

제 출 문

극지연구소장 귀하

미분화운석의 광물 특성 및 극한 환경에서의 실험을 통한 행성의 분화과정 규명

Mineral characterization and investigation of
planetary differentiation through experimentally
designing extreme conditions of meteorites

본 보고서를 “남극 빅토리아랜드 지역 지각 진화 및 행성형성과정 연구(본과
제명)” 과제의 위탁연구 “미분화운석의 광물 특성 및 극한 환경에서의 실험을 통한
행성의 분화과정 규명(위탁과제명)” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2019. 07. 29

(본과제) 총괄연구책임자 : 이 종 익
위탁연구기관명 : 연세대학교
위탁연구책임자 : 이 용 재
위탁참여연구원 : 공 미 혜
“ : 황 희 정
“ : 김 태 현
“ : 방 윤 아
“ : 최 진 혁
“ : 권 소 연

연세대학교

보고서 초록

요 약 문

| | | | | | |
|--|--|--|------------|----------|------|
| 위탁연구과제명 | 미분화운석의 광물 특성 및 극한 환경에서의 실험을 통한 행성의 분화과정 규명 | | | | |
| 위탁연구책임자 | 이 용 재 | 해당단계 참여연구원 수 | 7명 | 해당단계 연구비 | 5천만원 |
| 연구기관명 및 소속부서명 | 연세대학교 지구시스템과 학과 | | 참여기업명 | | |
| 국제공동연구 | 상대국명 : | | 상대국연구기관명 : | | |
| 요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내) | | | | 보고서 면수 | 52 |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ 2D X선 나노 회절 분석은 수 나노 미터에서 수백 마이크로미터의 범위의 결정 크기가 일정한 단일 또는 다중 상(multiphase)의 넓은 영역 맵을 만드는 빠르고 간단한 방법이기 때문에, 마이크로미터 크기의 운석 내 결정 구조 및 광물 동정, 광물 상사 사이의 관계를 2D 시스템을 이용해 이들의 물리적, 화학적 특성을 이해할 수 있고 그를 통한 생성 환경을 유추하는데 중요. ▪ 충격 단계에 의한 그룹화는 광학 현미경으로 결정되는데 관측된 라만 밴드의 이동에 의해 더 충격 단계 정보를 향상. ▪ 본 연구에서 수행한 섭입대에서 지구 내부로 물 운반체 역할을 할 수 있는 광물이 섭입대 조건에서의 물과 광물의 반응에 대한 연구를 통해서 지구 내부의 물 운반 메커니즘을 이해하는데 중요한 의미. ▪ 본 연구에서 수행한 격자 압축 역학과 상전이의 동역학을 100ps 단위로 연구함으로써 레이저 펌프와 XFEL probe의 효율적인 조합을 보여줌. 충격 압축 시 파동의 3상 모두에서 결정구조의 측정을 확립. 또한, 철의 충격 압축 동안 관찰된 입자 크기에 대한 분쇄 효과는 응력의 함수로서 가역 과정을 나타냄. 철의 bcc에서 hcp로의 상전이 압력은 정적 압력에서 확립된 압력과 유사한 것을 밝힘. | | | | | |
| 색 인 어 (각 5개 이상) | 한 글 | 광물학, 방사광가속기, 운석, 극한 환경, 행성 형성 | | | |
| | 영 어 | Mineralogy, Synchrotron, Meteorites, Extreme conditions, Planetary formation | | | |

I. 제 목

미분화운석의 광물 특성 및 극한 환경에서의 실험을 통한 행성의 분화과정 규명

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- (1) 남극에서 발견된 다양한 운석에 대한 광물학적-분광학적 분석을 통해, 새로운 광물상 발견과 물성 연구를 하고자 함.
- (2) 선진국(미국, 일본 등)을 중심으로 남극 탐사 및 운석 연구가 추진되어 왔으나, 운석을 직접 활용한 행성의 형성 및 진화 과정에 대한 극한 환경의 모사 실험 사례는 전 세계적으로 실시된 바가 드뭄.
- (3) 첨단 가속기 시설 활용과 고온-고압의 극한 환경 실험이 접목된 연구를 통해, 운석에서 일어날 수 있는 물성 변화를 관찰하고, 이를 통해 행성의 분화 과정을 규명.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- (1) 광물학적-분광학적 기술을 이용한 미분화운석 및 충격 미분화운석 광물 특성 연구
 - 미분화운석은 지구형 행성 및 소행성의 기본적인 구성요소인 동시에 태양계 생성 초기 당시의 화학적 구성 요소를 현재까지 보존.
 - 과거로부터 현재까지 행성의 진화 및 분화 과정을 이해하는데 중요한 대상 물질.

- 1차적으로 광물학적-분광학적 분석 기술을 적용하여 미분화운석의 기초 자료 수집과 결정학적-분광학적 해석을 수행.

(2) 광물물리 연구를 통한 지구 및 행성 내부 연구 사례

- 지구 내부를 구성하고 있는 물질과 이들의 움직임은 지표의 환경과 지표상의 모든 지질 활동을 규정.
- 지각판의 섭입대는 지표상의 물질이 맨틀로 순환하는 입구이며 그 순환 과정에서 지진과 화산활동 등 다양한 지질 활동이 유발.
- 지구 내부에 해당하는 온도와 압력 조건을 만들어내고 대상 물질의 구조적, 화학적, 그리고 물성의 변화를 관찰하는 것이 광물물리 연구 방법론 활용.
- 특히 지구 내부에는 대기권이나 수권 등 지구 표면에 존재하는 것보다 훨씬 많은 양의 물과 탄소 등 가벼운 성분을 함유하고 있을 것으로 추정.
- 이러한 휘발성 성분들은 지구 형성 초기 분화과정을 거쳐 지표에 확산되었지만, 일정한 양이 끊임없이 지구 내부와 표면 사이를 순환하고 있으며 이러한 순환이 동적인 지구로서의 항상성을 유지.
- 각각의 가벼운 성분들은 안정적으로 암석(광물)에 결합된 형태로 섭입대를 통하여 지구 내부로 운반되며 그 과정 속에 일부는 화산활동을 통하여 다시 지표로 분출된다. 이러한 휘발성 원소들의 지구 내부로의 섭입 과정, 지구 내부에서의 거동 및 분출 과정을 이들의 순환 매개체인 광물물리 연구를 통해 이해.

(3) 지구형 행성의 내부 조건에 해당되는 극한 환경에서의 실험을 통한 미분화운석 구성 물질의 물성 변화 관찰 및 분화과정 유추

- 우주에 존재하는 물질의 상태 중 많은 부분이 초고온, 초고압 상태로 고체와 플라즈마의 중간 정도에 해당.
- 이러한 물질의 상태는 기존의 응집 물리나 플라즈마 통계물리의 표준이론으로 맞지 않음.
- 강력한 X선 레이저를 사용하면 미소한 공간에 이러한 상태를 만들어 물질특성을 연구함으로써 우주에 대해 더 많은 것을 이해할 수 있음.

- 반사 거울을 사용하는 기존의 자유전자 레이저(free electron laser: FEL) 기술은 방사광가속기와 병행하여 20년 간 꾸준히 개발.

- 단, 200 나노미터 이하의 짧은 파장에서는 거울의 반사율이 급격히 떨어져 가시영역 부근의 레이저와 달리 반사 거울을 이용할 수 없어 자기증폭 자발방사(self-amplified spontaneous emission: SASE) 방법이 한계를 극복하는 방법.

- 이러한 원리를 이용하는 4세대 방사광은 그 파장이 원자 크기 수준의 X선이고, 순간 최대 출력이 수백억 킬로와트이며, 가로결맞음(transverse coherency)이 완벽한 레이저.

- 본 연구에서는 이러한 광원을 이용해 지구형 행성의 핵 구성 물질로 알려져 있는 철-니켈 시료를 팔라사이트에서 획득하여, 극한 환경 실험을 진행.

IV. 연구개발결과

(1) 광물학적-분광학적 기술을 이용한 미분화운석 및 충격 미분화운석 광물 특성 연구

- 본 연구에서는 CM, CV 콘드라이트, ureilite, 충격을 받은 ordinary 콘드라이트 등 다양한 환경에서 생성된 (충격)미분화운석을 연구.
- 알루미늄이 풍부한 칼슘 포함 물질(CAI)이 형성된지 500만년 이내에 고온 무수 상 광물들은 탄소질 콘드라이트(carbonaceous chondrite)의 기질(matrix) 즉 모암을 구성하고 있는 수화 광물, 특히 사문석 광물에서 변형.
- 초기 태양계에서의 물(H₂O)의 이용 가능성과 역할, 수성 변질을 이해하기 위해서는 CM의 기원을 밝히는 것이 중요.
- CM 콘드라이트의 주 구성 광물은 olivine, pyroxene이며 magnetite, sulfide, calcite가 10% 미만으로 구성.
- CV 콘드라이트는 olivine, diopside, plagioclase뿐 아니라 chromite, pyrrhotite, Ca-phosphate, taenite가 존재하며 low Ca-pyroxene은 존재하지 않음.

- 충격을 받은 ordinary 콘드라이트는 olivine, pyroxene, feldspar와 같은 주 구성 광물과 chromite, troilite, Fe-Ni metal이 소량 포함.
- 특히, 모암을 구성하고 있는 olivine의 고압 광물인 wadsleyite, ringwoodite가 존재하였으며, olivine과 periclasite가 고온, 고압을 받아 anhydrous phase B가 생성되었고, feldspar가 고온에 의해 분해되면서 jadeite가 존재 (표 1.1).

표 1.1. Carbonaceous chondrite, Ureilite, Ordinary chondrite의 구성 광물과 나노 X선 회절 분석을 통한 (충격)미분화운석의 구성 광물 비교

| Sample | Matrix | Olivine | Orthopyroxene | Spinel | Chromite | Troilite | Fe-Ni metal | Reference |
|-------------------------------|-------------|---------|---------------|--------|----------|----------|-------------|--------------------------|
| QUE 97990 | CM2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Howard et al. 2011 |
| Y 791198 | CM2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Howard et al. 2011 |
| Murchison | CM2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Howard et al. 2011 |
| Murray | CM2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Howard et al. 2011 |
| Mighei | CM2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Howard et al. 2011 |
| ALHA 81002 | CM2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Howard et al. 2011 |
| Nogoya | CM2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Howard et al. 2011 |
| RKP 14005 | CM2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | This study |
| Carbonaceous chondrite | | | | | | | | |
| Mokoia-25 | CV | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Jogo et al. 2013 |
| Y 86009 UH | CV | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Jogo et al. 2013 |
| Mokoia-3 | CV | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Jogo et al. 2013 |
| Allende | CV | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | This study |
| Ureilite | | | | | | | | |
| Y 790981 | Ureilite | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Ogata and Takeuchi, 1991 |
| Y 74123 | Ureilite | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Ogata and Takeuchi, 1991 |
| FRO 100069 | Ureilite | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | This study |
| Ordinary chondrite | | | | | | | | |
| Richardton | Ordinary H5 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Jones et al. 2016 |
| Oro Grande | Ordinary H5 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Jones et al. 2016 |
| EET 14009 | Ordinary H5 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | This study |
| EET 13014 | Ordinary L6 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | This study |
| EET 13019 | Ordinary L6 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | This study |
| TIL 08001 | Ordinary L6 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | This study |

- 화학적 변화가 아닌 충격 유발 변화가 발생한 경우 라만 피크 위치를 분석하는 것은 충격 단계 분류의 참고 자료로 이용될 수 있음.
- 충격 단계에 의한 그룹화는 광학 현미경으로 결정되는데 관측된 라만 밴드의 이동에 의해 더 충격 단계 정보를 향상.

- RRUFF 데이터베이스에서 주요 라만 밴드 위치는 충격을 덜 받은 pyroxene의 경우, 1003 cm^{-1} 에서 1009 cm^{-1} 사이이며, 강한 충격을 받은 pyroxene의 경우, 1007 cm^{-1} 에서 1016 cm^{-1} 사이이다. Enstatite에서 주요 라만 밴드는 1007 cm^{-1} 이며, ferrosilite의 주요 라만 밴드는 990 cm^{-1} 이고, diopside의 경우는 1012 cm^{-1} 에서 나타남.

- Enstatite에서 Fe의 증가는 Mg가 풍부한 pyroxene의 1007 cm^{-1} 을 네거티브 방향으로 밴드 이동을 야기하고, Ca의 증가는 높은 wavenumber로 밴드의 이동을 야기.

- 그러나 본 연구에서 이용한 시료는 주요 밴드의 위치가 1008 cm^{-1} , 1011 cm^{-1} 로 나타나 충격 변형에 의해 야기된 것으로 보임.

- 충격을 덜 받은 olivine의 경우 주요 더블 라만 밴드가 820 cm^{-1} 에서 823 cm^{-1} 에 나타나고, 강한 충격을 받은 olivine의 경우 819 cm^{-1} 에서 825 cm^{-1} , 846 cm^{-1} 에서 859 cm^{-1} 사이로 다양.

- 820 cm^{-1} 과 850 cm^{-1} 의 라만 밴드 위치 이동은 밴드 위치에서 서로 상대적으로 중간 정도의 상관관계를 나타내며, 발생된 결정 격자의 disordering에 따라 충격이 증가하면서 더 높은 밴드 위치로 이동 (표 1.2).

표 1.2. 마이크로 라만분석법을 이용하여 (충격)미분화운석 내 Olivine과 pyroxene의 라만 밴드와 충격 유발에 의한 라만 밴드 위치 변화에 대한 요약

| Shock stage | Mineral type with shock stage | Shock induced peak position shifts of Raman bands of olivines and pyroxenes (cm ⁻¹) | |
|-------------|--------------------------------|---|----------|
| | Investigated bands of olivine | 838-854 | 813-822 |
| S1 | Unshocked olivine | 852 | 821 |
| | Unshocked olivine | 854 | 822 |
| | Unshocked olivine | 854 | 821 |
| S2 | Shocked olivine | 855 (+1) | 823 (+1) |
| | Shocked olivine | 859 (+5) | 826 (+4) |
| S3 and S4 | Strongly shocked olivine | 864 (+10) | - |
| | Investigated bands of pyroxene | 990-1012 | 655-677 |
| S1 | Unshocked pyroxene | - | 660 |
| | Unshocked pyroxene | - | 665 |
| S2 | Shocked pyroxene | 1011 | 668 |
| S3 and S4 | Strongly shocked pyroxene | 1008 | - |
| | Strongly shocked pyroxene | 985 (-5) | - |

- 본 연구에서 수행한 격자 압축 역학과 상전이의 동역학을 100ps 단위로 연구함으로써 레이저 펄프와 XFEL probe의 효율적인 조합을 보여줌.
- 충격 압축 시 파동의 3상 모두에서 결정구조의 측정을 확립.
- 또한, 철의 충격 압축 동안 관찰된 입자 크기에 대한 분쇄 효과는 응력의 함수로서 가역 과정을 나타냄.
- 철의 bcc에서 hcp로의 상전이 압력은 정적 압력에서 확립된 압력과 유사한 것을 밝힘.

V. 연구개발결과와 활용계획

(2) 광물물리 연구를 통한 지구 및 행성 내부 연구 사례

- 본 연구에서 수행한 섭입대에서 지구 내부로 물 운반체 역할을 할 수 있는 광물이 섭입대 조건에서의 물과 광물의 반응에 대한 연구를 통해 지구 내부의 물 운반 메커니즘을 이해하는데 중요한 의미를 가짐.
- 지구 내부의 이산화탄소 저장체 역할을 할 수 있는 광물로 섭입대 조건에서의 이산화탄소와 투각섬석의 반응에 대한 연구는 지구내부의 이산화탄소 운반 메커니즘을 이해하는데 중요한 의미를 가짐.

(3) 3세대 및 4세대 광원을 활용한 지구형 행성의 내부 조건에 해당되는 극한 환경에서의 X-선 실험을 통한 미분화운석 구성 물질의 물성 변화 관찰 및 분화과정 유추

- 하부 맨틀 및 지구 핵의 광물물리 연구에 필수적인 Mbar (대기압 백만 배) 초고압과 5000K 초고온 조건을 구현하기 위한 laser-heating 장치를 갖춘 고압 전용 빔라인의 활용을 통해 연구를 수행.
- 4세대 가속기 선원(XFEL)의 초단파 X-선 펄스(~25 fs)와 레이저 충격을 이용해 동적 고온-고압의 극한 환경 하에 철의 원자단위 동역학적인 변화를 측정함으로써 지구의 동역학과 자기 특성을 이해하고자 함.

(1) 남극 운석에서의 새로운 광물상 발견 및 전문적인 데이터베이스 구축

(2) 극한 환경에서의 실시간 분석을 통한, 새로운 물성 변화 및 변화 과정 규명

(3) 지구형 행성의 초기 과정 및 분화과정에 대한 이해도 증가

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Mineral characterization and investigation of planetary differentiation through experimentally designing extreme conditions of meteorites

II. Purpose and Necessity of R&D

We propose to apply advanced mineralogical and spectroscopic probes on various meteorites collected on the Antarctic area and also to explore them in-situ at high-pressure and high-temperature conditions using 3rd and 4th generation synchrotron facilities to gain insights on the evolution of planets.

III. Contents and Extent of R&D

Through experimentally designing extreme conditions during meteorite impact utilizing mineralogical and spectroscopic examination,

- (1) We propose to build new data base of newly identified minerals and their physical and chemical properties
- (2) We propose to examine shock-induced transformation during meteoritic impact in time and space
- (3) We propose a model of early evolution of planets and later differentiation based on our findings from the above examinations

IV. R&D Results

- (1) Mineral characteristics of chondrites and shocked meteorites using mineralogical-spectroscopic technology
 - The high pressure minerals of olivine, wadsleyite and ringwoodite in the parent rock were present. The olivine and periclase were subjected to high temperature and high pressure to produce anhydrous phase B, and the feldspar was decomposed by high temperature.
 - The grouping by the impact step is determined by optical microscope, and the movement of the observed Raman band further improves the impact level information.
- (2) Case studies of Earth and Planet's interior through mineral physics research
 - In this study, it is important to understand the mechanism of water transport in the earth through the study of the reaction of water and minerals in the subsurface condition of minerals that can act as a water carrier in the subduction zone.
- (3) Inference of differentiation process and the change in the properties of the meteorites through X-ray experiments in extreme conditions corresponding to the internal conditions of terrestrial planets using third- and fourth-generation light sources
 - we show efficient combination of laser pump and XFEL probe By studying the dynamics of lattice compression dynamics and phase transitions in this study in 100 ps increments.

V. Application Plans of R&D Results

- (1) Systematic investigation on meteorites utilizing advanced mineralogical and spectroscopic techniques
- (2) In-situ probe on meteorites at high-pressure and high-temperature conditions

using 3rd and 4th generation synchrotron facilities

(3) New insights on the origin of planets

목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 4 장 연구개발목표 달성도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

제 1장 서론

미분화운석은 지구형 행성 및 소행성의 기본적인 구성요소인 동시에 태양계 생성 초기 당시의 화학적 구성요소를 현재까지 보존하고 있어 과거로부터 현재까지의 행성의 진화 및 분화 과정을 이해하는데 중요한 대상 물질로써 고려되었다. 이러한 사실을 밝히기 위하여 선진국(미국, 일본 등)을 중심으로 남극 탐사 및 운석 연구가 추진되어 왔으나, 운석을 직접 활용한 행성의 형성 및 진화 과정에 대한 극한 환경의 모사 실험 사례는 전 세계적으로 실시된 바가 드물었다. 극한 환경 모사 실험을 위해서는 1차 적으로 광물학적-분광학적 분석 기술을 적용한 체계적인 데이터베이스 구축을 진행한다. 이를 통해 아직 확인되지 않은 새로운 광물 종에 대한 발견과 물성 연구를 기대할 수 있다. 선별된 운석 시료들에 대한 첨단 가속기 시설과 고온-고압 극한 환경에서의 실시간 분석 기술을 접목함으로써 운석 형성 시의 물성 및 변화 과정을 연구함으로써 행성 형성과 진화 과정에 대한 새로운 정보를 제공한다. 또한 운석 충돌 시의 동적 극한 환경 연구도 시도함으로써 지구와 행성의 진화 과정에 대한 이해도 확장한다.

제 2장 국내외 기술개발 현황

남극 운석은 운석이 지구에 낙하하기 전 조성의 보존성이 매우 우수한 편에 속하여, 따라서 일부 국가에서는 1900년대 중반부터 많은 탐사를 통해 연구를 진행해왔다. 이전 연구들을 통해서 지구화학적 자료들이 보고되었고, 많은 운석 자료들은 암석학적인 관점에서 보고가 이루어졌지만, 마이크로 스케일의 광물학적인 실험적 접근 및 운석 시료에 대한 극한 환경에서의 실험은 진행된 바가 매우 드물었다. 하지만 X-선 측정 기술의 발달(3세대 방사광가속기 운영 및 4세대 광원 건설)과 극한 환경을 모사할 수 있는 기기들의 발달로 인하여, 최근 행성의 형성 및 진화 과정을 밝히기 위한 연구들이 시도되고 있다. 이러한 연구들은 지구 내부에 존재할 것으로 추측되는 원소들의 합성물로 많이 시도되었으며, 자연에서 산출된 광물을 이용한 극한 환경(지구 맨틀 및 핵)의 실험은 최근 활발히 진행 중에 있다. 남극의 미분화운석은 행성 형성 초기 물질로 잘 알려져 있으며, 행성의 진화 과정을 밝히기 위한 시료로써 가치가 있으나, 극한 환경과 가속기 시설 활용 연구의 접목 사례는 드문 상황이다. 이와 더불어 기존에 고온-고압 실험을 통해 지구 내부에 존재할 것이라고 추측된 광물 상에 대한 발견과 미확인된 광물 상에 대한 연구도 X-선 측정 기술 발달과 함께 꾸준히 보고되어 오고 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

미분화운석은 지구형 행성 및 소행성의 기본적인 구성요소인 동시에 태양계 생성 초기 당시의 화학적 주성 요소를 현재까지 보존하고 있어 과거로부터 현재까지 행성의 진화 및 분화 과정을 이해하는데 중요한 대상 물질로 1차적으로 광물학적-분광학적 분석 기술을 적용하여 미분화운석의 기초 자료 수집과 결정학적-분광학적 해석을 수행하고자 하였다.

제 1절 Micro-XRF

X선 형광 분석법은 X선원으로부터 발생되어 가속된 전자를 시료에 조사해 각 원소의 안쪽 껍질에 존재하는 전자가 여기된다. 여기된 전자는 들뜬 상태가 되며, 이를 안정화 시키기 위해 바깥 껍질에 있는 전자가 안쪽 껍질을 채우게 된다. 이때 각 껍질의 결합 에너지에 해당하는 에너지가 방출된다. 각 원소마다 특성 X선의 고유한 에너지와 파장을 갖고 있으며, 에너지 값으로 성분 원소의 정성 분석이 가능하고 검출한 X선의 양으로 정량 분석을 할 수 있다.

본 실험은 마이크로 형광측정의 분석기구인 연세대학교 결정학연구실의 M4 Tornado micro-XRF를 사용하였다 (그림 1.2). 마이크로 XRF는 작은 샘플 영역의 분석에 용이한 에너지 분산형 X선 분광기로, 포인트 분석, 라인 스캔 및 면적 분석과 같은 주사 전자 현미경-에너지 분산 분광기(SEM-EDS)와 동일한 기능을 가지지만 독립형 장비이다. M4 토네이도는 원자 번호 11이상(Na 이상)부터 92이하(U 이하)까지의 원소를 식별할 수 있어 지질학적 물질분석에 적합하다. 마이크로 XRF 분광기는 측정시간이 상대적으로 짧고 비파괴적이며 다양한 종류의 물질에 적용할 수 있기 때문에 운석의 특성화 및 분류에 유용한 도구로 사용 될 수 있다. M4 Tornado는 최대 190x160 mm의 평평한 표면이나 거친 표면을 분석 및 매핑할 수 있어 시료 준비(박편 제작)의 필요성이 적다. 운석 시료를 측정할 경우, 시료 전체 원소 분포도를 빠르게 수집하고 상 분포 상태를 쉽게 식별 할 수 있고, 상분포 매핑을 통해 콘드룰이나 CAI와 같은 콘드라이트 성분의 함량을 파악하는데 유용하다.

일반적으로 X선 형광 분석은 20-60 mm의 큰 시료 영역에서 수행된다. 본 연구실의 장비는 polycapillary optic을 장착하여 빔 크기가 20 μm 으로 불균질한 시료, 혹은 관입체, 작은 크기의 입자를 갖는 운석 등을 측정하는데 아주 유용하다 (그림 1.1).

그림 1.1. polycapillary optic이 장착된 micro-XRF의 이미지

1) 원소 분포도

Micro-XRF로 측정된 원소 분포는 다양한 색상을 사용해 표시할 수 있으며 여러 가지 원소를 단일 이미지로 결합해 나타낼 수 있다. 색상조합을 구체적으로 선택해 관심 영역을 강조할 수 있으며, 특정 원소의 조합으로 구성 광물을 구별해 낼 수 있다. 여러 개의 분포도를 하나의 이미지로 결합할 수 있기 때문에 하나의 분포도를 사용하여 여러 광물 상을 식별할 수 있다. 일반적으로 ordinary 콘드라이트에서는 Na, P, S, Ca, Ti, Cr, Ni등의 원소들이 whitlockite(Ca&P), troilite(S), chromite(Cr), ilmenite(Ti), 금속(Ni) 및 사장석(Na)을 식별하는데 사용된다.

2) 상 분포도

상 분포 mapping은 모든 픽셀에 저장된 화학 정보를 사용하여 유사한 강도의 원소 분포도를 나타내고, 이를 이용해 존재량을 결정할 수 있다. 존재량 분석은 전체 광물 구성 및 시료의 입자 크기에 의해 제한된다. 상 분포 mapping은 조성이 약간 다른 별개의 상으로 이루어진 조립질 시료에 가장 적합하다.



그림 1.2. 연세대학교 결정학연구실의 마이크로 X선 형광분석 장치

본 연구에 이용된 미분화운석은 2014년도에 남극 빅토리아랜드 동쪽 해안에 위치한 Mawson 빙하 앞 빙폭의 중앙부에 위치한 Reckling Peak(RKP, 남위 76도 16분, 동경 159도 15분) 지역과 서쪽으로 50km 떨어진 곳에 위치한 Elephant Moraine(EET, 남위 76도 17분, 동경 157도 20분) 지역에서 발견된 미분화운석과 그리고 멕시코의 Allende 지역에서 발견된 미분화운석을 연구하였다. 미분화운석은 극지연구소에서 제작한 박편을 분석하였다 (그림 1.3).

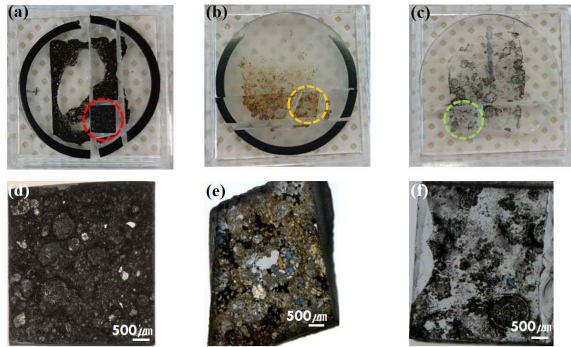


그림 1.3. RKP, EET, Allende 미분화운석의(a, b, c) 박편과 현미경(d, e, f) 이미지

Reckling Peak 14005 (RKP 14005) 운석은 탄소질 콘드라이트(carbonaceous chondrite)로 CM group에 속한다. RKP 14005의 구성 원소 및 원소 분포를 확인하기 위해 XRF를 이용하여 25 μm 간격으로 각 지점마다 60초 동안 노출하여 mapping 실시하였다. RKP 14005의 구성 원소는 Iron (Fe), Silica (Si), Calcium (Ca), Nickel (Ni), Sulfur (S), Magnesium (Mg), Manganese (Mn), Chromium (Cr), Phosphorus (P)이며, 약 500 μm 크기의 콘드룰(chondrule)에 Si, Mn, Cr이 주로 분포하며 Fe도 콘드룰 내 공존하며, matrix는 Ca, P가 주로 분포하며 일부 Ni와 S도 발견되었다 (그림 1.4).

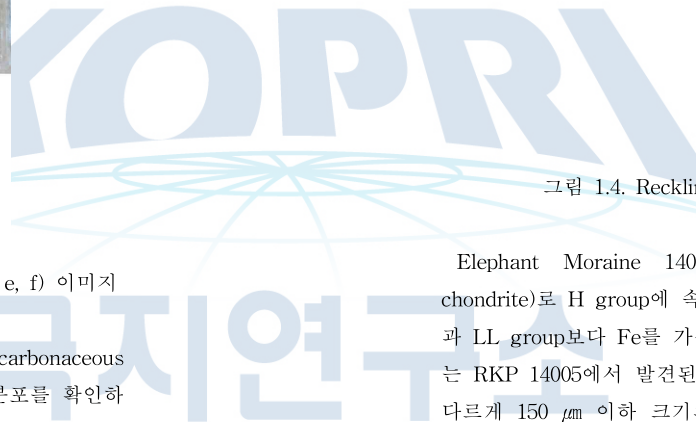


그림 1.4. Reckling Peak 14005의 micro-XRF의 mapping 이미지

Elephant Moraine 14009 (EET 14009) 운석은 보통 콘드라이트(ordinary chondrite)로 H group에 속한다. H group은 다른 보통 콘드라이트 그룹인 L group 과 LL group보다 Fe를 가장 많이 가지고 있는 그룹이다. EET 14009 의 구성 원소는 RKP 14005에서 발견된 원소 중 P를 제외하고 Ti, K가 존재하며 RKP 14005와 다르게 150 μm 이하 크기의 작은 콘드룰로 이루어져 있고, 이러한 콘드룰은 Si와 Mg 혹은 그 외 Fe와 S가 분포하거나 Fe와 Ni가 주로 분포한다 (그림 1.5).

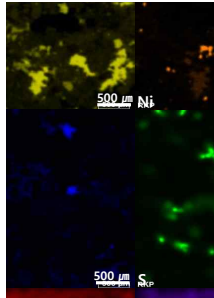


그림 15. Elephant Moraine 14009의 micro-XRF의 mapping 이미지

Allende 운석은 탄소질 콘드라이트(carbonaceous chondrite)로 CV group에 속한다. CV group은 다른 탄소질 콘드라이트에 비해 휘발성분이 적는데 이는 모 소행성이 상당한 열을 받은 것으로 보인다. Allende의 구성 원소는 K를 제외하고 EET 14009와 동일하게 구성되어 있다 (그림 1.6).

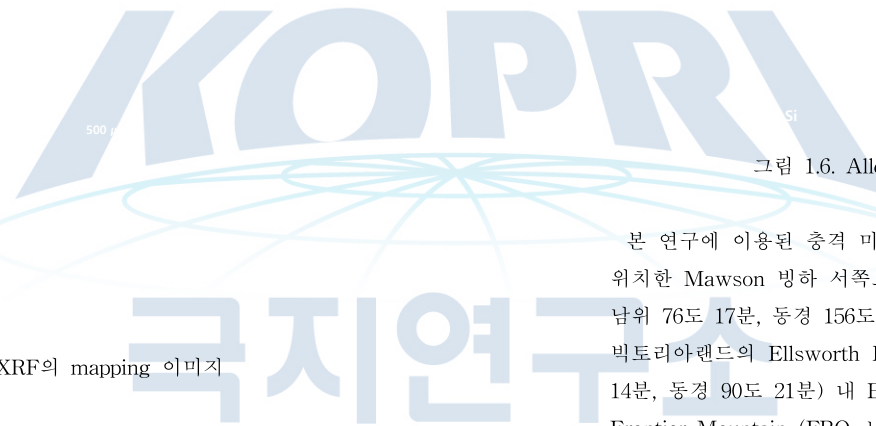


그림 1.6. Allende의 X선 micro-XRF의 mapping 이미지

본 연구에 이용된 충격 미분화운석은 2013년도에 남극 빅토리아랜드 동쪽 해안에 위치한 Mawson 빙하 서쪽으로 50km 떨어진 곳에 위치한 Elephant Moraine(EET, 남위 76도 17분, 동경 156도 27분) 지역에서 발견된 충격 미분화운석과 그리고 남극 빅토리아랜드의 Ellsworth Land 지역에 위치한 Thiel Mountains (TIL, 남위 85도 14분, 동경 90도 21분) 내 Bermel Escarpment 지역에서 발견된 충격 미분화운석과 Frontier Mountain (FRO, 남위 72도 57분, 동경 160도 26분) 지역에서 발견된 충격 미분화운석을 연구하였다. 미분화운석은 극지연구소에서 제작한 박편을 분석하였다 (그림 1.7).

(a) (b) (c) (d)

그림 1.7. (a) EET 13014, (b) EET 13019, (c) TIL 008001, (d) FRO 10069의 박편 이미지

Elephant Moraine 13014는 위도 76°17.115'S, 경도 156°27.207'E인 곳에서 발견되었고 Ordinary chondrite이며 petrology type은 6단계로 용융은 일어나지 않지만 거의 광물 성분이 균질화하고 변성을 받은 것으로 나타났다. 박편 내 구성 원소는 Iron (Fe), Silica (Si), Calcium (Ca), Aluminium (Al), Argon (Ar), Nickel (Ni), Sulfur (S), Manganese (Mn), Chromium (Cr), Potassium (K), Titanium (Ti), Cobalt (Co)이다 (그림 1.8).

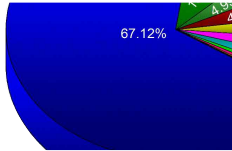


그림 1.8. Elephant Moraine 13014의 X선 형광분석 mapping에 따른 원소 분포 함량 (각 원소의 질량퍼센트는 정성분석으로 정량분석 값과 차이 존재)

중앙 부분의 vein 영역은 Iron, Nickel, Cobalt 등의 금속으로 구성돼 있고, vein 영역 왼쪽과 오른쪽에서 관찰되는 간섭색이 주황색을 띠는 벽면으로 깨진 듯한 부분은 압력변성을 받은 휘석군으로 보인다(Si, Ca 원소조합). 또한 왼쪽 상부의 간섭색이 화려한 부분은 감람석으로 보인다. 원소 분포도를 보면 일부분에서 troilite(FeS), chromite(FeCr₂O₄), ilmenite(FeTiO₃)도 존재하는 것으로 보인다. 대체적으로 압력에 깨진 형태의 세립질로 구성되어 있으며 콘드류이나 refractory inclusion은 잘 관찰되지 않는다 (그림 1.9).

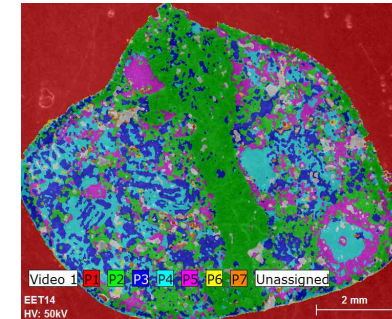


그림 1.9. Elephant Moraine 13014의 상 (phase) 분포도

Elephant Moraine 13019는 위도 76°43.015'S, 경도 158°46.375'E인 곳에서 발견되었고 Ordinary chondrite에 속한다. Petrology type은 6단계이고 L group이다. 박편 내 구성 원소는 Iron (Fe), Magnesium (Mg), Silica (Si), Calcium(Ca), Aluminium (Al), Sulfur (S), Argon (Ar), Nickel (Ni), Manganese (Mn), Chromium (Cr), Potassium (K), Titanium (Ti), Cobalt (Co)이다 (그림 1.10).

그림 1.10. Elephant Moraine 13019의 X선 형광분석 mapping에 따른 원소 분포 함량 (각 원소의 질량퍼센트는 정성분석으로 정량분석 값과 차이 존재)

Vein 영역은 Ni가 많이 분포하고 있으며 vein을 기준으로 양 옆에 바탕은 Si가 대부분 분포하고 Ca와 K도 존재하며, 그 바탕 중간 중간에 S가 존재한다. 대부분의 바탕이 감람석과 휘석으로 이루어진 Fe-Mg silicate로 구성돼 있으며, 중간부의

vein 영역은 Fe, Ni, Co 등의 금속물질 함량이 높다. 본 암석의 바탕, 즉 기질이 되는 부분이 silicate 광물로 이루어져 있기 때문인 것으로 사료된다. 또한 일부 troilite(FeS), chromite(FeCr_2O_4)가 존재하는 것으로 보인다 (그림 1.11).

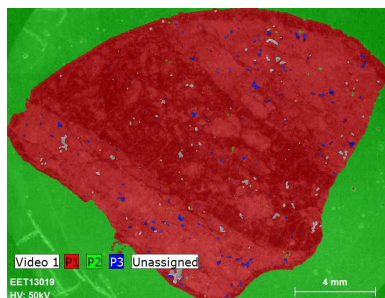


그림 1.11. Elephant Moraine 13019의 상 (phase) 분포도

Thiel Mountains 08001은 Bermel Escarpment의 위도 $85^{\circ}14.262'S$, 경도 $90^{\circ}21.046'W$ 인 곳에서 발견되었다. Ordinary chondrite이며 petrology type은 6단계로 용융은 일어나지 않지만 거의 광물 성분이 균질화하고 변성을 받은 것으로 나타났다. 박편 내 구성 원소는 Iron (Fe), Magnesium (Mg), Silica (Si), Calcium(Ca), Aluminium (Al), Argon (Ar), Nickel (Ni), Sulfur (S), Manganese (Mn), Chromium (Cr), Potassium (K), Titanium (Ti), Phosphours (P)이다 (그림 1.12).

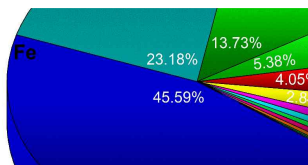


그림 1.12. Thiel Mountains 08001의 X선 형광분석 mapping에 따른 원소 분포 함량 (각 원소의 질량퍼센트는 정성분석으로 정량분석 값과 차이 존재)

박편 내 큰 grain들은 Fe와 Si, Ca등이 분포하고 있으며, grain 안에 작은 점들은 opaque mineral로서 chromite(FeCr_2O_4), troilite(FeS) 등이고, 광물과 광물 사이에 vein은 Fe-Ni metal 등이 분포하는 것으로 보인다.

상 분포도와 원소 분포를 종합해보면, Phase 1은 Fe와 Si의 분포와 유사하고, Phase 3은 Ni의 분포와 유사하며 Phase 6는 S의 분포와 Phase 7은 Cr의 분포와 일치하며 이를 통해 올리빈, 철-니켈 합금, 크로마이트(chromite, FeCr_2O_4), 트로이 라이트 (troilite, FeS)일 것으로 보인다 (그림 1.13).

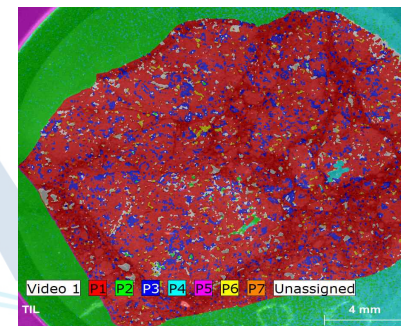


그림 1.13. Thiel Mountains 08001의 상 (phase) 분포도

Frontier Mountain 10069는 위도 $72^{\circ}57.198'S$, 경도 $160^{\circ}26.762'E$ 인 곳에서 발견되었고 primitive Achondrite에 속하며 ureilite group이다. 탄소가 풍부한 초염기성 암으로 충격 변성은 거의 받지 않았다. 박편 내 구성 원소는 Magnesium (Mg), Silica (Si), Iron (Fe), Calcium(Ca), Argon (Ar), Chromium (Cr), Manganese (Mn), Sulfur (S), Potassium (K), Nickel (Ni), Titanium (Ti)이다 (그림 1.14).



그림 1.14. Frontier Mountain 100069의 X선 형광분석 mapping에 따른 원소 분포 함량 (각 원소의 질량퍼센트는 정성분석으로 정량분석 값과 차이 존재)

가운데 영역을 제외한 위쪽 영역과 아래 오른쪽 영역의 큰 grain은 Si와 Fe가 주로 분포하며, 가운데 영역은 Ca, Si가 분포하고 있다. 큰 grain 사이 경계 부분에는 Fe와 S, Ni가 존재한다. 큰 grain은 olivine이고, 가운데 영역은 휘석군이 주를 이루고 있다.

상 분포도와 원소 분포를 종합해보면, Phase 2는 Si 분포와 유사하고 Phase 3는 Fe의 분포와 유사하고, Phase 4는 Ca의 분포와 유사하고, Phase 6은 Ni의 분포와 유사하며, Phase 7은 S의 분포와 일치한다. 각각에 해당하는 주 구성 광물은 pyroxene, olivine, Fe-Ni metal, troilite(FeS)로 보인다 (그림 1.15).

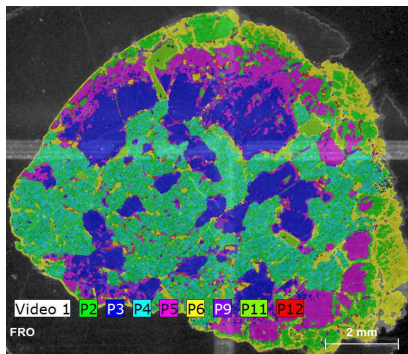


그림 1.15. Frontier Mountain 100069의 상 (phase) 분포도

제 2절 Micro-XRD

방사광(synchrotron radiation)은 상대성 운동을 하는 가벼운 하전입자(charged particle)가 운동 방향에 대해 횡방향(transverse)으로 가속을 받으면 발생 된다. 즉, 저장링에서 전자(electron)나 양전자(positron)가 2극 자장(휨자석)에 노출되면 횡방향의 가속을 받아 궤도가 휘면서 발생 된다. 원형가속기인 3세대 방사광가속기는 피코초 영역의 시간 분해능을 가지며 정적 현상을 규명하는데 이용 된다.

운석은 마이크론 크기의 광물들로 구성되어 있어 높은 공간 해상도와 강한 회절 강도를 검출하는 마이크론 영역의 X-선원이 필요하다. 본 연구에서는 NSRRC (National Synchrotron Radiation Research Center) TPS 21A 빔라인과 APS (Advanced Photon Source) GSECARS 13IDD 빔라인을 이용하였다.

TPS의 경우 여러 파장을 가진 X선인 연속X선 (continuous X-ray) 혹은 백색X선 (white X-ray)이 발생하는데 시료를 X선의 방향에 대해 일정한 방향으로 고정 한 후 백색X선을 쬐어 모든 가능한 X선의 회절이 일어나게 하여 결정의 뒤쪽에서 X선 회절 사진을 찍는 라우에 방법으로 데이터를 얻었다. 반면, APS에서는 특정 파장을 가진 단색X선 (monochromatic X-ray)이 발생하는데 특정 면지수(Miller indices: hkl)를 갖는 원자 평면으로부터 산란되어 나오는 X선은 회절 원뿔 자기 중 한자리에 존재하게 되며 회절 빔의 자리는 산란이 일어나는 원자 평면의 방향에 의해 결정되게 되며 이러한 방식으로 데이터를 얻었다 (표 2.1).

표 2.1. 대만 방사광가속기 (TPS)와 아르곤 방사광가속기 (APS)의 빔라인 제원 비교

| Source | Undulator | Undulator |
|-------------------|------------------------|----------------------------------|
| Energy Range | 5-30 KeV (white beam) | 4.9-45 KeV (Monochromator) |
| Energy Resolution | 10 ⁻⁴ | 10 ⁻⁴ |
| Focused Spot Size | 100 nm × 100 nm | 2 μm × 10 μm |
| Detector | Dectris Pilatus3S-6M | Dectris Pilatus3 X CdTe 1M |
| Technique | X-ray Laue diffraction | Single crystal X-ray diffraction |

1) 대만 방사광가속기

대만 방사광가속기의 TPS (Taiwan Photon Source) 21A 빔라인은 X-선 나노 회절 빔라인이며, 미세구조 분석을 위한 X선 (FORMOSA, FOCUS x-Ray for Micro-Structure Analysis) end station을 가지고 있다. End station은 2D/3D X-ray Laue 회절, 나노 X-ray mapping, X-ray fluorescence/mapping, X-ray absorption spectroscopy 등이 가능하다. 본 연구에서는 Laue 회절과 X-ray fluorescence, SEM을 이용하였다 (그림 2.1).

시료는 가로 5 mm, 세로 5 mm 크기의 박편을 준비하여 시료 홀더에 장착하였으며(그림 2.1b), Laue 회절은 white beam을 이용하였고 에너지 범위는 5-30 KeV이며 Pilatus 6M detector를 사용하였다. 빔 크기는 toroidal focus 미러와 한 쌍의 K-B 미러가 2단계 focusing 시스템으로 구성되어 있어 100 nm에서 측정했다.

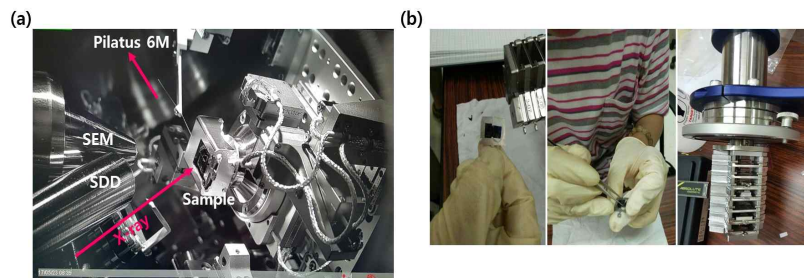


그림 2.1. (a) 대만 방사광가속기 TPS 21A beamline FORMOSA end station의 시료 측정 챔버와 (b) 시료 준비 모습

2) 미국 아르곤 방사광가속기

아르곤 국립 연구소 (Argonne National Laboratory) 내 APS의 GSECARS (GeoSoilEnviroCARS) 13IDD 빔라인은 다이아몬드 앤빌 셀 (Diamond anvil cell, DAC)과 대부피고압기 (Large volume press, LVP)를 이용해 극한 온도 압력 범위에서 고체 및 액체 상태의 지구관련 물질에 대한 연구를 수행할 수 있다. 또한, 단결정 회절 분석도 가능하다.

본 연구에 이용한 검출기는 Pilatus 1M을 이용하여 5초의 노출 시간으로 약 500개의 회절 데이터를 확보하였다. 측정 에너지는 30 keV ($\lambda = 0.4133 \text{ \AA}$)에 빔 크기는 $2 \times 10 \text{ \mu m}$ 크기로 수렴하여 측정하였다 (그림 2.2). LaB_6 (SRM 660)를 이용하

여 기기분석 제원값을 확인하였다.

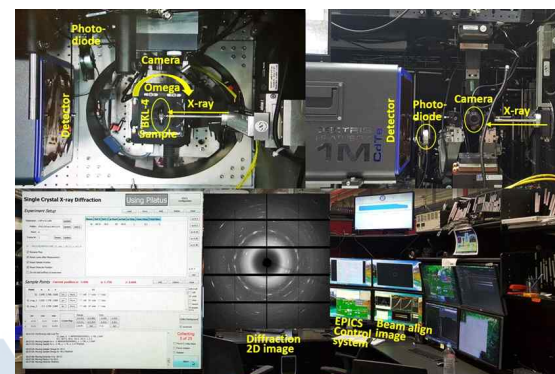


그림 2.2. APS 13ID-D 빔라인에서의 Pilatus3 X CdTe 1M을 이용한 single crystal x-ray diffraction 실험

2017년 5월과 10월에 NSRRC (대만가속기연구소)에서 나노-X선 회절 분석을 실시했다. 시료는 가로 5 mm, 세로 5 mm 크기의 박편을 준비했고 에너지는 white beam으로 범위는 5-30 KeV이며 빔 사이즈는 200 nm이고, Pilatus 6M detector 사용하였다 (그림 2.1).

Laue 회절 결과는 각 미분화운석 내 olivine group, pyroxene group, oxide mineral의 존재를 보여준다. RKP 14005 내 olivine group은 Ca, Mg, Fe가 섞여 있는 ferroan monticellite ($\text{Ca}(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_4$)이고 EET 14009에서는 fayalite (Fe_2SiO_4), Allende 콘드라이트에서는 Mg와 Fe가 섞여 있는 olivine ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$)으로 구성되어 동일한 olivine group이어도 생성환경이 달라 구성 원소가 상이하게 나타났다 (그림 2.3).

Ferroan monticellite는 Ca를 포함하는 forsterite가 1100도가 넘는 고온 환경에서 생성되거나 forsterite와 Ca를 포함하는 휘석 혹은 탄산염광물이 수성 환경에서 약 500도에서 반응할 때 생성되는 광물이다. 세 지역의 콘드라이트에서 모두 발견된 광물은 chromite (FeCr_2O_4)와 pyroxene group이며 chromite는 열 변성 작용 지시자이다 (그림 2.3). EET 14009에서만 발견된 광물은 albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)와 troilite (FeS)로 석운과 Fe, Ni의 반응에 의해 약 650K 이하로 응축되거나 콘드라이트에서 Fe-Ni-S 용융물로 결정화되거나 소행성이 shock metamorphism, thermal metamorphism 같은 2차 과정을 통해 생성되는 광물이다 (그림 2.3).

(a) RKP 14005

Olivine

Pyroxene

Troilite

Chromite

(b) EET 14009

Troilite

Pyroxene

(c) Allende

Olivine

Chromite

Albite

그림 2.3. RKP 14005, EET 14009, Allende 콘드라이트에서 발견된 olivine, pyroxene, albite, chromite, troilite의 Laue 회절 인덱싱 이미지와 구조 모델

Elephant Moraine 13014 내 존재하는 vein 내 영역에 대해 APS에서 단결정 X선 회절 분석을 수행하였다 (그림 2.4). 분석 영역의 단결정 X선 회절 분석 결과 ringwoodite, troilite, iron(kamacite), majorite, omphacite 등으로 구성되어 있었다. troilite와 iron은 운석의 모암(host rock) 구성 성분에 해당하며 이때 iron은 kamacite에 속한다. Ringwoodite는 olivine이 고압 및 고온을 받아 생성되는 고압 광물이다. Majorite는 pyroxene이 15-25 GPa 이상의 고압 및 1500도 이상의 고온을 받아 생성되는 고압 광물이다.

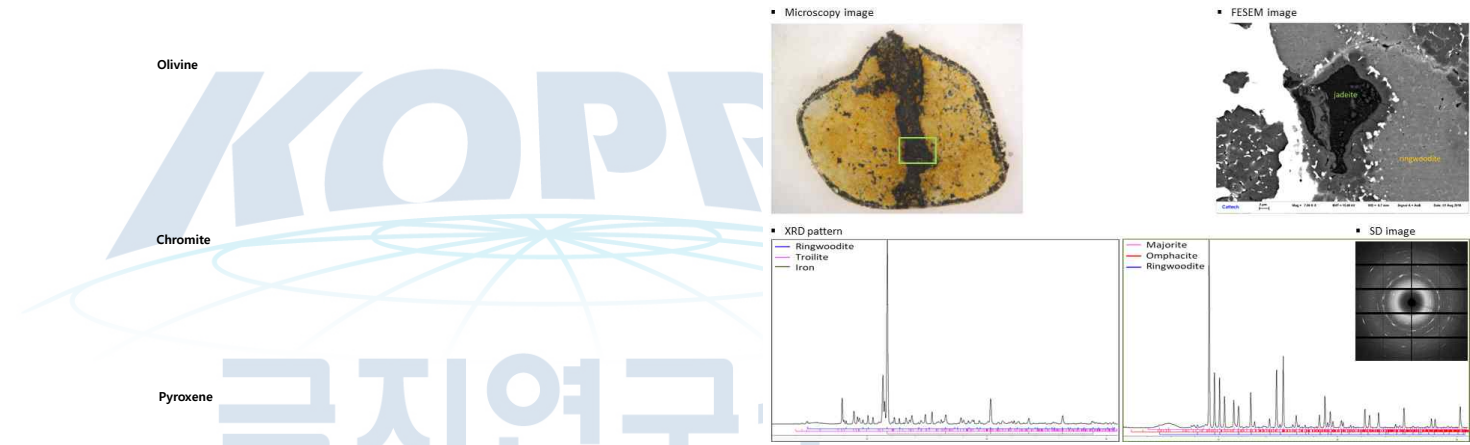
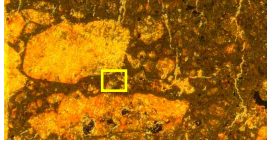


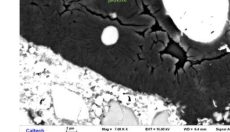
그림 2.4. Elephant Moraine 13014의 vein 내 고압 광물의 현미경과 FESEM 이미지 및 단결정 X선 회절 이미지 및 패턴

Elephant Moraine 13019 내 존재하는 vein 내 영역에 대해 TPS에서 라우에 X선 회절 분석을 수행하였다 (그림 2.5). 각도 공차(angular tolerance)는 0.5, 측정된 값과 비교하기 위해 계산된 reflection 수를 400으로 설정하였으며, 구조해석을 위해 선정된 spot 크기는 0.05에서 150 마이크로미터이며 reflection 검출을 위해서는 background intensity 값을 결정해줘야 하는데 이것이 Thres. mult이며 0.7-3.0로 설정했다. 나노 X선 분석 결과 orthopyroxene, oligoclase, eastatite가 존재하고 있었다 (표 2.1).

Microscopy image



FESEM image



분 중 하나이다.

- ✓ Phase 1 : Olivine
- ✓ Phase 2 : Omphacite
- ✓ Phase 3 : Lepidocrocite
- ✓ Phase 4 : Ferropericlase
- ✓ Phase 5 : Anhydrous phase B

그림 2.5. Elephant Moraine 13014의 vein 내 고압 광물의 현미경과 FESEM 이미지

표 2.1. 라우에 X선 회절 분석을 통한 결정 구조 해석

| | Or | Ensta | Ensta |
|----------------------------|---------|----------|----------|
| Angular tolerance | | 0.5 | |
| Num Ref for index | | 400 | |
| Spot size | 1.0-100 | 0.05-150 | 0.05-100 |
| Thres. mult | 0.7 | 2.0 | 3.0 |
| Num of selected peak | 216 | 243 | 346 |
| Num of indexed reflections | 191 | 217 | 276 |
| R factor | 1.00 | 1.11 | 1.36 |

그림 2.6. Thiel Mountain 08001의 vein 내 고압 광물의 현미경과 FESEM 이미지 및 단결정 X선 회절 이미지 및 패턴. APS에서 측정된 분석 영역의 Rietveld refinement

Thiel Mountains 08001 내 존재하는 vein 내 두 영역에 대해 APS에서 단결정 X선 회절 분석을 수행하고, TPS에서 나노 X선 회절 분석을 수행하였다. 첫 번째 분석 영역의 단결정 X선 회절 분석 결과 omphacite, forsterite, iron oxide, periclase, anhydrous phase B가 분포하고 있었다.

이러한 측정 데이터를 Rietveld method를 이용해 구조 분석을 진행했고 R_{wp} 가 6.97%로 나타났다 (그림 2.6). 이러한 구성 광물들을 통해 생성 환경과 고온 고압 반응을 유추해볼 수 있는데 forsterite는 host rock에 해당하며 원래 존재하던 forsterite가 periclase와 약 12 GPa 이상, 1000-1600도 사이의 고압, 고온 환경에서 반응하여 anhydrous phase B가 생성됨을 알 수 있다. omphacite는 ultrahigh-pressure metamorphic rock에서 생성되며 에클로자이트의 주요 구성 성

두 번째 분석 영역의 라우에 X선 회절은 구성 원소가 Mg, Fe, Si, O로 이루어진 영역으로 원소만으로는 올리빈인지 동질이상인지 구분이 불가능해 결정구조를 확인하고자 수행하였다. 각도 공차(angular tolerance)는 0.5, 측정된 값과 비교하기 위해 계산된 reflection 수를 400으로 설정하였으며, 구조해석을 위해 선정된 spot 크기는 0.1에서 90 마이크로미터 reflection 검출을 위해서는 background intensity 값을 결정해줘야 하는데 이것이 Thres. mult이며 0.2로 설정했다. Anhydrous phase B로 분석을 했을 때 검출된 reflection은 245개로 올리빈으로 분석했을 때보다 3배 이상 reflection 되는 것으로 나타났다 (표 2.2).

표 5.3.2.2. 라우에 X선 회절 분석을 통한 결정 구조 해석

| Olivine | | |
|----------------------------|--------|------|
| Angular tolerance | 0.5 | |
| Num Ref for index | 400 | |
| Spot size | 0.1-90 | |
| Thres. mult | 0.2 | |
| Num of indexed reflections | 75 | 245 |
| R factor | 1.61 | 1.76 |

제 3절 Micro-Raman

라만분광법은 물질은 구성하는 원자의 진동특성에 관한 정보를 제공해 주므로 원자 주위의 환경, 원자의 단거리질서와 원자의 질량에 민감하고 여기광으로써 레이저를 사용하기 때문에 기체, 액체, 고체 등 극미량 시료의 편광측정, 저온측정, 고압측정도 가능하다. 단일 진동수의 레이저광을 시료에 조사하여 입사 방향과 다른 방향으로 산란되어 나오는 미약한 광을 분광기를 통해 관측하게 되는데 입사광과 같은 진동수를 갖는 광산란을 레일리산란(Rayleigh scattering)이라 하며, 입사광보다 더 많은 진동수를 갖는 광산란을 라만산란(Raman scattering)이라고 한다. 그리고 입사광과 라만산란광의 진동수차를 라만시프트(Raman shift)라고 한다.

Spectroscopy

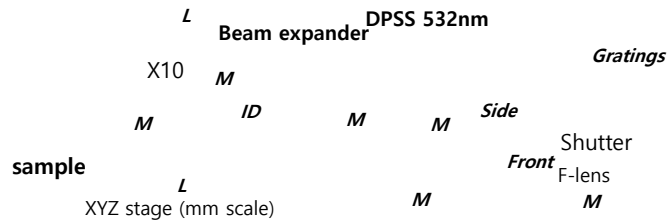


그림 3.1. 마이크로 라만분광 시스템 모식도

본 실험은 Micro-Raman 분석기구조로 연세대학교 결정학연구소의 Horiba사를 사용하였으며 (그림 3.2), 모식도는 그림 3.1과 같다. 라만분광법은 물질을 구성하는 원자의 진동특성에 관한 정보를 제공해 주므로 원자 주위의 환경, 특히 원자의 단거리 질서와 원자의 질량 등에 매우 민감하고 레이저를 사용해 기체, 액체, 고체 등 극미량 시료의 편광측정, 고압측정도 가능하다. 빔 크기는 20 μm 이며 532 nm 파장을 사용하여 1800 그레이팅(grating)에서 180초 측정하였다.

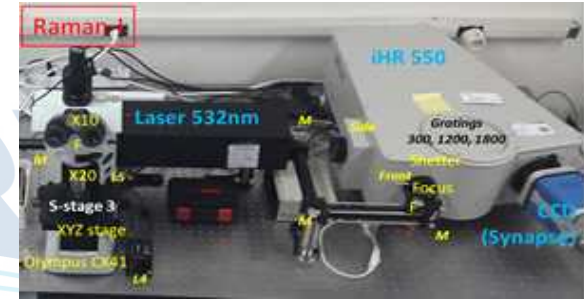


그림 3.2. 연세대학교 결정학연구소의 마이크로 라만분광 장치 모습

Micro-Raman 분석은 532 nm 파장을 사용하여 1800 grating에서 180초 동안 측정하였다. 미분화운석 내 Olivine은 Mg와 Fe 존재비에 따라 라만 피크가 다르게 나타나는데, forsterite는 826 cm^{-1} 과 858 cm^{-1} 근처에서 나타나고, fayalite는 815 cm^{-1} 과 836 cm^{-1} 근처에서 나타난다. 본 시편에서 나타난 823 cm^{-1} , 826 cm^{-1} 와 854 cm^{-1} , 859 cm^{-1} 라만 피크는 Mg와 Fe가 섞인 olivine으로 존재한다. Pyroxene은 type에 따라 상이한데 triclinic pyroxene은 655 cm^{-1} 근처와 990 cm^{-1} 근처에서 관찰되며, monoclinic pyroxene은 라만 피크가 660 cm^{-1} 근처와 1000 cm^{-1} 근처에서 관찰된다. Orthorhombic pyroxene은 660-677 cm^{-1} 합쳐져서 피크가 넓게 (broad) 나타나며, 1004-1010 cm^{-1} 근처에서도 넓게 (broad) 나타난다. 본 시편에서 667 cm^{-1} 과 1011 cm^{-1} 의 라만 피크가 넓게 (broad) 관찰되어 orthopyroxene인 것으로 보인다 (그림 3.3).

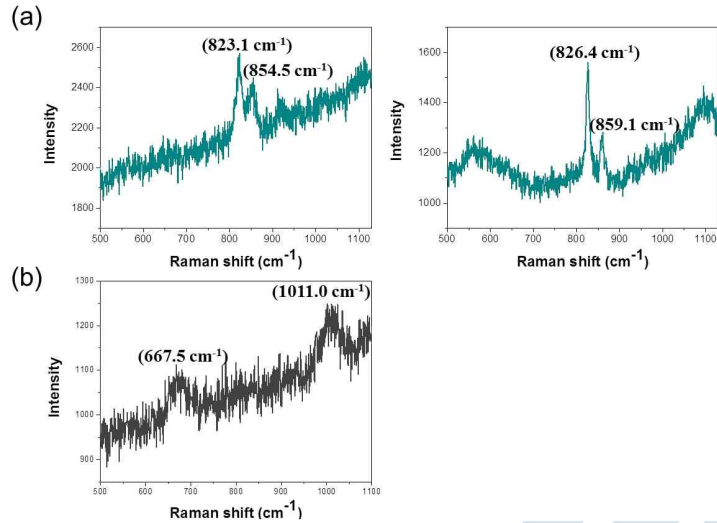


그림 3.3. 콘드라이트 내 (a) olivine과 (b) pyroxene의 라만 데이터

충격 미분화운석 내 Olivine은 Mg와 Fe 존재비에 따라 라만 피크가 다르게 나타나는데, forsterite는 826 cm^{-1} 과 858 cm^{-1} 근처에서 나타나고, fayalite는 815 cm^{-1} 과 836 cm^{-1} 근처에서 나타난다. 본 시편에서 나타난 821-822 cm^{-1} 와 852-854 cm^{-1} 라만 피크는 Mg와 Fe가 섞인 olivine으로 존재한다. Graphite는 1331 cm^{-1} 과 1584 cm^{-1} 에서 나타나며 graphite가 고온 고압을 받아 diamond가 되면 1331 cm^{-1} 옆에 shoulder 피크가 나타나게 된다. 본 시편은 graphite인 것으로 보인다. Pyroxene은 type에 따라 상이한데 triclinic pyroxene은 655 cm^{-1} 근처와 990 cm^{-1} 근처에서 관찰되며, monoclinic pyroxene은 라만 피크가 660 cm^{-1} 근처와 1000 cm^{-1} 근처에서 관찰된다. Orthorhombic pyroxene은 660-677 cm^{-1} 합쳐져서 피크가 넓게 (broad) 나타나며, 1004-1010 cm^{-1} 근처에서도 넓게 (broad) 나타난다. 본 시편에서 660-665 cm^{-1} 의 라만 피크가 관찰되어 monoclinic pyroxene인 것으로 보인다 (그림 3.4).

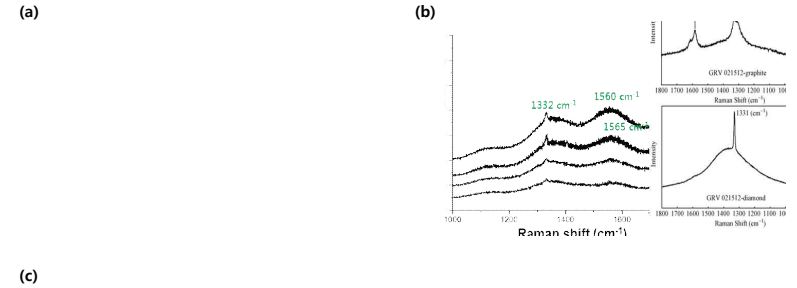


그림 3.4. 콘드라이트 내 (a) olivine과 (b) graphite, (c) pigeonite의 라만 데이터

제 4절 광물물리 연구를 통한 지구 및 행성 내부 연구 사례

지구 내부를 구성하고 있는 물질과 이들의 움직임은 지표의 환경과 지표상의 모든 지질 활동을 규정한다. 지각판의 섭입대는 지표상의 물질이 맨틀로 순환하는 입구이며 그 순환 과정에서 지진과 화산활동 등 다양한 지질 활동이 유발된다. 지구 내부에 해당하는 온도와 압력 조건을 만들어내고 대상 물질의 구조적, 화학적, 그리고 물성의 변화를 관찰하는 것이 광물물리 연구 방법론 활용한다. 특히 지구 내부에는 대기권이나 수권 등 지구 표면에 존재하는 것보다 훨씬 많은 양의 물과 탄소 등 가벼운 성분을 함유하고 있을 것으로 추정된다. 이러한 휘발성 성분들은 지구 형성 초기 분화과정을 거쳐 지표에 확산되었지만, 일정한 양이 끊임없이 지구 내부와 표면 사이를 순환하고 있으며 이러한 순환이 동적인 지구로서의 항상성을 유지한다. 각각의 가벼운 성분들은 안정적으로 암석(광물)에 결합된 형태로 섭입대를 통하여 지구 내부로 운반되며 그 과정 속에 일부는 화산활동을 통하여 다시 지표로 분출된다. 이러한 휘발성 원소들의 지구 내부로의 섭입 과정, 지구 내부에서의 거동 및 분출 과정을 이들의 순환 매개체인 광물물리 연구를 통해 이해하고자 한다.

1) 지각권 섭입대 환경에서의 해양퇴적물 점토광물 연구 사례1

(Nature Geoscience (2017, 10, 947-953, IF = 13.941)에 게재)

카올리나이트는 자연에서 발견되는 주요 점토 광물이며 1:1 이팔면체 층상 규산염 광물이다. 카올리나이트는 해양 퇴적물에 평균적으로 14.2%를 차지하는 광물로서 섭입대에서 지구 내부로 물 운반체 역할을 할 수 있는 광물로 섭입대 조건에서의 물과 카올리나이트의 반응에 대한 연구는 지구 내부의 물 운반 메커니즘을 이해하는데 매우 중요한 의미를 가진다. 지표에 풍부하게 존재하고 있는 점토광물인 카올리나이트($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)가 지하 75km 깊이에 해당하는 온도 압력 조건에서 물 분자가 카올리나이트 내부 구조의 층 간에 유입되어 d_{001} 면의 팽창을 보이는 것을 확인하였으며($7 \rightarrow 10\text{\AA}$), 약 8.0 GPa 및 574°C의 환경에서 새로운 12Å에 해당하는 회절 피크가 관찰되었고 부가적으로 코사이트(coesite)를 형성하는 것을 관찰하였다 (그림 4.1.1). 초수화 카올리나이트가 보다 깊은 환경으로 섭입하게 되면 약 200km 깊이에서는 다른 알루미늄을 함유한 광물로 변하면서 운반하던 물을 주변으로 유출시키게 된다.

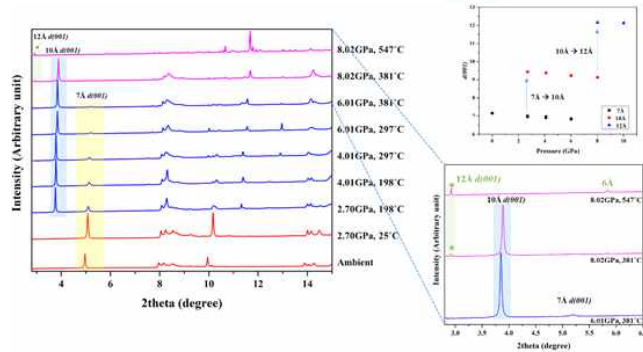


그림 4.1.1. SSRL과 APS에서 측정된 물이 존재하는 환경에서의 카올리나이트의 온도 압력에 따른 회절패턴의 변화 및 카올리나이트의 (001) reflection d-spacing의 변화

이 결과는 카올리나이트의 초수화 이후 탈수 반응을 통해 상당량의 물이 지하

200km 심부에서 주변으로 방출 될 수 있음을 보여준다. 이렇게 유출된 물은 주변 암석에 비해 가볍기 때문에 암석의 틈을 따라 상부로 이동하며 암석의 녹는점을 낮추어 마그마의 형성을 유도하게 된다. 이를 통해 물의 지구 심부로의 이동과 함께 섭입대에서의 마그마 형성 및 지표의 화산활동으로 이어지는 매커니즘을 제시한다.

2) 상부 맨틀의 온도 압력 조건에서의 Fe-함유 광물의 상 전이에 대한 연구 사례2

올리빈은 상부 맨틀의 주요 구성 광물로서 물을 압력 매개체로 하여 10 GPa 및 700°C까지 온도 및 압력을 단계적으로 올리면서 실시간 X-선 회절 패턴을 측정한다. 이를 이용하여 올리빈의 회절패턴의 변화를 관찰하였으며, 이는 지금까지의 온도 및 압력 세팅에서 관찰하지 못하였던 결과이다 (그림 4.2.1). 추후 획득한 데이터를 바탕으로 상전이에 대해서 구조적으로 어떠한 변화가 있는지 살펴볼 필요성이 있을 것으로 예상 되어진다.

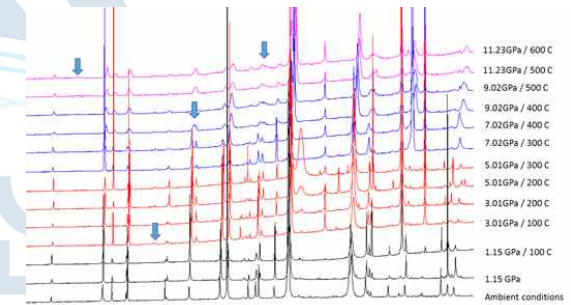


그림 4.2.1. 올리빈의 온도 압력에 따른 X선 회절패턴의 변화

3) 지각권 섭입대 환경에서의 해양퇴적물 각섬석광물 연구 사례3

(Current Applied Physics (2018, 11, 1218-1224, IF=2.058)에 게재)

투각섬석(tremolite, $CaMg_5Si_8O_{22}(OH)_2$)은 사면체끼리 두 개 혹은 세 개의 모서리를 공유 결합함으로써 구성된 이쇄형 사슬(double chain)을 골격으로 하는 결정구조를 가지는데 사면체 6개가 환형을 만들고 이들이 반복되어 축을 따라 사슬이 배열되는 구조를 갖게 된다. 투각섬석은 자연계에 존재하는 섬유상의 천연광물로 석면(asbestos)에 속하기도 한다. 지구 내부의 이산화탄소 저장체 역할을 할 수 있는 광물로 섭입대 조건에서의 이산화탄소와 투각섬석의 반응에 대한 연구는 지구내부의

이산화탄소 운반 메커니즘을 이해하는데 중요한 의미를 가진다. 투각섬석은 이산화탄소와 반응하여 0.5 GPa에서 160도 열을 가한 후 일부 방해석이 형성되었다(그림 4.3.1). 체적탄성률은 물과 반응했을 때 74 GPa, 실리콘 오일을 사용했을 때 90 GPa, 이산화탄소와 반응했을 때 107 GPa로 나타났다. 이러한 증가는 탄산화 반응을 포함해 각 매개체와 입자와 상호 작용이 있을 것으로 보인다.

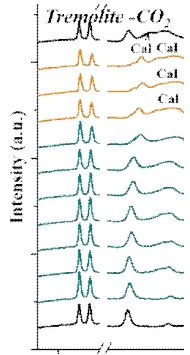


그림 4.3.1. PAL 10C에서 측정된 이산화탄소가 존재하는 환경에서의 투각섬석의 온도 압력에 따른 회절패턴의 변화

제 5절 지구형 행성의 내부 조건에 해당되는 극한 환경에서의 실험을 통한 미분화운석 구성 물질의 물성 변화 관찰 및 분화과정 유추

우주에 존재하는 물질의 상태 중 많은 부분이 초고온, 초고압 상태로 고체와 플라즈마의 중간 정도에 해당 된다. 이러한 물질의 상태는 기존의 응집 물리나 플라즈마 통계물리의 표준이론으로 맞지 않는다. 강력한 X선 레이저를 사용하면 미소한 공간에 이러한 상태를 만들어 물질특성을 연구함으로써 우주에 대해 더 많은 것을 이해할 수 있게 된다.

반사 거울을 사용하는 기존의 자유전자 레이저(free electron laser:FEL) 기술은 방사광가속기와 병행하여 20년 간 꾸준히 개발되어 왔다. 단, 200 나노미터 이하의

짧은 파장에서는 거울의 반사율이 급격히 떨어져 가시영역 부근의 레이저와 달리 반사 거울을 이용할 수 없어 자기증폭 자발방사(self-amplified spontaneous emission:SASE) 방법이 한계를 극복하는 방법이다. 이러한 원리를 이용하는 4세대 방사광은 그 파장이 원자 크기 수준의 X선이고, 순간 최대 출력이 수백억 킬로와트이며, 가로결맞음(transverse coherency)이 완벽한 레이저이다.

본 연구에서는 이러한 광원을 이용해 지구형 행성의 핵 구성 물질로 알려져 있는 철-니켈 시료를 팔라사이트에서 획득하여, 극한 환경 실험을 진행하였다(그림 5.1). 운석에서 기원한 가장 기초적인 물질을 통하여, 새롭게 접목되는 Laser-shock 실험의 가능성, 그리고 추후 미분화운석(전암 시료)에 대한 가능성 탐색 차원에서 시도하게 되었다.

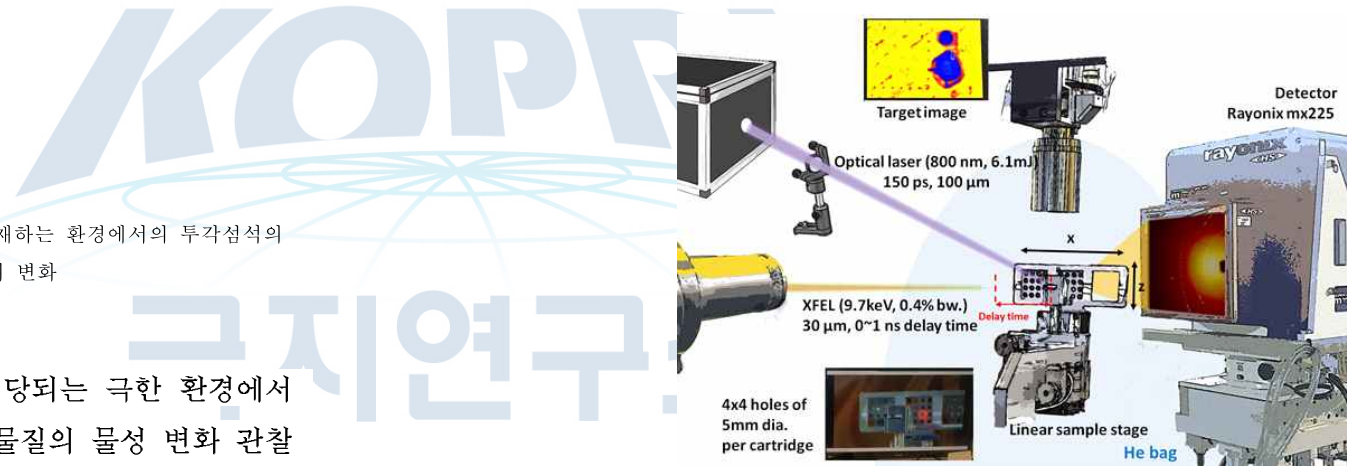


그림 5.1. 2017년 12월에 첫 번째 laser-shock 압축 빔타임 동안 사용된 실험 장치 및 9 μm 철-니켈 시료

2017년 12월 9일부터 4일간, 2018년 9월 10일부터 4일간 PAL-XFEL (4세대 방사광 가속기)에서 철-니켈 시료 및 이와 비교 가능한 순수한 철 물질에 optical laser를 활용하여, 시료의 물성 연구를 진행하고 이론적으로 관찰 가능한 최대 압력과 비교를 통해 향후 Laser-shock 실험의 가능성을 알아보았다(그림 5.2).

2018년 실험 조건은 12 KeV의 에너지에서 30 um의 빔사이즈로 pink beam을 이용하고 레이저는 140 ps에서 펄스가 6 mJ에 60 um 사이즈로 XFEL과 레이저 사이의 각도는 5.4도에서 수행하였다.

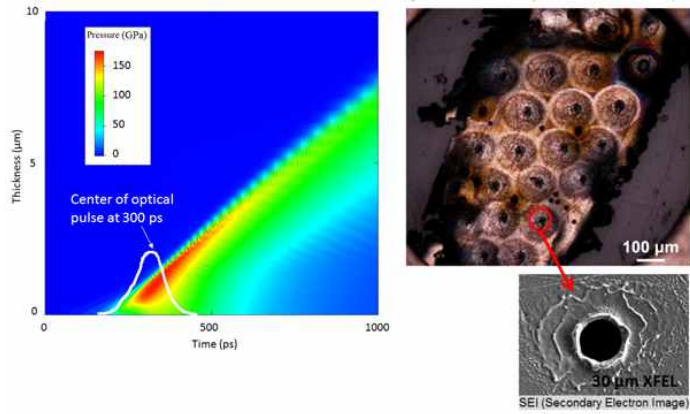


그림 5.2. 충격에 대한 1-D Hellios hydrocode 시뮬레이션으로 색은 압력을 나타냄 (왼쪽). 2017년 12월 실험 후 laser-shock에 pumped되고 XFEL-probed된 iron foil의 모습 (오른쪽)

실험에 이용한 시료는 1 μm, 2 μm, 4 μm, 6 μm, 10 μm 두께의 다결정 Fe foil로, 99.9%의 순수 합성물과 운석 내 10% 미만의 Ni를 함유한 kamacite, pallasite 내에 olivine과 acapulcoite 내에 plagioclase를 선정하였다 (그림 5.3).



그림 5.3. 실험에 사용된 Fe foil, pallasite 내 kamacite, acapulcoite, olivine 시료의 모습

철은 핵 반응에 의해 생성된 가장 안정한 원소로 우주에서 가장 풍부하고 무거운 원소이기 때문에 행성 내부에 존재한다. 팔라사이트 내 kamacite와 Fe foil은 대기압에서 체심입방구조 (bcc)를 가진 강자성 상태에서 안정적이다. 10 GPa 이상에서 hcp 구조를 가지며 1000K 이상에서 fcc로 상전이가 일어난다 (그림 5.4).

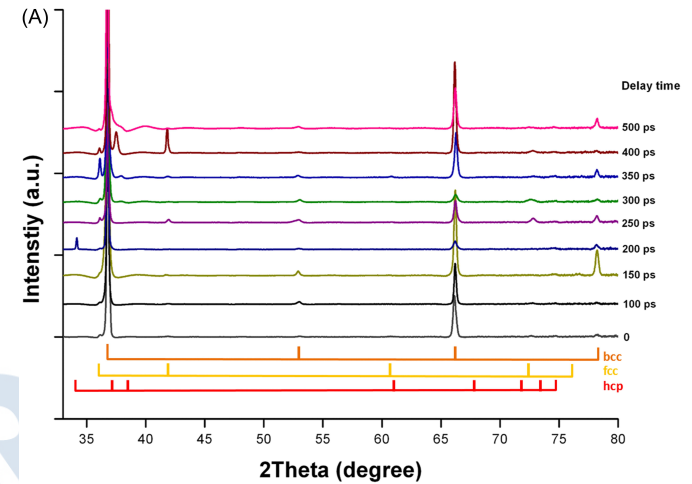


그림 5.4. XFEL에서 측정된 Fe의 delay time에 따른 회절패턴의 변화

laser-shock 실험 결과 기존 연구보다 더 높은 HEL이 10 GPa까지 나타나고 여기서 자유 표면의 두 번째 plastic wave가 사라졌다. 소성 압축된 bcc 상태 없이 HEL(약 9GPa)과 hcp(약 23 GPa)까지 존재함으로 280ps의 지연시간에서 유사한 상황을 관찰했다. 그리고 HEL이 5GPa까지 떨어지는 300ps에서 세 번째 wave가 관찰된다 (그림 5.5).

이러한 결과를 토대로 이론적으로 계산된 관찰 가능 압력 최대치에 절반 수준에 근접한 데이터를 얻는 데 성공하였으며, (기술적 개선 가능성을 연구소 측과 의견 공유함) 이는 현재 지구의 하부 맨틀 수준에 해당하는 것으로 사료 된다.

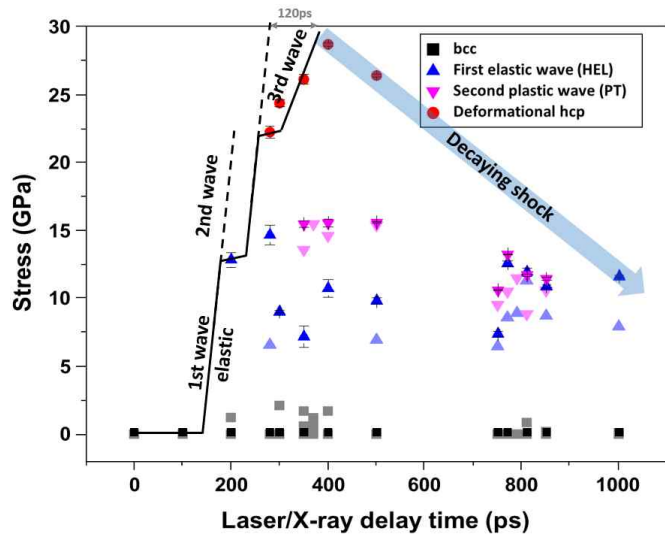


그림 5.5. 2017년 12월 PAL-XFEL의 FXS-XSS에서 수행된 laser-shock 압축 probe 및 XFEL probe 연구의 결과. 3개의 wave structure는 첫 번째 elastic wave, 두 번째 plastic wave, 세 번째 deformational hcp로 구성

이는 초기 지구의 물리화학적 분화 과정에 대한 연구를 진행하기에 가능성 있는 압력으로 판단되며, 실제 미분화운석을 활용한 Laser-shock 실험 및 화학적 분석이 종합된다면, 의미 있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

제 4장 연구개발목표 달성도

제 1절 연구목표 및 주요 달성도

1) 4차년도 연구목표

| 연구목표(당해년도) | 목표별 주요 연구내용 | 비고 |
|---------------------------------|---|----|
| ○ 남극 운석의 데이터베이스 구축 | - 연세대학교의 다양한 광물학적-분광학적 측정 기기를 통한 분석 | |
| ○ 미확인된 광물상 발견 및 물성 연구 | - 데이터베이스를 기초로 대형 가속기 시설을 활용한 결정학적 및 물리화학적 특성 연구 | |
| ○ 극한 환경 모사 실험을 통한 운석의 실시간 물성 연구 | - 행성의 형성 및 진화과정에 대한 모델 정립 및 운석 충돌 시 발생될 수 있는 물질의 물성 변화 관찰 | |
| ○ 논문 작성 및 학회 발표 | - 4차년도 분석 결과를 토대로 논문 작성 | |

2) 4차년도 주요 달성도

4) 5차년도 주요 달성도

| 세부연구목표 | 수행내용 | 연구기간 | | | | | | | | | | | | 진도율 (%) | | | | | | | | | |
|--------|--------------------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|---------|--|--|--|--|--|--|--|--|------|
| | | 2017년 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 1월 | 2월 | 3월 | 4월 | 5월 | 6월 | 7월 | 8월 | 9월 | 10월 | 11월 | 12월 | | | | | | | | | | |
| 시료분석 | 마이크로 X선 회절, 마이크로 라만 및 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 100% |
| | 마이크로 형광 측정을 통한 데이터베이스 구축 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 논문작성 | 가속기 시설을 활용한 실험 결과 논문 작성 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 100% |
| | 가속기 시설을 활용한 실험 결과 학회 발표 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

당초계획
 실적

| 세부연구목표 | 수행내용 | 연구기간 | | | | | | | | | | | | | | | 진도율 (%) | | | | | | |
|--------|-------------------------|-------|----|----|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|--|--|--|---------|--|--|--|--|--|------|
| | | 2018년 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 6월 | 7월 | 8월 | 9월 | 10월 | 11월 | 12월 | 1월 | 2월 | 3월 | 4월 | 5월 | | | | | | | | | | |
| 시료 분석 | 가속기 시설을 활용한 실험 데이터 분석 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 100% |
| | 가속기 시설을 활용한 실험 결과 논문 작성 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 논문 작성 | 가속기 시설을 활용한 실험 결과 학회 발표 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 100% |
| | 가속기 시설을 활용한 실험 결과 학회 발표 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

당초계획
 실적

3) 5차년도 연구목표

| 연구목표(당해년도) | 목표별 주요 연구내용 | 비고 |
|---------------------------------|--|----|
| ○ 광물물리 연구를 통한 지구 및 행성 내부 연구 | - 데이터베이스를 기초로 대형 가속기 시설을 활용한 결정학적 및 물리화학적 특성 연구 | |
| ○ 남극 운석의 데이터베이스 구축 | - 연세대학교의 다양한 광물학적-분광학적 측정 기기를 통한 분석 | |
| ○ 극한 환경 모사 실험을 통한 운석의 실시간 물성 연구 | - 행성의 형성 및 진화과정에 대한 모델 정립 및 운석 충돌 시 발생 될 수 있는 물질의 물성 변화 관찰 | |
| ○ 논문 작성 및 학회발표 | - 4차년도 분석 결과를 토대로 논문 작성 | |

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1절 연구결과의 활용방안

- 1) 남극 운석 탐사를 통해 발견된 운석에 대해 마이크로 스케일의 광물학적-분광학적 데이터베이스 구축 시 장기적인 운석 연구에 도움이 될 것으로 기대함.
- 2) 미확인된 광물상 발견 시 해외저널 게재 기대.
- 3) 행성의 형성 및 진화 과정에 대한 첨단 가속기시설 연구를 통해 아직 규명되지 않은 지질학적 현상들을 새롭게 밝힘으로써 극지연구의 새로운 분야 및 모델 제시.

제 2절 기대성과 및 파급효과

- 1) 남극 운석 탐사 결과물에 대한 광물학적-분광학적 데이터베이스 구축.
- 2) 마이크로 스케일 분석장비 활용을 통한 운석내 미확인된 광물상 발견 가능.
- 3) 운석에 대한 극한 환경 모사 실험을 통해 행성의 형성 및 진화 과정에 대한 모델 제시.
- 4) 방사광가속기 첨단 분석기법의 접목을 통한 운석 연구의 새로운 모델 제시.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 미분화운석에서 지구 맨틀에서 존재할 것이라고 예측되었던 광물상이 실제로 발견된 사례가 사이언스지에 발표됨 (Tschauer et al., 2014).
- 운석내 특정 광물상에 대한 가속기를 활용한 극한 환경 실험을 통해 화성에 물이 존재할 수 있다는 연구 사례가 네이처 커뮤니케이션스에 발표됨 (Adcock et al., 2017).
- 운석 내 새로운 광물상에 대한 연구 결과들이 아메리칸 미네랄로지스트에 여러 차례 보고됨 (Ma et al., 2017; Ma et al., 2012).

제 7 장 참고문헌

- Ma C, Tschauer O, Rossman GR, Liu W (2012) Kangite, IMA 2011-092. CNMNC Newsletter No. 12, page 155. Mineralogical Magazine, 76, 151-155.
- Ma C (2012) Browneite, IMA 2012-008. CNMNC Newsletter No. 13, page 814. Mineralogical Magazine, 76, 807-817.
- Ma C, Beckett JR, Rossman GR (2012) Buseckite, (Fe,Zn,Mn)S, a new mineral from the Zaklodzie meteorite. American Mineralogist, 97, 1226-1233.
- Ma C, Tschauer O, Beckett JR, Rossman GR, Liu W (2012) Panguite, $(\text{Ti}^{4+}, \text{Sc}, \text{Al}, \text{Mg}, \text{Zr}, \text{Ca})_{1.8}\text{O}_3$, a new ultra-refractory titania mineral from the Allende meteorite: Synchrotron micro-diffraction and EBSD. American Mineralogist, 97, 1219-1225.
- Ma C, Tschauer O, Beckett JR, Rossman GR, Liu W (2012) Discovery of kangite, $(\text{Sc}, \text{Ti}, \text{Al}, \text{Zr}, \text{Mg}, \text{Ca}, \square)_2\text{O}_3$, a new ultra-refractory mineral in Allende. Meteoritics & Planetary Science, 47 (S1), A257.
- Ma C (2012) Discovery of meteoritic eringaite, $\text{Ca}_3(\text{Sc}, \text{Y}, \text{Ti})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$, the first solar garnet? Meteoritics & Planetary Science, 47 (S1), A256.
- Ma C, Beckett JR, Rossman GR (2012) Browneite, MnS, a new sphalerite-group mineral from the Zaklodzie meteorite. American Mineralogist, 97, 2056-2059.
- Tschauer O, Ma C, Beckett JR, Prescher C, Prakapenka VB, Rossman GR (2014) Discovery of bridgmanite, the most abundant mineral in Earth, in a shocked meteorite. Science, 346, 1100-1102.
- Adcock CT, Tschauer O, Hausrath EM, Udry A, Luo SN, Cai Y, Ren M, Lanzirotti A, Newville M, Kunz M, Lin C (2017) Shock-transformation of whitlockite to merrillite and the implications for meteoritic phosphate. Nature Communications, 8, 14667.
- Ma C, Krot AN, Nagashima K (2017) Addibischoffite, $\text{Ca}_2\text{Al}_6\text{Al}_6\text{O}_{20}$, a new calcium aluminate mineral from the Acfer 214 CH carbonaceous chondrite: A new refractory phase from the solar nebula. American Mineralogist, 102, 1556-1560.

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.