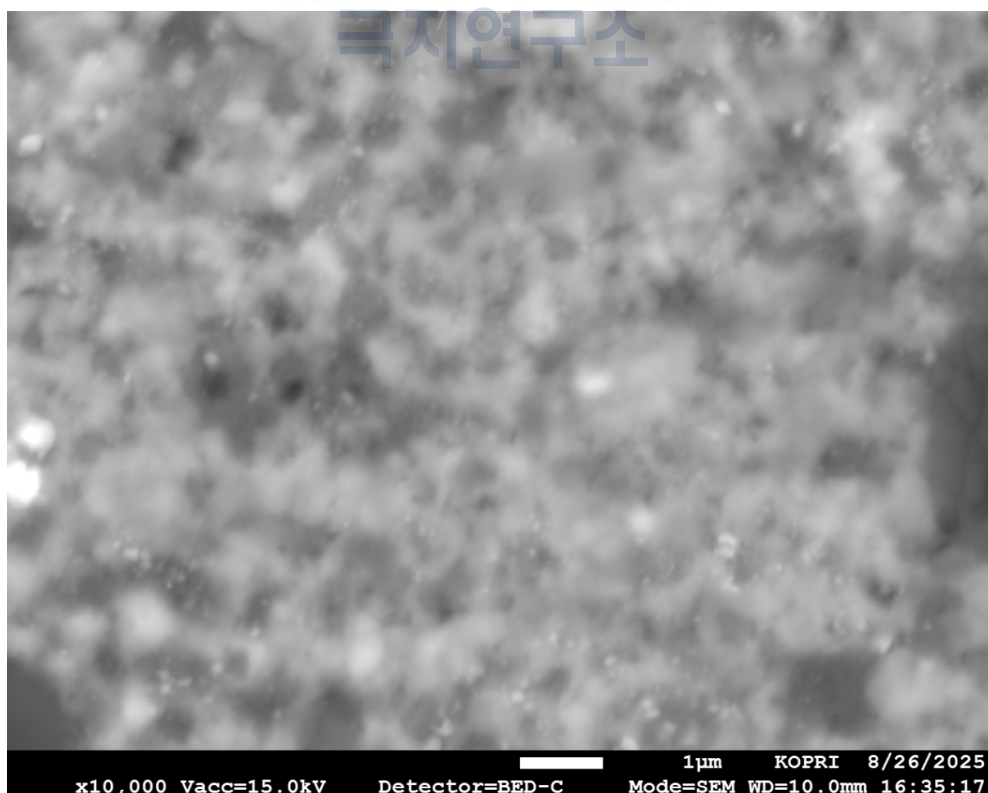


그림 16. Murchison 박편의 기질부(matrix) 후방산란전자(BSE) 이미지



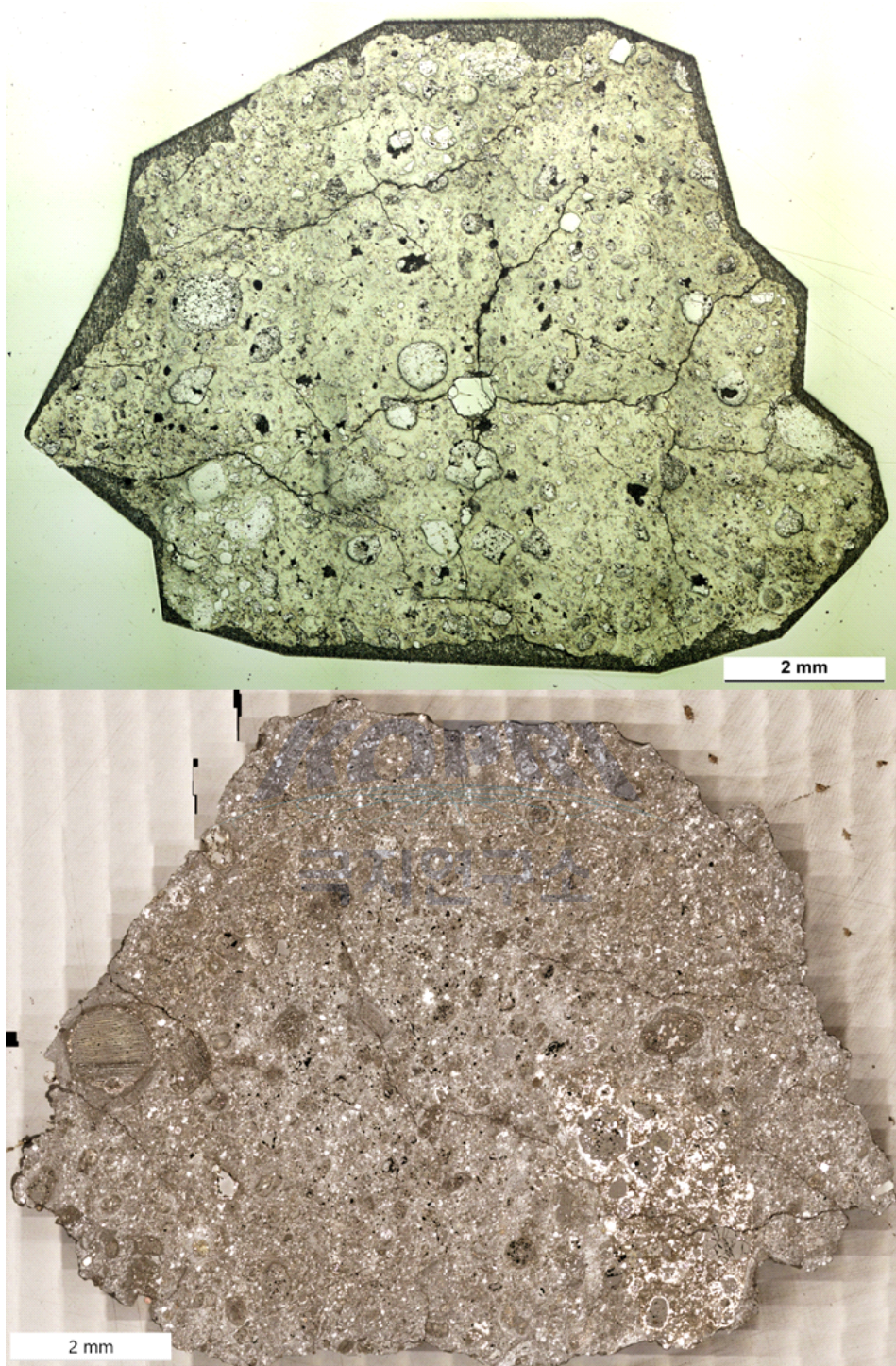


그림 17. 윤활유를 포함한 다이아몬드 연마제를 사용하여 연마한 CM 콘드라이트 박편(위)과 같은 시료에 대해 3M Trizact만을 이용하여 완전 건조 연마로 완성한 박편(아래). 가장 눈에 띄는 차이는 기존 연마 방식에서는 물질의 경도에 따라 연마 정도가 달라져 표면 굴곡이 심한 반면, 완전 건조 연마 방식은 모든 물질이 동일하게 연마되어 매우 편평하다는 것임. 석고를 포함한 함수광물과 유기물은 물, 알코올과 같은 극성 용매에 매우 취약하고 경도도 약해 기존의 연마 방식으로는 쉽게 소실되는 문제가 있었음.

### 제 3 절 석고 탐색 및 산출 특성

#### 1. 산출 위치별 특성

SEM-EDS/EPMA 관찰 결과에 따르면 석고는 (a) 기질 내부의 폐쇄적 미세 공간, (b) 충격·열변형에 기인한 미세 균열, (c) 개방형 공극·절리 부위에서 서로 다른 산출 양상을 보인다. 용융각 인접부에서 석고가 희박하거나 결여되는 경향은 대기권 통과 시의 마찰열-탈수-상변화(석고→무수석고→(국지적) 탄산염 변환) 가능성이 합치하며, 내부 보존상 석고와 균열/공극 부착상 석고의 기원이 서로 다름을 시사한다. 남극 표면 환경의 황산염 비산·결빙-용융 사이클로 인해 CM 콘드라이트의 균열이나 공극 부위에 2차적으로 석고가 생성될 수 있는 가능성이 있다. 이러한 관찰 결과는 석고의 지구 풍화 기원과 모천체 기원을 분리 해석하기 위해, 위치·조직·연계 광물 정보를 통합 해석해야 함을 의미한다.

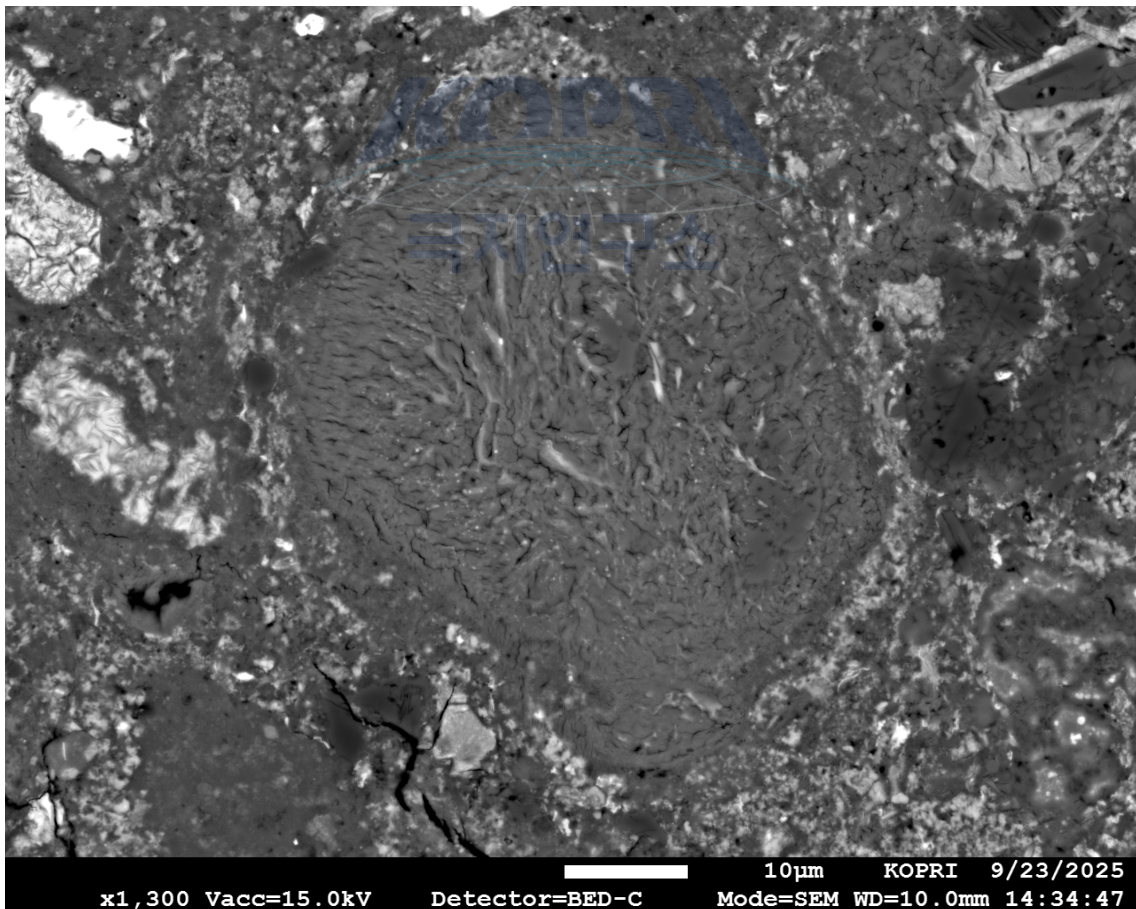


그림 18. CM 콘드라이트 내부에 섬유상의 조직을 보이는 석고



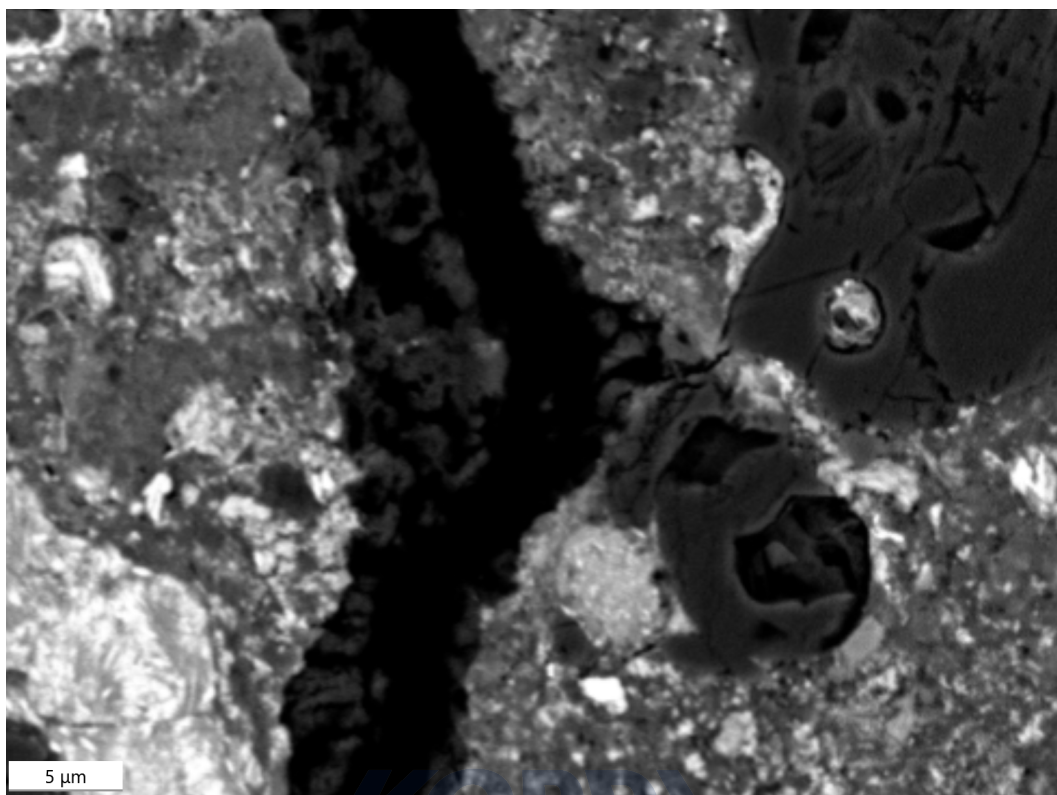


그림 19. 시료 내의 균열을 따라 산출되는 석고

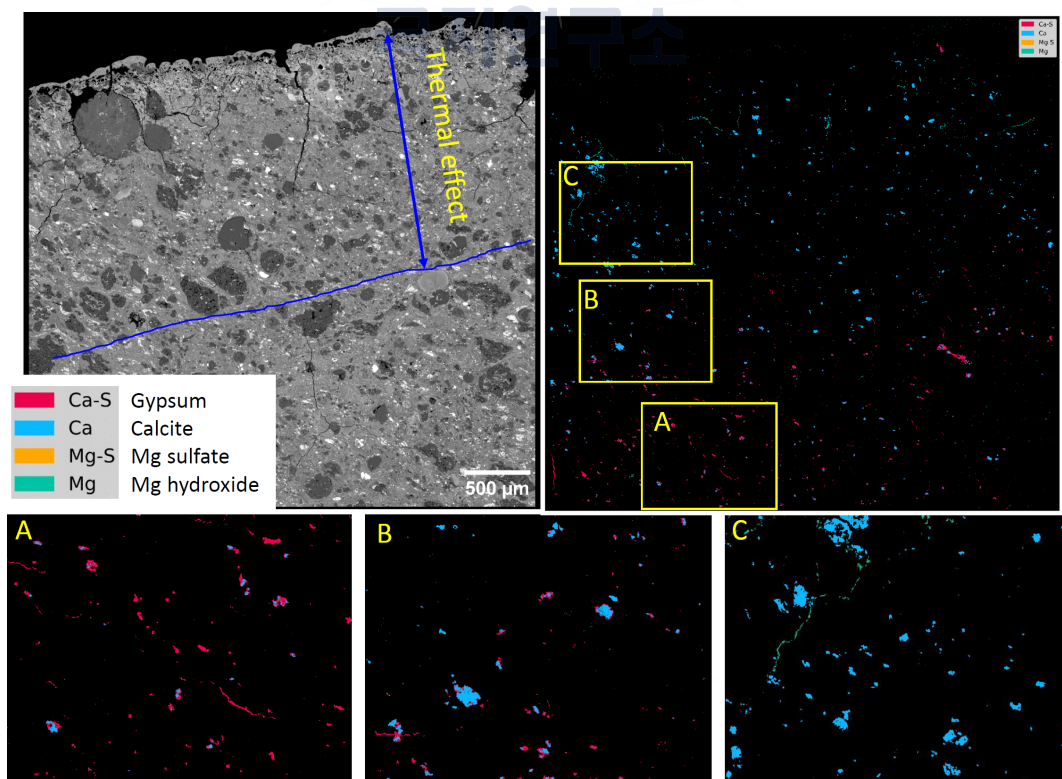


그림 20. 용융각 주변에는 존재하지 않고 내부에만 존재하는 석고



## 제 4 절 석고의 정량 화학 분석

### 1. EPMA 분석 조건

석고를 EPMA로 분석할 때 전자빔에 의한 물리적 손상, 전자빔 조사 영역 온도 증가에 따른 탈수 현상과 물 함량 변화, 원소 이동에 따른 X선 세기 변화 등의 가능성을 고려해야 한다. 따라서 보통의 규산염 광물 분석에 사용하는 조건보다 전자의 에너지와 전류밀도가 낮은 조건에서 가속전압, 전류세기, 전자빔 크기를 다양하게 적용해 석고 표준물질의 주원소 Ca, S 함량과 물의 함량을 측정해 테스트 하였다. 테스트에 사용된 조건은 가속전압 10kV와 15kV, 빔 전류 세기 0.5 – 10 nA, 전자빔 크기 1 – 20  $\mu\text{m}$ 이다. 석고 분석에 사용한 각 원소들의 WDS (Wavelength Dispersive Spectrometer)와 회절 결정의 설정은 표 3, 표 4와 같다. 석고 표준시료에서는 총 9개의 원소를 분석하였고(표 3), CM 콘드라이드의 석고 분석에는 표준시료 분석에서 검출한계보다 높은 함량을 보이지 않는 Na, K, Mn, Al은 제외하고 5개 원소만 분석하였다(표 4). 각 원소의 X선 측정 시간은 처음에는 20초로 하였으나, 낮은 전자빔 전류밀도 조건에서도 Ca과 S X선의 세기의 시간에 따른 변화가 관찰되어 이를 최소화하기 위해 일부 분석에서는 측정시간을 10초로 단축하였다. 그리고 또 분석시간 단축을 위하여 모든 분석에서 X선의 배경신호를 직접 측정하지 않고 광물 밀도에 따라 추정하는 MAN (Mean Atomic Number) 배경 보정 방법도 적용하였다.

EPMA는 수소나 물의 함량을 분석할 수 없기 때문에 석고의 이론적인 조성은 CaO 32.6 wt%, SO<sub>3</sub> 46.5 wt%로 질량백분을 합계 79.1%가 되며 나머지 20.9%가 물의 조성이다. 이 분석에서는 물을 제외한 분석 결과의 질량백분을 합계가 100에서 부족한 만큼을 물로 가정하고, 이를 다시 기질 보정(matrix correction)에 반영해 몇 차례의 반복 계산(iteration)을 거쳐 정확한 물 함량을 계산하는 Probe for EPMA 소프트웨어(또는 CalcZAF 소프트웨어)의 기능을 사용해 석고의 물을 포함한 조성을 계산하였다. 황을 EPMA로 분석할 때 PET 회절 결정을 이용해 측정하는데, 황의 K $\alpha$  X선 위치가 황화 광물(sulfides)과 황산염 광물(sulfates)에서 다른 것으로 알려져 있다. 황의 정량 분석에는 화학식이 간단하고 조성이 정확하게 알려진 황철석(pyrite), 섬아연석(sphalerite), 방연석(galena), 펜틀란다이트((Fe,Ni)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>) 등의 황화 광물이 주로 표준물질로 사용되는데 석고의 분석에도 황화 광물을 표준물질로 사용할 수 있는지 확인하기 위해 황의 K $\alpha$  X선의 위치를 확인하였다. 그 결과 황화 광물과 황산염 광물 사이에서 뚜렷한 S K $\alpha$  X선의 위치 차이를 보였고(그림 19), 황화 광물을 표준물질로 하여 황의 X선 위치를 선정하면 석고 분석에서 최대 14%의 황 X선 세기 감소가 나타날 수 있다. 따라서 석고의 황 분석에는 황산염 광물 표준물질 사용이 권장되며, 부득이하게 황화 광물을 표준물질로 사용할 때 주의가 필요하다. Ca의 X선 위치는 석고와 다른 규산염 광물 사이에 큰 차이를 보이지 않았다. 이 분석에서는 Ca와 S 분석에 경석고(anhydrite) 표준물질을 사용하였다.

표 3. 석고 표준시료 분석에 사용된 EPMA 원소 분석조건

| Elements | X-ray      | Channel | Crystal | Order | Peak position (mm) | Bg upper (mm) | Bg lower (mm) | Counting time (s) |          |          | Background calibration | TDI correction |
|----------|------------|---------|---------|-------|--------------------|---------------|---------------|-------------------|----------|----------|------------------------|----------------|
|          |            |         |         |       |                    |               |               | Peak              | Bg upper | Bg lower |                        |                |
| Si       | K $\alpha$ | 2       | TAP     | 1     | 77.359             | -             | -             | 20                | -        | -        | MAN                    | yes            |
| Al       | K $\alpha$ | 2       | TAP     | 2     | 90.584             | -             | -             | 20                | -        | -        | MAN                    |                |
| Fe       | K $\alpha$ | 4       | LIF     | 1     | 134.908            | -             | -             | 20                | -        | -        | MAN                    | yes            |
| Mn       | K $\alpha$ | 4       | LIF     | 2     | 146.418            | -             | -             | 20                | -        | -        | MAN                    |                |
| Mg       | K $\alpha$ | 1       | TAPH    | 2     | 107.483            | -             | -             | 20                | -        | -        | MAN                    |                |
| Ca       | K $\alpha$ | 3       | PETL    | 1     | 107.622            | -             | -             | 20                | -        | -        | MAN                    | yes            |
| Na       | K $\alpha$ | 1       | TAPH    | 1     | 129.423            | -             | -             | 20                | -        | -        | MAN                    | yes            |
| K        | K $\alpha$ | 3       | PETL    | 2     | 119.892            | -             | -             | 20                | -        | -        | MAN                    |                |
| S        | K $\alpha$ | 5       | PETH    | 1     | 171.962            | -             | -             | 20                | 10       | 10       | off-peak               | yes            |

표 4. CM 콘드라이트 석고 분석에 사용된 EPMA 원소 분석조건

| Elements | X-ray      | Channel | Crystal | Order | Peak position (mm) | Peak counting time (s) | Background calibration | TDI correction |
|----------|------------|---------|---------|-------|--------------------|------------------------|------------------------|----------------|
| Si       | K $\alpha$ | 2       | TAP     | 1     | 77.359             | 10 - 20                | MAN                    | yes            |
| Fe       | K $\alpha$ | 4       | LIF     | 1     | 134.908            | 10 - 20                | MAN                    | yes            |
| Mg       | K $\alpha$ | 1       | TAPH    | 1     | 107.483            | 10 - 20                | MAN                    | yes            |
| Ca       | K $\alpha$ | 3       | PETL    | 1     | 107.622            | 10 - 20                | MAN                    | yes            |
| S        | K $\alpha$ | 5       | PETH    | 1     | 171.962            | 10 - 20                | MAN                    | yes            |

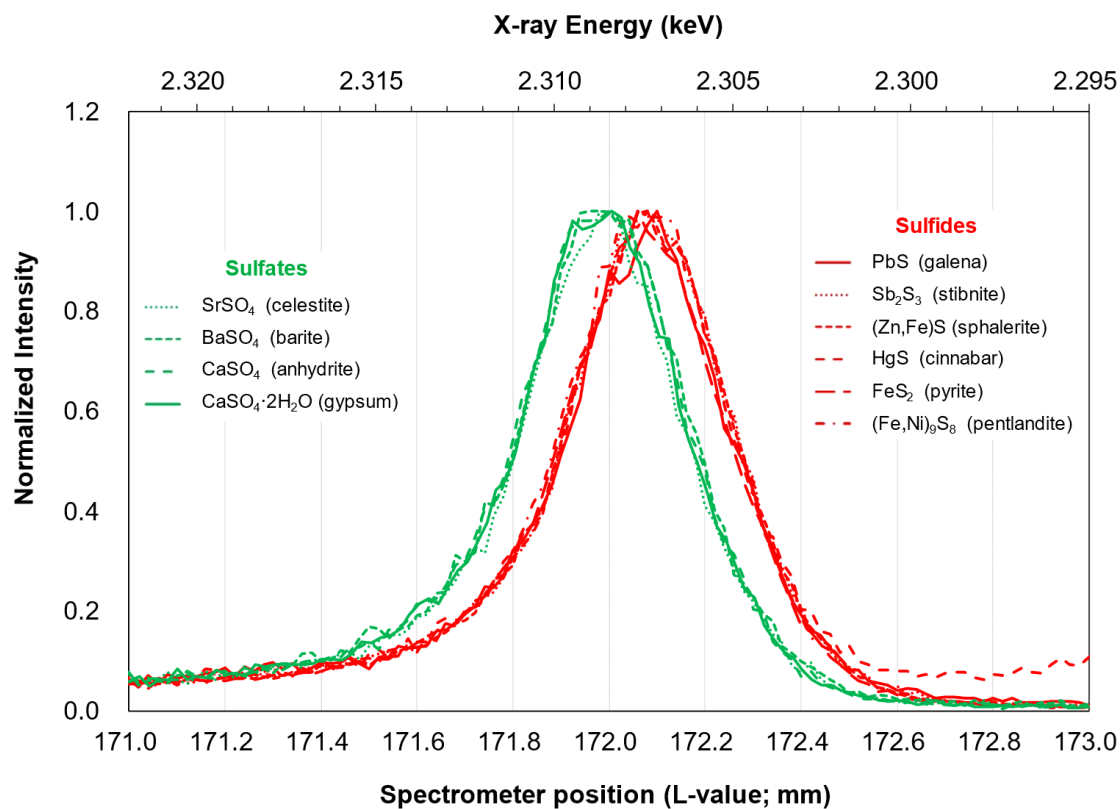


그림 21. PETH 회절 결정으로 측정된 여러 종류의 황화 광물(sulfides)와 황산염 광물(sulfates) 표준물질에서의 S K $\alpha$  피크 위치

## 2. 석고 표준물질

EPMA 분석 테스트를 위해 두 종류의 석고 표준물질이 사용되었다. 147 석고는 미국 Wyoming주의 Powderhorn River Basin에서, 148 석고는 미국 Arkansas주의 Little Rock에서 산출하는 자연 석고이다(그림 20).

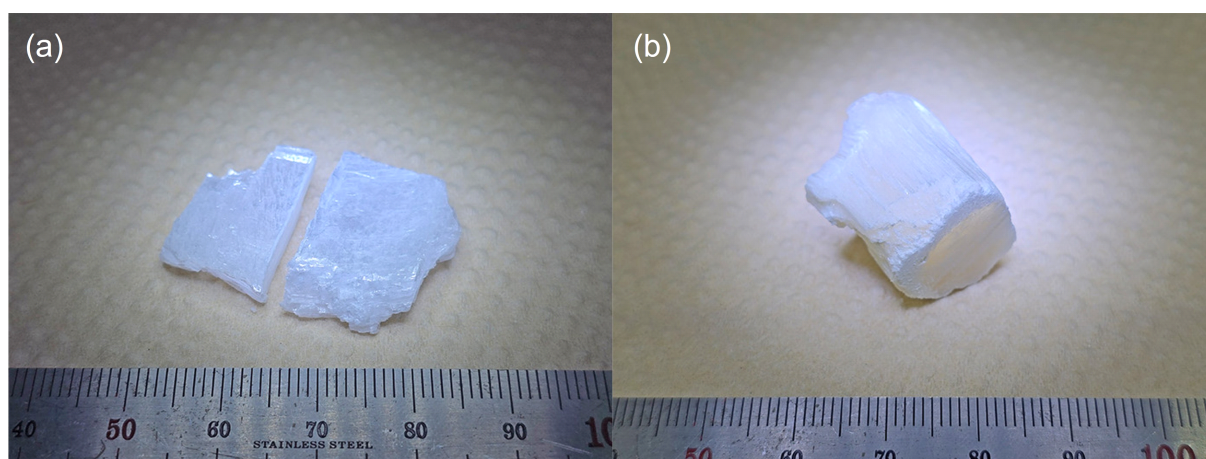


그림 22. 석고의 EPMA 분석 테스트로 사용된 두 종류의 표준물질. (a) Gypsum 147, Powderhorn River Basin, Wyoming, US (b) Gypsum 148, Little Rock, Arkansas, US

### 3. 진공챔버 내에서 석고의 탈수 작용

EPMA의 샘플 챔버 내부는 터보분자펌프(TMP; Turbo Molecular Pump)를 사용해 고진공 상태가 유지되며, 분석에 사용한 JEOL JXA-8530F 장비의 샘플 챔버 내부 압력은 약  $2\sim3\times10^{-4}$  Pa 정도이다. 이러한 낮은 압력으로 인해 석고 표준물질 표면에서 탈수 작용이 일어나 석고가 경석고로 변화하는 것을 확인하였다. 그림 21은 석고와 경석고가 혼재하는 표준시료 표면 영역에서 각각 15시간과 3일의 시간이 흐른 뒤 석고가 탈수작용을 거쳐 경석고로 변화하는 과정을 보여준다. 탈수작용에 의해 석고가 경석고로 변화하면 표면에서 특징적인 갈라짐이 관찰되고(그림 22a 그림 22c), 기존 석고의 반투명한 성질이 사라져 불투명하게 변화한다 (그림 22b). 후방산란전자 이미지에서 석고와 경석고의 중간 정도 밝기를 보이는 영역이 존재하는 것으로 볼 때 진공 환경에서 석고에서 경석고로의 변화는 점진적으로 일어나는 것으로 보인다.

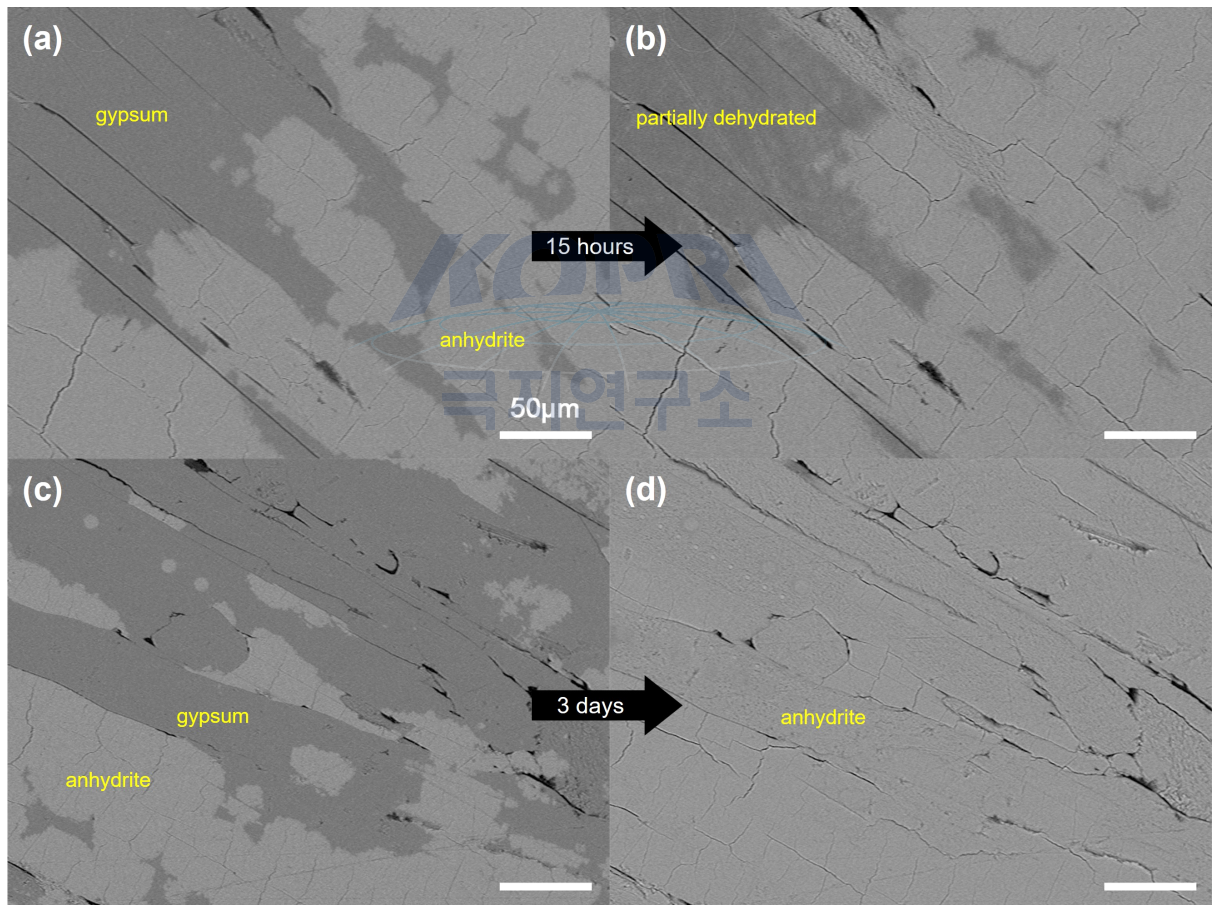


그림 23. 고진공 샘플 챔버 내부에서 탈수 작용으로 석고가 경석고로 변화하는 과정을 비교한 후방산란전자 이미지. (a, b) EPMA 샘플 챔버 내부에서 15시간이 흐른 뒤 석고 일부가 탈수되어 경석고로 변하고 후방산란전자 이미지에서 색이 밝아짐. (c, d) EPMA 샘플 챔버 내부에서 3일이 경과한 뒤 탈수작용으로 석고가 모두 경석고로 변화



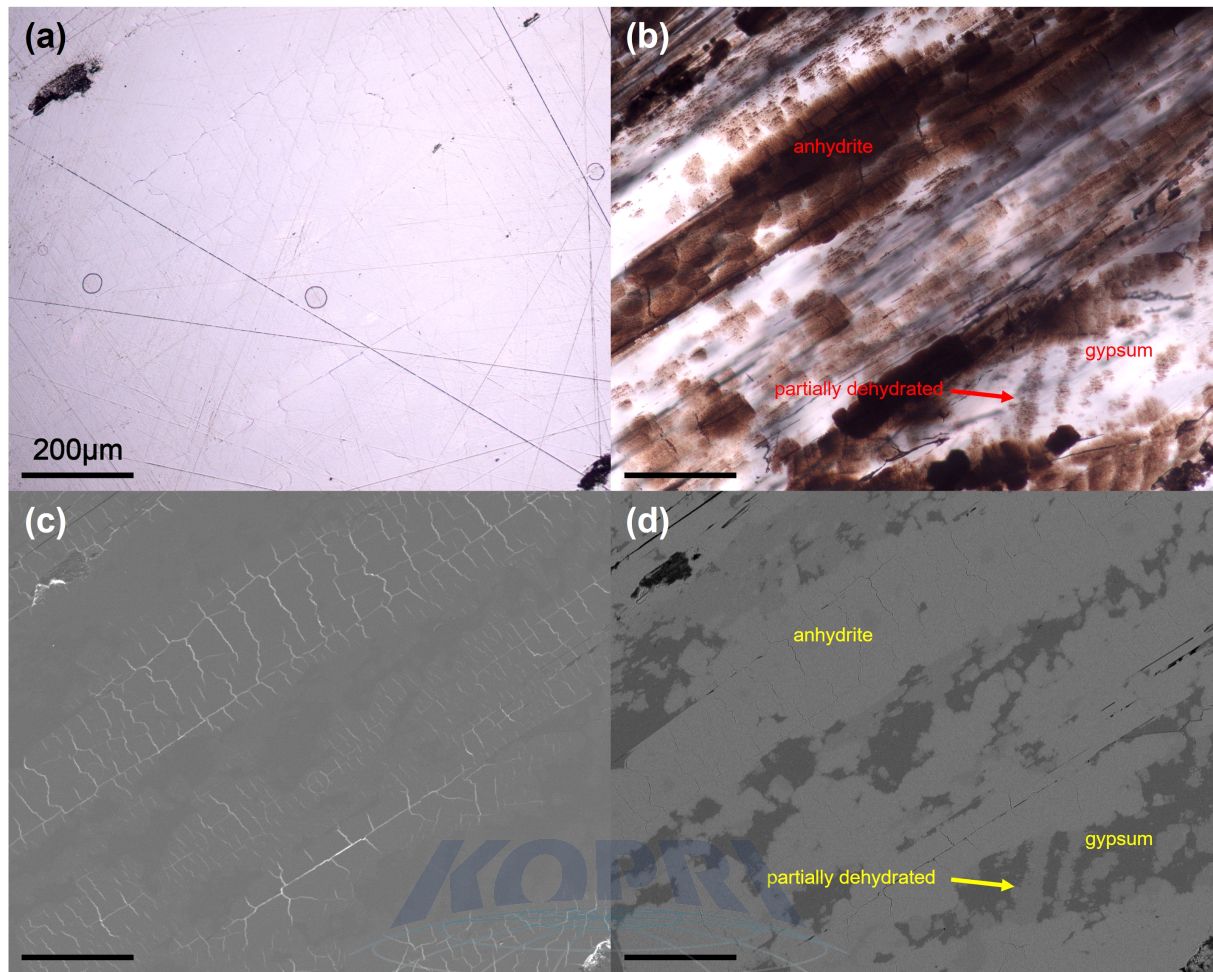


그림 24. 석고와 경석고 혼재 영역의 (a) 반사현미경 (b) 투과현미경 (c) 전자현미경 이차전자 이미지 (d) 전자현미경 후방산란전자 이미지. 석고가 경석고로 변화하면 규칙적이고 뚜렷한 갈라짐이 발생하고 불투명해진다. 그리고 탈수 과정의 중간 단계로 보이는 일부 영역도 확인된다.



#### 4. 석고의 물 함량

15kV 가속전압, 5nA 전류 세기, 20  $\mu$ m 빔 크기 조건에서 각각 147 석고와 148 석고를 분석한 결과와 물의 함량을 계산한 결과를 표 5에 정리하였다. 두 표준물질 석고 모두 20.7 wt%의 물 함량이 계산되어 이상적인 석고의 물 함량을 잘 보여준다. 물을 포함한 조성 계산 전과 후에서 보이는 다른 원소들의 조성 차이는 물에 의한 흡수 효과가 기질 보정에 반영된 결과이다. Na, K은 두 표준물질 모두에서 검출한계 이상으로 검출되지 않았고, Si, Al, Fe, Mn은 검출한계보다 높아 최대 0.11wt% 까지 측정되기도 하지만 그 함량이 크지 않아 두 석고 표준물질 모두 이상적인 석고의 조성을 가지고 있는 것으로 볼 수 있다.

표 5. 147 석고와 148 석고 표준물질의 EPMA 분석 결과

| Element                        | Gypsum147 |                             | Gypsum148 |                             |
|--------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|
|                                | Raw       | Recalculation<br>with water | Raw       | Recalculation<br>with water |
| SiO <sub>2</sub>               | b.d.l.    | 0.08                        | b.d.l.    | 0.07                        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | b.d.l.    | 0.06                        | b.d.l.    | 0.11                        |
| FeO                            | b.d.l.    | 0.08                        | b.d.l.    | b.d.l.                      |
| MnO                            | b.d.l.    | 0.06                        | b.d.l.    | b.d.l.                      |
| MgO                            | b.d.l.    | 0.10                        | b.d.l.    | 0.11                        |
| CaO                            | 31.64     | 33.04                       | 31.93     | 32.81                       |
| Na <sub>2</sub> O              | b.d.l.    | b.d.l.                      | b.d.l.    | b.d.l.                      |
| K <sub>2</sub> O               | b.d.l.    | b.d.l.                      | b.d.l.    | b.d.l.                      |
| SO <sub>3</sub>                | 43.44     | 45.84                       | 44.13     | 46.12                       |
| H <sub>2</sub> O               | -         | 20.75                       | -         | 20.73                       |
| Total                          | 74.9      | 100                         | 76.05     | 100                         |

## 5. 전자빔에 의한 효과

약 90초의 측정 동안 전자빔에 의해 석고 표면에 발생한 변화를 이차전자 이미지로 촬영하여 비교하였다. 그림 23은 15kV 가속전압에서, 그림 24는 10kV 가속전압에서 측정한 결과이다. 전자빔에 조사된 석고 표면에서 공통적으로 관찰되는 특징은 조사 영역 바깥쪽 가장자리는 깊게 안쪽으로 패이고, 조사 영역 안쪽은 부풀어 오르는 것이다. 이러한 형상은 전자빔에 의한 국부적인 온도 상승에 따른 팽창과 물이 빠져나가 생긴 밀도 차이에 따른 수축 효과가 복합적으로 작용한 결과로 생각된다. 다만 15kV 가속전압, 5nA 전류세기, 20  $\mu\text{m}$  빔 크기를 사용한 경우와 10kV 가속전압, 0.5nA 전류세기, 5  $\mu\text{m}$ 와 10  $\mu\text{m}$  빔 크기를 사용한 세 가지 경우에는 전자빔 조사 영역 가장자리를 따라 발생하는 패임은 관찰되지 않고 큰 손상 없이 살짝 부풀어 오르는 정도의 변형만 확인된다. 이는 물의 이탈에 따른 밀도변화와 이에 따른 수축 효과가 크지 않기 때문으로 추측할 수 있으며, 따라서 물의 함량이 더 정확하게 측정될 수 있는 조건으로 해석할 수 있다.

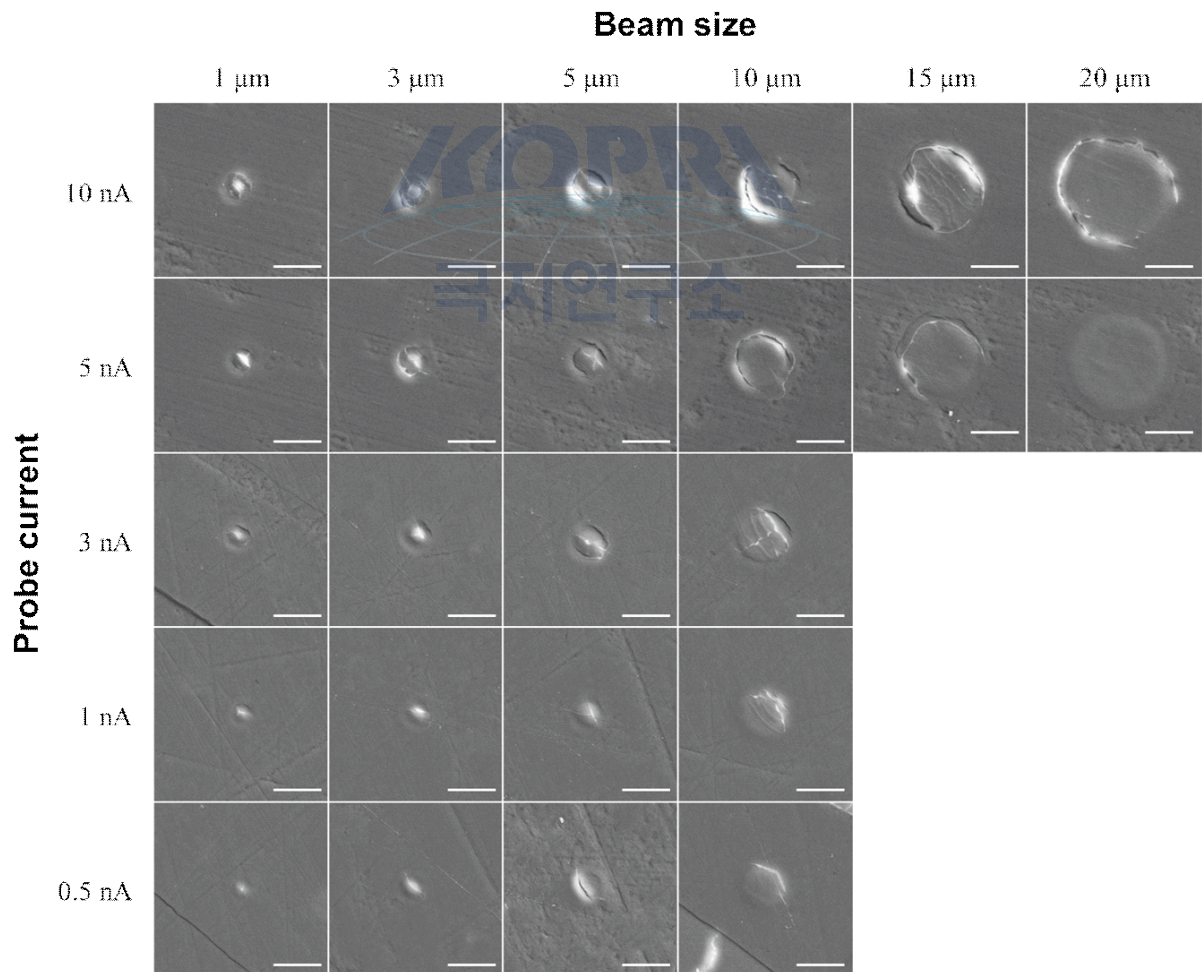


그림 25. 15kV 가속전압에서 전류 세기 (probe current)와 전자빔 크기(직경)에 따른 석고 표면의 변화. 측정 시간은 90초이며, 스케일바는 모두 10  $\mu\text{m}$ 이다.

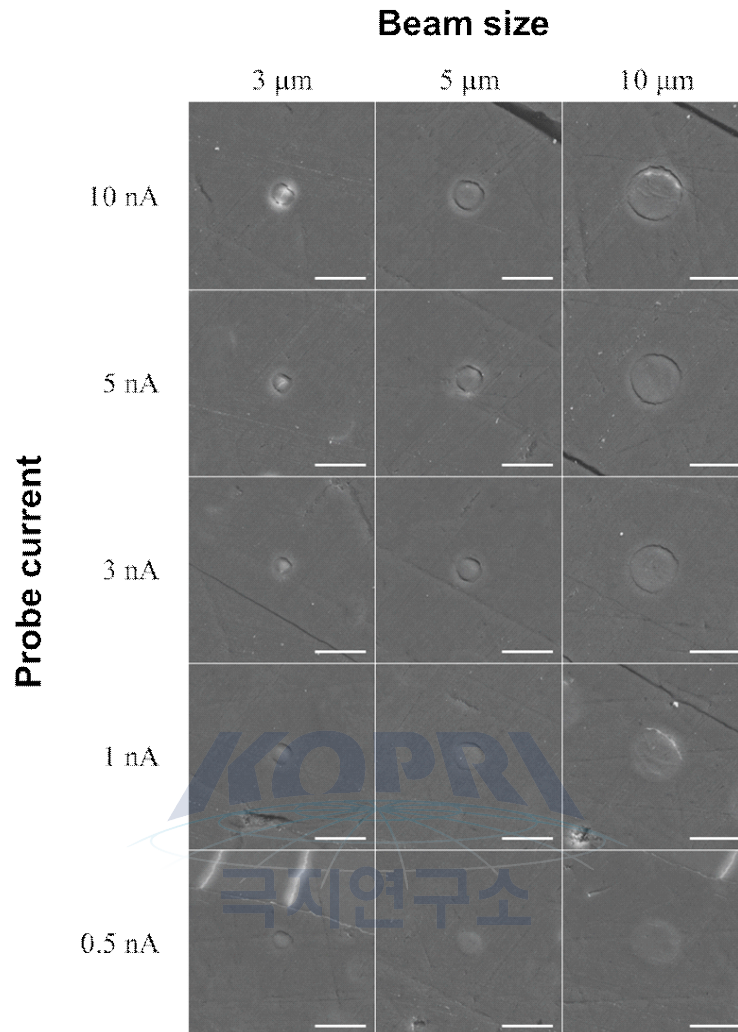


그림 26. 10kV 가속전압에서 전류 세기 (probe current)와 전자빔 크기(직경)에 따른 석고 표면의 변화. 측정 시간은 90 초이며, 스케일바는 모두 10  $\mu\text{m}$ 이다.

그리고 조사 영역 바깥쪽 경계부를 따라서, 또는 안쪽을 가로지르면서 깨진 크랙과 그에 따른 차징(charging) 효과가 흔하게 관찰된다. 이 크랙의 발생 빈도는 15kV 가속전압을 사용할 때 높고, 10kV 가속전압을 사용할 때는 상대적으로 적다. 따라서 크랙의 발생 정도는 석고에 입사한 전자의 에너지 크기와 직접적으로 비례하는 것으로 보인다. 크랙 발생 유무가 측정된 석고 조성에 미치는 영향은 예측하기 어렵지만 정확한 분석을 위해서는 가능한 크랙이 발생하지 않을 조건을 선택하는 것이 좋을 것이다. 다만 10kV 가속전압에서는 발생하는 Ca와 S의 X선 세기가 15kV 가속전압을 사용할 때보다 작아지기 때문에 10kV 가속전압을 선택하는 것이 항상 좋다고 판단하기는 어렵다.

## 6. 전자빔 조건에 따른 석고의 물 함량

148 석고 표준물질에서 다양한 전자빔 가속전압, 전류세기, 빔 크기 조건을 사용하여 분석하고 물 함량을 계산한 결과를 그림 25 (15kV)와 그림 26 (10kV)에 표시하였다. 모든 빔 조건에서 석고의 이상적인 물 함량 20.9 wt%와 유사하거나 낮은 결과를 보였으며, 전자빔의 전류 밀도가 높을수록 측정된 물의 함량은 낮았다. 그리고 동일한 전류세기에서는 빔 크기가 작을수록 측정된 물의 함량이 더 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 석고의 물 함량을 정확하게 측정하기 위해서는 일정 크기 이상의 큰 전자빔을 사용해야 한다. 15kV 가속전압을 사용하면, 석고의 물 함량이 맞게 측정되는 빔 크기의 하한선은 전류 세기가 10nA일 때  $20\mu\text{m}$ , 5nA일 때  $15\mu\text{m}$ , 3nA 이하일 때  $10\mu\text{m}$  였으며, 빔 크기가  $5\mu\text{m}$  이하로 줄어들면 0.5nA의 적은 전류 세기에서도 물의 함량이 정확하게 측정되지 않았다. 10kV 가속전압을 사용한 경우에도 15kV 가속전압 결과와 유사하게 전자빔 크기가  $5\mu\text{m}$  이하로 줄어들면 물의 함량이 정확하게 측정되지 않았다. 두 결과를 종합해보면 석고의 물 함량을 정확하게 측정하기 위해서는 최소  $10\mu\text{m}$  이상의 큰 전자빔을 사용해야 함을 알 수 있다.

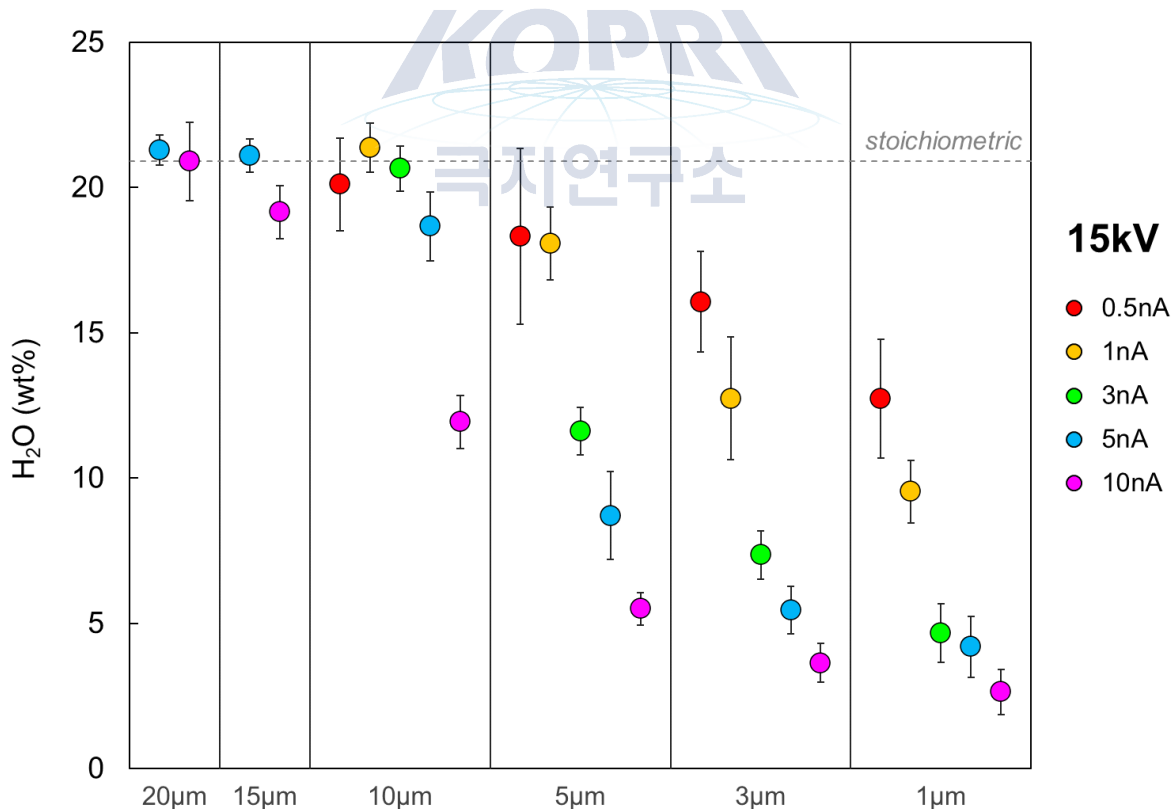


그림 27. 15kV 가속전압 전자빔의 다양한 전류 세기와 전자빔 크기(직경)로 측정한 석고의 물 함량. 모든 결과는 10회 반복 측정의 평균이며, 오차막대는  $2\sigma$ 의 표준편차이다.



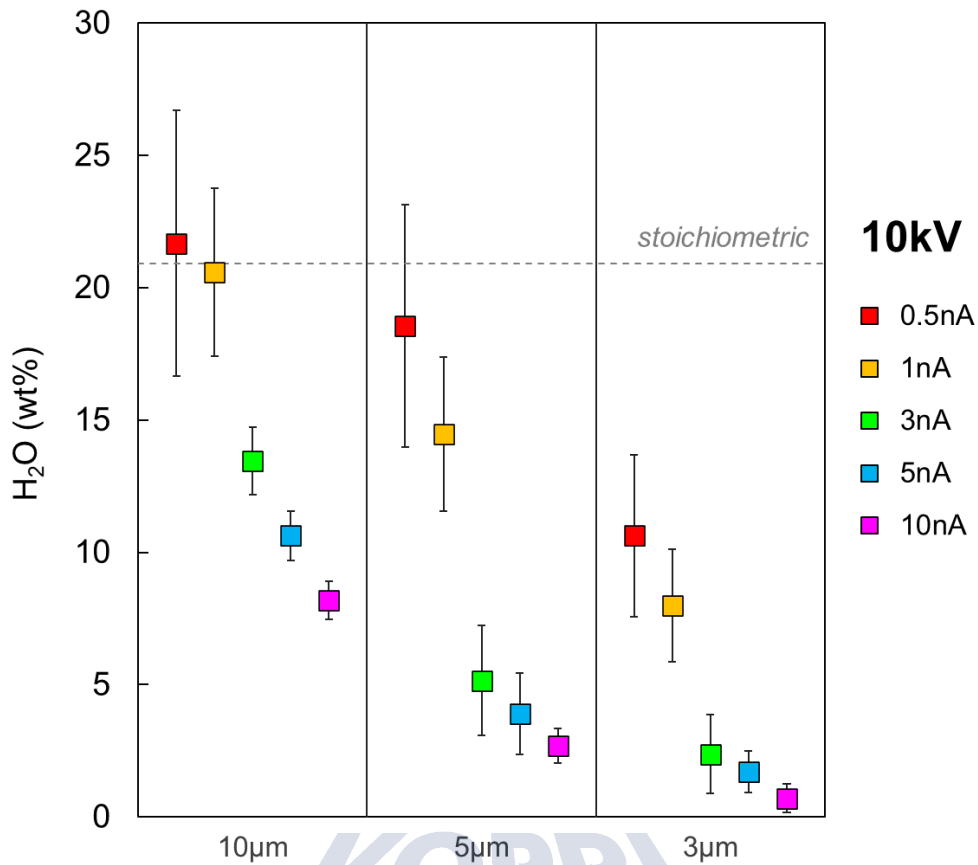


그림 28. 10kV 가속전압 전자빔의 다양한 전류 세기와 전자빔 크기(직경)로 측정한 석고의 물 함량. 모든 결과는 10회 반복 측정의 평균이며, 오차막대는  $2\sigma$ 의 표준편차이다.

전류 세기와 전자빔 크기가 동일한 경우 10kV 가속전압을 사용한 경우가 15kV 가속전압을 사용한 경우보다 물의 함량이 더 낮게 측정되었다. 두 결과를 합쳐 전자빔의 전류밀도, 즉 단위면적당 전류 세기에 따른 석고의 물 함량을 그림 27에 도시하였다. 그림을 보면 전자빔의 전류밀도가 같을 때 15kV보다 10kV를 사용한 경우 물의 함량이 더 낮게 측정되는 것을 확인할 수 있다. 이를 볼 때 전자의 가속전압이 10kV 이상인 경우, 그 에너지가 충분히 높아 물이 석고에서 이탈하는 과정에 10kV와 15kV 가속전압은 큰 차이를 만들지 않고, 오히려 10kV 가속전압을 사용하는 경우 전자의 침투깊이가 더 얕아서 더 좁은 영역에 집중된 온도 상승을 유발해 물을 더 빠르게 이탈시키는 것으로 추측할 수 있다. 그림 27의 결과에서, 석고 분석에 전자빔의 전류밀도 약  $0.04 \text{ nA}/\mu\text{m}^2$  이하의 작은 값을 사용했을 때 석고의 물 함량을 오차범위 내에서 측정할 수 있는 것으로 생각된다.

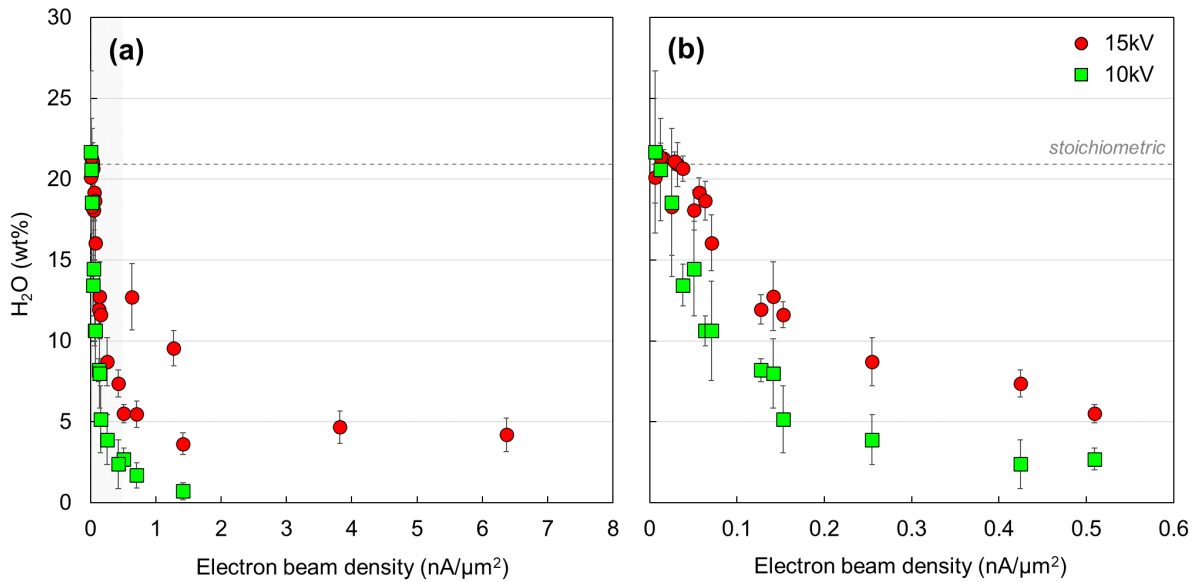


그림 29. 분석에 사용한 전자빔의 전류밀도에 따른 148 석고의 물 함량 결과. (b)는 (a)의 회색 음영 영역을 확대한 그림이다.

## 7. 동일 지점 반복 분석에서의 물 함량 비교

CM 콘드라이트 석고의 이차이온 질량분석기(SIMS) 분석을 위해 분석할 지점을 미리 EPMA로 분석하여 물 함량 측정, 석고 여부 확인 및 물의 형태로 포함된 산소의 비율을 계산할 필요가 있다. 따라서 EPMA 분석 지점에서 물의 함량, 그리고 이에 따른 물에 포함된 산소의 비율이 변화하지 않는지 확인하고자 EPMA 분석을 동일한 지점에서 2회 실시하여 두 번째 분석 결과가 첫 번째 분석과 차이가 있는지 알아보았다. 작은 전류밀도 조건에서 같은 지점을 두 번 반복해서 분석한 10회의 측정 결과를 그림 28에 도시하였다. 전자빔 크기는 10 μm를 사용하고 15kV 가속전압과 1nA 전류세기, 15kV 가속전압과 0.5nA 전류세기, 10kV 가속전압과 1nA 전류세기를 사용한 세 가지 경우 모두 두 번째 분석에서는 첫 번째 분석보다 물의 함량이 낮게 측정되었다. 따라서, 낮은 전류세기와 큰 빔을 사용하여 석고에서 물의 이탈을 최소화 하더라도 같은 지점을 다시 분석하면 물의 함량을 정확하게 측정하기 어렵다고 보인다.

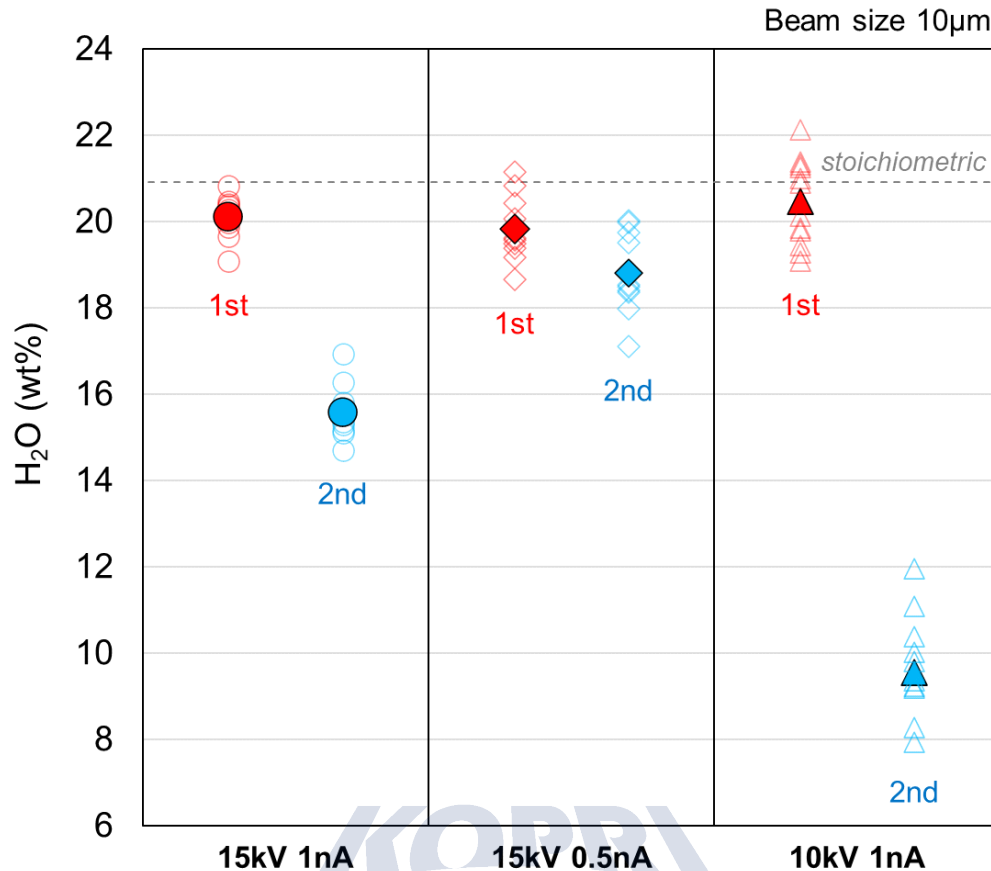


그림 30. 동일한 지점을 2회 반복 분석하여 측정한 석고의 물 함량 비교. 빨간 기호가 첫 번째 분석, 파란 기호가 두 번째 분석이다. 내부가 비어있는 기호는 10~12회 측정의 개별 결과이며 내부가 색으로 채워진 기호는 평균 값이다.

## 8. CM 콘드라이트 석고의 물 함량 측정

남극 CM 콘드라이트 EET 15007에서 산출하는 석고(그림 29)의 조성을 15kV 가속전압, 5nA 전류세기, 20  $\mu$ m 빔 크기를 이용해 측정한 결과를 표 6에 정리하였다. 해당 석고 결정은 비교적 큰 크기에도 매우 세립질이고 기공이 많으며 cronstedtite 또는 tochilinite 등의 다른 광물들과 섞여 있어 석고 외의 광물에서도 X선이 검출되어, 오직 Ca와 S만을 포함하여 계산하였고, 약 20.85 wt%의 물 함량을 얻어 석고임을 확인하였다. Ca/S의 몰 비는 0.976, O/S의 몰 비 5.948로 계산되어 석고에 가까운 stoichiometry를 보이나 그 정확도에 대해서는 추가 검증이 필요하다.

표 6. EET 15007 내 석고의 EPMA 분석 결과

|                                | Raw   | Recalculated with water<br>(only Ca, S) |
|--------------------------------|-------|-----------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 3.99  | -                                       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.29  | -                                       |
| FeO                            | 7.85  | -                                       |
| MnO                            | 0.12  | -                                       |
| MgO                            | 2.9   | -                                       |
| CaO                            | 30.92 | 32.14                                   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.07  | -                                       |
| K <sub>2</sub> O               | 0.01  | -                                       |
| SO <sub>3</sub>                | 46.21 | 47.01                                   |
| O                              | -     | -                                       |
| H <sub>2</sub> O               | -     | 20.85                                   |
| Total                          | 91.84 | 100                                     |

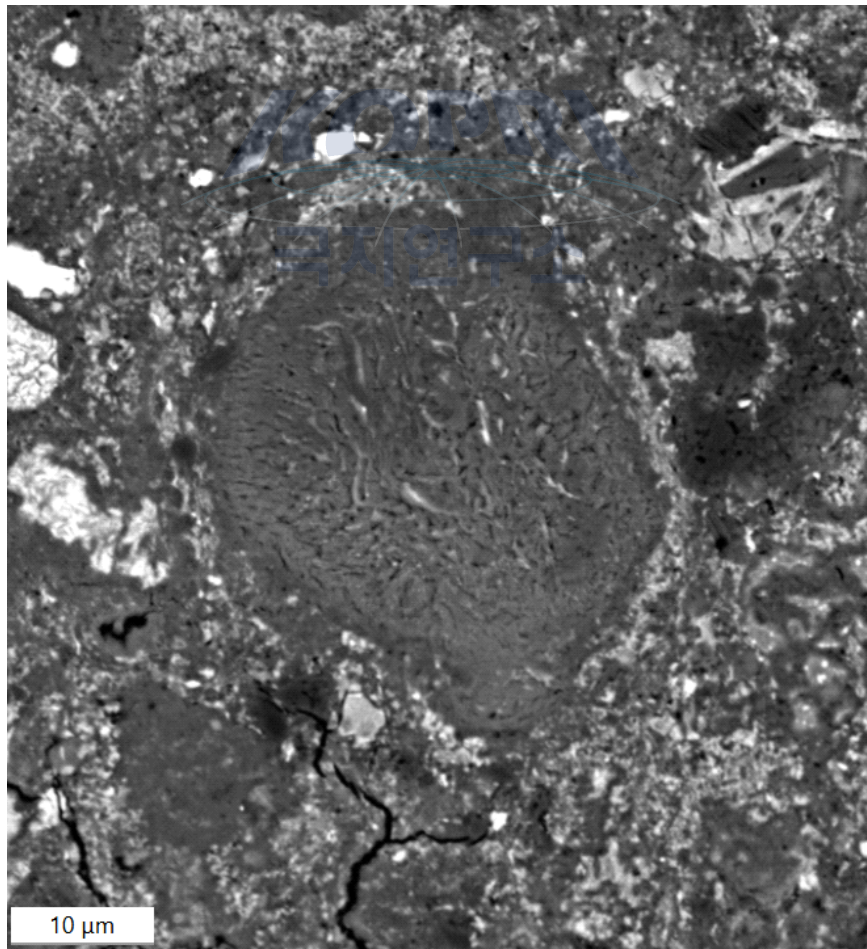


그림 31. 남극운석 CM 콘드라이트 EET 15007 내 석고의 후방산란 전자 이미지

## 9. 시간에 따른 Ca과 S의 X선 세기 비교

분석이 진행되는 동안 각각 PETL 회절 결정과 PETH 회절 결정에서 측정하는 Ca과 S의  $K\alpha$  X선의 시간에 따른 신호 세기 변화를 그림 30과 그림 31에 도시하였다. 두 원소 모두 분석이 진행됨에 따라  $K\alpha$  X선 세기가 증가하는 경향을 보이며, 증가 속도와 증가량은 일반적으로 전자빔의 전류 세기가 클수록, 그리고 빔 크기가 작을수록 더 크다. Ca과 S의 X선 세기가 증가하여 동일 조건에서의 경석고의 세기 정도에 가까워지는 것을 볼 때(그림 30, 그림 31), 석고에서의 Ca과 S의 X선 신호 세기 변화는 분석 체적 내에서 물이 탈수되며 석고가 경석고로 변화하는 과정에서의 조성 변화를 반영하는 것으로 해석된다.  $5\mu\text{m}$ 보다 작은 크기의 빔을 사용했을 때에는 전류 세기에 관계없이 Ca와 S 모두에서 뚜렷한 X선 세기 증가가 관찰되므로 탈수화에 따라 물의 함량을 정확하게 측정하기 어려울 것으로 생각된다. 뚜렷한 X선 세기 증가가 없어 조성이 정확하게 측정될 수 있는 조건은  $10\mu\text{m}$  크기의 빔을 사용하면  $1\text{nA}$  이하,  $20\mu\text{m}$  크기의 빔을 사용하면  $5\text{nA}$  이하이다. 그림 32는 Ca과 S 각 원소의 X선 세기 증가가 석고에서 경석고로의 변화를 반영하고 각 X선 세기가 최종적으로 경석고의 X선 세기와 같아진다고 가정하여 X선 신호 세기 증가 정도와 최종 계산된 물 함량을 비교한 도표이다. Ca와 S가 유사한 경향을 보이는 것으로 보아 각 원소의 X선 세기 증가가 각 원소의 거동의 차이보다는 분석 체적 내에서 물의 이탈에 의한 조성 변화와 더 직접적으로 연관됨을 추측할 수 있다. 그리고 대략 신호 증가 정도가 10%보다 적은 경우 계산된 물 함량에 크게 영향을 주지 않는 것으로 보아, X선 세기 증가가 있더라도 그 정도가 크지 않으면 물 함량에 미치는 영향이 적은 것으로 보인다. 이것은 전류 세기  $3\text{nA}$ , 빔 크기  $10\mu\text{m}$ 를 사용했을 때 Ca과 S 모두에서 신호의 증가가 관찰되지만 이 조건에서 석고 표준시료의 물 함량이 오차범위 내에서 정확하게 측정된 것(그림 25)으로도 추정해볼 수 있다.



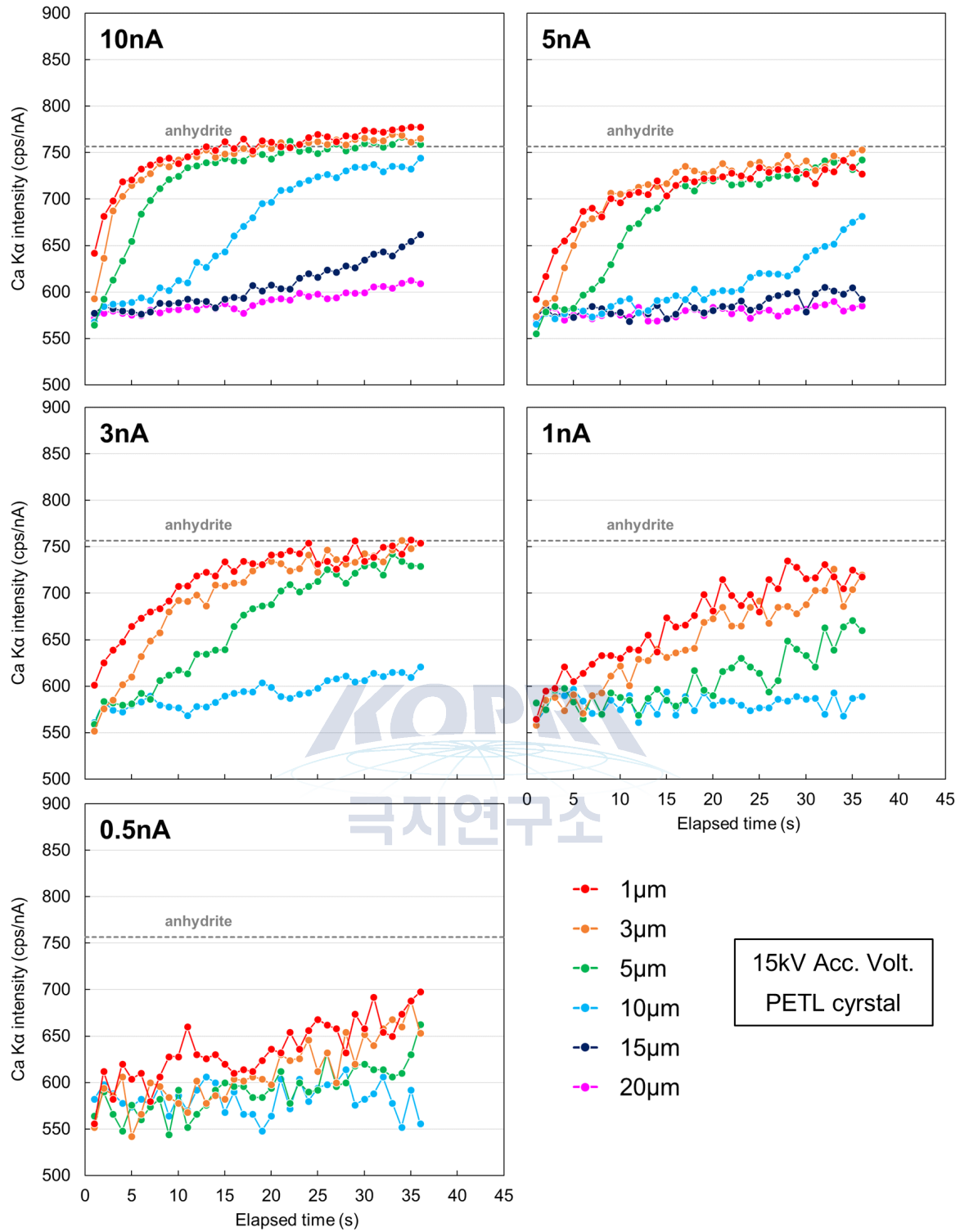


그림 32. 석고의 EPMA 분석 중 전자빔의 전류 세기와 빔 크기에 따른 Ca K $\alpha$  X선 세기의 시간 변화. 회색 점선은 같은 조건에서 경석고(anhydrite)의 Ca K $\alpha$  X선 세기이다.

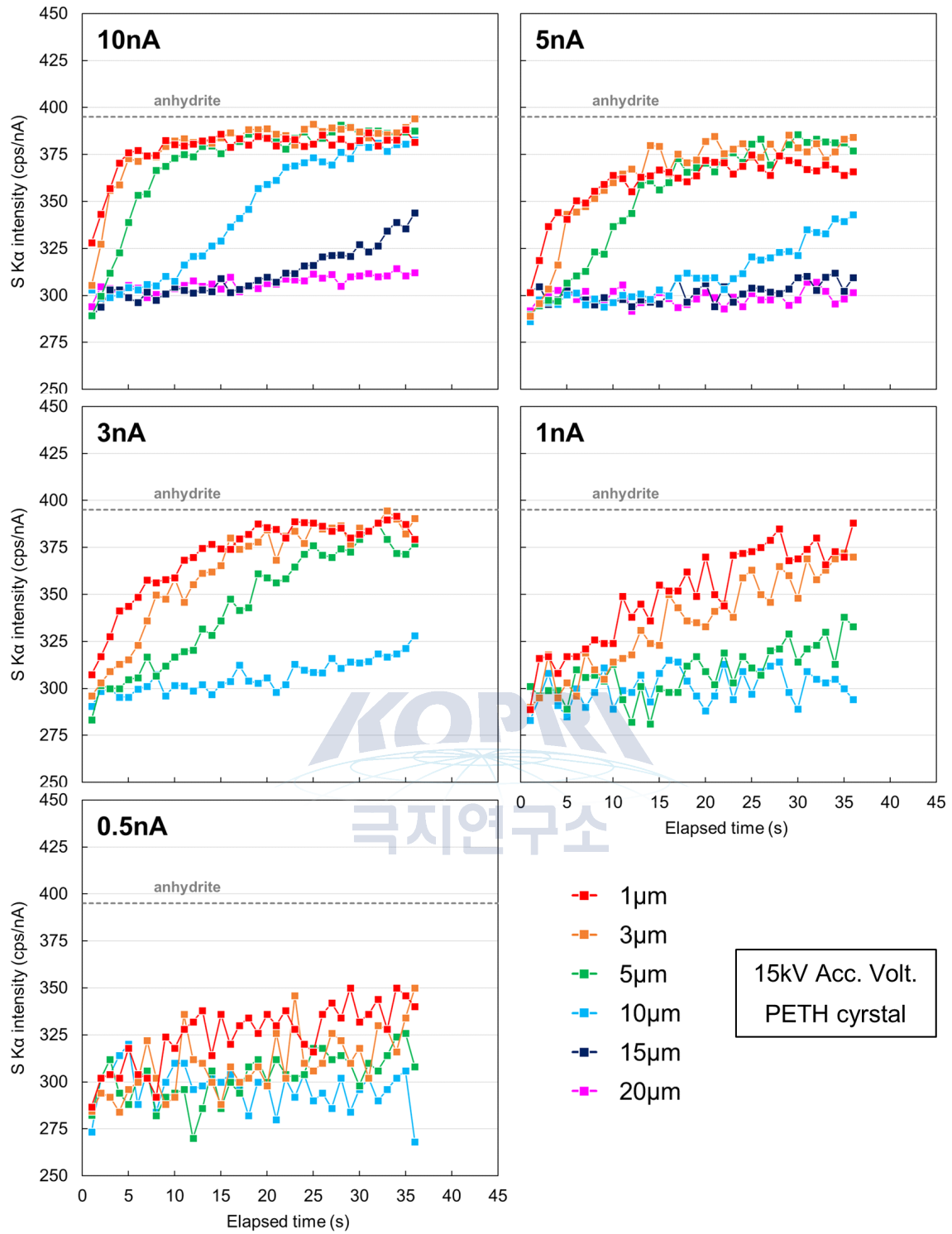


그림 33. 석고의 EPMA 분석 중 전자빔의 전류 세기와 빔 크기에 따른 S K $\alpha$  X선 세기의 시간 변화. 회색 점선은 같은 조건에서 경석고(anhydrite)의 S K $\alpha$  X선 세기이다.

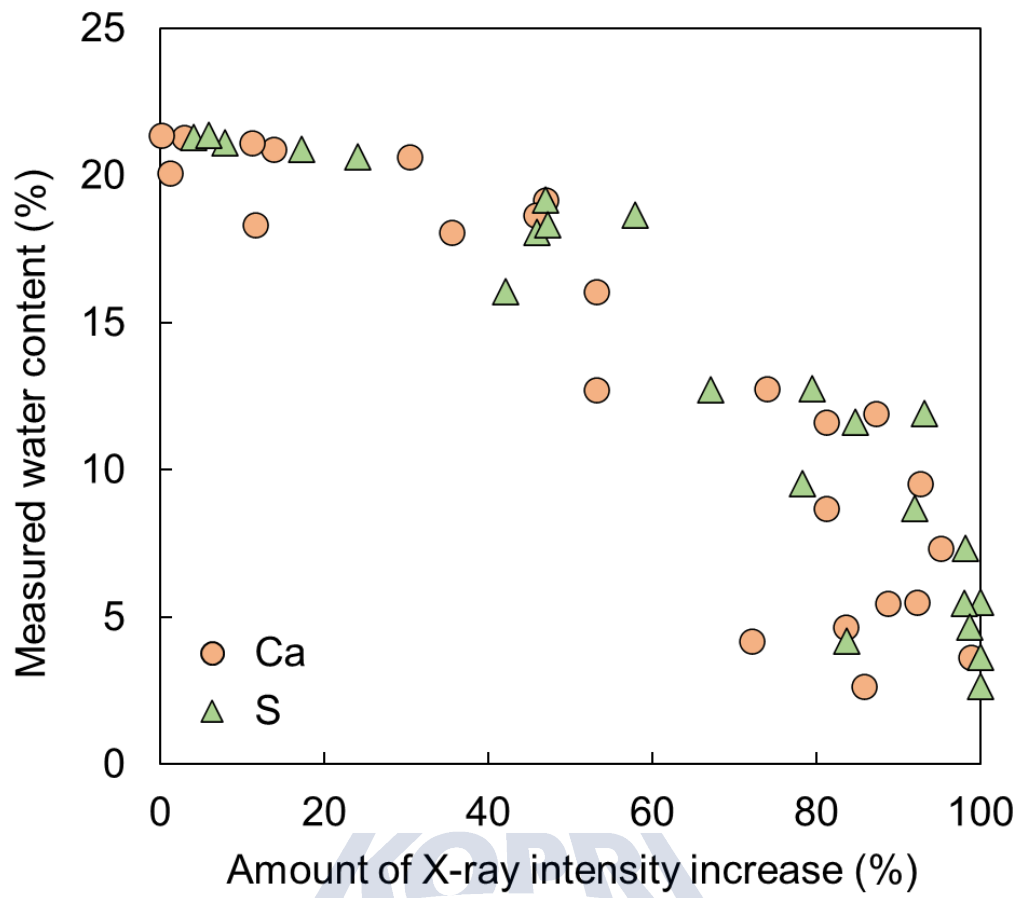


그림 34. Ca와 S의 분석 동안의 X선 세기 증가 정도에 따른 물 함량. 평균적인 석 고의 X선 세기를 0, 경석고의 X선 세기를 100%로 계산하였다.

## 제 5 절 석고 생성 기작의 이론적 접근

석고는 구조수를 함유한 수화 황산염 광물로, 지질학적 맥락에서 중요한 수분 저장소 역할을 수행한다. CM 콘드라이트 및 화성 표면 물질에서 석고가 보고되면서(Yeşilbaş et al., 2025), 그 기원이 주목받고 있다. 핵심적인 과학적 질문은 석고 내의 물이 천체 고유의 기원(endogenous origin)인지, 혹은 지구 기원 풍화작용, 충돌 사건, 또는 태양 성운의 잔여 유체 등 외부 기원(exogenous origin)에 의한 것인지 여부이다.

### 1. 지구에서의 석고 생성 환경

페쇄 분지, 사브카(소금 평지), 염호 등에서  $\text{Ca}^{2+}$ 와  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 과포화로 석고 및 무수석고가 침전된다. 대표적 사례로 Messinian 석고층 및 White Sands가 있다. 열수 및 정맥 환경(hydrothermal/vein setting) 고온의 열수 용액에서는 무수석고가, 저온에서는 석고가 안정하다. 멕시코 Naica 광산에서 발견된 초거대 석고 결정은 이러한 환경을 대표한다. 황철석(pyrite)의 산화로 황산이 생성되며, 이는  $\text{CaCO}_3$ 와 반응하여  $\text{CaSO}_4$  침전을 유발한다. 대표적 예시는 Carlsbad-Lechuguilla 동굴 시스템이다. 건조 기후 하에서는 토양 내에서 증발에 의해  $\text{Ca}^{2+}$ 와  $\text{SO}_4^{2-}$ 이 농축되어 석고가 토양 집합체로 생성된다(gypsic horizon). 석고 구조수의 동위원소 조성( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ )은 광물 생성 당시 용액의 기원을 직접 반영한다. 해양 기원 석고는 해수, 대륙 기원 석고는 강수·지하수, 열수 기원 석고는 지하수 혹은 마그마수를 기록한다.

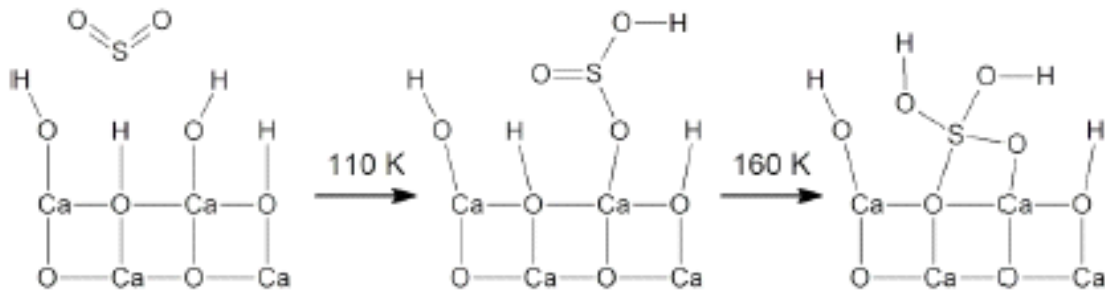
### 2. 소행성 기원

CM 콘드라이트는 원시 소행성체 내부의 저온 수성 변질을 기록하는 대표적 운석군으로, 점토광물, 탄산염, 자철석 등을 풍부하게 함유한다. 석고는 이들 운석에서 미세 균열이나 정맥을 충전하는 섬유상 집합체로 산출되며, 이는 황산염을 포함한 수용액이 균열을 따라 이동하며 침전되었음을 지시한다. 석고의 산소 동위원소 조성( $\delta^{17}\text{O}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\Delta^{17}\text{O}$ )은 지구 기원 황산염과 뚜렷이 구분되며, 이는 외계 생성 기원을 강력히 지지한다. 황 동위원소 조성 역시 남극의 황산염 범위와 구별되어, 석고의 지구 밖 기원 가능성을 시사한다. 석고는 방해석, 점토광물, 자철석과 공존하며, 이는 모두 수성 변질 과정의 산물이다.

#### 가. 수화된 CaO 표면에서의 $\text{SO}_2$

$\text{SO}_2$ 와 CaO 표면의 반응에 관한 연구에서 수화된 CaO 표면에  $\text{SO}_2$ 가 흡착하면 110–160 K 이상에서의 온도에서 OH 그룹과 반응하여  $\text{SO}_4^{2-}$  황산염 이온이 만들어지며, 최종 산물로  $\text{H}_2\text{SO}_3$ 와  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 가 생성될 수 있다는 것이 확인된다(Schewe et al., 2023).

이러한 결과는 소행성 표면과 같은 극저온의 환경에서의 석고 (gypsum) 생성을 위한 반응 경로의 초기 단계이다.



**Scheme 1.** Proposed reaction pathway for the adsorption of  $\text{SO}_2$  on as-prepared  $\text{HO-CaO}(001)$  and subsequent heating. The reaction includes three spectroscopically determinable  $\text{SO}_x$  species.

그림 35. 수화된  $\text{CaO}$  표면에  $\text{SO}_2$ 가 흡착 $\text{SO}_4^{2-}$  황산염 이온이 만들어지는 기작. 그림 출처: Schewe et al., (2023)

#### 나. 광물 표면에서의 $\text{SO}_2$

일반적으로  $\text{SO}_2$  가스는 일정 수준 이상의 습도가 존재하는 환경에서  $\text{OH}$  라디칼과 반응하여  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 를 생성한다. 반면, 건조한 환경에서는 이러한 반응이 매우 제한적이다. 그러나 특정 조건이 충족될 경우, 건조한 환경에서도  $\text{SO}_2$ 가 산화되어  $\text{SO}_4^{2-}$  이온이나  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 가 생성될 수 있음이 이전 연구를 통해 확인되었다(Langhammer et al., 2020; Mifsud et al., 2025; Bang et al., 2017). 소행성과 같이 건조하고 저온의 표면 환경에서는  $\text{SO}_2$  가스가 광물 표면에 흡착된 뒤, 광물 자체의 촉매 작용이나 자외선에 의한 광화학 반응을 통해 산화되어  $\text{SO}_4^{2-}$  이온을 생성할 수 있다. 또한 미량의 물이나 태양풍으로 유입된 수소가 존재할 경우, 표면에서 생성된  $\text{SO}_4^{2-}$  이온은  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 로 전환될 가능성이 있다.

최근 연구에 따르면,  $\text{TiO}_2$  아나타제(anatase) 표면에 흡착된  $\text{SO}_2$ 가 자외선(UV) 조사에 노출될 경우 단계적 광화학 반응을 거쳐  $\text{SO}_3^{2-}$  및  $\text{SO}_4^{2-}$  황산염이 생성된다(Langhammer et al., 2020). 이 과정에서  $\text{SO}_2$  분자는  $\text{TiO}_2$  표면 격자의  $\text{O}^{2-}$ 와 반응하여  $\text{SO}_3^{2-}$  이온을 생성하며, 이어 흡착된  $\text{O}_2$  분자로부터  $\text{O}$  원자를 전달받아  $\text{SO}_4^{2-}$  황산염 이온으로 전환된다. 이러한 광화학 반응 경로는  $\text{TiO}_2$ 뿐 아니라 다른 전이 금속 산화물 표면에도 적용될 수 있음이 제안되었다.

또한 고에너지 방사선이 존재하지 않더라도 낮은 온도에서의 열적 반응만으로  $\text{HSO}_3^-$ 와 같은 음이온성 황 화합물이 생성될 수 있음이 보고되었다(Bang et al., 2017). 얼음 표면에 흡착된  $\text{SO}_2$  분자는 95 K에서는 반응이 관찰되지 않았으나, 온도가 100~120 K에 도달하면  $\text{SO}_2$  분자와 이를 둘러싼  $\text{H}_2\text{O}$  분자 사이의 반응이 개시되었다. 이 과정에서 양성자 전이(proton transfer)와 주변 양성자의 재배열(proton rearrangement)이 일어



나며  $\text{HSO}_3^-$  이온과  $\text{H}_2\text{SO}_3$ (아황산)가 단계적으로 생성되었다. 이러한 결과는 얼음이 황을 포함하는 화학 반응 경로에서 중요한 촉진제 역할을 한다는 점을 시사한다.

#### 다. 얼음 표면에서의 $\text{SO}_2$

얼음 결정의 격자 내부에서는 물 분자의 무질서한 배향으로 인해 구조적 결함(defects)이 나타나지만, 표면은 상대적으로 무질서도가 낮은 것으로 알려져 있다(Buch et al., 2007; Buch et al., 2008; Pan et al., 2008; Pan et al., 2010; Watkins et al., 2010; Asakawa et al., 2016; Murata et al., 2016; Nojima et al., 2017; Pickering et al., 2018; Slater and Michaelides, 2019; Yamaguchi et al., 2019; Nojima et al., 2020; Hong et al., 2024; Berrens et al., 2025). 특히 사전 용해(premelting) 직전까지는 잘 정렬된 영역(well-ordered region)이 존재하며, 이 표면에는 양전하를 띤 매달린 양성자(positively charged dangling protons)가 분포한다. 이러한 양성자는 가스 분자의 음전하를 띤 부분과 강하게 상호작용할 수 있다. 예를 들어  $\text{HgBr}_2$  와 같은  $\text{Hg(II)}$  화합물이 얼음 표면과 반응하는 경우, Br 원자가 얼음 표면의 매달린 양성자와 상호작용하여 해리 흡착(dissociative adsorption)을 일으키고 환원 반응이 촉진된다는 사실이 보고되었다(Yi et al., 2021).

$\text{SO}_2$  분자는 정전기 전위 표면(electrostatic potential surface)에서 황 원자가 양전하를 띠고 산소 원자가 음전하를 띠는 특징을 지닌다. 따라서 얼음 표면의 매달린 양성자와 흡착적 상호작용을 할 가능성이 높다. 나아가 수화된  $\text{CaO-SO}_2$  시스템에서 확인된 것과 같이, 주변  $\text{H}_2\text{O}$  분자와의 상호작용, 즉 수소 결합 네트워크(hydrogen bonding network)를 통해  $\text{H}_2\text{SO}_3$  및  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 가 생성될 가능성이 크다.

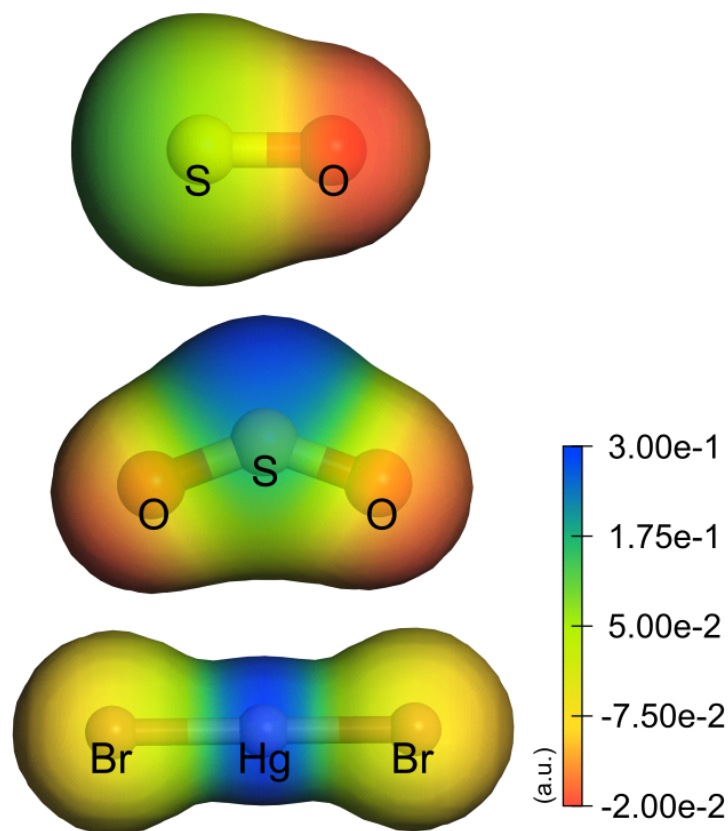


그림 36. SO, SO<sub>2</sub>, HgBr<sub>2</sub> 분자의 정전위(Electrostatic Potential) 표면을 전자 밀도 등치면 (0.008 e/Å<sup>3</sup>)에 투영한 모습이다. 정전위 값은 -0.02 a.u. (빨간색, 음전하)에서 0.3 a.u. (파란색, 양전하)까지로 매핑하였다. 계산은 반경험적 LCAO 방법을 사용하였으며, SO(삼중항)는 A-UHF(annihilated unrestricted Hartree-Fock), SO<sub>2</sub>와 HgBr<sub>2</sub>(단일항)는 RHF를 적용하였다. 해밀토니안은 NDDO(neglect of diatomic differential overlap)를 사용하였고, PM6(parameterization model 6) 매개변수화를 적용하였다(Pople et al., 1965; Clark et al., 2003; Stewart, 2007).

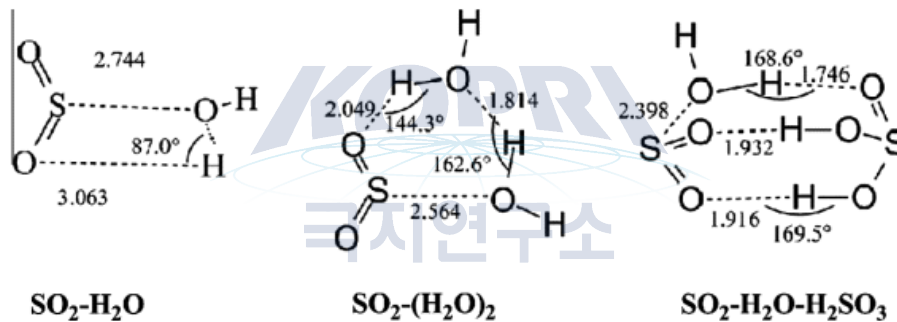
최근 연구에 따르면, 황(S)이 풍부한 먼지 입자 표면에 성간 얼음(O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) 입자가 흡착될 경우 우주선 조사(cosmic ray irradiation)를 통해 SO<sub>2</sub>, CS<sub>2</sub>, OCS, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수화물과 같은 다양한 황 함유 무기 분자가 생성될 수 있다. 주요 생성물은 SO<sub>2</sub>와 CS<sub>2</sub> 분자이며, 특히 SO<sub>2</sub>는 황이 풍부한 기관 표면에 O<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub> 얼음 입자가 흡착되었을 때 주로 생성되는 것으로 보고되었다. 반면 CO 얼음 입자가 흡착된 경우에는 CS<sub>2</sub>가 주 생성물로 나타났다. H<sub>2</sub>O 입자가 흡착될 경우 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수화물이 생성됨이 확인되었다(Bang et al. 2017).

또한 90~120 K의 낮은 온도 환경에서도 얼음 표면에서 SO<sub>2</sub>가 주변 물 분자들과 반응하여 HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 같은 음이온성 황 화합물이 생성될 수 있음이 밝혀졌다(Bang et al., 2017). 이러한 결과는 성간 얼음 환경에서는 고에너지 방사선이 존재하지 않더라도 저온에서의 열적 반응만으로 SO<sub>2</sub>의 화학적 변화가 가능함을 보여준다. 나아가 미량의 물이나 태양풍과 같은 추가적인 수소 공급원이 존재한다면, 이 과정을 통해 표면에 생성된 황산염 이온이 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>로 전환될 수 있다.

#### 라. H<sub>2</sub>O 분자와 SO<sub>2</sub>의 반응 동력학

SO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O가 반응하여 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 황산염을 생성하는 과정은 단순히 두 분자 간의 정전기적 인력에 의한 것이 아니라, H<sub>2</sub>O 분자들이 생성하는 수소 결합 네트워크 내에서 발생하는 양성자 이동이 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다(Liu et al., 2016). H<sub>2</sub>O 분자가 한 개만 존재하는 경우에는 전이 상태(transition state)의 에너지 장벽이 높아 직접적인 반응이 거의 불가능하다. 그러나 추가적인 H<sub>2</sub>O 분자가 반응에 참여할 경우, 수소 결합 네트워크가 양성자 이동을 위한 활성화 에너지를 낮추어 반응을 촉진한다.

이 과정에서 SO<sub>2</sub> + 2H<sub>2</sub>O → H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O와 같은 반응이 일어나며, SO<sub>2</sub> 분자의 S 원자가 H<sub>2</sub>O 분자의 O 원자와 새로운 결합을 생성한다. 동시에 H<sub>2</sub>O 분자의 양성자는 주변의 다른 H<sub>2</sub>O 분자에 전달되고(proton relay), 전달받은 H<sub>2</sub>O 분자는 다시 자신의 수소 원자를 SO<sub>2</sub> 분자의 O 원자에 전달하여 H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>를 생성한다. 이렇게 생성된 H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>는 SO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 시스템의 연속 반응을 통해 2H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>로 전환된다. 이후 주변에 소량의 H<sub>2</sub>O 분자가 존재할 경우, H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>는 쉽게 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>이온으로 변화할 수 있다.



**Fig. 3.** Structures of reactant complexes SO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>-(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> obtained at B3LYP/cc-pV(T+d)Z level of theory (bond distances in angstrom, angles in degree).

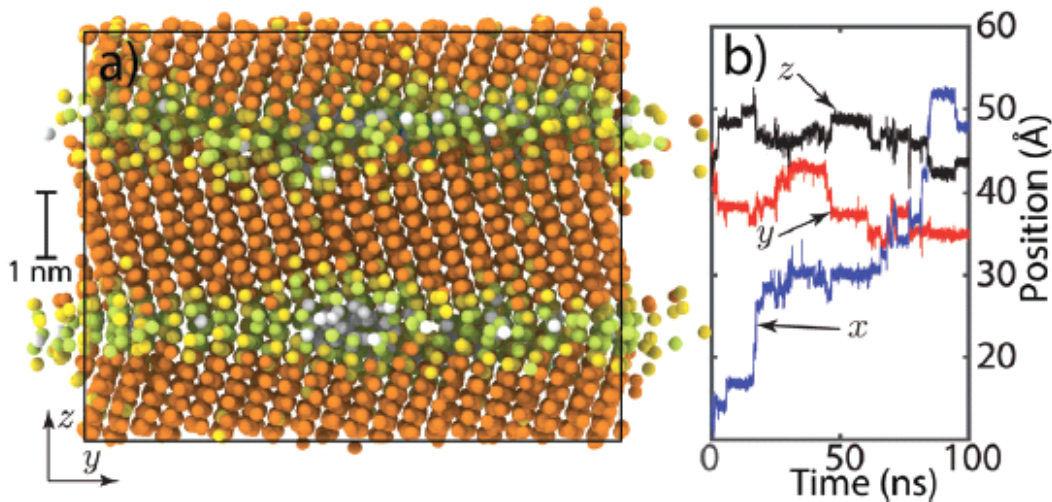
그림 37. SO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O가 반응하여 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 황산염을 생성하는 과정. 그림 출처: Liu, et al. (2016).

#### 마. 얼음 경계에서 석고의 결정화 가능성

이전 연구에 따르면 해빙이 생성되는 과정에서 해수 내의 염류(salts)는 얼음 결정화 과정에서 배제되어 간극 염수(interstitial brine)에 농축된다. 이로 인해 Ca<sup>2+</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>이온의 농도가 상승하며, 결과적으로 용액이 과포화 상태(supersaturation)에 도달하면 석고(gypsum) 결정이 생성되어 침전된다. 이 과정에서 얼음은 간극 염수 내에 용해된 이온들을 가두고 농축하는 역할을 수행하며, 화학 반응과 광물 침전이 일어날 수 있는 반응 매개체(reaction medium)를 제공한다.

소형성 표면에서도 이와 유사한 현상이 발생할 가능성이 존재한다. 이전 연구에서는

얼음 결정의 경계면(grain boundary)에 사전 용융 온도(premelting temperature)에서 유리질과 유사한 영역(glass-like region)이 존재할 수 있음을 제시하였다(Moreira et al., 2018). 이러한 영역은 얼음 격자 내부 영역(bulk region)과는 다른 동역학적 특성을 가지며, 얼음 결정화 과정에서 배제된 다양한 원소들이 높은 농도로 축적될 수 있다. 이때 주변 H<sub>2</sub>O 분자와의 상호작용을 통해 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 이온의 생성이 촉진될 수 있으며, 이는 석고 생성을 위한 화학 반응 경로로 이어질 수 있다.

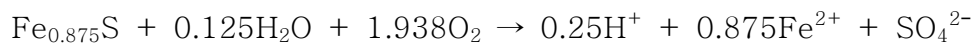


**Fig. 4** (a) Snapshots of the oxygen positions in the  $\Sigma 35$  cell obtained after an MD simulation using the TIP4P/Ice model over an interval of 0.1  $\mu$ s. Color coding is the same as that used in Fig. 1. (b) x, y and z coordinates of a particular oxygen atom in the upper GB region as a function of time.

그림 38. 얼음 결정의 경계면에서 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 이온의 형성 가능성. 그림 출처: Moreira, et al., (2018)

#### 바. 기존 수성 변질 실험의 시사점

Allende CV 콘드라이트를 대상으로 한 수성 변질 실험을 통해 석고와 같은 황산염 광물의 생성 과정을 규명하려는 연구가 수행되었다(Jones and Brearley, 2006). 이 연구에서는 황산염이나 탄산염 광물이 초기에는 존재하지 않았으며, 대신 황화광물인 pyrrhotite와 pentlandite의 산화 과정을 통해 황산염이 공급되었을 것으로 제안되었다. 해당 과정에서 황산염은 수용액 상으로 용출되어 이후 CaSO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub> 등의 황산염 광물을 생성할 수 있다.



이 과정에서 황산염 및 탄산염 이온의 농도, 모천체의 온도, 그리고 수용액의 pH에 따라 안정한 광물상이 달라진다(Jones and Brearley, 2006). 예를 들어, 황산염과 탄산염 이온 농도가 유사할 경우(pH 7-8 범위)에는 방해석(calcite)이 먼저 안정상으로 생성된

다. 그 결과, 탄산염 이온의 농도가 점차 감소하면서 황산염 이온의 상대적 비율이 증가하게 된다. 이러한 변화는 수용액의 안정 광물 영역을 변동시켜, 방해석의 안정 영역이 축소되고 황산염 광물의 안정 영역이 확장되는 방향으로 전환된다.

한편 CV 콘드라이트와 달리 CM 콘드라이트에서는 사문석(serpentine)이 가장 우세한 필로규산염(phylllosilicate) 광물로 존재하며, tochilinite-cronstedtite intergrowth (TCI)가 주로 발견된다. 이러한 변질 광물 조합은 CV 콘드라이트에서 보고된 조합과 현저히 다르다. 연구진은 이러한 차이가 CM 콘드라이트의 변질 광물이 상대적으로 낮은 산소 포화도 환경에서 생성되었기 때문이라고 제안하였다. 물/암석 비율, pH, 온도 또한 변질 광물의 생성에 영향을 미치지만, 특히 환원 환경이 tochilinite의 생성을 촉진했을 것으로 해석된다.

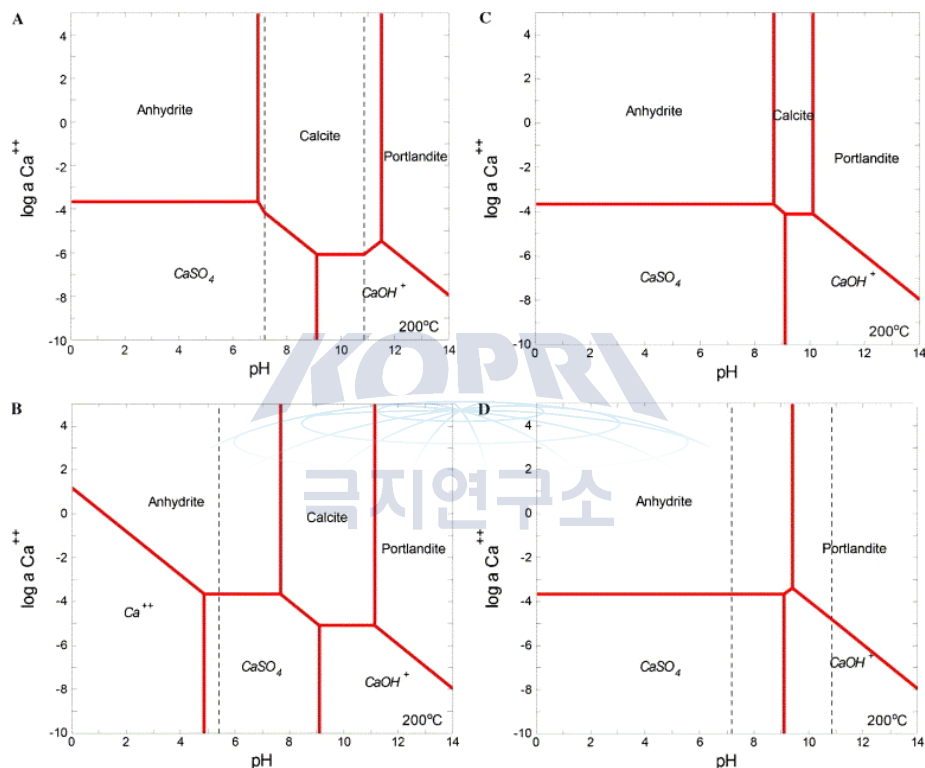


그림 39. 200 ° C에서 pH와  $\text{Ca}^{2+}$  활성도를 바꿔가며, 칼슘을 포함한 황산염류와 방해석 (calcite) 상들의 안정 영역을 나타낸 activity-activity 도표. 각 도표는  $\text{SO}_4^{2-}$ 와  $\text{HCO}_3^-$  이온의 농도를 다르게 설정해 작성했다. (A)  $\log[\text{SO}_4^{2-}] = -3$ ,  $\log[\text{HCO}_3^-] = -3$ . (B)  $\log[\text{SO}_4^{2-}] = -3$ ,  $\log[\text{HCO}_3^-] = -4$ . (C)  $\log[\text{SO}_4^{2-}] = -3$ ,  $\log[\text{HCO}_3^-] = -5$ . (D)  $\log[\text{SO}_4^{2-}] = -3$ ,  $\log[\text{HCO}_3^-] = -6$ . 그림 출처: Jones and Brearley (2006)

#### 사. 반응 경로

CM 모천체에서 석고는 주로 황화물(pyrrhotite 등)의 산화  $\rightarrow$  황산염( $\text{SO}_4^{2-}$ ) 생성  $\rightarrow$   $\text{Ca}^{2+}$ 와의 반응·침전 경로로 생성될 수 있다. 물-암석 반응이 우세한 암석지배 (rock-dominated) 저온 유체에서 침전한 황산염의 산소동위원소( $\delta^{17}\text{O}$ )가 전암  $\delta^{18}\text{O}$  및 변질지수(MAI)와 상관을 보인다는 이전 연구는 이 시나리오를 강하게 지지한다. 이



는 단순한 대기 산화·지표 기원만으로 설명하기 어렵고, 모천체 내부의 수성 변질 환경에서 제한적 동위원소 교환과 저온 침전이 지속되었음을 시사한다.

#### 아. 조건 (온도-pH-산화도)

기존 연구를 종합하면, 석고 안정성은 대체로 저온( $-2\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), pH 7-9(중성~약염기성), 환원 환경에서 약한 산화 Eh에서 높다. 이러한 제한은 소행성 Ryugu 표토에서 관찰된 유기황-황산염 공존 및 미세환경 산화-환원 변동 조건과 어긋나지 않는다. Ryugu 시료의 미세 복합 입자에서 석고(칼슘 황산염)와 티올류 유기황이 공존하면서, 황 동위원소( $\delta^{33}\text{S}$ )가 양(+)의 이상을 보인 사례는 태양성운 단계의 광화학 기원 황 저장고(MIF-S)가 후속 수성변질 동안 부분적으로 보존·재분배되었음을 시사한다. 본 연구에서는 CM 콘드라이트 석고의 기원으로, 산소는 모천체 유체에서, 황은 황화물 산화·분자운 유산 신호가 혼재될 수 있음을 같이 고려한다.

#### 자. 동위원소 제약

CM/CI 수용성 황산염의  $\delta^{17}\text{O}$  분포( $-0.2\sim +1.2\text{‰}$ )와 전암  $\delta^{18}\text{O}$ ·변질지수 관련성은 모천체에서 유체 지배 하의 침전을 지지한다. 지구 대기나 물이 개입하면  $\delta^{17}\text{O}$ 가 0‰ 부근으로 수렴하거나 대기 산화 경로에 따라 양(+)으로 치우칠 수 있으므로, 산출 위치(내부 vs. 균열/공극) 정보와 결합해 판별하는 것이 중요하다. 소행성 Ryugu의 복합 입자의  $\delta^{33}\text{S}=+5\pm 2\text{‰}$ 는 매우 드문 양(+)의 MIF-S 사례로서, 모천체 표층에 분자운/광화학 흔적이 보존될 수 있음을 보여준다. 따라서  $\delta^{17}\text{O}$ - $\delta^{33}\text{S}$ - $\delta\text{D}$ (구조수)의 다중 동위원소 교차 해석을 통해 석고의 기원을 정량적으로 판별할 수 있을 것이다.

#### 차. 요약

운석의 변질 과정 실험(hydrothermal alteration)을 통해 CM 콘드라이트의 변질 광물 생성 과정을 실험실 환경에서 모사하려는 시도들이 있어 왔다(Jones and Brearley, 2006; King, Mason et al., 2021; Suttle, King et al., 2021; Suttle, King et al., 2022). 국내 연구 여건을 고려할 때, 이러한 실험실 기반의 변질 광물 조합 연구를 체계적으로 수행할 수 있는 잠재력이 존재한다. 변질 광물 생성 실험뿐만 아니라, 변질 전·후 광물에 대한 XRD, Raman, SEM, TEM 등의 광물 분석과 동위원소 및 미량 원소 분석 역량을 결합한다면, 태양계 생성 초기의 저온 변질 과정에서 생성되는 CM 콘드라이트의 광물 조합, 동위원소 특성, 미량 원소 분배 계수 등을 정량적으로 규명할 수 있는 분석 체계를 마련할 수 있을 것이다.

최근 Ryugu 소행성 탐사에서 획득한 표토(regolith) 시료의 분석을 통해 소행성 환경에서 나타나는 원시 태양계 광물의 변질 작용에 관한 새로운 정보가 밝혀지고 있다. Ryugu 시료에는 smectite, serpentinite와 같은 필로규산염(phyllosilicate) 광물뿐만 아니라, 약  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  이하의 수성 변질 작용을 통해 생성된 것으로 보이는 탄산염 광물과 자철석이 발견되었다. 또한 다수의 유기물 역시 공존하는 것으로 확인되었다(Bose et

al., 2017).

Ryugu 시료에서 관찰된 유기물(thiol)과 황산염(sulfate)의 생성 환경을 열역학 모델링을 통해 추적한 결과, 약 92 °C 이하의 비교적 낮은 온도, pH 7~9 범위의 중성에서 약염기성 수용액, 그리고 Eh 약 -0.3 V 수준(iron-wüstite buffer 조건)의 비교적 환원적인 환경이 적합한 것으로 추정되었다. 그러나 실제 Ryugu 시료에서 자철석이 발견됨에 따라 이러한 환원 환경이 지속적으로 유지된 것이 아니라, 시간에 따라 변화했을 가능성이 높다는 점이 제시되었다(Nakamura et al., 2022; Fujiya et al., 2023; McCain et al., 2023).

지구에서 석고( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )는 주로 광물·화산 기원 물질( $\text{Ca}^{2+}$ , SO,  $\text{SO}_2$ )가 물에 용해되어 농도가 증가할 때 침전 과정을 통해 생성된다. 그러나 특정 조건에서는 물이 존재하지 않더라도  $\text{SO}_2$ 로부터 황산염 이온이 생성되어 석고 생성을 위한 반응 경로가 시작될 수 있다. 특히 전이 금속 산화물 표면에서 자외선(UV) 조사에 의해  $\text{SO}_2$  분자가 광물 격자의  $\text{O}^{2-}$  이온과 반응하여  $\text{SO}_4^{2-}$  황산염 이온이 생성될 수 있다.

소행성 표면의 극저온 환경에서는 물이 주로 얼음 형태로 존재한다. 이러한 낮은 온도에서도 얼음 표면의 양전하를 띠는 매달린 양성자와의 정전기적 상호작용, 그리고 얼음 내부의 수소 결합 네트워크를 통한 양성자 이동(proton transfer)에 의해 SO 및  $\text{SO}_2$  분자로부터  $\text{SO}_3^{2-}$ 와  $\text{SO}_4^{2-}$  이온이 생성될 수 있다. 이 과정은 나아가  $\text{H}_2\text{SO}_3$ 나  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 의 생성으로 이어질 수 있다.

극저온 환경에서 SO/ $\text{SO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  시스템에서의 석고 생성 가능성은 여러 연구를 통해 검증되고 있다. 지금까지 보고된 결과를 종합하면, 저온의 얼음 환경에서도 SO/ $\text{SO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  혼합물로부터 석고 생성이 충분히 가능하다는 결론에 도달할 수 있다. 특히 성간 얼음 환경에서 태양풍과 같은 수소 이온 공급원이 존재한다면 이러한 반응은 더욱 촉진될 가능성이 크다.

이러한 연구 결과는 운석에서 발견되는 석고를 구성하는  $\text{SO}_4^{2-}$  황산염의 기원이 단순히 지표에서의 수화 변성 작용에 국한되지 않고, 성간 공간의 건조하고 극저온의 환경에서 일어난 광화학 반응에 기원을 둘 수 있음을 시사한다.

## 제 6 절 석고의 구조수 및 황산염 이온의 동위 원소 분석 전략

석고의 수소, 산소, 황 동위원소는 석고가 모천체에서의 수성 변질 작용을 통해 생성된 산물인지, 아니면 지구 환경에서 생성된 이차 변질 광물인지를 판별하는 중요한 단서를 제공한다. 만약 석고가 모천체에서 생성된 것이라면, 동위원소 정보는 모천체의 온도, pH와 같은 변질 환경 조건을 해석할 수 있게 해주며, 나아가 원시 태양계에서 모천체에 존재하던 물의 동위원소 조성에 대한 정보도 제공할 수 있다.

칼슘 황산염(Ca-sulfate)은 포함된 구조수의 양에 따라 세 가지 상으로 구분된다. 즉, 석고(gypsum,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), 소석고(bassanite,  $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ), 그리고 무수석고(anhydrite,  $\text{CaSO}_4$ )이다. 석고를 가열하면 약 150 °C에서 소석고로 전이하고, 약 200 °C에서 무수석고로 전이하며, 이 과정에서 구조수가 방출된다(Bauska et al., 2018). 방출된 구조수는 IRMS(isotope ratio mass spectrometer)를 이용하여 전달·분석할 수 있으며, 이를 통해 구조수에 포함된 수소와 산소 동위원소 조성을 정밀하게 측정할 수 있다.

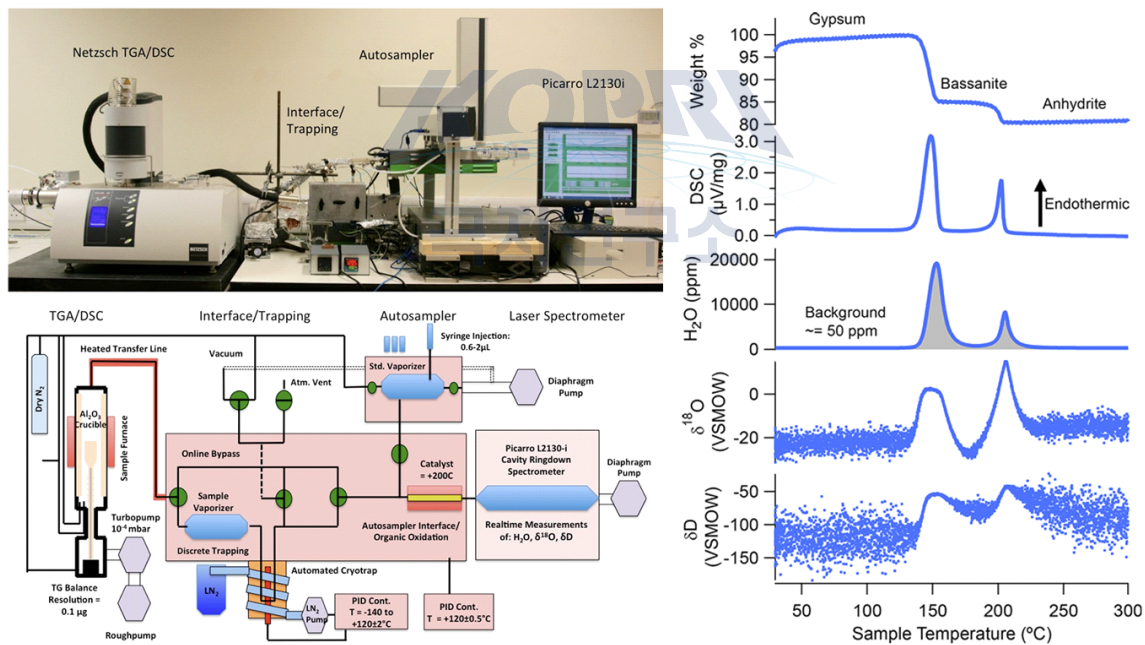


그림 40. (좌) 온라인-차동 열 동위원소 분석(DTIA) 시스템. (우) 구조수의 이중 방출로 잘 알려진 석고→소석고→무수석고 전이. 상단 두 패널은 Netzsch TGA/DSC에서 얻은 질량 감소(TGA)와 시차주사열량(DSC) 결과를, 하단 패널은 Picarro CRDS로 측정된  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  신호를 각각 보여준다 (Bauska et al., 2018)

석고의 황산염 이온에 포함된 황과 산소 동위원소는 시료 용해 후 바라이트( $\text{BaSO}_4$ )로 침전시켜 분석할 수 있다. 황 동위원소의 경우, 초기 석고의 분리가 충분히 이루어진다면 안정적인 분석이 가능하다.

지중해에서 생성된 석고를 대상으로 한 연구에서는 황산염 이온의 황과 산소 동위원소

조성이 측정되었으며, 그 결과 지구 환경에서 석고가 생성될 때 동위원소 조성의 국지적 변화를 보이는 것이 확인되었다(Evans et al., 2015). 해당 연구에서 제시된 그림에 따르면, 중심의 별 표시는 석고가 생성된 해수의 동위원소 값을 나타내며, 왼쪽으로 뺀 화살표는 황산염 이온의 산소 동위원소 값이 구조수 및 수용액과의 산소 동위원소 교환(oxygen isotope exchange)을 통해 점진적으로 변화할 수 있음을 시사한다. 따라서 운석 시료의 경우에도 황산염의 산소 동위원소를 해석할 때는 이러한 교환 반응의 가능성을 충분히 고려해야 한다.

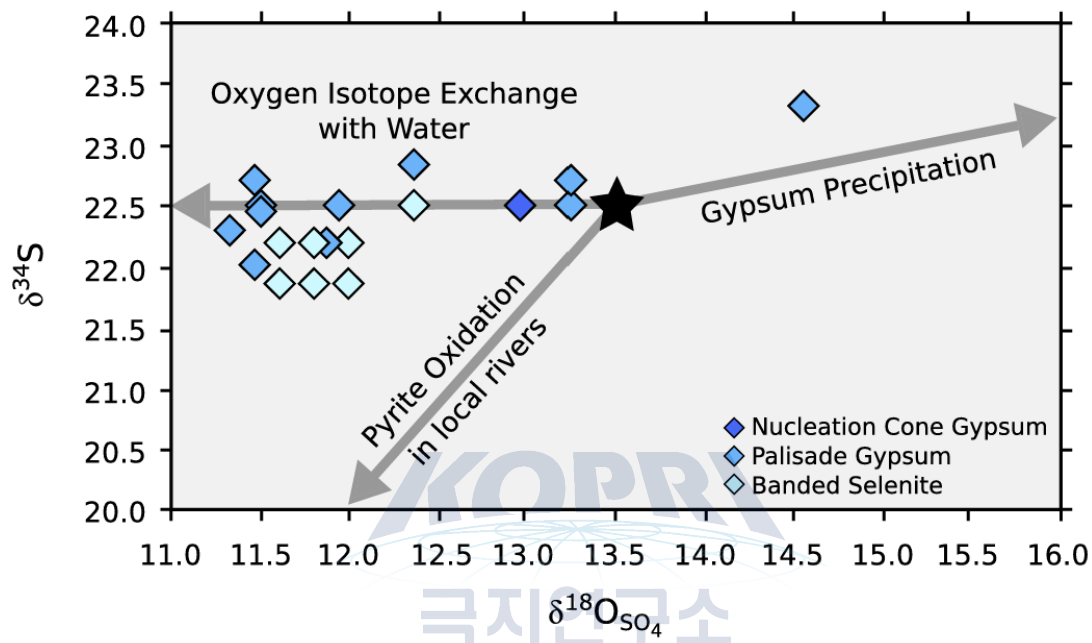


그림 41. Yesares 석고의 황산염  $\delta^{34}\text{S}$  vs.  $\delta^{18}\text{O}$  (Evans et al., 2015)

석고가 생성된 이후 주변 수용액과의 접촉이 지속될 경우, 구조수의 산소 동위원소 값이 변할 수 있는지를 조사한 연구가 수행되었다. 해당 연구에서는 약 50 °C 이하의 온도 조건에서 동위원소 교환이 비교적 억제된다는 사실이 확인되었다(Gazquez and Hodell, 2022). 그러나 석고와 수용액 사이의 화학적 평형 여부, 즉 석고의 재결정화 작용 발생 여부, 석고 결정의 크기, 그리고 열개(fracture)의 존재 여부 등은 산소 동위원소 확산에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 실제 분석에서는 이러한 요인을 면밀히 고려해야 하며, 동위원소 신호의 해석에 주의를 기울일 필요가 있다.

표 7. 석고 분석에서 전암 분석과 in-situ 분석의 차이

| 구분               | 전암(Bulk) 분석                                                                                                                         | in-situ 분석                                                                                                                                       |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 시료 크기<br>요구량     | 수 mg~수십 mg 필요 (통상 1-5 mg 이상)                                                                                                        | 수 $\mu\text{m}$ 단위 입자 또는 영역 (몇 pg-ng 수준)                                                                                                         |
| 분석 영역            | 시료 전체(혼합된 phase의 평균치)                                                                                                               | 단일 결정, 균열 충전물, 층상 구조 등 미세 영역 선택 가능                                                                                                               |
| 공간 해상도           | 없음 (전체 평균)                                                                                                                          | 수 $\mu\text{m}$ (SIMS) ~ 수백 nm (NanoSIMS) 수준                                                                                                     |
| 정밀도( $1\sigma$ ) | 매우 높음 ( $\pm 0.05\text{--}0.2\%$ $\delta^{18}\text{O}$ , $\pm 0.2\%$ $\delta^{34}\text{S}$ , $\pm 2\text{--}5\%$ $\delta\text{D}$ ) | 다소 낮음 ( $\pm 0.2\text{--}0.5\%$ $\delta^{18}\text{O}$ , $\pm 0.3\text{--}0.8\%$ $\delta^{34}\text{S}$ , $\pm 10\text{--}20\%$ $\delta\text{D}$ ) |
| 대표 장비            | IRMS (Isotope Ratio Mass Spectrometer), TC/EA-IRMS, EA-IRMS, gas extraction line                                                    | SIMS, NanoSIMS                                                                                                                                   |
| 시료 준비            | 분말화, 탈수 및 정제 $\rightarrow$ 가스 추출 ( $\text{O}_2$ , $\text{CO}_2$ , $\text{SO}_2$ , $\text{H}_2$ )                                    | 박편, 표준시료와 동시 분석                                                                                                                                  |
| 장점               | 평균 조성 $\rightarrow$ 전체 시료의 절대값 파악- 높은 측정 정밀도- 절대값 보정이 용이- 기기 재현성 우수                                                                 | 광물별 분리 불필요- 오염/2차 광물 영향 최소화- 광물 간 미세한 동위원소 분화 확인 가능- 원위치 분석으로 구조적 맥락 보존                                                                          |
| 단점               | 미세 영역 차이(예: 균열 vs 매트릭스) 반영 불가- 2차 변질, 오염 포함 시 평균 왜곡- 시료 소비량 많음                                                                      | 시료 표면 조건·charging에 민감- 표준 보정 복잡 (matrix effect)- 신호 강도 낮음 $\rightarrow$ 정밀도 저하- 분석 속도 느림                                                         |
| 적합 연구 목적         | 전체 석고의 동위원소 평균값을 통한 기원·환경 구분(예: 지구 vs 소행성, 해양 vs 기원수)- 광범위 시료 비교 연구                                                                 | 석고 내 성장대·균열·포획물 등 미세 구조별 동위원소 변이 파악- 모천체 내 반응 경로·시간적 진화추적                                                                                        |
| 예시 적용            | CM/CI 운석 황산염의 bulk $\Delta^{17}\text{O}$ , $\delta^{34}\text{S}$ , $\delta\text{D}$ 측정 $\rightarrow$ 소행성 수성변질 특성 규명                 | Ryugu 시료 내 $\mu\text{m}$ 단위 황산염 결정의 $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{34}\text{S}$ , $\Delta^{33}\text{S}$ $\rightarrow$ 국소적 형성 환경 추정             |



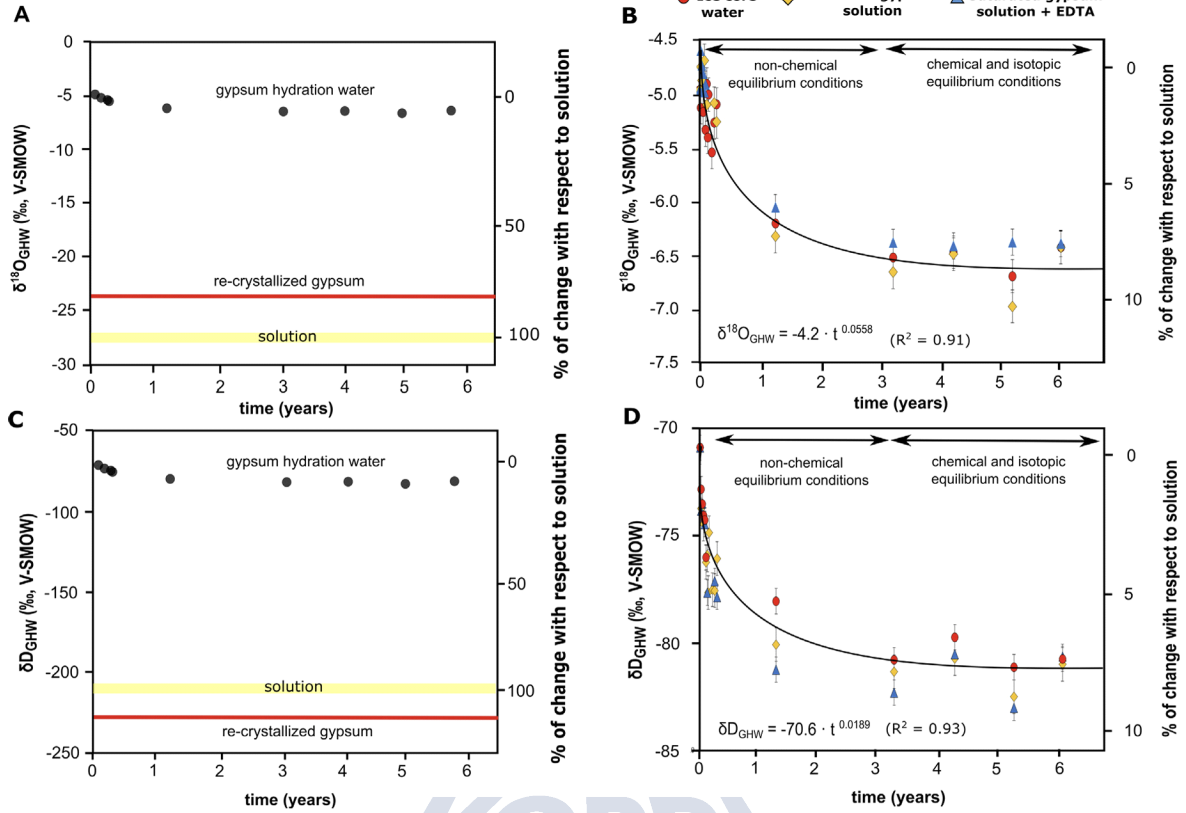


그림 42. 6년에 걸쳐 용액 상에서 관찰한 석고 수화수(GHW)의 산소·수소 동위원소 진화. 실험은  $^{18}\text{O}/\text{D}$ -결핍 용액과 접촉한 미세결정 합성 석고로 구성됨. 패널 A와 C는 각 시점별 모든 실험의 평균값을, 패널 B와 D는 각각 A와 C의 확대 보기를 제시함. 초기  $^{18}\text{O}/\text{D}$ -결핍 용액은 (1) 빙핵수, (2) 빙핵수로 제조한 석고 포화 용액, (3) 동일한 석고 포화 용액에 석고 재석출을 억제하는 스케일 방지제(EDTA)를 처리한 용액으로 구성되었음. 그림 출처: Gazquez and Hodell, 2022)

## 제 7 절 Raman을 이용한 CM 콘드라이트 내 석고 분석

CM 콘드라이트는 석고와 방해석과 같은 변질 광물뿐만 아니라 다양한 형태의 유기물을 포함하고 있다. Raman 분광 기법은 석고와 방해석이 지니는 특징적인 진동 모드를 이용하여 마이크로미터 수준의 공간 분해능으로 두 광물의 분포를 비파괴적으로 분석할 수 있다. 더 나아가 Raman 스펙트럼에서 나타나는 탄소의 G-band와 D-band는 유기물의 분포를 추적할 수 있을 뿐 아니라, 유기물이 경험한 변질 온도를 해석하는 데 단서를 제공한다. 따라서 Raman 분광법은 다양한 탄소 콘드라이트 시료 분석에 적합한 기법으로 평가된다.

또한 Murchison 및 Allende 운석에 포함된 불용성 유기물(insoluble organic matter, IOM)을 약 300 °C에서 열처리하기 전과 후의 Raman 분석 결과는 유기물의 열적 성숙도를 평가하는 지표를 제공한다. 고온 열처리 이후 두 운석의 Raman 스펙트럼에서 공통적으로 D-band와 G-band의 폭이 증가하는 것이 확인되었다. 특히 Allende IOM의 경우 열처리 이후 G-band의 세기가 증가하고 D-band의 세기가 감소하는 경향을 보였다. 이는 고온 환경에서 Allende IOM 유기물 복합체의 구조가 변화하여, Murchison IOM이 나타내는 구조적 특징과 유사한 형태를 띠게 되었음을 지시한다.

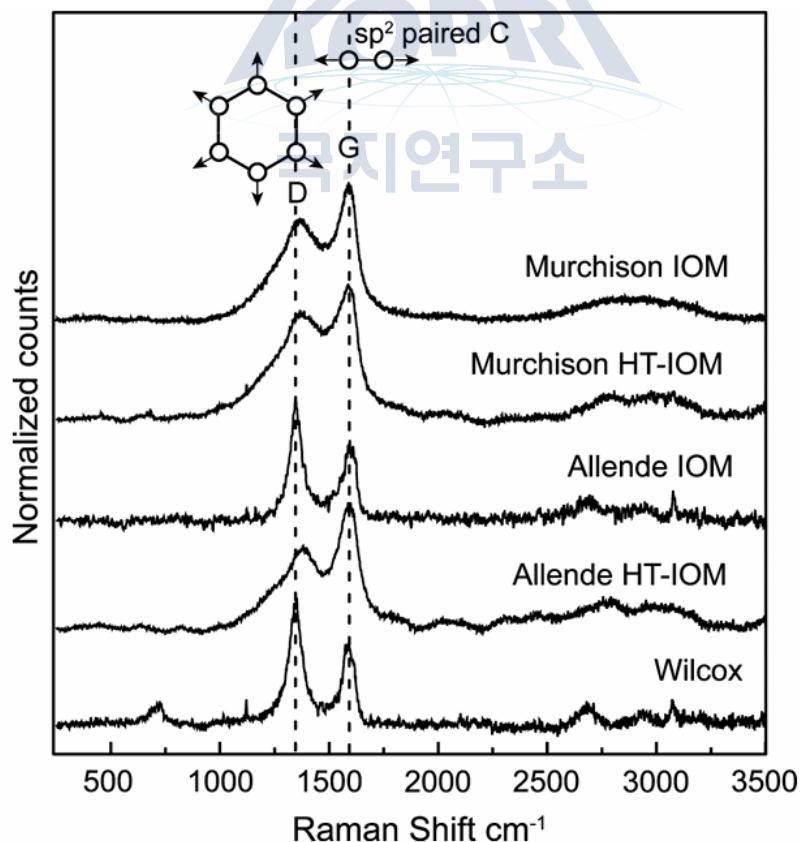


그림 43. 머치슨 및 아엔데 시료의 IOM과 HT-IOM, 그리고 지구 기원의 Wilcox 케로젠에서 얻은 라만 스펙트럼. 점선으로 D 및 G 밴드를 표시함. (Bose et al., 2017)

## 제 8 절 XANES를 이용한 석고 분석법

운석 시료에서 황은 다양한 원자가 환경을 가지며, 대표적으로 황산염 광물( $S^{6+}$ ), 황화 광물( $S^{1-}$ ), 유기물(thiol,  $S^{2-}$ ) 등에서 뚜렷한 산화 상태(oxidation state)를 보인다. 황의 산화 상태를 분석하면 CM 콘드라이트 모천체에서 일어난 광물 변질 과정에서 황의 거동을 이해할 수 있을 뿐 아니라, 모천체의 산소 포화도와 같은 화학적 환경 조건을 추정할 수 있다.

특히 유기물에 포함된 황은 운석 시료에서 직접적인 공간 분포를 규명하기 어렵다. 그러나 황 K-흡수단 근처 X선 흡수 미세구조(sulfur XANES) 분석을 활용하면, 공간에 따른 황 원소의 결합 환경 분포를 파악할 수 있다. 이를 통해 황화 광물과 유기물, 또는 황산염 광물과 황화 광물의 공간적 공존 양상을 추정할 수 있으며, 나아가 모천체 내부에서의 변질 과정을 추적할 수 있는 중요한 단서를 확보할 수 있다.

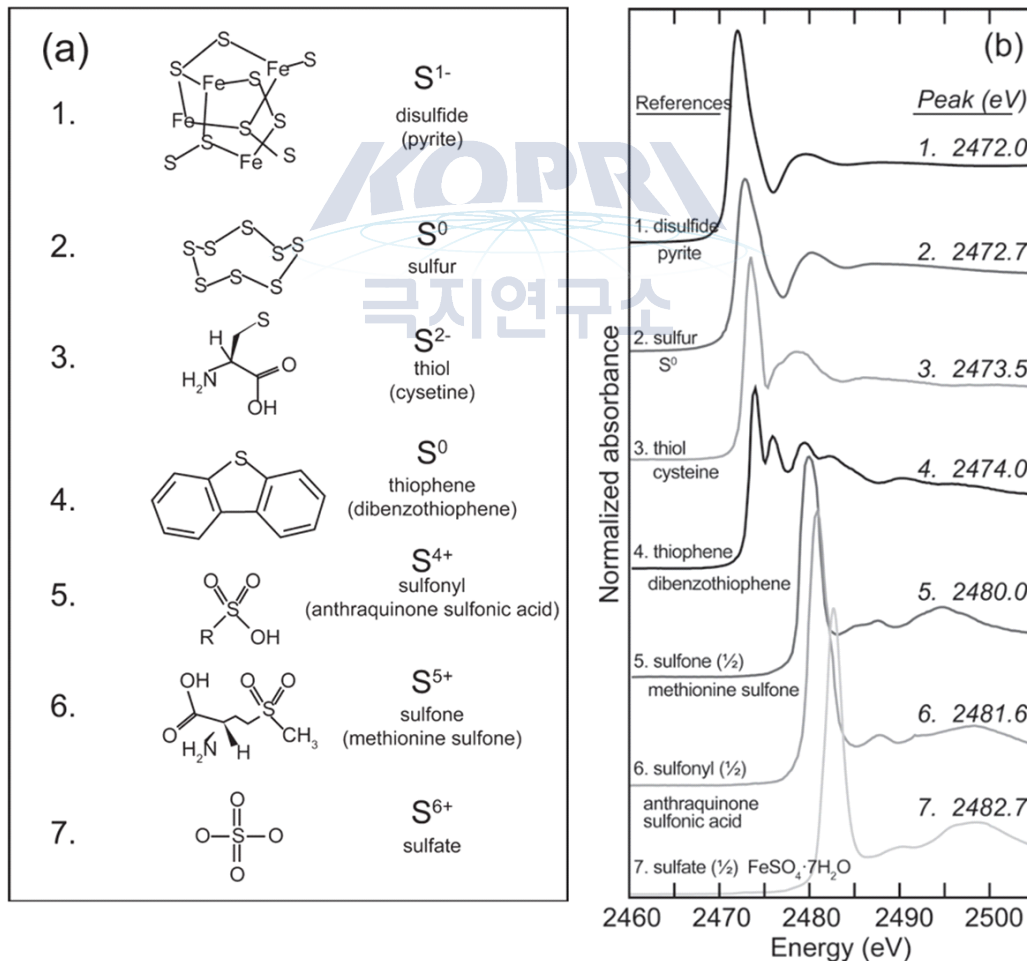


그림 44. (좌) 여러 황 함유 화합물의 산화 상태( $S^{2-} \sim S^{6+}$ )와 구조. (우) 다양한 황 산화 상태를 갖는 기준 화합물의 황 K-엣지 XANES 스펙트럼. (Bose et al., 2017)

Murchison 및 Allende 운석에 포함된 불용성 유기물(insoluble organic matter, IOM)을 약 300 °C에서 열처리하기 전과 후의 XANES 분석 결과는 황을 포함한 화학종의 변화를 잘 보여준다. Murchison IOM의 경우 열처리 이후 pyrite와 무기 황 신호는 감소하고, thiophene과 같은 유기물 신호는 증가하였다. 반면 Allende IOM의 경우에는 열처리 전후에 관계없이 pyrite와 무기 황 신호가 안정적으로 유지되었다. 이러한 결과는 고온 열처리 과정에서 황을 포함한 화학종들 사이에 구조적 전이가 발생함을 의미한다. 더 나아가 이 정보는 CM 콘드라이트가 경험한 수성 변질의 온도 조건을 추정하는 데 중요한 단서를 제공한다.

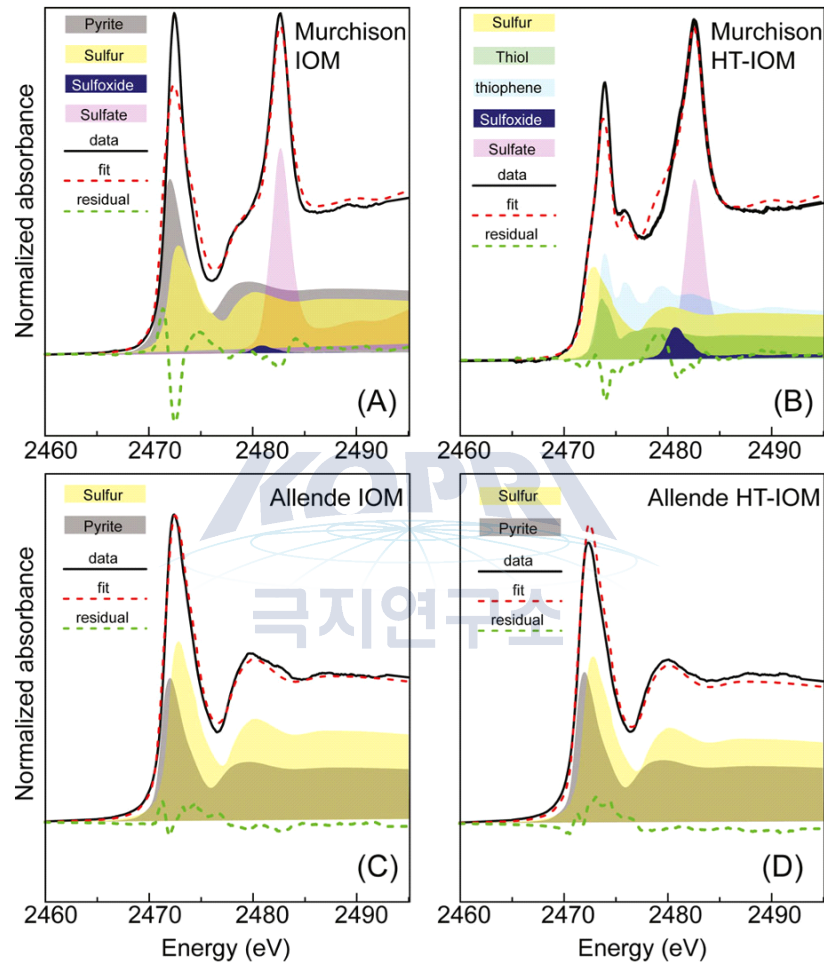


그림 45. (A) 머치슨 IOM, (B) 열처리(HT) 머치슨 IOM, (C) 아엔데 IOM, (D) 열처리(HT) 아엔데 IOM의 XANES 결과이다. 검은 실선은 원시 스펙트럼(측정값)을, 점선/점선 등은 황 함유 화합물의 기준 스펙트럼을 이용한 시뮬레이션 결과를 각각 나타낸다(Bose et al., 2017).

아래 결과와 같이 X-선 분광 이미징 기법으로 운석 시료 내 sulfur-species 분포를 획득할 수 있다.

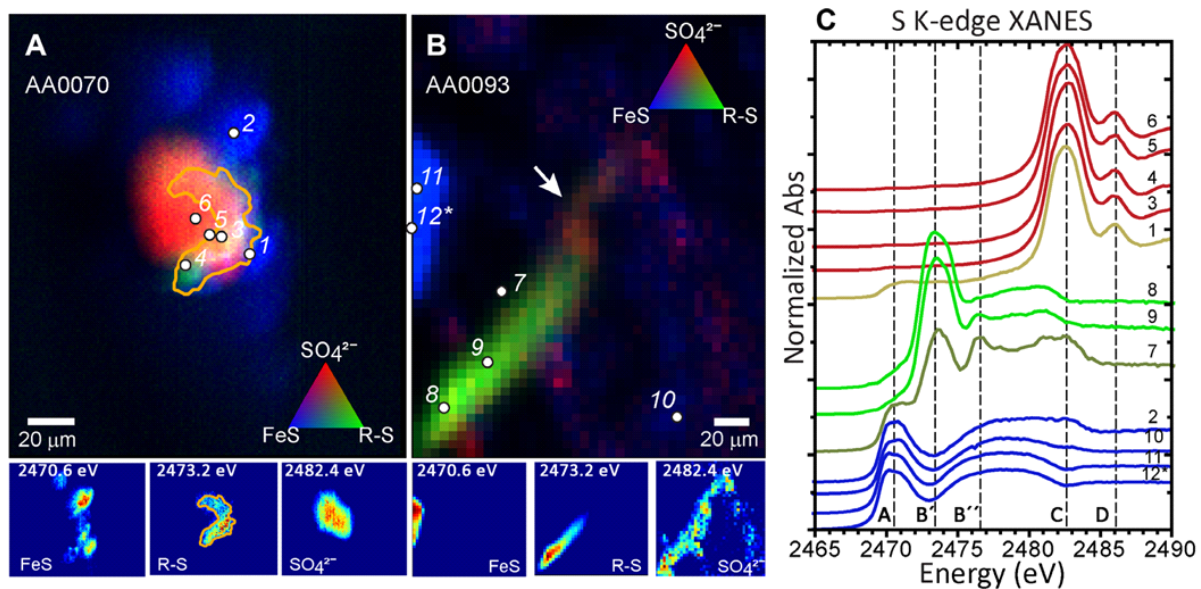


그림 46. (좌) 황 흡수단(S K-edge) 부근에서 획득한 다중 에너지 X선 형광(XRF) 맵으로, Ryugu 입자 A0070과 A0093 내 두 개의 티올(thiol) 풍부 영역(초록색)이 확인되며 단황화물 입자와 공간적으로 인접함을 보여줌. (우) 선택 영역에 대한 황 K-edge XANES 결과(Bose et al., 2017).





## 제 9 절 이차이온질량분석기(SIMS)를 이용한 분석 방법

본 절은 NanoSIMS와 대형 SIMS(LG-SIMS, Cameca IMS-1280 등)를 축으로 설계하였다. 석고는 작은 크기(수  $\mu\text{m}$ )의 수화 광물이며, 공간해상도-감도-다중동시수집을 동시에 요구하므로 SIMS 분석이 반드시 필요하다. 대형 SIMS는 고정밀 산소/황 동위원소에 유리하며, 표준화·기질효과 보정의 체계가 확립되어 있다.

### 1. NanoSIMS (H-O-S 동위원소 정량 맵핑)

- 시료 준비: 평탄 연마(거칠기 최소화), 저온 C-코팅, 휘발성 수지 최소화, 표준물질(gypsum/anhydrite/barite) 동일 마운트 탑재.
- 빔·극성:  $\text{O}^-$  1차빔으로 양이온( $\text{Si}^+$  등)을 보기보다는,  $\text{Cs}^+$  1차빔으로 음이온( $^{16}\text{O}^-$ ,  $^{18}\text{O}^-$ ,  $^1\text{H}^-$ ,  $^2\text{H}^-$ ,  $^{32}\text{S}^-$ ,  $^{34}\text{S}^-$ ,  $^{33}\text{S}^-$ ) 동시수집을 기본으로 한다. 전하 중화(e-flood) 최적화가 필수이다.
- 질량분해능(MRP):  $^{16}\text{OH}^-/^{17}\text{O}^-$  분리,  $^{16}\text{O}_1\text{H}^-/^{17}\text{O}^-$  간섭 제거를 위해 고 MRP 모드 선택(수만 단위)하고, 카운팅 목표를 설정한다.
- 데이터: 이온영상( $\mu\text{m}$  이하 픽셀)으로 석고 내부의 미세 이질성(내부 vs. 가장자리 vs. 균열 연계)을 가시화한다.
- 케이스 스터디 반영: Ryugu 입자에서 보고된 석고-티올 복합립의 10  $\mu\text{m}$  규모 테두리 유기황, 둘레의 미소 황화물 공존, 그리고  $\delta^{33}\text{S}=+5\pm2\%$  사례를 분석 설계·영상 파이프라인에 반영한다(복합 상 간 경계 추적, 유기-무기 황 분포의 동시 지도화).

### 2. LG-SIMS (IMS-1280 등, 고정밀 산소/황 동위원소)

- 목표: gypsum/anhydrite의  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{17}\text{O}$ - $\delta^{17}\text{O}$ , H/D 분석 및  $\delta^{34}\text{S}$ - $\delta^{33}\text{S}$ 의 고정밀 점 분석(spot).
- 프로토콜: 다중 콜렉터(Faraday/EM) 조합, 표준-시료-표준 드리프트 보정, 매트릭스 매칭 표준(gypsum/anhydrite/barite) 사용을 기본으로 한다.
- 성능: 산소 동위원소 sub-permil 정밀도가 보고되어 있으며, 운석 미세광물에 대한 장기간 자동화 루틴·전자학 안정화·시료 준비가 핵심이다.

표 8. 동위원소 지시자 기반 기원 판별 매트릭스

| 지시자                                 | 모천체 수성 변질                                                                                                        | 지구 풍화 기원                                                                                                  | 태양계 성운 기원                                                                                                                                    | 판별 시 주의점                                                                                             |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\Delta^{17}\text{O}_{\text{SO}_4}$ | 낙하 CM 석고<br>-0.23 ~ +1.18‰<br>(전암 $\delta^{18}\text{O}$ ,<br>MAI와 상관) →<br>암석지배<br>유체에서 황화물<br>산화·침전             | ≈ 0‰(TFL<br>부근) 경향. 단,<br>대기 에어로졸<br>황산염은<br>양(+)의 $\Delta^{17}\text{O}$ 를<br>가질 수 있음                     | 사례 제한                                                                                                                                        | 오존 ( $\text{O}_3$ ) 개입 시<br>$\Delta^{17}\text{O} > 0$ 가능 →<br>환경 문맥적 해석<br>필요                        |
| $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ | +4.5 ~<br>+9.7‰(낙하 CM)                                                                                           | 다양(대기·지표<br>수 반영). 남극<br>빙설 유래<br>황산염은 큰<br>음의 값<br>가능(빙하수<br>기원)                                         | 사례 제한                                                                                                                                        | 절대값만으로 기원<br>단정 곤란. $\Delta^{17}\text{O}$ 와<br>위치 정보(내부/균열)와<br>통합 해석 필요                             |
| $\Delta^{33}\text{S}$               | 대체로<br>~0‰(MDF)<br>경향(수성<br>변질·산화/환원<br>과정은 주로<br>질량의존)                                                          | ~0‰(일반<br>풍화·용탈)                                                                                          | 양의 이상(+)<br>가능: Ryugu<br>복합입자(석고+<br>티올)에서 +5 ±<br>2‰ 보고(광화학<br>기원 $\text{S}^0$ 보존)                                                          | $\Delta^{33}\text{S}$ 의 큰 양(+) 편차는<br>광화학(MIF-S) 흔적<br>지표. 단, 대부분 CM<br>황은 sub-permil 범위<br>보고가 일반적임 |
| $\delta^{34}\text{S}$               | 수 - 수% 내<br>변동(산화·침전<br>에 따른 MDF)                                                                                | 광범위(환경<br>의존)                                                                                             | 맥락 의존적                                                                                                                                       | $\delta^{34}\text{S}$ 만으로 기원<br>구분은 제한적( $\Delta^{33}\text{S}$ 와<br>병행 해석 필수)                        |
| 종합<br>판별                            | 내부 보존상<br>석고에서 CM형<br>$\Delta^{17}\text{O}$ (양의 값) +<br>$\Delta^{33}\text{S} \approx 0$ →<br>모천체 수성 변질<br>가능성 높음 | 균열/공극<br>부착상 +<br>$\Delta^{17}\text{O} \approx 0$ 또는<br>빙설형 $\delta^{18}\text{O}$ (음)<br>→ 지구<br>풍화/오염 의심 | $\Delta^{33}\text{S}$ 크게 양(+)<br>+ Ryugu형 음의<br>$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{17}\text{O}$ →<br>분자운/광화학<br>기원 S 풀 보존<br>+ 모천체 유체<br>반응 흔적 | 위치(내부/균열),<br>광물연계(황화물·유기<br>황 공존), 분광/XANES<br>정보와 다중 증거<br>결합 필수                                   |

## 제 10 절 석고의 SIMS 분석을 통한 소행성 물의 산소동위원소 조성 추정

CM 콘드라이트의 석고는 전자빔에 의해 쉽게 탈수되어 무수석고가 되기 때문에 이를 이용하면 하나의 석고 샘플에서 석고와 무수석고의 산소동위원소 조성을 분석할 수 있을 것으로 생각한다.

- 1) CM 콘드라이트 석고에 대해 in-situ 산소동위원소 분석
  - 2) 전자빔으로 시료를 조사하여 탈수시켜 무수석고화
  - 3) 무수석고의 산소동위원소 분석
- 모식도로 표현하면 그림 45와 같다.

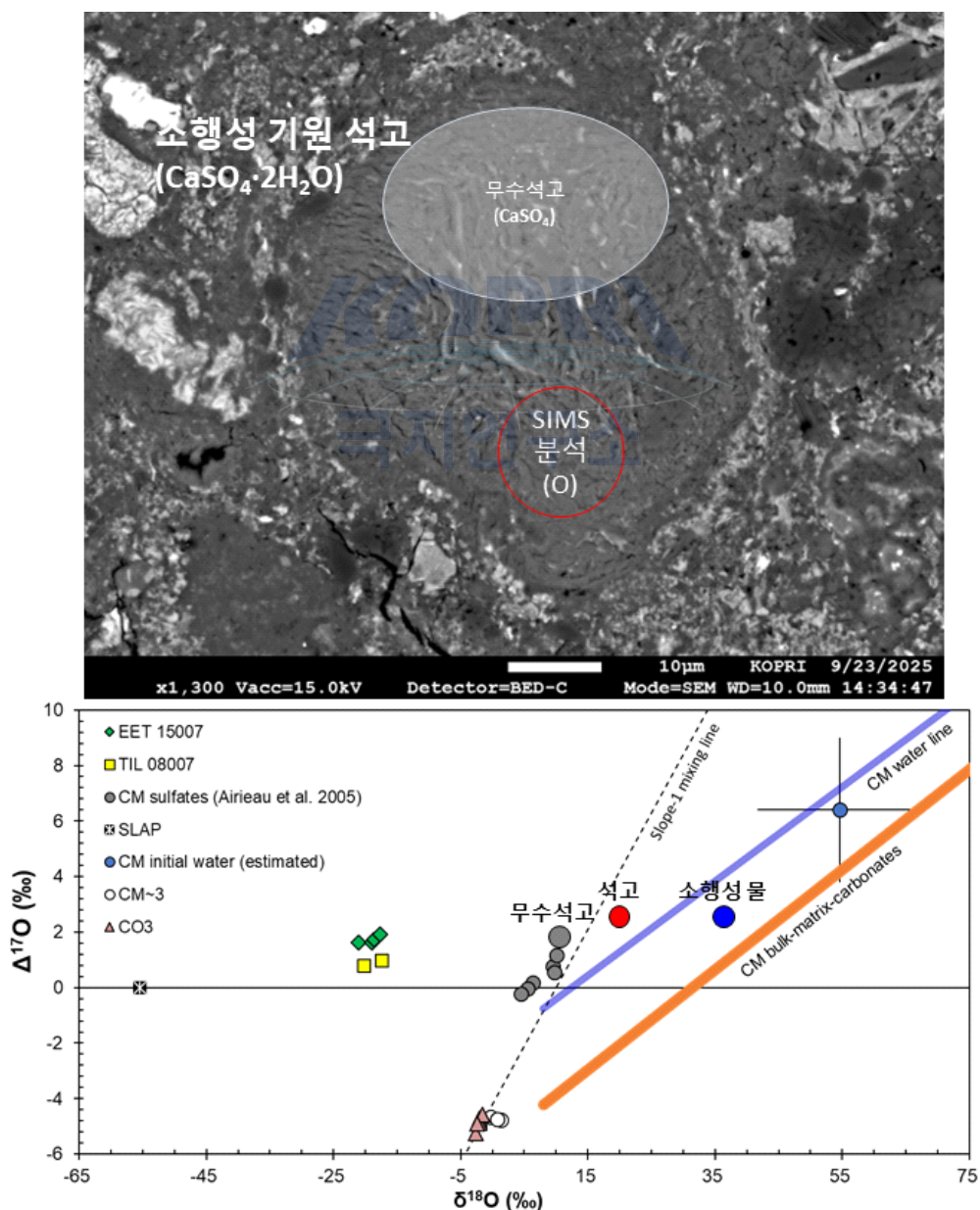


그림 47. CM 콘드라이트 EET 15007 석고의 산소 동위원소 분석 결과

석고 내의 구조수(즉, 소행성의 물)의 산소동위원소 조성은 석고와 석고를 탈수시킨 무수석고의 산소동위원소 조성으로부터 구할 수 있다. 산소동위원소 비를  $R$ 이라 한다면,

$$R_{gyp} = \frac{4}{6} \alpha_{SO_4} R_{SO_4} + \frac{2}{6} \alpha_{H_2O} R_{H_2O}$$

여기서  $\alpha_{SO_4} = 1$ ,  $\alpha_{H_2O}$ (석고와 물의 평형분별계수)는 소행성에서 수성변질이 있을 때의 온도 범위에서는 약 1.0035이다. 그럼,

$$R_{gyp} = \frac{4}{6} R_{SO_4} + \frac{2}{6} \times 1.0035 R_{H_2O}$$

따라서,

$$R_{H_2O} = \frac{3}{1.0035} R_{gyp} - \frac{2}{1.0035} R_{SO_4}$$

이다.

만약 CM 콘드라이트의 석고를 SIMS로 분석해 얻은  $\delta^{18}O = 20$ ,  $\delta^{17}O = 13$ 이고, 전자 빔으로 탈수시킨 무수석고를 분석해서  $\delta^{18}O = 10$ ,  $\delta^{17}O = 7$  이라면, 우리는 위의 식으로부터 소행성의 물의  $\delta^{18}O = 36.4$ ,  $\delta^{17}O = 21.4$ 를 얻을 수 있다.

## 제 4 장 종합 전략 및 중장기 로드맵(5년)

### 제 1 절 연구과제제안서(안)

#### 1. 연구의 필요성 및 국내외 동향

##### 가. 태양계 물 기원 규명의 중요성

지구의 바다, 화성의 고대 호수, 목성·토성계 얼음 위성 등의 물의 기원은 행성과학의 핵심 질문이다. 혜성, C형 소행성 등이 후보로 제시되어 왔으나, 수소·산소 동위원소 조성(예: D/H 비,  $\delta^{18}\text{O}-\delta^{17}\text{O}$ )의 비교 결과 지구 해양과 완벽히 일치하는 경우는 드물었다. 이러한 불일치는 지구 물의 주요 공급원이 혜성보다 탄소질 소행성일 가능성을 시사한다(Alexander et al., 2012).

##### 나. CM 콘드라이트의 역할

탄소질 콘드라이트인 CM 콘드라이트는 풍부한 수화광물과 유기물, 황산염·탄산염 등의 2차 광물을 포함하며, 초기 태양계 소행성에서의 저온 수성 변질 기록을 보존하고 있다. 실제로 Murchison, Cold Bokkeveld 등 다수의 CM 콘드라이트에서 석고( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )가 확인되었는데(Fuchs et al., 1973; Lee, 1993), 이것이 모체 소행성에서 형성된 것인지 낙하 후 지구풍화로 생성된 것인지가 논쟁의 대상이다.

##### 다. 연구 공백

지금까지 CM 콘드라이트 내 석고에 대한 다중 동위원소 분석 사례는 거의 없었다. 일부 연구에서 석고 황산염의 산소 동위원소가 지구 기원의 황산염과 다른 비지구적  $\delta^{17}\text{O}$  이상을 보인다고 보고되었다(Airieu et al., 2005). 그러나 석고 구조수의 수소·산소 동위원소( $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ )와 황 성분의 다중 동위원소( $\delta^{34}\text{S}-\delta^{33}\text{S}$ )를 모두 포괄한 종합적인 데이터는 전무하며, 운석 석고의 형성 조건을 실험과 모델링으로 재현한 시도도 미비한 실정이다.

##### 라. 국내외 연구 동향

최근 Ryugu 및 Bennu 소행성 샘플 회수 임무를 통해 회수된 시료의 분석에서, 탄소질 소행성 내부의 저온( $<70^\circ\text{C}$ ) 수성 변질 조건이 직접 규명되고 있다. 예를 들어 Ryugu 시료의 미량 황산염에서 질소·황 동위원소의 이상치(anomaly)가 발견되어, 이는 분자운에서 자외선 광화학에 의해 형성된 무거운 황 동위원소의 저장소가 있었음을 보여준다(Bose et al., 2024). 이러한 동위원소 이상은 기존의 CM 콘드라이트에서 간접 추정되던 것을 직접 입증한 사례로, 다중 동위원소 분석의 과학적 가치를 부각시키고 있다. 한편 CM 콘드라이트와 Ryugu/Bennu 소행성 간 유사성으로 인해, 운석 연구가 회수 시료 해석에 필수적이라는 분석도 제시되었다(Suttle et al., 2021). 국내에서도 우주항공청의 우주탐사 로드맵에 근거한 우주물질 시료 분석에 대한 관심이 증가하고 있다. 이러한 흐름 속에 CM 콘드라이트 석고의 다중 동위원소 연구는 행성 물



기원 규명과 향후 화성 샘플 회수 임무(Mars Sample Return, Tianwen-3)에 기여할 중요한 연구로 주목받을 것이다.

## 2. 연구 목표

### 가. 최종 목표

CM 콘드라이트 내 석고의 수소(H/D), 산소( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\Delta^{17}\text{O}$ ), 황( $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\Delta^{33}\text{S}$ ) 동위원소를 마이크로 미터 스케일에서 동시 분석하여, 해당 석고가 지구 풍화 산물인지 소행성 기원(수성 변질)인지 판별한다. 나아가 석고 구조수에 함유된 물을 직접 분석함으로써 소행성 내 존재했던 물의 동위원소 조성(D/H,  $\delta^{18}\text{O}$ )을 직접 복원하는 것을 목표로 한다. 이러한 분석 결과를 저온 수성 변질 실험 및 PHREEQC 수리지구화학 모델링과 연계하여 소행성 내부에서 석고가 형성될 수 있는 구체적 조건(pH, 온도, 산화환원 등)을 규명한다. 그리고 지구의 동위원소 조성과의 비교를 통해 지구형 물의 기원을 추적하고, 달과 화성의 시료 회수 임무를 대비한 분석기술을 확립한다.

### 나. 정량적 목표 및 주요 지표

#### 1) 동위원소 판별 한계 수치

운석 석고의 기원을 판별할 수 있는 동위원소 임계값을 도출 (예:  $\Delta^{17}\text{O} \geq +0.3\text{‰}$ 이면 지구밖 기원). 이를 위해  $\delta\text{D}$  정확도  $\pm 5\text{--}10\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} \pm 1\text{‰}$ ,  $\Delta^{17}\text{O} \pm 0.1\text{‰}$ ,  $\delta^{34}\text{S} \pm 0.2\text{‰}$  수준의 정밀도 확보가 목표이다.

2) 데이터셋 구축: 5개 이상 서로 다른 CM 콘드라이트에서 석고 다중 동위원소 데이터셋 확보 ( $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}$ - $\Delta^{17}\text{O}$ - $\delta^{34}\text{S}$ - $\Delta^{33}\text{S}$ ). 이를 통해 운석-소행성-지구 간 물질순환 비교 프레임워크를 구축하고, 결과를 행성 물 기원 모델에 정량적으로 연결

3) 실험·모델링 재현: PHREEQC 모델링과 저온 실험을 통해 석고 형성 가능한 pH-T-Eh 조건 범위를 도출하고, 실험 결과와 합치되는지 확인. 예를 들어 pH ~8, T ~50 °C에서 석고가 최대 생성됨을 증명하고, 이 조건에서 형성된 석고의 동위원소 조성이 실제 운석 값과 일치하는지 검증

4) 판별 프레임워크 완성: 이상의 분석·실험 결과를 종합하여 “소행성 vs 지구 기원 석고 판별 프레임”을 제시한다. 해당 프레임에는 다중 동위원소 지표 조합(예:  $\Delta^{17}\text{O} + \delta\text{D}$  수준)과 광물 산출 양태(예: 운석 내 충전맥 동반 여부) 등이 포함되며, 이로써 향후 회수 시료나 다른 운석의 수성작용 여부를 식별할 수 있도록 한다.

## 3. 연구 내용 및 방법

### 가. 분석 기법별 연구 내용

본 연구에서는 Raman 분광, XRD, SEM-EDS, EPMA, (Cryo)NanoSIMS, IRMS, XANES 등을 종합적으로 활용하며, 각 기법의 목적·조건·예상 성과는 다음과 같다.

#### 1) Raman 분광

운석 내 황산염 광물을 비파괴적으로 동정하기 위한 기법이다. 532 nm 레이저 Raman으로 석고의 특징적  $\text{SO}_4$  진동 피크( $1,008\text{ cm}^{-1}$ )와 소석고 또는 무수석고의 피크를 구분한다.

→ 기대 성과: 시료 준비 전 단계에서 석고 존재 여부 및 상태(수화 정도)를 확인하여 이후 정밀 분석 대상을 선정

2) X선 회절 (XRD): Raman과 보완적으로, 시료의 분말 XRD를 통해 Ca-황산염 상(phase)을 정량 분석한다. 내부 표준(Si 분말)을 활용하여  $2\theta$  오차  $\pm 0.02^\circ$  로 격자상수를 결정하고, 석고, 소석고, 무수석고를 정량 식별한다.

→ 기대 성과: 운석 내 황산염 광물의 광물학적 형태 파악 및 석고의 양을 정량화하여 다중 동위원소 분석 시료 선별

3) SEM/EPMA: 주사전자현미경과 전자현미분석(EPMA)을 통해 운석 박편 내 석고의 산출 위치와 화학조성을 분석한다. 석고의 산출 양태와 미세구조를 관찰하고, Ca, S 맵을 작성하여 분포를 확인한다. EPMA 정량분석으로 석고의 조성(특히 미량 염소 등 불순물)과 연관 광물 조성을 측정한다.

→ 기대 성과: 석고가 균열 충전물로 산출되는지, 주변에 황화물 또는 탄산염 광물이 공존하는지 등 지질학적 문맥을 확보하여 석고 형성 환경 추론에 활용.

4) (Cryogenic) NanoSIMS: 일본 북해도 대학의 Cryo-SIMS 장비를 활용, 저온 보존 상태에서 석고 입자의 동위원소 조성을 마이크로미터 스케일에서 측정한다. 시료를 약  $-50^\circ\text{C}$  로 유지하여 석고의 구조수를 유지한 채, 이차이온 질량분석으로 산소 3동위원소( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ), 수소 동위원소(H, D), 황 동위원소( $^{32}\text{S}$ ,  $^{33}\text{S}$ ,  $^{34}\text{S}$ , 가능하면  $^{36}\text{S}$ 도 시도)를 동시에 측정한다. 특히  $\delta^{17}\text{O}$ 와  $\delta^{33}\text{S}$  같은 비질량분별 이상치까지 검출하며, 공간해상도가 높아 개별 석고 입자의 내부-외부 변화도 분석 가능하다.

→ 기대 성과: 석고 각각의 동위원소 “지문(fingerprint)” 확보. 예를 들어,  $\delta^{17}\text{O}$  값으로 소행성 유체의 산소 공급원을 추론하고,  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 로 물의 기원(혜성 유래 vs 원시 소행성 수분)을 제시하며,  $\delta^{34}\text{S}-\delta^{33}\text{S}$ 로 황의 광화학 기원을 평가

5) IRMS: SIMS 결과를 벌크 수준에서 교차검증하기 위해, 콘드라이트 황산염을 수 mg 단위로 채취 후 분석한다. 값이 알려진 표준물질과 함께  $\delta^{18}\text{O}$ 와  $\delta^{17}\text{O}$ 를 측정하여 VSMOW 기준으로 보정한다.

→ 기대 성과: SIMS vs IRMS 간 동위원소 데이터의 일치도를 확인하여 신뢰도를 높이고, 대량시료 기준의 평균 조성을 확보한다.

6) XANES: 방사광 가속기 XANES를 활용하여 석고 및 부존 광물, 유기물 내 황의 산화상태와 결합 환경을 조사한다. 특히 황 K-흡수단 근처 스펙트럼을 통해 황의 산화상태를 지도화한다. 칼슘의 XANES 분석도 시도하여 석고 형성 기작을 제약한다.

→ 기대 성과: 콘드라이트 내부에서 황 화합물들의 상호전환 관계를 규명하고, 석고 형성 과정에서 황화물→황산염 산화가 있었음을 직접 증거로 제시. 아울러 XANES로 검출된 유기황(thiol 등) 존재 여부를 확인하면, 초기 유기물 분해 산물과 석고의 연관성도 평가할 수 있을 것이다.

나. 모델링 및 실험: 분석 결과를 해석하고 예측력을 높이기 위해 지구화학 모델링과 저온 수성 변질 실험을 병행한다.

1) PHREEQC 수리지구화학 모델링: USGS의 PHREEQC 프로그램을 이용하여 저온 수성 변질 환경에서의 광물 평형을 시뮬레이션한다. 초기 조건으로 CM 모일석 조성 (예: FeS(트롤라이트)와 CaCO<sub>3</sub>(방해석)의 공존 시스템) 및 물-암 비(W/R)를 설정하고, 온도 0-100 °C, pH 6-10 범위에서 황화물 산화에 따른 용액 조성 변화를 모사한다. 이때 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도 증가와 Ca<sup>2+</sup> 용출 정도에 따라 석고의 포화도를 계산하고, 동시에 방해석 등 탄산염과의 경쟁적 석출 여부도 평가한다.

→ 기대 성과: 석고 안정영역(stability field)을 (pH-온도-Eh) 공간에서 도출하여, 소행성 내부에서 석고가 형성될 수 있는 조건의 이론적 범위를 제시한다. 예를 들어 모델 결과 pH ~8, T <50 °C 구간에서만 석고 포화도가 1 이상으로 올라간다면, 이는 해당 조건에서만 석고가 침전되었음을 의미한다. 이러한 결과는 운석 분석으로 추정된 과거 모체 유체의 pH (~8) 및 저온 환경 가설과 부합하는지 검증할 수 있다.

2) 저온 수성 변질 실험: 모델링을 실험으로 검증하기 위해 모사 실험을 수행한다. 항온 교반 반응기에 FeS(황화철)와 CaCO<sub>3</sub>(탄산칼슘) 혼합시료를 넣고, 초순수를 가하여 비율 W/R=10:1 정도의 슬러리 상태로 만든다. 용기 내 온도는 0-80 °C (빙점 부근~난용성 범위)로, 용액 pH는 7-9로 조절한 뒤 (NH<sub>4</sub>OH/CO<sub>2</sub> buffer 등 사용) 수 주간 반응을 진행한다. 일정 간격으로 용액을 샘플링하여 용존 Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도를 ICP로 모니터링하고, 실험 종료 후 생성된 고체를 회수하여 Raman/XRD로 생성 광물을 동정한다.

→ 기대 성과: FeS 산화 → 황산염 생성 → CaCO<sub>3</sub>와 반응 → 석고 석출의 일련 과정이 재현될 경우, 소행성 내부 반응 경로를 실험적으로 입증하게 된다. 만약 석고가 형성되면 그 양과 형태를 관찰하고, 추출하여 동위원소 조성( $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ )을 측정해 질량의존 동위원소 분별이 있었는지와 콘드라이트 석고의 조성과의 비교한다. 결과적으로 모델 예측 vs 실제 실험 vs 운석 데이터를 삼각 검증하여 신뢰도를 확보한다. 반대로 석고가 형성되지 않으면, 모체 천체에서 다른 Ca 공급원 또는 열수 조건의 필요성을 시사하게 될 것이다.

다. 판별 프레임 구성 요소

최종적으로 운석 석고가 지구 기원인지 소행성 기원인지를 판단하기 위한 다변량 판별 프레임을 구축한다. 이는 본 연구의 핵심 산출물로서, 다음 요소들을 종합 고려한다.

1) 동위원소 지표

(a) 산소 동위원소 이상치: 석고 황산염의  $\Delta^{17}\text{O}$  값이 +값을 보이면 지구 기원

황산염(대기나 해수 기원,  $\delta^{17}\text{O} \approx 0\text{‰}$ )과 구분.

(b) 수소 동위원소 조성: 석고 구조수의  $\delta\text{D}$ 가 현대 지표수 범위를 크게 벗어나면(예: 매우 낮은 D/H 비), 지구 밖 기원을 시사 (지구 대기수의  $\delta\text{D} \approx -50\text{‰}$  기준)

(c) 황 동위원소 이상치:  $\delta^{34}\text{S}$ - $\delta^{33}\text{S}$  조합이 지구 황 순환상의 질량분별 직선에서 벗어날 경우 (예:  $\delta^{33}\text{S} \neq 0$ ), 초기 태양계 광화학 기원 신호로 해석

## 2) 지질학적 맥락

(a) 석고의 산출 형태: 운석 기질(matrix) 내에 독립적으로 단독 또는 다른 광물을 치환하는 양상으로 존재하면 소행성 내 유체가 흐르며 형성된 증거, 반면 열개를 따라 표면에 피복된 얇은 층이면 지구에서 침투한 물에 의한 2차 침전일 가능성.

(b) 공존 광물: 석고가 지구에서 풍화 생성물과 함께 발견되면 지구 풍화 의심, 탄산염 광물과 공존하면 원시 모체 내 형성 가능성.

2) 모델/실험 부합성: 시료별 유추된 형성 환경(pH, T, W/R 등)이 모델링/실험에서 석고가 형성되는 조건과 일치하는지 검토한다. 예를 들어 특정 콘드라이트의 석고 동위원소 조성이 모델 상 pH 8, T 50 °C 조건 산출물과 일치하면 소행성 내 형성을 강하게 시사하는 반면, 운석의 지구 낙하 후 노출 환경(pH ~5.5 빗물, 대기 O<sub>2</sub> 존재, 남극 환경 지시 등)에서는 모델링에 따라 석고보다 다른 황산염(예: 소석고)이 형성되거나 하는 경우 지구 기원 가능성을 배제할 수 없다.



## 4. 연차별 추진 계획

각 연차별로 시료 확보, 분석 개발, 실험 및 모델링, 데이터 통합 단계를 점진적으로 진행한다. 주요 추진 일정을 아래 표에 요약하였다.

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1차년도(2026) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 시료확보 및 예비조사<br/>국내·해외기관으로부터 CM2 콘드라이트 1~2개 확보</li> <li>- 석고 동정 및 전처리:<br/>시료 중 석고 등 황산염 광물 존재 확인(Raman, XRD) 석고 결정 산출 위치 파악(SEM)</li> <li>- EPMA 조건 최적화:<br/>석고 분석용 EPMA 측정조건(저전류, 빔크기 등) 테스트 및 라만으로 손상 여부 확인</li> <li>- LG-SIMS 파일럿 분석:<br/>일본 북해도 대학의 Cameca ims-1280 등으로 석고의 <math>\delta^{18}\text{O}</math>, <math>\delta\text{D}</math>, <math>\delta^{34}\text{S}</math> 시범 측정</li> <li>- PHREEQC 모델링 착수:<br/>소행성 초기 조성 가정 설정 및 0-50°C 등에서 수성 변질 모사</li> </ul> |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            | <p>초기 실행.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cryo-SIMS 파일럿 분석:<br/>일본 북해도 대학과 공동으로 Cryo-SIMS 이온 이미징 시험, 크라이오 전처리 체계 점검.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 2차년도(2027) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 동위원소 분석기법 확립:<br/>NanoSIMS 및 LG-SIMS를 활용한 석고의 수소·황 동위원소 분석 방법 확립. (예: H/D, 다중 황 동위원소 이차이온 신호 최적화, 표준시료 보정 곡선 작성)</li> <li>- 교차검증:<br/>SIMS 측정값을 벌크 IRMS값과 비교하여 오차 보정.</li> <li>- 저온 변질 실험 개시: 0, 25, 50 °C 등 3가지 온도에서 콘드라이트 모사물 + 증류수 반응 실험 개시(1개월, 3개월 등), 초기 결과에서 석고 생성 여부 확인.</li> <li>- 국제공동연구:<br/>일본 북해도 대학, 한국기초과학지원연구원과 Cryo-SIMS 기술 교류 및 공동분석(1차년도 파일럿 보완)</li> </ul>                                                                                                        |
| 3차년도(2028) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다중 동위원소 데이터셋 완성:<br/>1~2차년도 확보 시료에 대해 H-O-S 동위원소 분석 일괄 완료. 최소 3개 콘드라이트에서 석고의 <math>\delta D</math>, <math>\delta^{18}O</math>, <math>\delta^{34}S</math>, <math>\delta^{17}O</math>, <math>\delta^{33}S</math> 데이터 확보</li> <li>- 통합 비교 및 해석:<br/>동위원소 데이터 + 모델링 + 실험 결과를 종합 비교. 불일치시 모델 및 실험 조건 재조정.</li> <li>- Ryugu/Bennu 1차 비교:<br/>공개된 류구/베누 회수시료 데이터(문헌 또는 공동연구결과)와 데이터 예비 비교. (예: 탄산염 광물과 자철석의 산소/수소 동위원소 등과 대조)</li> <li>- 중간점검: 국내 워크숍 개최, 외부 전문가 자문 통해 연구방향 수정/보완</li> </ul> |
| 4차년도(2029) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 표본군 확대:<br/>추가 CM 콘드라이트 <math>\geq 3</math>종 확보·분석(총 <math>\geq 5</math>개). 콘드라이트간 석고 동위원소 패턴의 공통점 및 차이점 도출</li> <li>- 모델링 정교화:<br/>3차년도까지의 결과를 토대로 소행성 수리화학모델 정교화.</li> <li>- (Nano)SIMS 이온 이미징 심화:<br/>대표 시료를 선정하여 &lt;100 nm 수준 고해상도 동위원소 이미징 실시, 석고 내부 동위원소 조성 분포 파악</li> <li>- 화성 석고 비교:<br/>화성 기원 운석(ALH 84001, EETA 79001 등) 중 황산염 함유</li> </ul>                                                                                                                               |



|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            | 시료 혹은 Mars 로버(큐리오시티) 데이터의 Ca-황산염 특성과 비교하여, 행성간 환경차이 논의                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 5차년도(2030) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기원 판별 기준 완성:<br/>전 시료의 모든 분석 데이터를 통합, 모천체 vs. 지구기원 판별 기준 최종 확립. 도표화 및 표준절차서 제작</li> <li>- 기술 이전 및 확산:<br/>2028년 도입 예정인 한국기초과학지원연구원의 Cryo-NanoSIMS 분석체제로 본 연구 기법을 이양. 관련 표준 운영절차(SOP) 문서화 및 공유</li> <li>- 최종성과물 도출:<br/>논문게재(국제학술지 5편 이상 목표), 데이터공개</li> <li>- 시료 회수 임무 대비:<br/>화성회수시료(MSR/Tianwen-3) 분석제안서 작성, 한국 우주탐사임무 백서에 본 기법 활용방안 제시.</li> </ul> |

## 5. 연구추진체계 및 역할

본 연구는 다학제적 접근이 필요한 만큼, 참여 기관 간 역할 분담과 협력 구조를 명확히 하였다. 특히 시료 확보-분석-실험-모델링-데이터 관리(큐레이션)의 전 주기 협업체계를 구축한다.

가. 극지연구소: 총괄 및 콘드라이트 시료의 전처리, 화학 분석, 동정, 동위원소 분석 중심

프로젝트 전체를 관리하며, 국내 보유 설비(예: IRMS, Raman, XRD 등)를 활용한 동위원소 분석과 광물 분석을 주도. 또한 PHREEQC 모델링 및 데이터 통합 해석의 허브 역할을 수행하며, 참여기관·국제협력 간 일정 조율을 담당. 남극 운석을 확보·보관 중인 극지연구소에서 본 연구에 필요한 CM 콘드라이트 시료를 제공하고, 시료의 전처리 및 보관을 담당. 운석 절단 및 박편 제작, 기본 화학조성 분석 등을 수행하여 시료 특성을 파악한 뒤 연구팀에 배포.

나. 한국지질자원연구원: 저온 실험 담당

수리지구화학 실험 전문성을 바탕으로 저온 수성 변질 실험 설계를 주도. 실험 장비(항온 반응기 등)를 운영하여 석고 생성 실험을 수행하고, 생성물에 대한 XRD/Raman 분석으로 결과를 1차 평가한 후 주관기관과 공유. 실험 파라미터 최적화와 오차 분석을 통해 모델링팀에 피드백을 제공.

다. 한국기초과학지원연구원/일본 북해도대학: 동위원소 분석

NanoSIMS와 LG-SIMS를 이용한 석고의 다중 동위원소 분석법 설계, 데이터 보정, 표준물질 확보. 석고 분석을 위한 Cryo-(Nano)SIMS 분석 전주기 절차 수립(전처리, 시료 이동, 분석 조건 등). 방사광 가속기 XANES 분석 계획 수립 및 분석 수행

## 6. 국제협력 및 일정

국제 공동연구는 전문 장비 활용과 데이터 상호비교를 위해 필수적이다. 본 연구는 아래와 같은 기관들과 협력 일정을 계획하고 있으며, 이는 향후 시료 회수 미션(Hayabusa2, OSIRIS-REx, Mars Sample Return 등)과도 연계된다.

가. 일본 북해도 대학: Cryo-SIMS 분석 협력

1~3차년도(2025-2027년)에 북해도 대학의 Cryo-SIMS 시설을 활용한 공동분석을 실시. 연구책임자 및 공동연구자들이 파견되어 석고 시료의 H-O-S 동위원소 동시 분석 기술을 수립하고, 전주기 분석 절차를 전수받음. 이 협력은 JAXA Hayabusa2 미션의 Ryugu 시료 분석팀과의 교류로 확대되어, 소행성 Ryugu 시료 분석과 해석을 공유.

나. NASA Johnson Space Center: OSIRIS-REx 미션으로 회수된 Bennu 시료의 탄산염·황산염 데이터와 우리 운석 데이터를 교환·비교하여, 소행성 간의 물질 진화 공통점과 차이를 규명. 최첨단 FIB-TEM으로 콘드라이트 내 석고 분석을 수행하여 형성 기작을 규명.

다. ESA/NASA Mars Sample Return 과학팀: 화성 샘플 대비 협력

5차년도(2029년)에 MSR 시료 분석 준비 단계에 한국 측 연구 결과를 공유하고, 화성 황산염 시료 분석 전략 수립에 참여. 화성에서 확보될 황산염의 지구 오염 가능성 평가에 활용하고, 화성 황산염 연구로 화성의 지권-수권-기권 상호 작용 및 화성 물의 기원 규명에 참여.

라. 그 외 국제공동 활용: 이 밖에 영국 Natural History Museum 등 운석 DB 보유 기관과 협력하여 추가 CM 콘드라이트를 확보하고, 한국기초과학지원연구원의 가속기 팀과 협력하여 일본, 미국, 유럽의 싱크로트론(XANES 분석) 시설을 공동 활용을 모색. 중국과의 국제연구협력을 통해 Tianwen-3으로 확보할 화성 시료의 초기 분석에 참여 시도.

## 제 5 장 연구개발 성과의 활용 방안

### 제 1 절 향후 연구 과제 연계 및 기술 고도화

본 연구에서 정립한 석고(gypsum) 기원 판별 프레임( $\delta^{17}\text{O}$ - $\delta^{33}\text{S}$ - $\delta\text{D}$  다중 동위원소 + 산출 위치 구분 + 분광 분석)은 CM 콘드라이트 이외의 CI, CO, 소행성 회수 시료, 화성 시료로 확장 적용이 가능하며, Ryugu · Bennu 시료와의 교차검증을 통해 태양계 초기 수성 화학의 보편성 · 지역성을 동시에 평가할 수 있는 기반이 된다. CM 콘드라이트의 수성 변질이 수화 2차 광물의 지배적 생성과 깊게 연동되고, 그 진화 스펙트럼이 Ryugu · Bennu와 유사하다는 점에서, 본 연구에서 제안하는 분석 방법은 자연스럽게 소행성 시료 해석으로 이어질 수 있다. 따라서 향후 제안하는 과제에서는 다음과 같은 성과 활용 방안을 제시한다.

기술 측면에서는 NanoSIMS-LG-SIMS 연계 루틴을 정규화하여 (i)  $\mu\text{m}$ 급 원소 영상 기반의 내부 보존상 석고 선별 (ii) LG-SIMS 고정밀 O · S 동위원소 점분석 → (iii) IRMS-연계 탈수 실험으로 구조수( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) 보정의 순서를 표준 운영 절차(SOP)로 고도화할 계획이다. 특히 LG-SIMS(IMS-1280)의 산소 동위원소 정밀도(sub-permil)와 안정화된 다검출기 운용은 석고 · 무수석고 표준 간 기질효과 보정 체계를 한층 신뢰성 있게 만들 수 있다. 해당 절차는 박편 분석 자동화와 표준-시료 교차 주기를 통해 장시간 운용의 재현성을 확보할 수 있다.

또한, Ryugu 입자에서 보고된 석고-유기황 공존과 비질량의존 S 동위원소( $\delta^{33}\text{S} > 0$ ) 사례는, 운석 석고 분석에서도 유기물-황화물-황산염 삼자 상호작용을 동시에 지도화해야 함을 시사한다. 이에 따라 NanoSIMS 단계에서 H · O · S- 동시 수집 이온영상을 도입하고, S K-edge XANES로 산화수 분포( $\text{S}^{2-} \sim \text{S}^{6+}$ )를 병치하여 미세환경 산화-환원 구배를 복원하는 통합 해석을 표준화할 것이다.

### 제 2 절 국제 공동연구 및 탐사 미션 참여 가능성

본 연구의 분석 프레임은 시료 회수 임무와의 정합성이 높다. OSIRIS-REx의 Bennu(Bennu) 시료는 수화광물 · 탄소 · 유기물의 존재가 입증되어 있으며, 초기 분석에서 염수(briny) 환경 기원 광물과 생명 기원 분자(아미노산 · 염기류)가 보고되는 등 수성 변질-유기물 연구의 교차 지점을 제공한다. 이러한 자료는 운석 석고의 물-황-탄소 계 추적과 직접적으로 관련된다. 국내 장비-인력을 차기 연구로 조직화하면, 국제 분담 분석(예: 입자 선택, 특정 계열 이온영상, LG-SIMS 교차보정 등)에서 실질적 역할을 수행할 수 있다.

한편 Ryugu 시료의 석고·유기황 동시 보존과 분자운 흔적 + 수성 기원 공존 결과는, 운석 석고의 기원 판별에 참조할 만하다. 특히  $\delta^{17}\text{O}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ 가 규산염 광물과 유사하고  $\delta^{33}\text{S}$ 가 양(+)인 석고 분석 사례는, 분자운 기원의 S 저장고가 모천체 수성변질 중 부분적으로 보존될 수 있음을 보여준다. 이는 CM 석고의 암석지배 유체에서의 침전( $\delta^{17}\text{O}$ 는 양의 값)이라는 고전적 그림과 상보적으로, 황 동위원소에 기반한 다중 기원 혼합 가능성을 연구 설계에 반영해야 함을 시사한다.

### 제 3 절 학문적·교육적 파급효과 및 표준화 산출물

본 연구의 성과는 (i) 동위원소-현미결합 SOP 매뉴얼(시료 준비-코팅-NanoSIMS-LG-SIMS-IRMS 연계), (ii) 표준물질을 통한 보정(gypsum/anhydrite/barite 매트릭스 매칭), (iii) 고정밀 분석을 위한 체크리스트(빔 손상 저감·재현성 기준)와 함께 표준 분석 절차를 공개할 수 있다. 이러한 표준화 산출물은 CM 콘드라이트를 넘어 Bennu·Ryugu, 더 나아가 화성 시료 회수(MSR) 시대의 수화광물-황 동위원소 분석에 폭넓게 적용 가능한 분석 자산이 된다.



## 제 6 장 기대효과 및 향후 연구 방향

### 제 1 절 기술적·산업적 측면의 기대효과

퍼서비어런스 로버가 화성 Jezero 크레이터의 암석 “Cheyava Falls”에서 채취한 코어에서 밝은 칼슘 황산염 맥(흰색 부분)을 관찰하였다. 본 연구에서 개발된 석고 분석 기술은 향후 화성 샘플 회수 임무에도 적용될 수 있는 가능성을 보여준다.

본 연구를 통해 확보한 소행성 수성 변질 광물 분석 기술은 차세대 소행성 시료 회수 임무에서 핵심적으로 활용될 수 있다. 예를 들어, NASA OSIRIS-REx 임무를 통해 2023년에 귀환한 Bennu 소행성 시료에 황산염 광물이 포함되어 있다면, 본 연구의 방법론을 적용하여 그 기원을 규명할 수 있다. 만약 Bennu 시료에서 Ryugu 시료와 유사한 석고 및 황산염의 동위원소 특성이 발견된다면, 카보네이셔스 소행성 전반에 걸쳐 공통적인 미량 황산염 생성 메커니즘이 존재함을 강하게 뒷받침하게 된다.

반대로 Bennu 시료에서 황산염이 전혀 발견되지 않더라도, Ryugu 사례와의 비교를 통해 그 특이성을 강조하고 통계적 논의를 확장할 수 있다. 이러한 비교 연구는 국제 우주탐사 프로그램 참여를 확대하는 기반이 되며, 우리나라 연구진이 NASA, JAXA 등과 협력하여 우주물질 분석 연구에 주도적으로 참여할 수 있는 발판을 마련한다.

#### 1. 화성 샘플 분석 선도

2030년대 중반에 예정된 Mars Sample Return(MSR) 임무를 통해 화성의 토양과 암석이 지구로 회수될 예정이다. 특히 화성 Jezero 크레이터에서는 퍼서비어런스 로버의 관측을 통해 수화황산염(Ca-sulfate) 맥이 다수 존재하는 것이 확인되었으며, 그 기원을 둘러싸고 화성의 물 순환 및 기후 진화에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 현지 로버 장비만으로는 동위원소 분석이 불가능하므로, 샘플을 지구로 가져온 후 정밀 분석을 수행할 필요가 있다.

본 연구에서 개발된 석고 분석법은 화성 샘플의 황산염 광물 분석에 직접 응용될 수 있으며, 이를 통해 화성의 물이 지구의 물과 얼마나 다른지, 혜성 기원의 물이 혼합되었는지, 그리고 대기와의 어떤 동위원소 분별 과정을 거쳤는지를 규명할 수 있다. 이러한 연구는 화성의 고대 거주 가능성을 평가하는 데 직결되는 핵심적인 과학 문제와 관련된다. 따라서 본 연구 성과는 우리나라가 MSR 샘플 과학 분야에 기여할 수 있는 중요한 기반을 제공한다.

아울러, 본 연구는 국내 분석 기술의 자립화라는 측면에서도 중요한 의미를 가진다. 현재까지 우주물질 분석 기술은 해외 장비와 연구 인프라에 대한 의존도가 높았다. 그러나 국내에서 분석 기술을 개발하고 고도화한다면, 장비 및 기법의 원천 기술을 확보할 수 있을 뿐 아니라 잠재적 산업화에도 기여할 수 있다.



## 2. 다분야 파급효과

본 연구에서 제안된 SIMS 기반 분석 기법은 우주물질 연구를 넘어 지구환경 시료 연구에도 폭넓게 응용될 수 있다. 예를 들어, 지구상의 고지층에 잔존하는 황산염 광물의 동위원소 조성을 미세한 공간 범위에서 측정함으로써 당시의 기후 조건이나 미생물 활동과 같은 고대 환경을 해석할 수 있다. 특히 황 동위원소 분석은 생명 활동의 지표로 활용될 수 있으므로, 지구 초기의 생명 기원을 탐색하거나 화성에서의 잠재적 미생물 흔적을 규명하는 연구에 핵심적인 단서를 제공할 수 있다.

본 연구의 방법론은 황, 산소, 수소 동위원소를 동시에 분석할 수 있는 장점을 지니고 있어 이러한 생지화학적 연구에 매우 큰 파급 효과를 미칠 것으로 기대된다.

산업적 측면에서도 응용 가능성이 크다. 황산염 광물이 관여하는 다양한 소재와 공정, 예를 들어 건축 자재로 사용되는 석고보드의 특성 평가나 지하수 황산염 오염의 기원 규명 등에 이 기법을 적용할 수 있다. 이는 분석 서비스 및 장비 개발 분야에서 새로운 시장을 창출할 수 있는 가능성을 제시한다.

## 제 2 절 과학적 측면의 기대효과

### 1. 학설 검증과 패러다임 전환

본 연구는 오랫동안 지속되어 온 “CM 콘드라이트 황산염은 지구 오염 산물”이라는 가설에 정면으로 도전하여, 실제 사례를 통해 모천체 기원 가능성을 검증하였다. 이는 운석학 및 행성물질과학 분야에서 패러다임 전환을 촉발할 수 있는 발견으로 평가된다. 향후 후속 연구를 통해 다수의 운석에서 석고의 외계 기원이 확립된다면, 지금까지 단순한 풍화 산물로 간주되었던 2차 광물들이 사실은 태양계 초기의 귀중한 기록임이 인식될 것이다. 이러한 변화는 운석 보존 및 처리 방식에도 직접적인 영향을 미쳐, 앞으로 남극 운석을 더욱 신속하고 청정하게 다루는 노력으로 이어질 것이다.

### 2. 초기 태양계 화학 진화 연구

석고라는 단일 광물에 대한 다원소 동위원소 분석은 해당 광물이 생성된 화학적 환경(온도, pH, 산화도)뿐만 아니라, 그 생성에 사용된 물의 기원과 진화사를 복원할 수 있음을 보여준다. 산소, 수소, 황 동위원소의 결합 해석을 통해 모천체 유체가 태양계 생성 초기 어느 저수지(예: 태양 성운)에서 유래했는지를 유추할 수 있음을 확인하였다.

이러한 접근법은 기존의 전암 또는 개별 성분 분석으로는 확보하기 어려웠던 입체적인 정보를 제공하며, 행성과학 분야에 새로운 연구 방향을 제시한다. 더 나아가 여러 소행성 시료와 운석들에 대해 다원소 동위원소를 측정하면, 특정 원소의 이상치(예:  $^{33}\text{S}$ ,  $^{15}\text{N}$ , D 등)가 태양으로부터 어느 거리의 소행성까지 분포하는지를 보여주는 분포 지도를 작성할

수 있다. 실제로 Ryugu 사례는 황(S) 동위원소 이상(anomaly)이 태양으로부터 약 3 AU 떨어진 소행성까지 존재한다는 사실을 입증하였으며, 이는 과거 예상보다 분자운 기원 성분의 분포 범위가 훨씬 넓다는 것을 시사하였다.

마찬가지로 산소와 수소의 동위원소 분포 지도를 구축하면, 태양 성운과 외부 성운 물질의 혼합 비율을 추정할 수 있으며, 이를 통해 행성 생성 과정에서 물질 교환이 어디까지 이루어졌는지에 대한 모델을 한층 정교하게 개선할 수 있다. 따라서 본 연구는 초기 태양계 물질의 화학적 진화를 구체적으로 복원해 나가는 여정의 중요한 출발점으로 평가된다.

### 제 3 절 정책·전략적 측면의 기대효과

본 연구에서 추적한 소행성 기원의 물 동위원소 지문은 지구와 화성의 물의 기원을 비교·논의하는 데 중요한 자료로 활용될 수 있다. 기존 연구에서는 주로 수소 동위원소(D/H)에 기반하여 지구 물의 기원을 해석해 왔으나, 앞으로는 산소 동위원소를 함께 고려함으로써 보다 종합적이고 정밀한 해석이 가능해질 것이다.

예를 들어, 지구 해양의 산소 동위원소 값( $\delta^{18}\text{O} \approx 0\text{‰}$ ,  $\Delta^{17}\text{O} \approx 0\text{‰}$ )과 본 연구를 통해 추정된 소행성 유체의 산소 동위원소 값( $\delta^{18}\text{O} \approx +5\text{‰}$ ,  $\Delta^{17}\text{O} \approx +1\text{‰}$ )을 비교하면, 지구 물에 기여한 카보네이셔스 콘드라이트 성분의 상대적 비중을 추정할 수 있다. 만약 두 값이 크게 차이를 보인다면, 지구 물의 주요 공급원이 혜성과 같은 다른 천체였음을 시사할 것이며, 반대로 두 값이 유사하다면 카보네이셔스 소행성이 지구 물의 중요한 공급원이었음을 의미하게 된다.

화성의 경우, 향후 샘플 회수 임무를 통해 확보되는 동위원소 분석 결과를 본 연구의 소행성 데이터와 비교함으로써, 화성 물이 태양계 생성 시 어느 위치의 물질로부터 기원했는지를 추론할 수 있다. 예를 들어, 화성 석고의  $\Delta^{17}\text{O}$ 와  $\delta\text{D}$  값을 측정하여 지구 및 소행성과 비교하면, 화성 물의 주요 공급원이 혜성, 소행성, 혹은 내부 분화 과정에 있었는지를 구분할 수 있다.

이러한 비교 연구는 태양계 행성들의 물의 계통을 추적하는 큰 그림에서 중요한 의미를 가지며, 본 연구는 그 과정에서 한 축을 담당하게 될 것이다.

### 제 4 절 향후 연구 방향 및 계획

#### 1. 추가 운석 분석

본 연구에서는 제한된 수의 시료만을 대상으로 분석을 수행하였으나, 향후에는 분석

대상을 확대할 계획이다. 우선 보유 중인 남극산 CM 콘드라이트, 특히 국내에서 수집된 시료들을 대상으로 석고 또는 기타 황산염 광물의 존재 여부를 조사하여 시료 수를 늘리고 통계적 경향을 파악할 예정이다.

또한 국외 연구 그룹과 협력하여 비교 표본을 확보할 계획이다. 예를 들어, Murchison, Murray와 같은 낙하 운석 및 풍화가 심한 운석들을 대상으로 동일한 분석을 수행함으로써, 풍화 영향을 받은 대조군과 모천체 기원의 순수군을 비교할 수 있다. 이를 통해 석고의 동위원소 조성이 풍화 정도에 따라 어떻게 변화하는지, 운석별 변질 정도에 따라 어떠한 추세를 보이는지를 정량적으로 규명할 수 있을 것이다.

특히 자문 과정에서 제안된 Aguas Zarcas 운석(2019년 코스타리카 낙하)의 경우, 낙하 직후 신속히 수습되어 풍화가 거의 진행되지 않은 시료로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서 얻은 결과와 대비하면 풍화 효과를 분리하여 해석할 수 있으며, 이는 운석 내 석고의 기원을 명확히 구분하는 데 중요한 기준을 제공할 것이다.

## 2. 수소 동위원소 및 다원소 통합 연구

차기 연구에서는 석고의 수소 동위원소(D/H) 분석을 본격적으로 추진할 계획이다. 이를 위해 극지연구소에서 보유 중인 수소 가스 IRMS 장비의 시료 전처리 라인을 개조하여, 석고 시료를 단계별 열분해 방식으로 처리하면서 방출되는 물( $H_2O$ )의  $\delta D$  값을 측정하는 방법을 확립하고 있다. 구체적으로는 약 5 mg 정도의 석고 시료를 진공 라인에 장착한 후 온도를 단계적으로 상승시켜, 낮은 온도(약 100 °C)에서 방출되는 흡착수와 높은 온도(150–200 °C)에서 방출되는 구조수를 분리하여  $\delta D$ 를 측정할 예정이다. 이를 통해 석고의 본래 구조수에 해당하는 수소 동위원소 조성을 확보할 수 있으며, 앞서 획득한 산소 동위원소 자료와 결합하여 물의 2원소 동위원소 조합( $\delta D$  vs.  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{17}O$ )을 도출할 수 있다.

이 조합은 태양 성운과 외부 성운 물질의 혼합 비율을 평가하는 데 유용하다. 예를 들어, 모천체 유체의  $\delta D$ 가  $-300\text{‰}$ 이고  $\delta^{17}O$ 가  $+1\text{‰}$ 이라면, 이는 지구 물( $\delta D \approx 0\text{‰}$ ,  $\delta^{17}O \approx 0\text{‰}$ )이나 혜성 물( $\delta D +1000\text{‰}$  이상)과 뚜렷이 구별되어 독자적인 수분 저장소로 정의될 수 있다.

아울러 황 동위원소( $\delta^{34}S$ ,  $\delta^{33}S$ )는 국내 또는 해외 연구 그룹과 협력하여 SIMS로 측정할 계획이다. 황 동위원소 데이터까지 확보된다면, 단일 석고 결정에서 H, O, S, Ca에 걸친 다원소 동위원소 정보를 통합적으로 얻을 수 있다. 이를 기반으로 모천체 내 광물-유체 상호작용을 정량적으로 모형화할 수 있으며, 예컨대  $\delta^{34}S$ - $\delta^{33}S$  관계를 통해 황화물에서 황산염으로의 전환 여부를 평가하고, O-H 동위원소 조합을 통해 유체 기원과 분별작용 정도를 규명할 수 있다. 더 나아가 Ca 동위원소 분석이 가능해질 경우 석고의 침전 온도 추정도 시도할 수 있을 것이다.

이와 같은 다각적이고 통합적인 접근은 국제적으로도 선도적인 연구로 자리매김할 것이며, 태양계 생성 초기의 물질-유체 상호작용을 구체적으로 이해하는 데 기여할 것으로 기대된다.

### 3. 모델링 및 실험적 재현

향후 연구에서는 분석과 병행하여 석고 생성 메커니즘에 대한 모델링을 추진할 계획이다. 우선 반응 경로 모사를 위해 PHREEQC와 같은 수리지구화학 모델을 활용하여 CM 모천체 유체의 조성을 가정하고, 온도 0~50 °C, 암석-물 함량비(rock/water ratio) 등 다양한 조건에서 어떤 2차 광물이 안정적으로 생성되는지를 시뮬레이션할 예정이다. 이를 통해 석고가 생성되기 위한 임계조건, 즉  $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$  농도 비율, pH, 산화 환원 상태 등을 규명하고, 모천체 내에서 가능한 시나리오와 비교·검증할 수 있을 것이다.

더 나아가 실험적으로 카보네이셔스 콘드라이트의 조성에 근접한 합성물을 제작한 뒤, 이를 저온 조건에서 물과 반응시켜 석고가 생성되는지를 확인하는 연구를 고려하고 있다. 예를 들어  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4$  반응에 주목하여, 소량의 물이 존재하는 조건에서  $\text{SO}_2$ 를 주입하는 실험을 수행할 계획이다. 이는 모천체 내부에 황화물이 기체상으로 존재했을 경우 석고가 생성될 수 있는 가능성을 평가하는 것으로, 일부 운석에서  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (포틀랜드아이트)와  $\text{CaS}$ (황화칼슘)가 동시에 발견된 사례를 참고한 것이다.

만약 이러한 반응 경로를 통해서도 석고 생성이 확인된다면, 모천체 내부의 극미량 수분 환경에서도 석고가 생성될 수 있음을 보여주는 결과가 될 것이다. 이는 곧 황산염 생성 메커니즘에 대한 포괄적 이해를 확립하는 데 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

### 4. 신규 과제 추진

앞서 제시한 연구계획은 신규 과제 제안서에 상세히 반영될 예정이다. 새롭게 기획되는 과제는 5년의 기간 동안 다음과 같은 목표를 설정한다. 첫째, 다양한 운석 및 샘플을 대상으로 석고 동위원소 조사를 수행하여 통계적 분석을 가능하게 한다. 둘째, SIMS 기반 다원소 동위원소 분석법을 고도화하기 위해 SIMS 장비 개선과 표준 시료 확보를 추진한다. 셋째, 이러한 분석 결과를 종합하여 행성 물질 기원에 대한 종합적 모델을 제시한다.

이를 통해 국제 학술지(SCI급) 논문 다수를 발표함으로써 학문적 성과를 창출하고, 학생 및 신진 연구자의 참여를 통해 차세대 전문가 양성을 도모할 계획이다. 아울러 NASA 및 JAXA 연구자들과의 협력을 공식화하여, 필요시 Ryugu와 Bennu 시료의 공동 분석을 제안하고, Mars Sample Return(MSR) 샘플 과학팀과 중국의 텐윈-3호 화성 시료 회수 임무(시료 분석) 참여를 추진하고자 한다.

## 제 7 장 결론

### 제 1 절 연구 요약

본 연구에서는 남극에서 수집된 CM 콘드라이트 내 석고를 대상으로 복합적인 분석을 수행하여, 석고가 소행성 모천체의 물로부터 생성되었을 가능성을 제시하였다. SEM-EDS, EPMA 등 다양한 기법을 통해 석고의 존재와 완전한 수화 상태를 확인하였으며, IRMS 분석을 통해 석고 황산염의 산소 동위원소 조성이 지구 기원과 명확히 구별됨을 증명하였다. 나아가 SIMS를 활용한 혁신적인 in-situ 분석을 통해 석고의 결합수와 황산이 동일한 외계 동위원소 기록을 보일 수 있는 가능성에 대해 조사하였고, 이는 석고에 포함된 물이 실제로 모천체 유체에서 기원할 수 있음을 시사한다. 이러한 결과는 운석을 통해 소행성의 물을 직접 분석할 수 있게 되었음을 의미하며, 지구형 행성 물의 기원을 추적하는 새로운 방법론의 성립을 알리는 중요한 성과이다.

### 제 2 절 과학적·기술적 의의

본 연구는 지금까지 간과되었던 CM 콘드라이트의 미량의 석고에 기록된 정보를 끌어내어 태양계 물질 순환 연구에 새로운 방법론을 제시하고 있다. 기존의 주류 가설과 상반되는 증거를 제시함으로써 학문적 논의를 진전시켰으며, 이는 향후 다수의 검증 연구를 촉발할 것이다. 기술적 측면에서는 석고의 in-situ 동위원소 분석 기법을 확립하여 국내외 어디에도 존재하지 않던 새로운 분석 기법을 개척하였다. 이를 통해 우리나라는 우주물질 분석 분야에서 일부 선진국과 어깨를 나란히 할 수 있는 독자적인 노하우를 확보할 수 있으며, 향후 화성 샘플 분석 등 차세대 우주탐사 과제에 주도적으로 참여할 수 있는 교두보를 마련할 수 있다.

### 제 3 절 국가 R&D 파급효과

본 연구 성과는 단발적인 결과로 그치지 않고, 중장기 후속 연구로 확장하는 자료로 활용할 것이다. 준비 중인 신규 과제에서는 본 연구의 방법론을 발전시켜 다수의 시료를 대상으로 다원소 동위원소 지도를 작성하고, 지구·화성·소행성의 물 구성 성분을 비교하는 거시적 연구로 확장할 계획이다. 이는 국가 우주핵심 기술 개발과 기초과학 발전에 기여할 것으로 기대된다. 또한 본 연구 과정에서 양성된 젊은 연구자들은 향후 해당 분야의 전문 인력으로 성장하여, 국내 우주과학 및 지구과학 연구 공동체의 역량 강화에 기여할 것이다.



## 제 4 절 결론 및 제언

CM 콘드라이트 석고의 동위원소 분석을 통한 소행성 물 조성 추정을 위한 기획 연구를 통해 새로운 연구 목표가 수립되었다. 지구의 물이 어디에서 기원했는가라는 근본적인 질문에 답을 찾는 과정에서, 태초의 물과 유기물이 풍부한 소행성 내부에서 성장한 작은 석고 결정이 오늘날 중요한 단서로 작용하고 있다는 사실은 운석 시료의 과학적 파급효과를 잘 보여준다. 앞으로 이 방향의 연구가 지속적으로 발전하여 태양계 생성 초기의 “물의 기원과 진화”를 이해할 수 있게 되기를 기대한다. 본 기획보고서가 후속 연구계획의 수립과 추진에 중요한 토대가 될 것이다.



## 참고문헌

- Airieau S. A., Farquhar J., Thiemens M. H., Leshin L. A., Bao H., and Young E. (2005) Planetsimal sulfate and aqueous alteration in CM and CI carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 4167–4172.
- Alexander B., Thiemens M. H., Farquhar J., Kaufman A. J., Savarino J., and Delmas R. J. (2003) East Antarctic ice core sulfur isotope measurements over a complete glacial–interglacial cycle. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 108, 4786.
- Asakawa H., Sazaki G., Nagashima K., Nakatsubo S., and Furukawa Y. (2016) Two types of quasi–liquid layers on ice crystals are formed kinetically. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 113, 1749–1753.
- Bang J., Shoaib M. A., Choi C. H., and Kang H. (2017) Efficient thermal reactions of sulfur dioxide on ice surfaces at low temperature: A combined experimental and theoretical study. *ACS Earth Space Chem.* 1, 503–510.
- Bauska T. K., Walters G., González F., and Hodell D. A. (2018) Online differential thermal isotope analysis of hydration water in minerals by cavity ringdown laser spectroscopy. *Anal. Chem.* 90, 752–759.
- Berrens M. L., Calegari Andrade M. F., Fourkas J. T., Pham T. A., and Donadio D. (2025) Molecular fingerprints of ice surfaces in sum frequency generation spectra: A first–principles machine learning study. *JACS Au* 5, 1173–1183.
- Bishop J. L., Lane M. D., Dyar M. D., King S. J., Brown A. J., and Swayze G. A. (2014) Spectral properties of Ca–sulfates: Gypsum, bassanite, and anhydrite. *Am. Mineral.* 99, 2105–2115.
- Bose M., Root R. A., and Pizzarello S. (2017) A XANES and Raman investigation of sulfur speciation and structural order in Murchison and Allende meteorites. *Meteorit. Planet. Sci.* 52, 546–559.
- Bose M., Reddy V., Marshall J. R., Piani L., Kebukawa Y., Iwata N., Sugita S., Lauretta D. S., and Watanabe S. (2024) Evidence of both molecular cloud and fluid chemistry in Ryugu regolith. *Sci. Adv.* 10, eadp3037.
- Buch V., Milet A., Vlčha R., Jungwirth P., and Devlin J. P. (2007) Water surface is acidic. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 104, 7342–7347.
- Buch V., Groenzin H., Li I., Shultz M. J., and Tosatti E. (2008) Proton order in the ice crystal surface. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 105, 5969–5974.
- Cowie B. R., and Johnston D. T. (2016) High–precision measurement and standard calibration of triple oxygen isotopic compositions ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{17}\text{O}$ ) of sulfate by F2 laser fluorination. *Chem. Geol.* 440, 50–59.
- Evans N. P., Turchyn A. V., Gazquez F., Bontognali T. R. R., Chapman H. J., and Hodell D. A. (2015) Coupled measurements of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  of hydration water and salinity of fluid inclusions in gypsum from the Messinian Yesares

- Member, Sorbas Basin (SE Spain). *Earth Planet. Sci. Lett.* 430, 499–510.
- Fabre S., Beche E., Esvan J., Thebault Y., Munsch P., and Quitte G. (2024) Iron and sulfur secondary phases as proxies of aqueous alteration on chondrite parent bodies. *ACS Earth Space Chem.* 8, 174–193.
- Fuchs L. H., Olsen E., and Jensen K. J. (1973) Mineralogy, mineral–chemistry, and composition of the Murchison (C2) meteorite.
- Fujiya W. (2018) Oxygen isotopic ratios of primordial water in carbonaceous chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.* 481, 264–272.
- Fujiya W., Ikeda S., Ito M., Uesugi M., Yabuta H., and Tachibana S. (2023) Carbonate record of temporal change in oxygen fugacity and gaseous species in asteroid Ryugu. *Nat. Geosci.* 16, 675–682.
- Gazquez F., Evans N. P., and Hodell D. A. (2017) Precise and accurate isotope fractionation factors ( $\alpha^{17}\text{O}$ ,  $\alpha^{18}\text{O}$  and  $\alpha\text{D}$ ) for water and  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (gypsum). *Geochim. Cosmochim. Acta* 198, 259–270.
- Gazquez F., and Hodell D. A. (2022) Preservation and modification of the isotopic composition ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  and  $2\text{H}/1\text{H}$ ) of structurally–bound hydration water of gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) in aqueous solution. *Geochim. Cosmochim. Acta* 337, 73–81.
- Geilfus N.-X., Galley R. J., Cooper M., Halden N., Hare A., Wang F., Sørensen D. H., and Rysgaard S. (2013) Gypsum crystals observed in experimental and natural sea ice. *Geophys. Res. Lett.* 40, 6362–6367.
- Hazen R. M., and Morrison S. M. (2021) An evolutionary system of mineralogy, Part V: Aqueous and thermal alteration of planetesimals (~4565 to 4550 Ma). *Am. Mineral.* 106, 1388–1419.
- Hiroi T., Yabuki A., Usui T., and Imae N. (2021) UV–visible–infrared spectral survey of Antarctic carbonaceous chondrite chips. *Polar Sci.* 29, 100723.
- Hong J., Tian Y., Liang T., Liu X., Song Y., Guan D., Yan Z., Guo J., Tang B., and Cao D. (2024) Imaging surface structure and premelting of ice Ih with atomic resolution. *Nature* 630, 375–380.
- Iizuka T., Shibuya T., Hayakawa T., Yokoyama T., Gautam I., Haba M. K., Ito K. T. M., Hibiya Y., Yamaguchi A., Abe Y., Allon J., Alexander C. M. O. D., Amari S., Amelin Y., Bajo K.-i., Bizzarro M., Bouvier A., Carlson R. W., Chaussidon M., Choi B.-G., Dauphas N., Davis A. M., Di Rocco T., Fujiya W., Fukai R., Hidaka H., Homma H., Huss G. R., Ireland T. R., Ishikawa A., Itoh S., Kawasaki N., Kita N. T., Kitajima K., Kleine T., Komatani S., Krot A. N., Liu M.-C., Masuda Y., Motomura K., Moynier F., Nagashima K., Nakai I., Nguyen A., Nittler L., Pack A., Park C., Piani L., Qin L., Russell S., Sakamoto N., Schönböckler M., Tafla L., Tang H., Terada K., Terada Y., Usui T., Wada S., Wadhwa M., Walker R. J., Yamashita K., Yin Q.-Z., Yoneda S., Yui H., Zhang A.-C., Nakamura T., Naraoka H., Noguchi T., Okazaki R., Sakamoto K.,

- Yabuta H., Abe M., Miyazaki A., Nakato A., Nishimura M., Okada T., Yada T., Yogata K., Nakazawa S., Saiki T., Tanaka S., Terui F., Tsuda Y., Watanabe S.-i., Yoshikawa M., Tachibana S., and Yurimoto H. (2025) Late fluid flow in a primitive asteroid revealed by Lu–Hf isotopes in Ryugu. *Nature* 646, 62–67.
- Jenkins L. E., Lee M. R., Daly L., King A. J., Floyd C. J., Martin P.-E., Almeida N. V., and Genge M. J. (2024) Winchcombe: An example of rapid terrestrial alteration of a CM chondrite. *Meteorit. Planet. Sci.* 59, 988–1005.
- Jenkins L. E., King A. J., and Bintang F. (2024) A high-resolution in situ X-ray diffraction study of mineral transitions due to post-hydration heating in CM chondrite meteorites. *Earth Planets Space* 76, 151.
- Jones C. L., and Brearley A. J. (2006) Experimental aqueous alteration of the Allende meteorite under oxidizing conditions: Constraints on asteroidal alteration. *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 1040–1058.
- King A. J., Schofield P. F., and Russell S. S. (2021) Thermal alteration of CM carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 300, 358–392.
- King A. J., Russell S. S., Schofield P. F., and Woolley A. R. (2020) Terrestrial modification of the Ivuna meteorite and a reassessment of the chemical composition of the CI type specimen. *Geochim. Cosmochim. Acta* 268, 73–89.
- Labidi J., Farquhar J., Alexander C. M. O' D., Eldridge D. L., and Oduro H. (2017) Mass-independent sulfur isotope signatures in CMs: Implications for sulfur chemistry in the early solar system. *Geochim. Cosmochim. Acta* 196, 326–350.
- Landaïs A., Barkan E., and Luz B. (2008) Record of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $^{17}\text{O}$ -excess in ice from Vostok, Antarctica during the last 150,000 years. *Geophys. Res. Lett.* 35, L02709.
- Langhammer D., Kullgren J., and Osterlund L. (2020) Photoinduced adsorption and oxidation of  $\text{SO}_2$  on anatase  $\text{TiO}_2(101)$ . *J. Am. Chem. Soc.* 142, 21767–21774.
- Lee M. R. (1993) The petrography, mineralogy and origins of calcium sulphate within the Cold Bokkeveld CM carbonaceous chondrite. *Meteoritics* 28, 53–62.
- Liu J., Fang S., Bing Q., Tao F.-M., and Liu J.-Y. (2016) Theoretical study of the auto-catalyzed hydrolysis reaction of sulfur dioxide. *Comput. Theor. Chem.* 1076, 11–16.
- Losiak A., and VelBel M. A. (2011) Evaporite formation during weathering of Antarctic meteorites—A weathering census analysis based on the ANSMET database. *Meteorit. Planet. Sci.* 46, 443–458.
- Lopez-Buendia A. M., Garcia-Banos B., Urquiola M. M., Catala-Civera J. M., and Penaranda-Foix F. L. (2020) Evidence of a new phase in gypsum-anhydrite transformations under microwave heating by in situ dielectric analysis and Raman spectroscopy. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 22, 27713–

27723.

- McCain K. A., Kappler A., Suga H., Noguchi T., Yin Q.-Z., Kebukawa Y., Fukai R., and Tachibana S. (2023) Early fluid activity on Ryugu inferred by isotopic analyses of carbonates and magnetite. *Nat. Astron.* 7, 309–317.
- Mifsud D. V., Kaňuchov Z., Auriacombe O., Herczku P., Qasim D., Kovács S. T. S., Róz R., Sulik B., Juhász Z., Rajta I., et al. (2025) Cosmic ray irradiation of interstellar ices on sulfur-rich grains: A possible source of sulfur-bearing molecules. *ACS Earth Space Chem.* 9, 1227–1242.
- Murata K.-I., Asakawa H., Nagashima K., Furukawa Y., and Sazaki G. (2016) Thermodynamic origin of surface melting on ice crystals. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 113, E6741–E6748.
- Nakamura T., Tachibana S., Yurimoto H., Uesugi M., Eizo N., et al. (2022) Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples. *Science* 379, eabn8671.
- Nojima Y., Suzuki Y., Takahashi M., and Yamaguchi S. (2017) Proton order toward the surface of ice Ih revealed by heterodyne-detected sum frequency generation spectroscopy. *J. Phys. Chem. Lett.* 8, 5031–5034.
- Nojima Y., Shioya Y., Torii H., and Yamaguchi S. (2020) Hydrogen order at the surface of ice Ih revealed by vibrational spectroscopy. *Chem. Commun.* 56, 4563–4566.
- Pan D., Liu L.-M., Tribello G. A., Slater B., Michaelides A., and Wang E. (2008) Surface energy and surface proton order of ice-Ih. *Phys. Rev. Lett.* 101, 155703.
- Pan D., Liu L.-M., Tribello G. A., Slater B., Michaelides A., and Wang E. (2010) Surface energy and surface proton order of the ice Ih basal and prism surfaces. *J. Phys.: Condens. Matter* 22, 074209.
- Pickering I., Paleico M., Sirkin Y. A. P., Scherlis D. A., and Factorovich M. H. (2018) Grand canonical investigation of the quasi-liquid layer of ice: Is it liquid? *J. Phys. Chem. B* 122, 4880–4890.
- Pople J. A., Santry D. P., and Segal G. A. (1965) Approximate self-consistent molecular orbital theory. I. Invariant procedures. *J. Chem. Phys.* 43, S129–S135.
- Schewe N., Maleki F., Di Liberto G., Gerdes A., Idriss H., Pacchioni G., and Wöll C. (2023) Identification of intermediates in the reaction pathway of SO<sub>2</sub> on the CaO surface: From physisorption to sulfite to sulfate. *Chem. Eur. J.* 29, e202203956.
- Sharp Z. D., and Wostbrock J. A. G. (2021) Standardization for the triple oxygen isotope system: Waters, silicates, carbonates, air, and sulfates. *Rev. Mineral. Geochem.* 86, 179–196.
- Shibuya T., Sekine Y., Kikuchi S., Kurokawa H., Fukushi K., Nakamura T., and



- Watanabe S.-I. (2024) Aqueous alteration in icy planetesimals: The effect of outward transport of gaseous hydrogen. *Geochim. Cosmochim. Acta* 374, 264–283.
- Slater B., and Michaelides A. (2019) Surface premelting of water ice. *Nat. Rev. Chem.* 3, 172–188.
- Stewart J. J. P. (2007) Optimization of parameters for semiempirical methods V: Modification of NDDO approximations and application to 70 elements. *J. Mol. Model.* 13, 1173–1213.
- Suttle M. D., King A. J., Schofield P. F., and Russell S. S. (2021) The aqueous alteration of CM chondrites, a review. *Geochim. Cosmochim. Acta* 299, 219–256.
- Suttle M. D., Hammond S. J., Woolley A. R., Schofield P. F., and Russell S. S. (2022) Alteration conditions on the CM and CV parent bodies – Insights from hydrothermal experiments with the CO chondrite Kainsaz. *Geochim. Cosmochim. Acta* 318, 83–111.
- Van Driessche A. E. S., Canals A., Ossorio M., Reyes R. C., and Garcia-Ruiz J. M. (2016) Unraveling the sulfate sources of (giant) gypsum crystals using gypsum isotope fractionation factors. *J. Geol.* 124, 235–245.
- Vaniman D. T., Martínez G. M., Rampe E. B., Bristow T. F., Blake D. F., Yen A. S., Ming D. W., Rapin W., Meslin P.-Y., Morookian J. M., Downs R. T., Chipera S. J., Morris R. V., Morrison S. M., Treiman A. H., Achilles C. N., Robertson K., Grotzinger J. P., Hazen R. M., Wiens R. C., and Sumner D. Y. (2018) Gypsum, bassanite, and anhydrite at Gale crater, Mars. *Am. Mineral.* 103, 1011–1020.
- Watkins M., VandeVondele J., and Slater B. (2010) Point defects at the ice (0001) surface. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 107, 12429–12434.
- Yi Y. S., Han Y., and Hur S. D. (2021) Reductive adsorption of atmospheric oxidized mercury on ice: Insights from density functional calculations. *ACS Earth Space Chem.* 5, 3170–3181.
- Yeşilbaş M., Vu T. H., Hodyss R., Poch O., Schmitt B., Choukroun M., Johnson P. V., and Bishop J. L. (2025) Geochemical transformations of gypsum under multiple environmental settings and implications for Ca–sulfate detection on Mars. *ACS Earth Space Chem.* 9, 433–444.

## 주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.