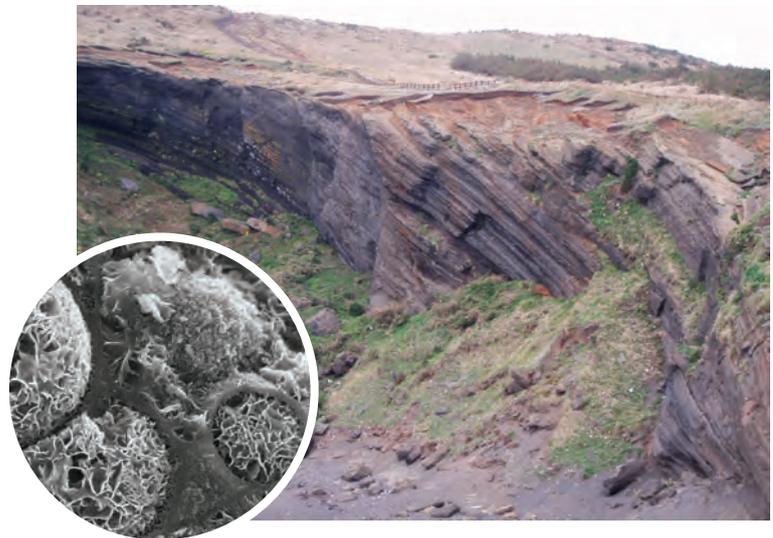


# 2019년도 (사)한국광물학회 · 한국암석학회 공동학술발표회 프로그램

Proceedings of the Annual Joint Conference,  
the Mineralogical Society of Korea and  
the Petrological Society of Korea,  
May 30-31, 2019, Chuncheon, Korea



- 일시 : 2019년 5월 30일(목)~31일(금)
- 장소 : 강원도 춘천시 강원대학길 1  
강원대학교 자연과학대학 3호관 · 5호관
- 주최 : (사)한국광물학회 · 한국암석학회
- 주관 : 강원대학교 지구자원연구소
- 후원 : 한국지질자원연구원, 한국지질자원연구원 DMR 융합연구단  
거명EnC, 클라리언트코리아(주), (주)성신, (주)KCC, 세미넷  
Thermo Fisher Scientific, 아미텍코리아(주), (주)대산  
(주)테스칸코리아, 한국석회석가공업협동조합  
강원대학교 지질 · 지구물리학과



(사)한국광물학회



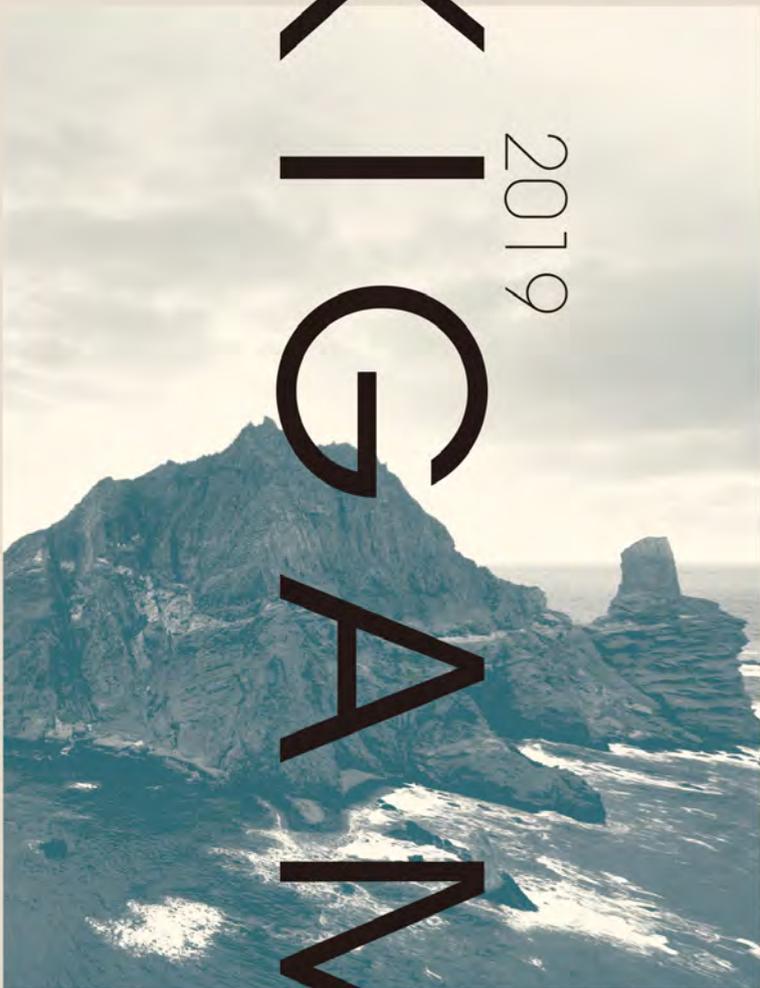
한국암석학회

함께가는  
사람중심의  
연구원

조직문화 대개혁  
시대정신에 맞는 정체성 확립  
사람중심의 열린 경영

근본에  
충실한  
연구원

새로고침을 통해 미래까지 재정립  
정부출연연구소 본연의 모습, 기능에 충실한 연구소



2019  
KIGAM

국가와  
국민에게  
대답하는  
연구원

황국기, 황국민 수호기반 연구  
미래성장 동력 창출을 위한 공공적 미션

## 공동학술발표회 및 공동총회 일정 (2019년 5월 30일)

	제1발표장 (자연대 3호관 105호)	제2발표장 (자연대 5호관 101호)	포스터 발표장 (자연대 3호관 109호)
09:00-09:30	등록		포스터부착시간: 09:00-18:00
09:30-10:45	구두발표 I		
10:45-11:00	휴식		
11:00-12:00	구두발표 II		
12:00-13:30	중식 및 포스터 발표		
13:30-13:45	공동총회		
13:45-14:45	특별 강연		
14:45-15:00	휴식		
15:00-15:30	(사)한국광물학회 정기총회	한국암석학회 정기총회	
15:30-15:50	구두발표 III	구두발표 III	
15:50-16:10	포스터 발표		
16:10-16:20		휴식	
16:20-17:05	구두발표 IV		
17:05-17:15	휴식		
17:15-18:00	구두발표 V		
18:00-	간담회		

## 공동학술발표회 및 공동총회 일정 (2019년 5월 31일)

야외학술답사

5월 31일(금)

※세부일정은 추후공지

5월 30일 제1발표장(사)한국광물학회 (발표 12분, 질문 3분, 총 15분) 구두발표 15편, 포스터 14편

시 간	발표자	제 목	좌 장
09:00-09:30	<b>등 록</b>		
09:30-09:45	손상보(강원대)·권기덕(강원대)	밀도범함수이론 계산을 이용한 저온조건에서의 황화철광물 상변환 연구	장세정
09:45-10:00	구태희(연세대)·김지영(연세대)·김진욱(연세대)	저온 환경에서의 철 환원 미생물(FeRB)에 의한 논트로나이트의 구조/화학적 특성 변화 연구	
10:00-10:15	이효진(기초연)·장세정(기초연)	동위원소 질량분석기를 이용한 인산염 산소동위원소 분석법	
10:15-10:30	김주혁(강원대)·권기덕(강원대)	분자동력학을 통한 토도로카이트 연구	
10:30-10:45	이성근(서울대)	수 메가바 압력하에서의 지구물질의 구조 및 성질: 핵자기 공명분광분석과 비탄성 산란 연구결과	
10:45-11:00	Coffee Break		
11:00-11:15	이아침(서울대)·이성근(서울대)	암석권 순환의 지구화학적 추적자로 이용되는 붕소를 함유한 규산염 용융체의 압력에 따른 네트워크 연결도 변화: 고상 핵자기 공명 분광분석 연구	김현나
11:15-11:30	한수연(강원대)·권기덕(강원대)	다카네라이트와 란시아이트 층간 구조에 대한 분자동역학 시뮬레이션 연구	
11:30-12:00	포스터 퍼레이드		
12:00-13:30	<b>중식 및 포스터 발표</b>		
13:30-13:45	<b>공동총회</b>		
13:45-14:15	고상모(지자연)·김남훈(지자연)·이길재(지자연)·유병윤(지자연)	특별강연: 한반도 북부의 지질 및 광화작용	권기덕
14:15-14:45	이성근(지자연)	특별강연: 화성암의 진화과정과 동위원소 분별작용	
14:45-15:00	Coffee Break		
15:00-15:30	<b>(사)한국광물학회 정기총회</b>		
15:30-15:50	김진욱(연세대)	김수진 학술상 수상자 강연: Reviews in Microbially-induced Smectite-to-illite Reaction	권기덕
15:50-16:20	포스터발표		
16:20-16:35	김민식(공주대)·한기성(PNNL)·이범한(지자연)·김진철(지자연)·김현나(공주대)	입도 및 결정도가 백운석의 탈이산화탄소 반응에 미치는 영향	현성필
16:35-16:50	김효임(서울대)·이성근(서울대)	철 함량 증가에 따른 비정질 알루미늄규산염의 원자구조와 무질서도의 변화: 뫼스바우어 및 다핵종 고상 핵자기공명 분광분석을 이용한 연구	
16:50-17:05	정재우(연세대)·김기태(극지연)·박영규(연세대)·이재일(극지연)·유규철(극지연)·김진욱(연세대)	결빙시 철 함유광물의 생지화학적 변이작용	
17:05-17:15	Coffee Break		
17:15-17:30	권진중(서울대)·김효임(서울대)·이상화(한양대)·김재용(한양대)·이성근(서울대)	수소 저장된 $Ti_{53}Zr_{27}Ni_{20}$ 준결정에 대한 고해상도 $^1H$ MAS NMR 연구	이유수
17:30-17:45	박창근(극지연)	태양계 최초물질에서 발견되는 육방정계 $CaAl_2Si_2O_8$ (dmisteinbergite)의 기원 연구	
17:45-18:00	우수 발표상 시상		
18:00-	<b>간담회</b>		

**5월 30일 제2발표장(한국암석학회)** (발표 12분, 질문 3분, 총 15분) 구두발표 19편, 포스터 11편

시 간	발표자	제 목	좌 장
09:00-09:30	<b>등 록</b>		
09:30-09:45	박용(서울대)·정해명(서울대)	고압에서 녹염석 정색편암의 변형과 섭입대에서의 지진파 전파 특성 연구	박문재
09:45-10:00	김도현(서울대)·정해명(서울대)	Strain-induced lattice-preferred orientation of chlorite and implications for seismic anisotropy	
10:00-10:15	이정진(서울대)·정해명(서울대)·Reiner Klemm(Friedrich-Alexander University of Erlangen-Nurnberg)	섭입대에서 활석 편암의 변형과 지진파 P파 비등방성에 미치는 영향 연구	
10:15-10:30	최사람(서울대)·박정우(서울대)·김종욱(KIOST)·오지혜(KIOST)·박창근(극지연)	중앙인도양해령 반려암질 암석에서 관찰된 멜트-암석 반응의 증거와 멜트-암석 반응이 중앙해령현무암 성분에 미치는 영향	
10:30-10:45	김지혁(서울대)·박정우(서울대)·이미정(극지연)·이종익(극지연)·Philip R. Kyle(New Mexico Institute of Mining and Technology)	알칼리 마그마의 진화: 남극 북빅토리아랜드 플레이아데스 화산 복합체의 동시기 소동 및 포타슘 마그마 분화 계열	
10:45-11:00	Coffee Break		
11:00-11:15	황상구(안동대)·이소진(안동대)·오경식(안동대)	Interpretation on Changes in Eruptive Styles from Vesicularity and Textural Analyses of Pumice Clasts in the Maljandeung Tuff, Ulleung Island, Korea	박창근
11:15-11:30	김지연(충남대)·최성희(충남대)·이기욱(기초연)·이신애(기초연)	경기육괴 서남부 가로림만 지역 지곡리층 혼성편마암의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대와 의미	
11:30-11:45	이호선(부산대)·정창식(기초연)	펄토초 레이저사막 유도결합플라즈마질량분석기를 이용한 저어콘 미량원소 분석	
11:45-12:00	정창식(기초연)	우리나라 저어콘 분석 현황	
12:00-13:30	<b>중식 및 포스터 발표</b>		
13:30-13:45	<b>공동총회</b>		
13:45-14:15	고상모(지자연)·김남훈(지자연)·이길재(지자연)·유병운(지자연)	특별강연: 한반도 북부의 지질 및 광화작용	권기덕
14:15-14:45	이승구(지자연)	특별강연: 화성암의 진화과정과 동위원소 분별작용	
14:45-15:00	Coffee Break		
15:00-15:30	<b>한국암석학회 정기총회</b>		
15:30-15:50	장윤득(경북대)	도암상 수상자 강연: Syenite from Ulleung Island: As a Window for Pre-eruptive Shallow Alkaline Magma Dynamics	김윤섭
15:50-16:10	박창근(극지연)	선암상 수상자 강연: 대형 이차이온질량분석기를 이용한 태양계 최초 물질의 $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$ 동위원소 시스템 연구	
16:10-16:20	Coffee Break		
16:20-16:35	류충렬(지자연)	울산시 울주군 삼남면-삼동면 남쪽 경계부 양산단층대 일대에 발달하는 압축성 호상선상구조와 제4기 단층운동	이유영
16:35-16:50	강지훈(안동대)	충주-괴산 지역 계명산층과 문주리층 구성암류의 특징과 차이점으로부터 옥천열곡작용의 고찰	
16:50-17:05	박문재(서울대)·정해명(서울대)	중국 북서부 North Qaidam 초고압변성대 유카 에클로자이트에서 나타나는 전진/후퇴변성작용과 변형메커니즘에 대한 연구	
17:05-17:15	Coffee Break		
17:15-17:30	Xiaohan Wan(전북대)· Chang-Whan Oh(전북대)· Byung-Choon Lee(지자연)	The Paleoproterozoic igneous and metamorphic activities in the Ji'an Group within the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton and its tectonic meaning	이호선
17:30-17:45	이유영(기초연)·조문섭(충북대)·김태훈(지자연)	영남육괴 고온변성작용과 차노카이트 형성의 시간적 관계	
17:45-18:00	부이 빈 하우(충북대)·김윤섭(충북대)·정연중(기초연)	북서 베트남 송마 봉합대 남코 부가체 변성이질암의 초기 트라이아스기 고압 변성작용과 후기 트라이아스기 중압 변성작용	
18:00-	<b>간담회</b>		

5월 30일 포스터발표장

포 스테 발 표		좌 장
1	서정민(안동대)·홍수민(안동대)·김영훈(안동대)·김정진(안동대)	권기덕
2	서정민(안동대)·홍지은(안동대)·김영훈(안동대)·김정진(안동대)	
3	이유수(극지연)·한영철(서울대)·이성근(서울대)	
4	문동혁(문화재연)·권혁남(문화재연)·곽병문(중원문화재연)·이은우(중원문화재연)	
5	민소영(경북대)·김영규(경북대)	
6	여진우(경북대)·김영규(경북대)	
7	박수정(강원대)·권기덕(강원대)	
8	박영규(연세대)·이재일(극지연)·정재우(연세대)·Claus-DieterHillenbrand(BAS)·유규철(극지연)·김진욱(연세대)	
9	오토곤-에르덴 다바수렌(지자연)·이범한(지자연)·유봉철(지자연)·고상모(지자연)	
10	호르게 아코스타(페루 지질광업제현연구소)·허철호(지자연)	
11	김규례(경북대)·김영규(경북대)	
12	김은정(서울대)·이성근(서울대)	
13	심규훈(충남대)·유재형(충남대)·고상모(지자연)·이범한(지자연)	
14	정바루(충남대)·유재형(충남대)·고상모(지자연)·이범한(지자연)	
15	김지훈(안동대)·이덕선(울산재난관리과)·노신영(안동대)·정진우(안동대)·고상모(지자연)	김윤섭
16	황상구(안동대)·이소진(안동대)·한기환((주)서정)	
17	이소진(안동대)·황상구(안동대)·송교영(지자연)	
18	김선규(충남대)·최성희(충남대)	
19	이보영(전북대)·오창환(전북대)·이기욱(기초연)	
20	최현욱(충남대)·최성희(충남대)·김승섭(충남대)	
21	김원정(전북대)·오창환(전북대)·이승환(전북대)·김진석(전북대)·신명호(전북대)·정지완(전북대)	
22	Hoang Thi Hong Anh(충남대)·최성희(충남대)·유영재(충남대)·Pham Trung Hieu(Ho Chi Minh City University of Science)	
23	이은지(충남대)·최성희(충남대)·김지인(충남대)·이정현(충남대)	
24	한충희(강원대)·전혜수(강원대)·박영록(강원대)	
25	김태현(자자연)·이승구(지자연)·유재영(강원대)	

포스터 부착 09:00 - 18:00. 발표자 대기 시간 13:00-13:30  
※ 발표자 대기 시간이 짧은 관계로 학술발표시간 이외에 자유로운 토의를 부탁드립니다.

2019

(사)한국광물학회 학술발표회 일정

May 30, 2019

제 1 발표장

자연대 3호관 105호

5월 30일 / 목

09:00 - 09:30	등록
09:30 - 10:45	구두발표 I
10:45 - 11:00	휴식
11:00 - 11:30	구두발표 II
11:30 - 12:00	포스터퍼레이드
12:00 - 13:30	중식 및 포스터 발표
13:30 - 14:45	공동총회 및 특별강연
14:45 - 15:00	휴식
15:00 - 15:30	(사)한국광물학회정기총회
15:30 - 15:50	구두발표 III
15:50 - 16:20	포스터 발표
16:20 - 17:05	구두발표 IV
17:05 - 17:45	구두발표 V
17:45 - 18:00	우수발표상 시상
18:00 -	간담회

5. 30 / Thu.

제1발표장 (사)한국광물학회

좌장:장세정

09:00-09:30

등 록

09:30-09:45

손상보, 권기덕

밀도범함수이론 계산을 이용한 저온조건에서의 황화철광물 상변환 연구

09:45-10:00

구태희, 김지영, 김진욱

저온 환경에서의 철 환원 미생물(FeRB)에 의한 논트로나이트의 구조/화학적 특성 변화 연구

10:00-10:15

이효진, 장세정

동위원소 질량분석기를 이용한 인산염 산소동위원소 분석법

10:15-10:30

김주혁, 권기덕

분자동역학을 통한 토도로카이트 연구

10:30-10:45

이성근

수 메가바 압력하에서의 지구물질의 구조 및 성질: 핵자기 공명분광분석과 비탄성 산란 연구결과

10:45-11:00

Coffee Break

좌장:김현나

11:00-11:15

이아침, 이성근

암석권 순환의 지구화학적 추적자로 이용되는 붕소를 함유한 규산염 용융체의 압력에 따른 네트워크 연결도 변화: 고상 핵자기 공명 분광분석 연구

11:15-11:30

한수연, 권기덕

다카네라이트와 란시아이트 층간 구조에 대한 분자동역학 시뮬레이션 연구

11:30-12:00

포스터 퍼레이드

12:00-13:30

중식 및 포스터 발표

5. 30 / Thu.

제1발표장 (사)한국광물학회

좌장:권기덕

13:30-13:45

**공동총회**

\*자연대 5호관 101호

13:45-14:15

**고상모, 김남훈, 이길재, 유병운**

한반도 북부의 지질 및 광화작용

\*자연대 5호관 101호

특별강연

14:15-14:45

**이승구**

화성암의 진화과정과 동위원소 분별작용

\*자연대 5호관 101호

특별강연

14:45-15:00

**Coffee Break**

15:00-15:30

**(사)한국광물학회 정기총회**

좌장:권기덕

15:30-15:50

**김진욱**

Reviews in Microbially-induced Smectite-to-illite Reaction

15:50-16:20

**포스터 발표**

5. 30 / Thu.

제1발표장 (사)한국광물학회

좌장:현성필

16:20-16:35

**김민식, 한기성, 이범한, 김진철, 김현나**

입도 및 결정도가 백운석의 탈이산화탄소 반응에 미치는 영향

16:35-16:50

**김효임, 이성근**

철 함량 증가에 따른 비정질 알루미늄규산염의 원자구조와 무질서도의 변화:  
포스바우어 및 다핵종 고상 핵자기공명 분광분석을 이용한 연구

16:50-17:05

**정재우, 김기태, 박영구, 이재일, 유규철, 김진욱**

결빙시 철 함유광물의 생지화학적 변이작용

17:05-17:15

**Coffee Break**

좌장:이유수

17:15-17:30

**권진중, 김효임, 이상화, 김재용, 이성근**

수소 저장된  $Ti_{53}Zr_{27}Ni_{20}$  준결정에 대한 고해상도  $^1H$  MAS NMR 연구

17:30-17:45

**박창근**

태양계 최초물질에서 발견되는 육방정계  $CaAl_2Si_2O_8$ (dmisteinbergite)의 기원 연구

17:45-18:00

**우수발표상 시상**

18:00-

**간담회**

2019

한국암석학회 학술발표회 일정

May 30~31, 2019

제 2 발표장

자연대 5호관 101호

5월 30일 / 목

09:00 - 09:30	등록
09:30 - 10:45	구두발표 I
10:45 - 11:00	휴식
11:00 - 12:00	구두발표 II
12:00 - 13:30	중식 및 포스터 발표
13:30 - 14:45	공동총회 및 특별강연
14:45 - 15:00	휴식
15:00 - 15:30	한국암석학회정기총회
15:30 - 16:10	구두발표 III
16:10 - 16:20	휴식
16:20 - 17:05	구두발표 IV
17:05 - 18:00	구두발표 V
18:00 -	간친회

5월 31일 / 금

야외학술답사

5. 30 / Thu.

제2발표장 한국암석학회

좌장:박문재

09:00-09:30

등록

09:30-09:45

박용, 정해명

고압에서 녹염석 청색편암의 변형과 섭입대에서의 지진파 전파 특성 연구

09:45-10:00

김도현, 정해명

Strain-induced lattice-preferred orientation of chlorite and implications for seismic anisotropy

10:00-10:15

이정진, 정해명, Reiner Klemd

섭입대에서 활석 편암의 변형과 지진파 P파 비등방성에 미치는 영향 연구

10:15-10:30

최사랑, 박정우, 김종욱, 오지혜, 박창근

중앙인도양해령 반려암질 암석에서 관찰된 멜트-암석 반응의 증거와 멜트-암석 반응이 중앙해령현무암 성분에 미치는 영향

10:30-10:45

김지혁, 박정우, 이미정, 이종익, Philip R. Kyle

알칼리 마그마의 진화: 남극 북빅토리아랜드 플레이아데스 화산 복합체의 동시기 소듐 및 포타슘 마그마 분화 계열

10:45-11:00

Coffee Break

좌장:박창근

11:00-11:15

황상구, 이소진, 오경식

Interpretation on Changes in Eruptive Styles from Vesicularity and Textural Analyses of Pumice Clasts in the Maljandeung Tuff, Ulleung Island, Korea

11:15-11:30

김지인, 최성희, 이기욱, 이신애

경기육괴 서남부 가로림만 지역 지곡리층 혼성편마암의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대와 의미

11:30-11:45

이호선, 정창식

펨토초 레이저사박 유도결합플라즈마질량분석기를 이용한 저어콘 미량원소 분석

11:45-12:00

정창식

우리나라 저어콘 분석 현황

12:00-13:30

중식 및 포스터 발표

5. 30 / Thu.

제2발표장 한국암석학회

좌장:권기덕

13:30-13:45

**공동총회**

\*자연대 5호관 101호

13:45-14:15

**고상모, 김남훈, 이길재, 유병운**

한반도 북부의 지질 및 광화작용

\*자연대 5호관 101호

특별강연

14:15-14:45

**이승구**

화성암의 진화과정과 동위원소 분별작용

\*자연대 5호관 101호

특별강연

14:45-15:00

**Coffee Break**

15:00-15:30

**한국암석학회 정기총회**

좌장:김윤섭

15:30-15:50

**장윤득**

Syenite from Ulleung Island: As a Window for Pre-eruptive Shallow Alkaline Magma Dynamics

15:50-16:10

**박창근**

대형 이차이온질량분석기를 이용한 태양계 최초 물질의  $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  동위원소 시스템 연구

16:10-16:20

**Coffee Break**

5. 30 / Thu.

제2발표장 한국암석학회

좌장:이유영

16:20-16:35

**류충렬**

울산시 울주군 삼남면-삼동면 남쪽 경계부 양산단층대 일대에 발달하는 압축성 호상선상구조와 제4기 단층운동

16:35-16:50

**강지훈**

충주-괴산 지역 계명산층과 문주리층 구성암류의 특징과 차이점으로부터 옥천열곡 작용의 고찰

16:50-17:05

**박문재, 정해명**

중국 북서부 North Qaidam 초고압변성대 유카 에클로자이트에서 나타나는 전진/후퇴변성작용과 변형메커니즘에 대한 연구

17:05-17:15

**Coffee Break**

좌장:이호선

17:15-17:30

**Xiaohan Wan, Chang-Whan Oh, Byung-Choon Lee**

The Paleoproterozoic igneous and metamorphic activities in the Ji'an Group within the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton and its tectonic meaning

17:30-17:45

**이유영, 조문섭, 김태훈**

영남육괴 고온변성작용과 차노카이트 형성의 시간적 관계

17:45-18:00

**부이 빈 하우, 김윤섭, 정연중**

북서 베트남 송마 봉합대 남코 부가체 변성이질암의 초기 트라이아스기 고압 변성작용과 후기 트라이아스기 중압 변성작용

18:00-

**간담회**

5. 30 / Thu.

포스터발표

좌장:권기덕/ 김윤섭

1	서정민·홍수민·김영훈·김정진	안동호와 임하호의 퇴적물 및 유입 부유물질의 중금속 특성 연구
2	서정민·홍지은·김영훈·김정진	안동호 퇴적물의 중금속 용출 특성 연구
3	이유수·한영철·이성근	남극지방 수은 및 반응성 수은 화합물 침적의 원자단위의 기원에 대하여
4	문동혁·권혁남·곽병문·이은우	충주지역 제철유적 출토 철광석의 산지해석을 위한 예비연구
5	민소영·김영규	버네사이트의 합성시 양이온 조건에 따른 토도로카이트의 상전이 특성
6	여진우·김영규	산성광산배수에서 발견되는 흰색 침전물의 상전이의 특성
7	박수정·권기덕	Na-, K-, Cs-버네사이트 분자동역학 시뮬레이션 연구
8	박영규·이재일·정재우· Claus-DieterHillenbrand· 유규철·김진욱	빙기-간빙기 동안의 스멕타이트의 화학 성분 분포를 이용한 기원지 분석: 남극 드레이크 해협 및 벨링스하우젠 해
9	오토곤·에르덴 다바수렌· 이범한·유봉철·고상모	몽골 무슈가이-후닥과 한국 홍천 지역의 희토류 광화작용에 대한 비교 연구
10	호르게 아코스타·허철호	페루 중부 오운 다중금속광화대의 황동위원소값
11	김규례·김영규	흡착된 비산염, 크롬산염, 그리고 셀레늄산염이 페리하이드라이트의 상변화에 미치는 영향
12	김은정·이성근	14 GPa의 고압에서 탄소를 포함한 비정질 $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 의 고상 NMR 연구
13	심규훈·유재형·고상모·이범한	필릭 및 아질릭 열수변질광물의 분광학적 특성

5. 30 / Thu.

포스터발표

좌장:김윤섭/ 권기덕

14	정바루·유재형·고상모·이범한	탄산염광물의 분광학적 특성과 광체탐지
15	강지훈·이덕선·노신영·정진우·고상모	육천변성대 충주-괴산 지역의 구성암류와 지질: 육천 충상단층 및 지구조단위 고찰
16	황상구·이소진·한기환	울릉도 말잔등응회암의 입도 및 구성원 분석과 화산분화 유형
17	이소진·황상구·송교영	통영 서부 사랑도응회암의 마그마 진화
18	김선규·최성희	백령도, 평택 및 아산 지역 후기 신생대 알칼리 현무암의 근원물질 종류에 대한 예비연구
19	이보영·오창환·이기욱	경기육괴 서남부 당진지역과 경기육괴 북부 고남산 지역에 나타나는 신원생대 화성작용 대비
20	최현욱·최성희·김승섭	포항-영덕 지역의 페름기-트라이아스기 화강암류에 대한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대 및 암석 성인에 대한 예비 연구
21	김원정·오창환·이승환·김진석·신명호·정지완	고군산군도지역의 신원생대 방축도층과 이를 관입한 화성암의 형성시기 및 지구조환경
22	Hoang Thi Hong Anh· 최성희·유영재· Pham Trung Hieu	Formation and Evolution of the Lithospheric Mantle beneath Southern Vietnam
23	이은지·최성희·김지인·이정현	대마도 마이오세 관입암류의 지구화학적 특징: 예비연구
24	한충희·전혜수·박영록	화천군 사내면 일대에 분포하는 쥐라기 화강암질암의 성인에 대한 암석화학적 연구
25	김태현·이승구·유재영	ICP-MS를 이용한 지질시료에서의 희토류원소 함량 분석 시에 발생하는 Ba, Ce, Pr의 산화물과 희토류원소 분포도의 상관성

# 제 1 발표장

자연대 3호관 105호  
(사)한국광물학회



- ▣ 밀도범함수이론 계산을 이용한 저온조건에서의 황화철광물 상변환 연구 손상보, 권기덕
  
- ▣ 저온 환경에서의 철 환원 미생물(FeRB)에 의한 논트로나이트의 구조/화학적 특성 변화 연구 구태희, 김지영, 김진욱
  
- ▣ 동위원소 질량분석기를 이용한 인산염 산소동위원소 분석법 이효진, 장세정
  
- ▣ 분자동역학을 통한 토도로카이트 연구 김주혁, 권기덕
  
- ▣ 수 메가바 압력하에서의 지구물질의 구조 및 성질: 핵자기 공명분광분석과 비탄성 산란을 연구결과 이성근
  
- ▣ 암석권 순환의 지구화학적 추적자로 이용되는 붕소를 함유한 규산염 용융체의 압력에 따른 네트워크 연결도 변화: 고상 핵자기 공명 분광분석 연구 이아침, 이성근
  
- ▣ 다카네라이트와 란시아이트 층간 구조에 대한 분자동역학 시뮬레이션 연구 한수연, 권기덕
  
- ▣ 특별강연: 한반도 북부의 지질 및 광화작용 고상모, 김남훈, 이길재, 유병운
  
- ▣ 특별강연: 화성암의 진화과정과 동위원소 분별작용 이승구
  
- ▣ 김수진 학술상 수상자 강연: Reviews in Microbially-induced Smectite-to-illite Reaction 김진욱
  
- ▣ 입도 및 결정도가 백운석의 탈이산화탄소 반응에 미치는 영향 김민식, 한기성, 이범한, 김진철, 김현나
  
- ▣ 철 함량 증가에 따른 비정질 알루미늄규산염의 원자구조와 무질서도의 변화: 뫼스바우어 및 다핵종 고상 핵자기공명 분광분석을 이용한 연구 김효임, 이성근
  
- ▣ 결빙시 철 함유광물의 생지화학적 변이작용 정재우, 김기태, 박영구, 이재일, 유규철, 김진욱

## 밀도범함수이론계산을 이용한 저온조건에서의 황화철광물 상변환 연구

Phase transition pathways of iron sulfides at low temperature: A density functional theory study

손상보(Sangbo Son) · 권기덕(Kideok D. Kwon)\*

강원대학교 지질학과 광물학 연구실

저온(low temperature) 환경에서 일어나는 황화철광물 [iron sulfide;  $\text{FeS}_{1+x}$  ( $x=0\sim 1$ )]의 상전이 거동은 전지구적으로 일어나는 철(iron; Fe)과 황(sulfur; S)의 지화학적 순환에 깊게 관여하는 핵심 메커니즘으로 알려져 있다. 현재 저온 환경에서 가장 많은 비율로 분포하고 있는 황철석의 대부분은 열역학적으로 준안정한(metastable) 막크나와이트(mackinawite; FeS)라는 전구체(precursor)가 여러 단계의 상변환(phase transformations)을 거치면서 형성된 최종 산물로 고려된다. 과거 황화철광물의 세부적인 상변환 과정을 연구한 실험에 의하면 막크나와이트가 겪는 상변환 중간 단계 물질들은 주변 환경 조건에 크게 좌우된다. 그러나 막크나와이트와 같이 열역학적으로 매우 불안정한 상전이 중간 산물은 반응성이 매우 높고, 나노크기일 뿐만 아니라 결정도 또한 낮아서 실험 연구가 상당히 어렵다. 과거 황화철광물의 연구결과 또한 황화철광물들의 상대적인 안정성에 대해서 이견을 보여주고 있다. 위와 같은 실험적 어려움을 극복하기 위해서는 예측하지 못한 외부 변수에 의한 오차를 완벽하게 통제할 수 있는 이론적 계산 연구가 중요하다. 이번 발표에서는 양자역학 이론을 기반으로 하는 밀도범함수이론(density functional theory) 계산 방법을 사용하여 황화철광물들의 포베다이어그램과  $\text{H}_2\text{S}$  농도에 따른 상대적인 열역학적 안정성 비교 결과를 발표하고, 이를 토대로 예측한 황화철광물의 세부적인 상전이 경로에 대해서 토의하고자 한다.

## 저온 환경에서의 철 환원 미생물(FeRB)에 의한 논트로나이트의 구조/화학적 특성 변화 연구

Structural/chemical modification of nontronite associated with low-temperature respiration  
by Fe-reducing bacteria

구태희 (Tae-hee Koo)<sup>1</sup> · 김지영 (Jee-young Kim)<sup>1,2</sup> · 김진욱 (Jin-wook Kim)<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 지구시스템과학과 생지구화학연구실

<sup>2</sup>원주지방환경청 기획평가국 측정분석과

철 환원 미생물에 의한 광물의 환원, 특히 논트로나이트의 환원에 의해 유도되는 스펙타이트-일라이트 상전이 반응 (S-I 반응)은 지난 십수년간 활발하게 연구된 주제로, 최근에는 실험실 규모의 회분식 실험의 결과를 토대로 자연환경에서 일어난 미생물에 의한 S-I 반응이 보고되었다. 그러나 아직 자연계에서 일어나는 미생물과 광물간의 반응은 구체적인 메커니즘이나 반응결과로 야기되는 생광물화작용 및 그 특성에 대한 연구는 제한적으로 이루어졌다. 따라서 다양한 자연환경에서의 미생물에 의한 S-I 반응을 이해하고 설명하고자 극한조건에서의 회분식 실험들을 수행하였으며, 본 연구에서는 그 일환으로 저온 (4°C)에서 성장-활동하는 미생물 균주를 이용한 논트로나이트의 구조 및 화학적 특성 변화 연구를 수행하였다.

저온 활동 미생물 균주인 *Shewanella vesiculosa* 와 *Shewanella frigidimarina* 를 산소를 제거한 M1 배지에 접종하고, 논트로나이트 N Au-1을 5 mg/mL의 농도로 분산시킨 뒤 4°C 배양기에서 ~1주일-1년의 기간동안 배양하였다. 이후 시료를 얼려 반응을 종결시키고 소분하여 X-선 회절분석, 철 산화도 측정, 양이온교환능 (CEC) 계산, 전자현미경 분석 및 상등액 성분분석을 실시하였다.

1년의 반응시간 경과 동안, 두 균주 모두 논트로나이트의 구조를 이루는 3가철을 환원시켜 18-21%의 환원도를 보이는 것을 확인하였으며, X-선 회절분석 결과에서는 6개월-1년 간의 장기간 반응 시료의 경우 층간간격이 11.2 Å 으로 나타났으며, 에틸렌글리콜 및 Li 처리 이후에는 10 Å 자리에서 일라이트 구조의 특성이 나타나는 것으로 확인되었다. 구조적 변화와 함께 각 점토광물의 화학적 특성 (성분구조비 및 양이온 교환능)의 변화도 확인되었으며, 상등액으로 구성성분이 용출되는 환원적 용출과 다시 새로운 2차광물의 형성 (납철석,  $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ )이 확인되었다. 이는 저온에서 미생물의 대사작용이 광물의 특성변화에 매우 중요한 역할을 할 수 있음을 확인한 결과이며, 남극과 같은 극지방에서의 점토광물의 형성, 변이과정 연구에 있어 매우 중요한 성과이다. 본 발표에서는 이러한 분석결과와 함께 미생물에 의한 S-I 반응 및 함께 수반되는 지화학적 결과가 자연환경, 특히 극한환경에서 갖는 의의에 대해 논의하고자 한다.

## 동위원소 질량분석기를 이용한 인산염 산소동위원소 분석법

A method for analyzing the oxygen isotopes of phosphate using a isotope ratio  
mass spectrometer

이효진(Hyojin Lee) · 장세정(Sae Jung Chang)\*

한국기초과학지원연구원 서울센터

인산염(phosphate, PO<sub>4</sub>)의 산소동위원소비(18O:16O,  $\delta$  18OPO<sub>4</sub>)는 과거 기후변화와 생명체 흔적을 복원하고, 인(P)의 생지화학적 순환을 이해하는데 유용하게 사용되고 있다. 특히, 인회석 (Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH,F,Cl)<sub>2</sub>) 광물 결정구조 내에 존재하는 인산염의 산소동위원소비( $\delta$  18OPO<sub>4</sub>)는 그 광물이 형성되던 시기의 주변 환경정보를 담고 있어, 고(古)환경 연구에 활용될 수 있다. 하지만 유기물이 다량 포함된 암석 시료의 경우, 산(ex, HCl, HNO<sub>3</sub>)을 이용하여 인회석 기원의 인산염을 추출하는 동안 유기-인(P)이 분해되어 유기 기원의 인산염으로 대상 시료가 오염되는 문제점이 있다.

본 연구에서는 유기탄소(TOC: 2-47 wt%) 함량이 다양한 선캄브리아기(~20 Ga)의 퇴적암(이암, 백운암, 사암)을 대상으로 유기-인(P)의 오염 없이 인회석 기원 인산염을 추출하고 정제하는 효율적인 시료전처리 방법을 정립하였다. 또한, 순수하게 정제된 인회석 기원 인산염의 산소동위원소비는 최근에 구축한 원소분석기(High temperature conversion elemental analyzer, TCEA)와 동위원소 질량분석기(Isotope ratio mass spectrometer, IRMS)를 연결한 TCEA-IRMS 시스템을 이용하여 분석하였다. 시료전처리 및 TCEA-IRMS 분석법의 신뢰성 검증을 위하여 표준물질에 대한 인산염 산소동위원소 분석을 실시하였고, 표준물질의 인증 값과 통계적으로 유의미한 차이가 없음을 확인하였다. 이번 연구에서 확립한 인회석 기원 인산염의 산소동위원소 분석법은 향후 암석을 이용한 고(古)환경 연구에 활용이 가능할 것으로 기대한다.

## 분자동력학을 통한 토도로카이트 연구

A study of todorokite using the molecular dynamics simulation

김주혁(Juhyeok Kim) · 권기덕(Kideok D. Kwon)\*

강원대학교 자연과학대학 지질학과

산화망간광물(manganese oxide minerals)은 층상 혹은 터널구조를 가지며, 그 안에 물과 양이온을 함유할 수 있어 미량원소 또는 중금속의 순환을 조절하는 중요한 역할을 한다. 토도로카이트(todorokite)는 터널형 산화망간광물 중 하나로, 3개의 Mn팔면체로 이루어진 기둥이 우각을 공유함으로써 3×3의 터널을 구성한다. 토도로카이트의 상대적으로 큰 터널은 보다 다양한 양이온을 함유할 수 있어 많은 연구의 대상이 되어왔다. 하지만 토도로카이트는 결정도가 매우 불량하고 나노 크기로 산출되기 때문에, 실험적으로 광물의 내부구조에 대해 연구하기에는 한계가 존재한다. 이번 연구는 토도로카이트 내부의 양이온 구조에 대한 이론적 정보를 제공하기 위해 원자 관점에서의 연구가 가능한 고전분자동력학 시뮬레이션(classical molecular dynamics simulation)을 수행하였다. 고전분자동력학 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 원자들 간의 상호작용을 묘사하는 정확한 가변변수가 필요한데, 최근 우리 실험실에서 개발한 산화망간에 특화된 힘 장(force field)을 사용하였다. 이론적 계산으로 얻은 토도로카이트의 격자상수는 기존 실험결과와 약 5% 이내의 매우 작은 오차를 보여 이번 연구 방법이 실제 토도로카이트를 잘 재현했다고 판단하였고, 다양한 양이온( $Mg^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Cs^+$ )을 함유시켜 구조를 분석하였다.  $Mg^{2+}$ 는 터널의 중앙에 우세하게 위치하고 일부는 터널 표면 근처에 위치하는 것이 확인되었으며 이는 기존 실험결과와 일치한다. 물의 함량을 증가시킬 경우,  $Cs^+$ 를 제외한 모든 양이온이 터널 중앙에 일렬로 배열되는 경향을 관찰하였다.  $Cs^+$ 는 다른 양이온들과는 다르게 물의 함량에 관계없이 항상 터널의 표면 근처에 위치하는 경향을 보인다. 다른 양이온들은 터널 중앙에서 물 분자와 배위하기를 선호하는 반면,  $Cs^+$ 는 터널의 표면 근처에서 물 분자 뿐만 아니라 터널을 구성하는 산소와도 배위하므로  $Cs^+$ 가 토도로카이트와 inner-sphere complex를 형성할 가능성이 있다고 판단된다. 고전분자동력학 시뮬레이션을 통해 토도로카이트 내부 양이온은 선호하는 위치가 서로 다르며,  $Cs^+$ 는 inner-sphere complex를 선호하는 결과를 얻었다. 따라서 토도로카이트가  $Cs^+$ 를 효과적으로 제거할 가능성이 있을 것으로 판단된다.

수 메가바 압력하에서의 지구물질의 구조 및 성질: 핵자기 공명분광분석과  
비탄성 산란을 연구결과

Earth materials above multi-megabar pressure conditions: Insights from double  
quantum NMR and inelastic X-ray scattering

이성근(Sung Keun Lee)

서울대학교 지구환경과학부

When compressed well above megabar pressures (100 Gigapascal), non-crystalline earth materials, such as oxide glasses and melts may undergo structural transitions into more densely packed networks that are expected to be significantly differ from those at ambient pressure and those of crystalline minerals. Recent technical advances in synchrotron inelastic X-ray scattering (IXS) and high-resolution solid-state NMR provided insights into the pressure-induced bonding changes in both non-crystalline and crystalline oxides well beyond 100 GPa. Here, we provide an overview of the experimental and theoretical progress and insights by IXS into electronic structures of key crystalline and amorphous earth materials under extreme compression well beyond *mega-bar* pressure conditions up to 160 GPa. Advances in high resolution solid-state NMR *via* double quantum magic angle spinning techniques allow us to reveal the first direct connectivity and proximity among major cations, such as  $^{27}\text{Al}$  and  $^{11}\text{B}$  in oxide glasses under compression at high pressure. These experimental breakthroughs shed light on a new opportunity to delve into the hidden origins of the configurational entropy of the melts in Earth's mantle and those in the Super-Earth bodies.

## 암석권 순환의 지구화학적 추적자로 이용되는 붕소를 함유한 규산염 용융체의 압력에 따른 네트워크 연결도 변화: 고상 핵자기 공명 분광분석 연구

Network connectivity of silicate melts containing boron considered as a  
geochemical tracer for recycled lithosphere in the Earth's interior:

Insights from high-resolution solid-state NMR

이아침(A Chim Lee) · 이성근(Sung Keun Lee)\*

서울대학교 지구환경과학부, 서울시 관악구 관악로 1

붕소를 포함한 휘발성 원소들은 상대적으로 지표에 농집되어 있고, 이들을 함유한 마그마의 물성에 큰 영향을 미친다. 맨틀 내부에는 암석권의 순환으로 인해 다량의 휘발성 성분의 존재가 예상되고 따라서 이들의 존재는 지구 내부 맨틀의 용융 및 이동에 영향을 미칠 것이다. 여러 저장고에서 발견되는 휘발성 성분을 통해 암석권의 순환을 이해하기 위해서는 각 저장고에서 이들의 거동에 대한 이해가 뒷받침되어야 한다. 암석권의 순환은 지각과 맨틀의 상호작용에 대한 이해가 선행되어야 하며, 이에 대한 지구화학적 추적자는 다음의 세 가지 조건을 만족해야 한다. 첫째, 높은 불호정성을 지녀서 지각에 풍부하고 맨틀에는 상대적으로 결핍이 되어야 한다. 둘째, 맨틀까지 섭입될 수 있어야 하며, 마지막으로 마그마 활동을 통해 지표로 상승할 때, 정출이 어려워야 한다. 이 세 가지를 모두 만족시키면서 동위 원소 조성 또한 지각과 맨틀에서 차이가 큰 휘발성 원소가 붕소이다. 뿐만 아니라 붕소는 친수성이 크기 때문에 물과 거동을 함께 할 것으로 예상되기 때문에 지구 내부에서 물의 순환에 대한 간접적인 지시자로도 대두되고 있다. 붕소는 불호정성(incompatible) 원소로 평균 지각 암석에 약 10-200ppm 함유되어 있고, 결핍 맨틀에는 0.1ppm 미만이 함유된 것으로 보고되었다(Leeman and Sisson, 1996). 또한 안정 동위 원소  $^{10}\text{B}$  및  $^{11}\text{B}$ 를 지니므로 질량 차이가 10%로  $\delta^{11}\text{B}$ 의 변화량이 크다. 예를 들어, 변질된 해양 지각의 값은 약 25‰, 결핍 맨틀에는 약 -10‰으로 보고되었다(Leeman and Sisson, 1996). 블루 다이아몬드의 존재는 붕소가 부화(0.01-10ppm)되어 있는 유체 및 용융체가 하부 맨틀에 존재하고, 붕소가 하부 맨틀까지 섭입하여 지표로 순환한다는 것을 지시하므로(Smith et al., 2018), 지구 내부에서 붕소를 함유한 규산염 용융체의 물성 변화 및 이에 관한 메커니즘 연구가 필요하다.

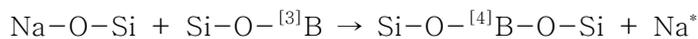
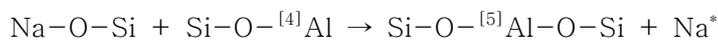
규산염 마그마 내에서의 원소의 거동 및 물성에 미치는 영향을 규명하기 위해 해당 마그마의 원자 구조에 대한 이해가 필요하다. 예를 들어, 규산염 용융체의 점성도는 중합도가 감소함에 따라 감소하고, 중합도는 규산염 용융체 내의 비연결산소의 비율이 증가하면 감소한다. 붕소를 함유한 규산염 용융체 내의 조성 또는 압력에 따른 네트워크 연결도 측정을 통해 점성도 변화를 유추할 수 있다. 하부 맨틀에서 붕소의 거동을 이해하기 위해서는 해당 압력(~24GPa) 대에서의 네트워크 연결도 및 네트워크 형성 이온의 배위 정보를 포함

하는 원자 구조에 대한 규명이 필요하다. 약 3GPa 압력에서 붕소를 함유한 알루미늄노실리케이트 용융체(CaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>)의 붕소의 배위 환경 변화는 규명이 되었고(Bista et al., 2017), 하부 맨틀 조건에서의 원자 구조 규명 이전에 중간 영역 대에 해당하는 압력에서 압력이 네트워크 형성 이온의 배위 환경 및 네트워크 연결도에 미치는 영향에 대한 이해가 필요하다.

핵종의 원자 구조와 네트워크 연결도에 대한 직접적인 정보를 제공하는 방법론 중 고해상도 고상 핵자기 공명 분광분석(high-resolution solid nuclear magnetic resonance spectroscopy: NMR)은 여러 핵종의 배위 환경을 스펙트럼에서 피크의 위치로 구분하고 분율에 대한 정량적인 정보를 제공한다. <sup>17</sup>O NMR 분광 분석법은 산소 주변 원자 환경에 대한 정보를 제공하고, 이차원 <sup>17</sup>O 3QMAS(triple quantum magic angle spinning) NMR 스펙트럼은 연결산소와 비연결산소를 분리하여 네트워크 연결도와 무질서도에 대한 정보를 제공한다. 본 연구에서는 NMR 분광 분석법을 이용하여 6 및 9GPa 압력 하에서 합성된 붕소를 함유한 비정질 소듐알루미늄노실리케이트(2Na<sub>2</sub>O-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-4SiO<sub>2</sub>)의 압력에 따른 원자 구조 변화를, 이전에 획득한 붕소, 알루미늄, 소듐의 원자 환경 변화와 더불어, 규명하였다.

산소의 배위수가 2일 때(<sup>12</sup>O), 네트워크 형성 이온 두 개와 공유결합 하고 있을 때의 산소를 연결 산소(예, Si-O-Si), 네트워크 교란 이온에 의해 한쪽의 네트워크 형성 이온과의 공유 결합이 끊어진 산소를 비연결 산소(예, Na-O-Si)라고 한다. 1기압에서 합성된 NaAl<sub>0.5</sub>B<sub>0.5</sub>SiO<sub>4</sub> 클래스의 이차원 <sup>17</sup>O 3QMAS NMR 스펙트럼 결과, 비연결 산소인 Na-O-Si의 존재가 확인되었고, 연결 산소인 Si-O-Al, Si-O-Si, Si-O-B, 그리고 소량의 B-O-B가 존재하는 것이 밝혀졌다. 압력이 증가함에 따라 해당 클래스 내의 Na-O-Si와 B-O-B의 분율이 감소하였고, 반면에 Si-O-B는 증가하였다. 이전 연구에서 획득한 <sup>11</sup>B NMR 결과, 압력에 따라 <sup>14</sup>B가 증가하는 것이 관찰되었으며, 배위수 증가에 따라 B-O-B가 감소한 것으로 보인다. 또한 압력에 따라 증가한 Si-O-B의 B는 4 배위수일 것으로 예상된다. Si-O-Al 피크와 Si-O-Si 피크 사이에는 고배위수 알루미늄과 연결된 Si-O-<sup>[5,6]</sup>Al의 생성 또한 관찰할 수 있다.

압력에 따른 Na-O-Si의 감소는 해당 비정질 규산염의 중합도의 감소를 의미한다. 압력에 따른 고배위수 붕소 및 알루미늄 생성을 고려하면 다음과 같은 메커니즘을 통해 중합도가 감소할 수 있다.



위의 식에서, Na\*는 charge balancing cation이다. 이전에 획득한 <sup>23</sup>Na NMR 결과, Na이 Al보다 B와 공간적인 친밀도(spatial proximity)가 더 높으므로 후자의 식에 의해 Na-O-Si의 감소가 우세할 것으로 생각된다. Na-O-Si의 감소는 고압 환경에서 붕소를 함유한 규산염 용융체의 점성도의 증가를 야기할 것이다. Na와 B의 공간적인 친밀도가 높은 것을 통해 지구 내부 상부 맨틀에서 용융체 내의 나노단위의 비균질성을 예상할 수 있

고, 이 경향성이 하부 맨틀까지 적용된다면, 블루 다이아몬드를 생성하는 붕소가 부화된 유체의 존재에 대한 가능성과 휘발성 원소들의 맨틀 내부에서의 분포에 관한 단서를 제공할 것으로 보인다. 또한 압력에 의해  $^{41}\text{B}$ 가 증가하는 것을 통해, 마그마 생성 깊이가 깊어질수록, 마그마 내에 존재하는 붕소의  $\delta^{11}\text{B}$  값이 감소할 것이다. 이를 통해 블루 다이아몬드의 유체 포획물 내의 붕소 또한 매우 낮은  $\delta^{11}\text{B}$  값을 지닐 것으로 예상된다.

본 연구에서는 이전 연구에서 획득한  $^{11}\text{B}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{27}\text{Al}$  NMR 결과를 토대로, 6 및 9GPa 압력 하에서 합성된 붕소를 함유한 규산염 용융체의 네트워크 연결도 및 무질서도를  $^{17}\text{O}$  NMR 분광 분석 방법론을 통해 규명하였다. 이전 연구에서 압력이 증가함에 따라 고배위수  $^{41}\text{B}$  및  $^{5,6}\text{Al}$ 이 증가하는 것이 관찰되었고, Na가 Al보다 B와 공간적인 친밀도가 높다는 것을 통해 Na-O-Si 감소는  $^{41}\text{B}$ 를 생성함과 동시에 Na는  $^{41}\text{B}$  주위에서 charge balancing cation의 역할을 할 것이라고 결론지었다. Si-O- $^{5,6}\text{Al}$ 의 비율이 압력에 따라 증가하는 것 또한 관찰되었고, Na-O-Si는 감소하여 이것이 붕소를 함유한 규산염 용융체의 점성도 증가에 영향을 미칠 것이다. 암석권 순환에 대한 지구화학적 추적자로 붕소를 이용하기 위해서는 하부 맨틀 내에서 붕소의 거동에 대한 정보 또한 필요하며, 따라서 약 24GPa에 해당하는 압력에서의 붕소를 함유한 규산염 마그마의 붕소 배위 환경을 포함한 원자 구조 규명이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구에 도움을 준 김은정 연구원께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- Leeman, W. and Sisson, V. (1996) Geochemistry of boron and its implications for crustal and mantle processes. *Rev. Mineral. Geochem.* **33**, 645–707
- Smith, E. M., Shirey, S. B., Richardson, S. H., Nestola, F., Bullock, E. S., Wang, J., and Wang, W. (2018) Blue boron-bearing diamonds from Earth's lower mantle. *Nature* **560**, 84–87
- Bista, S., Stebbins, J.F., Wu, J. and Gross, T.M. (2017) Structural changes in calcium aluminoborosilicate glasses recovered from pressures of 1.5 to 3GPa: Interactions of two network species with coordination number increases. *J. Non-Cryst. Solids* **478**, 50–57

## 다카네라이트와 란시아이트 층간 구조에 대한 분자동역학 시뮬레이션 연구

Interlayer structures of takanelite and rancieite: a molecular dynamics simulation study

한수연(Suyeon Han) · 권기덕(Kideok D. Kwon)

강원대학교 자연과학대학 지질학과

산화망간광물은 수성 환경과 토양 및 퇴적물에 풍부하게 분포하는 주요한 환경광물 중 하나로써, 세립질의 입자로 산출되기 때문에 넓은 표면적을 가지고 화학적 반응도 또한 높다. 층상형 산화망간광물은 층간 영역 내 물 분자와 함께 다양한 양이온에 대한 치환 능력이 우수한 편이며,  $MnO_6$  팔면체의 결함으로 발생하는 원자 빈자리(vacancy)는 전하 손실로 인한 높은 흡착력을 유발한다. 이로써 오염된 환경에서의 중금속, 방사성 핵종 등 다양한 오염물질의 거동을 조절하는 데 뛰어난 광물이므로 이에 대한 실험적 연구도 상당 수 이루어지고 있다. 그러나 층상형 산화망간광물은 자연 상에서 나노 크기 및 낮은 결정도로 산출되는 특성 때문에 정확한 광물 구조와 층간 양이온의 배위 환경, 물 함량 등을 실험으로 규명하는 데 제한이 있다. 이번 연구에서는  $Mn^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  단종(end member)이자 고용체 관계 광물인 takanelite와 rancieite [ $Me_{2x}^{2+}(Mn_{1-x}^{4+}\square_x)O_2 \cdot nH_2O$ ]에 대해 물 함량에 따른 격자상수, 층간 물 배열, 각 양이온의 거동을 규명하기 위해 분자동역학 시뮬레이션(molecular dynamics simulations; MD) 계산을 수행하였다. MD는 특정 환경 조건에서 매우 짧은 시간 단위마다 변화하는 시스템 내 모든 원자들의 위치와 속도를 계산함으로써, 주어진 시간 동안 원자 스케일로 변화하는 미시적 상태를 관찰 및 분석하는 데 매우 유용한 컴퓨터 시뮬레이션 방법이다. 원자들 간의 상호작용을 묘사하기 위해, 최근 우리 실험실에서 개발한 산화망간 특화 힘 장(force field)을 사용하였다. 먼저 층상형 산화망간광물 중 아연(Zn)의 단종인 chalcophanite의 탈수 실험을 계산적으로 재현하기 위해 물 함량 감소에 따른 구조 변화 및 층간 내  $Zn^{2+}$ 와 물 분자의 거동을 파악하였다. MD 계산 결과, 물 함량에 따른 격자상수와  $d$ -spacing의 변화 양상 및 양이온의 배위 구조 차이를 원자 단위로 관찰할 수 있었다. 고용체 광물 모델에서는 층간 양이온과 물 배열의 관계를 확인하였다. 더 나아가 불규칙한 원자 빈자리를 포함하는 고용체 광물 모델에서 그 함량 변화에 따른 구조적 차이 발생에 대해서도 토의해볼 예정이다. 이처럼 MD 시뮬레이션은 실험적으로는 자세히 조절하기 어려운 제한 요소들을 비교적 고려하기 용이하며 원자적 관점에서의 이해를 제공할 수 있으므로 중요하고, 앞으로 더욱 복잡한 연구에서도 적용될 수 있다.

## 한반도 북부의 지질 및 광화작용

Geology and mineralization of northern part of Korean Peninsula

고상모(Sang-Mo Koh) · 김남훈(Namhoon Kim) · 이길재(Gilljae Lee) ·

유병운(Byoung Woon You) · 이범한(Bum-Han Lee)

한국지질자원연구원 DMR 융합연구단

한반도 북부는 북중국 지괴 동편 블럭의 일부에 속하기 때문에 북중국 지괴의 형성과 지질학적으로 밀접하게 관련된다. 북중국 지괴를 이루는 대륙 핵들은 시생대에 형성되고 원생대로 가면서 진화-성장하였고, 현생이전에서 여러 지질학적 작용이 중첩-부가되면서 현재의 대륙 형태를 가지는 한중 지괴를 이루고 있다.

한반도 북부는 고시생대의 장풍층군과 남포층군, 중시생대의 송원층군 및 신시생대의 락산층군, 낭림층군과 무산층군으로 구분한다. 낭림층군은 원암인 퇴적암류가 광역변성작용을 받은 변성퇴적암류로 구성되고, 이에 수반된 변성형 광상인 인상흑연, 인회석, 알루미늄 광상들이 낭림지괴 내에 주로 형성되었다. 무산층군 내에는 해저퇴적분지에서 화산활동에 의해 화산성 퇴적물과 함께 철들이 침전된 호상철광상(BIF)이 배대되며, 광역 변성작용을 받아 현재 변성퇴적암류(철질규암) 및 변성화산암류(철질 각섬암) 내에 철 광체가 분포한다. 무산 철광상은 중국 요령성 안산(Anshan)-번시(Benxi) 철광화대의 철광상들과 지질환경 및 형성과정이 매우 유사하다.

한반도 북부의 고원생대 지층은 증산층군, 마천령층군, 후창층군, 의주층군 지층들로 구분한다. 마천령층군 북대천주층 내에는 석회석, 백운석, 마그네사이트 및 연-아연 광상이 분포하는데 특히 규모가 큰 연-아연 광상은 해저화산활동과 관련된 퇴적분기형(SEDEX) 광상에 속한다. 마천령층군 성진주층의 변성퇴적층 내에도 호상철광상이 배대된다. 또한 북대천주층 내에는 규모가 큰 마그네사이트 광상들이 백운암으로부터 형성되어 분포한다. 고원생대 관입암인 삭주암군은 알카리-섬장암류로 주로 구성되는데, 이 관입암체 내에 대규모 희토류 광상으로 알려진 정주 희토류 광상이 배대한다. 이는 삭주암군 관입암체가 알카리 관입암체로서 희토류 광상의 근원암과 배대암(모암)이기 때문이다. 연-아연 및 마그네사이트 광상들은 중국 요령성 쟈지고우(Zhenzigou) 연-아연 광화대와 다스차오(Dashiqiao) 마그네사이트 광화대와 지질환경과 형성과정이 거의 유사하다. 한반도 북부의 중원생대 변성퇴적암류는 황해층군, 상원초군층(상원계) 지층들로 구성되고, 신원생대 변성퇴적암류는 연탄군층(구현계) 지층들로 구성된다. 이중 상원초군층 사당우군층 내에는 석회석 및 백운석 광상들이 배대된다. 중-신원생대 관입암체는 벽성암군, 웅진암군, 연산암군, 삼해암군으로 이루어져 있다. 이중 벽성암군의 염기성 및 초염기성 관입암체는 Ni, Cu-Ni, Ti-Fe 광상을 형성 시킨 근원암이며, 염기성암류로 구성되는 삼해암군은 Cu-Ni 광상의 근원암이다.

고생대에는 천해성 및 육성 퇴적분지들이 형성되었으며, 퇴적암류들이 평남분지와 함북습곡대에 주로 분포한다. 고생대 초기의 황주초군층(황주계), 고생대 중기의 임진군층(임진계), 고생대 후기의 평안초군층(평안계)과 두만군층(두만계)으로 이루어져 있다. 이중 천해성 퇴적환경에서 형성된 황주초군층에는 우라늄, 석회석, 백운석, 반토혈암 및 보크사이트 광상들이 배태하고, 육성 퇴적환경에서 형성된 평안초군층과 두만군층 내에는 석탄(무연탄과 갈탄)층이 분포한다. 고생대 염기성 관입암체로서 남강암군과 청진암군이 분포하며, 특히 남강암군은 Ni-Cu 광화작용과 관련되며, 청진암군 사문암에 내에 크롬철석의 산출도 알려져 있다.

중생대에는 여러 개의 소규모 육성 퇴적분지들이 형성 되었으며, 퇴적암류들은 자성계와 대보계로 이루어져 있고, 관입암은 평강암군(알카리 섬강암류), 혜산암군(화강암류), 단천암군(화강암류), 압록강암군(화강암류)으로 구성된다. 중생대에는 쿨라판과 태평양판이 한반도와 중국 대륙쪽으로 섭입이 일어나면서 화성활동이 매우 격렬하게 일어나는 시기이다. 특히 단천암군과 압록강암군이 관입하는 쥐라기와 백악기에는 열수광상인 Fe, Cu, Pb, Zn, Au, Mo, W, Sn, Hg, Sb 광상들이 많이 형성되었다.

신생대에는 여러 지역(함흥, 길주-명천, 회령-온성 등)에서 육성 및 해성 소분지들이 형성되고 화산활동이 초래 되었다. 이 시기에는 주로 갈탄, 고령토 및 벤토나이트광상들이 형성되었다.

## 화성암의 진화과정과 동위원소 분별작용

Evolution processes of igneous rocks and isotope fractionation

이승구(Seung-Gu Lee)

한국지질자원연구원 국토지질연구본부

질량분석기의 발달은 미량원소 및 동위원소 지구화학의 연구기법은 지구와 행성의 진화사를 이해하는데 많은 영향을 주어왔다. 방사성 동위원소 지구화학은 지구를 포함한 태양계의 형성년대 뿐만 아니라 지구를 구성하고 있는 맨틀과 지각의 형성사를 정량적으로 이해하게 해주고 있다 (Banner, 2004). 아울러 미량원소 지구화학은 화성암의 형성과정 및 조구조 환경을 유추하게 해주는 귀중한 자료로서 활용되어지고 있다. 특히 초기원시운석내의 함량을 기준으로 비교한 암석과 광물에서의 희토류원소의 분포도 (Masuda, 1957)는 지구과학분야에서 지구화학적 연구방법의 유용함을 보여준 지구화학적 연구기법의 대표적인 예라고 볼 수 있다.

특히 1990년대 초반에 개발된 MC-ICP-MS(Multi-collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)는 방사성 동위원소 뿐만 아니라 안정동위원소에서 발생하는 동위원소간의 분별작용을 찾아낼 수 있게 해줌으로서 지구시스템내에서 발생하는 여러 가지 지질학적/지구화학적 환경변화과정을 추적할 수 있는 연구를 가능하게 해주고 있다 (Teng et al., 2017). 우리나라에도 최근 이 MC-ICP-MS가 여러 연구기관에 많이 보급되면서 안정동위원소를 이용한 동위원소 지구화학 혹은 환경지구화학 분야가 발달할 수 있는 계기가 만들어졌다고 본다. 이와 관련하여 본 발표자 또한 최근에 희토류원소 중의 하나인 Eu의 안정동위원소 분석법을 개발하여 보고한 바 있다 (Lee and Tanaka, 2019). 오늘의 발표에서는 Eu과 같은 무거운 원소의 안정동위원소가 지구시스템의 진화과정에서 분별작용을 일으킬 수 있다는 가능성과 미래의 지구화학의 새로운 연구주제로서의 희토류원소의 동위원소 분별작용연구를 토의하고자 한다. 이 분야의 연구 시초는 2000년대 중반 (Moynier et al., 2006)부터 시작되었지만, 미국, 유럽, 일본에서 조차 실험법과 이에 따른 해석법이 아직 정립되지 않은 미개척분야라 할 수 있다.

Banner, J.L (2004) *Earth-Science Reviews*, 65, 141-194.

Lee, S-G., Tanaka, T. (2019) *Spectrochimica Acta Part B*, 156, 42-50.

Masuda, A. (1957) *Journal of Earth Science of Nagoya University*, 5, 125-134.

Moynier, F., Bouvier, A., Blichert-Toft, J., Telouk, P., Gasperini, D., Albarede, F. (2006) *Geochimica Cosmochimica Acta*, 70, 4287-4294.

Teng, F-Z., Watkins, J.M., Dauphas, N. (2017) *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 82, 885p.

## Reviews in Microbially-induced Smectite-to-illite Reaction

김진욱 (Jin-wook Kim)

연세대학교 지구시스템과학과 생지구화학연구소

The smectite-to-illite reaction is observed frequently in many argillaceous rocks in nature. Since the first report of biogenic illite formation in the laboratory conditions, tremendous efforts have been made to find this reaction in the natural settings. In 2016, young mudstones were recovered from Nankai Trough by IODP expedition 370 in order to examine the role of microbes in the mineral diagenesis, closely linked to the limit of biosphere. The occurrence of microbially-catalyzed smectite-to-illite (S-I) reaction has challenged both the notions of solely chemical control for this reaction and the conventional concept of a semi-quantitative illite geothermometer for the reconstruction of the thermal and tectonic histories of sedimentary basins. This transition is accomplished via a significant bioreduction of structural Fe(III) in the precursor smectite and formation of illite. This paper presents a previously unidentified microbial mechanism for the biotic formation of illite seen in natural mudrocks with important implications for petroleum production, fault behavior, and evolution of microbial community in the deep biosphere.

## 입도 및 결정도가 백운석의 탈이산화탄소 반응에 미치는 영향

Effect of particle size and crystallinity on decarbonation of dolomite

김민식(Min Sik Kim)<sup>1</sup>, 한기성(Kee Sung Han)<sup>2</sup>, 이범한(Bum Han Lee)<sup>3</sup>,

김진철(Jin Cheol Kim)<sup>4</sup>, 김현나(Hyun Na Kim)<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 지질환경과학과, <sup>2</sup>Materials Science Group, Pacific Northwest National Laboratory, USA, <sup>3</sup>한국지질자원연구원 광물자원기술연구팀, <sup>4</sup>한국지질자원연구원 지질환경재해연구센터

### 1. 서언

백운석(Dolomite,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )은 대표적인 탄산염 광물로서, 단층 마찰열에 의한 탈이산화탄소 반응은 단층대의 단층강도 저하를 가져올 수 있어 백운석의 열분해에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다(Han et al., 2011; Viti, 2011). 이러한 탈이산화탄소 반응에 의한 단층강도 저하현상은 이후에 보다 큰 규모의 지진을 유발할 수 있다(Han et al., 2010). 특히, 마찰열에 의한 열분해의 결과로 탈이산화탄소 반응이 발생한다고 알려져 왔으며, 그에 따른 열분해 결과물인 방해석(Calcite,  $\text{CaCO}_3$ ), 페리클레이스(Periclase, MgO), 수활석(Brucite,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) 등은 약 550 °C 이상 고온환경의 지시자로 사용되어 왔다(De Paola et al., 2011). 하지만 단층면의 기계적 마찰에 의해 결정도가 낮고, 초미세 입도의 백운석이 형성될 수 있어 이와 같은 입도 및 결정도의 변화가 탈이산화탄소 반응 메커니즘에 미치는 영향에 대해서는 체계적으로 연구된바가 없다. 따라서 본 연구에서는 실험적 방법인 볼 밀을 이용한 기계적 분쇄를 통하여 단층비지의 형성을 모사하였고, 입도 및 결정도의 변화가 백운석의 탈이산화탄소 반응에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

### 2. 시료 준비 및 실험 방법

본 연구에서는 상업용으로 이용되는 중간입도 10  $\mu\text{m}$ 의 백운석 분말을 사용하였다. 백운석의 분쇄는 고 에너지 볼 밀 (Retsch - Emax)을 이용하여 1500 rpm의 회전속도에서 480분까지 분쇄시간을 증가시키면서 진행하였다. 분쇄 과정에서 냉각수를 이용해 시료의 온도가 90 °C 이하로 유지되었다. 입도 및 결정도의 변화가 탈이산화탄소 반응에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 분쇄된 일부 시료는  $\text{N}_2$  가스를 5 ml/min로 흘려주는 환경 하에 300~900 °C에서 각각 2시간 동안 열처리 하였다. 레이저회절 입도분석은 Malvern, Mastersizer 3000을 이용하였으며, 분석 전 10분간 초음파분산을 선행하였다. X-선 회절 분석(X-ray Diffraction analysis, XRD)은 Rigaku, Smartlab 기기를 이용하여,  $\text{CuK}\alpha$ , 40 kV, 30 mA, 3~90°( $2\theta$ )구간에서 스캔간격 0.02°( $2\theta$ ), 스캔속도 5°/min 조건에서 진행되었다. <sup>25</sup>Mg 고상핵자기공명 분광분석은 상온에서 600 MHz(14.1 T)의 Agilent 고상 NMR 및 4 mm HFXMAS 프로브(probe)를 이용하여 수행되었다. 30.738 MHz의 라모어(Larmor) 진동수에서 6  $\mu\text{s}$ 의 (90도 펄스)를 이용하였으며, 펄스반복 대기시간은 sec를

사용하였다. 시료 회전 속도는 13 kHz로 조정하였다. 화학적 차폐의 기준물질은  $MgCl_2$  수용액의 Mg 원자환경을 0 ppm으로 하였다. 열중량분석(TGA) 및 시차열분석(DTA)은 TA Instruments, SDT Q600을 이용하여  $N_2$  가스 환경에서  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 로 승온하였다.

### 3. 결과 및 토의

레이저회절 입도분석 결과, 분쇄 전 백운석의 중간입도는 약  $10\text{ }\mu\text{m}$ 이며, 분쇄 120분 후 약  $0.44\text{ }\mu\text{m}$  까지 입도가 지속적으로 감소하였고 단일 입도분포를 보인다. 240분 이상 분쇄 시 중간입도는  $0.66\text{ }\mu\text{m}$  까지 증가하였으며 이중 입도분포가 관찰되기 시작하였고, 분쇄 480분 후 중간입도는  $0.78\text{ }\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이중 입도분포의 중간 입도는 각각 약  $0.6\text{ }\mu\text{m}$ , 약  $3\text{ }\mu\text{m}$ 로 관찰되었다. 이렇게 이중 입도분포가 관찰되는 이유는 분쇄가 120분 이상 진행되면 백운석 입자가 응집체를 형성하였기 때문이다.

X-선 회절분석 결과, 백운석의 주요 회절피크인 (104) 피크가  $30.9^\circ$  ( $2\theta$ )에서 관찰되었고, 분쇄시간이 증가함에 따라 그 높이가 감소하고 폭이 증가하였다. 하지만, 분쇄 120분 이상의 시료에서는 피크의 높이 및 폭의 변화가 더 이상 발생하지 않았다. (104) 피크의 반치폭(Full Width at Half Maximum, FWHM)은 분쇄 전  $0.078^\circ$  에서 분쇄 60분  $0.324^\circ$  로 지속적으로 증가하였으나, 분쇄 120분에서 480분까지는 약  $0.38^\circ$  로 더 이상 증가하지 않았고, 피크의 높이는 지속적으로 감소하다 분쇄 120분에서 더 이상 감소하지 않았다. 이러한 결과는 분쇄과정이 백운석의 결정도 감소 및 비정질화를 발생시키나, 분쇄 120분 이후에는 비정질화가 한계에 도달했음을 의미한다.

$^{25}\text{Mg}$  고상핵자기공명 분광분석 결과, 백운석과 페리클레이스의 Mg 원자 환경이 각각 25 ppm과  $-8\text{ ppm}$ 에서 구분하여 관찰되었다. 또한 약 10 ppm에서 수화석의 피크 역시 작게 관찰되었다. 분쇄시간을 120분까지 증가함에 따라 백운석 피크 세기가 감소하고, 페리클레이스 피크가 점점 증가하였다. 이는 백운석의 분쇄 과정에서 페리클레이스가 형성된다는 것을 지시하며, 가열을 하지 않아도 기계적 마찰에 의해 탈이산화탄소 반응이 나타날 수 있음을 지시한다.  $^{25}\text{Mg}$  MAS NMR 스펙트럼에서 관찰되는 페리클레이스의 피크는 XRD 패턴에서 관찰되지 않았는데, 이는 페리클레이스가 비정질상으로 존재하기 때문이라 생각된다. XRD와 NMR 분석 결과 모두, 120분 이상 분쇄 시료에서는 더 이상 변화가 관찰되지 않는데, 이는 백운석의 비정질화와 탈이산화탄소 반응이 동시에 발생함을 지시한다.

TG 및 DTA 분석 결과, 분쇄가 진행됨에 따라 백운석의 열적 거동의 변화 역시 관찰되었다. 분쇄 전 시료의 경우,  $650\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$  구간에서 탈이산화탄소 반응에 의한 중량 감소 및 흡열반응이 관찰되었다. 반면 분쇄 후 시료의 경우,  $650\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$ 의 탈이산화탄소 반응에 앞서, 약  $400\sim 680\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 추가적인 중량감소 및 흡열반응이 관찰되었다. Ex-situ 가열 시료의 XRD 분석 결과,  $400\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 백운석의 열분해 반응의 결과물인 페리클레이스의 피크가 나타나기 시작하며, 이는 기존에 알려진 백운석의 열분해 온도인 약  $650\text{ }^\circ\text{C}$ 보다 약  $250\text{ }^\circ\text{C}$  낮은 온도에서 열분해에 의한 탈이산화탄소 반응이 일어남을 의미한다. 이러한 결과는 분쇄에 따른 백운석의 비정질화가 탈이산화탄소 반응 시작온도 및 메커니즘의 변화

를 발생시킨다는 것을 의미한다.

본 연구의 결과, 백운석의 탈이산화탄소 반응은 열에 의해 발생하는 것이라 여겨지던 기존 연구와는 다르게 본 연구에서는 기계적인 마찰으로도 탈이산화탄소 반응이 발생한다는 결과를 얻었다. 이는 단층 미끌림이 발생할 때 백운석의 비정질화와 탈이산화탄소 반응으로 인해 단층강도 저하현상이 일어날 수 있다는 뜻으로, 한 번 미끌림이 발생한 단층은 추후에도 미끌림이 반복되어 지진으로 발전될 수 있다는 것을 의미한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 기계적 분쇄가 백운석의 탈이산화탄소 반응에 미치는 영향을 레이저 회절 입도분석, X-선 회절분석, 고상핵자기공명 분광분석, 열 중량분석, 시차열분석을 통해 알아보았다. 실험 결과, 분쇄에 의해 입도 및 결정도의 변화, 기계적 탈이산화탄소 반응 발생, 중량감소 및 열적 탈이산화탄소 반응온도의 감소를 관찰하였다. 백운석의 탈이산화탄소 반응이 열에 의해서만 발생한다고 많이 알려져 왔었지만, 이번 연구 결과 기계적 힘에 의해서도 탈이산화탄소 반응이 발생한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 탄산염 지대의 단층강도 저하현상에 대한 이해도를 높이는데 도움이 될 것이라 기대된다.

#### 참고문헌

- De Paola, N., Chiodini, G., Hirose, T., Cardellini, C., Caliro, S. and Shimamoto, T. (2011) The geochemical signature caused by earthquake propagation in carbonate-hosted faults. *Earth and Planetary Science Letters*, 310(3-4), 225-232.
- Han, R., Hirose, T. and Shimamoto, T. (2010) Strong velocity weakening and powder lubrication of simulated carbonate faults at seismic slip rates. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115, (B3).
- Han, R., Hirose, T., Shimamoto, T., Lee, Y. and Ando, J. I. (2011) Granular nanoparticles lubricate faults during seismic slip. *Geology*, 39(6), 599-602.
- Viti, C. (2011) Exploring fault rocks at the nanoscale. *Journal of Structural Geology*, 33(12), 1715-1727.

## 철 함량 증가에 따른 비정질 알루미늄규산염의 원자구조와 무질서도의 변화: 포스바우어 및 다핵종 고상 핵자기공명 분광분석을 이용한 연구

Effect of iron content on the structure and disorder in iron-bearing sodium and calcium aluminosilicate glasses: Insights from Mössbauer and multi-nuclear ( $^{29}\text{Si}$ ,  $^{27}\text{Al}$ , and  $^{17}\text{O}$ ) solid-state NMR study

김효임 (Hyo-Im Kim), 이성근 (Sung Keun Lee)

서울대학교 지구환경과학부

### 1. 서언

철은 지구 및 지구형 행성에서 생성되는 규산염 마그마와 지표의 비정질을 구성하고 있는 가장 풍부한 전이원소로서, 철 함량 변화에 따른 원자구조 및 무질서도의 변화를 이해하는 것은 비정질과 용융체의 물성의 변동, 나아가 다양한 지질학적 과정을 이해하는데 필수적이다. 이에 포스바우어(Mössbauer) 분광분석 등의 실험적/이론적 방법론을 통하여 다양한 조성의 비정질 내 철의 산화 상태( $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ ) 및 철의 배위수를 규명하려는 노력이 이어져 왔다. 그러나, 비정질과 용융체의 물성을 결정하는 네트워크 연결도(degree of polymerization)와 화학적/위상학적 무질서도(chemical and topological disorder)의 정보를 획득하는데 가장 효과적인 실험적 방법론인 고상 핵자기공명 분광분석(NMR)을 통한 합철 물질의 구조 연구는 지질학 분야뿐만 아니라 자연과학 전반에 걸쳐 중요한 화두로 남아 있다. 최근 수행된 NMR 연구에서는 철이 보유한 홀전자의 영향으로 초래되는 신호의 소실과 분해능의 감소 등의 실험적 난점을 극복하고 최고 22.9 wt%의 산화철이 포함된  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  및  $\text{MgO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2$  비정질의 산소 및 규소 주변의 구조를 규명하였다(Kim et al., 2016; Kim and Lee, 2019). 이 연구 결과들은 합철 비정질 규산염의 원자구조 분석에 NMR 실험 방법론이 효과적으로 적용되어 구조의 증합도, 무질서도 및 철의 분포에 대한 유용한 정보들을 획득할 수 있음을 보여주었으며, 자연계 마그마 조성에 가까운 다성분계 합철 비정질 물질에 대해서도 그 가능성이 충분함을 제시하였다.

본 연구에서는 고상 NMR 방법론을 통하여 다양한 함량의 철이 포함된 자연계 유문암질 마그마의 모델시스템인 합철 Na- 및 Ca-알루미늄규산염 비정질의 알루미늄, 규소, 그리고 산소 주변의 원자 환경을 규명하였다. 또한, 철의 산화상태에 따른 구조적 역할을 보다 체계적으로 이해하기 위하여 포스바우어 분광분석을 통해 각 비정질의 산화상태를 확인하였다. 특히, 본 연구에서는 비정질 내 철의 구조적 역할을 보다 명시적으로 확인하고자 비정질을 구성하는 규소와 알루미늄이 모두 연결되어 있는 조성(charge-balanced join)을 연구의 대상으로 선택하였다. 또한, 현재까지 보고되지 않았던 합철 비정질의 알루미늄 환경을 관찰한 결과를 제시함으로써,  $\text{Fe}^{3+}$ 의 진입에 따른  $\text{Al}^{3+}$  네트워크의 변화 양상을 관찰

하였고 이를 통해  $\text{Fe}^{3+}$ 의 구조적 역할 및 배위수에 대한 단서를 획득하였다. 더불어, 중합도가 높은 비정질의 철 함량 증가에 따른 화학적 및 위상학적 무질서도의 변화 양상을 관찰한 본 결과를 통하여 점성도가 높은 자연계 규산염 용융체 및 비정질의 거동에 대한 보다 체계적인 논의를 수행하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 탄산염( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ )과 산화물( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ )를 혼합하여 알루미늄과 철이 치환된 형태의 합철 Na-알루미늄규산염  $[\text{Na}(\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Si}_3\text{O}_8]$  with  $x=0, 0.1, 0.3, 0.5$ 과 엘바이트( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) 및 아노르사이트( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) 조성에 각각 5, 10 wt%의 산화철이 첨가된 형태의 비정질 규산염을 합성하였다. 이 때, 용광로는 아르곤 기체로 채워졌으며 해당 용융 환경의 산소 분압( $\log f\text{O}_2$ )은 약  $-2.15 \pm 0.04$ 로 측정되었다. 피스바우어 실험은 Regional Centre of Advanced Technologies and Materials(the Czech Republic)의 MS-96 분광기로 수행되었으며, 약 30 mCi  $^{57}\text{Co}$  방사광원이 사용되었다. 획득된 스펙트럼을 분석하여 각 시료의  $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$  값과 초미세구조(hyperfine parameters)를 확인하였다. 고상 NMR 실험은 서울대학교 지구물질과학연구소의 Varian 400 MHz (9.4 T) 및 Bruker 600 MHz (14.1 T) 분광기를 이용하여 진행되었다.  $^{29}\text{Si}$ 와  $^{17}\text{O}$  NMR 실험은 400 MHz NMR과 4 mm Doty 프로브로 수행되었으며, 각각  $0.67 \mu\text{s}$ 와  $0.2 \mu\text{s}$ 의 단일 펄스로 MAS 스펙트럼을 획득하였다.  $^{17}\text{O}$  3QMAS 실험은  $4.5 \mu\text{s}$ -delay- $1.1 \mu\text{s}$ -echo delay- $19.5 \mu\text{s}$  펄스시퀀스를 사용하였다. 시료의 회전 속도는  $^{29}\text{Si}$ 와  $^{17}\text{O}$  NMR 실험에서 14 kHz,  $^{27}\text{Al}$  NMR 실험에서 17 kHz로 조절하였다.  $^{27}\text{Al}$  NMR 실험은 400 MHz와 600 MHz 분광기 모두에서 수행되었으며, 600 MHz 분광기 실험의 경우 1.9 mm 프로브를 사용하여 35 kHz의 준초고속 회전 속도에서 스펙트럼을 획득하였다.  $^{27}\text{Al}$  MAS 실험의 경우  $30^\circ$  펄스를 사용하였고, 3QMAS NMR 실험의 경우 각각  $3 \mu\text{s}$ -delay- $0.3 \mu\text{s}$ -echo delay- $15 \mu\text{s}$  (9.4 T)와  $4.6 \mu\text{s}$ -delay- $1.0 \mu\text{s}$ -echo delay- $15 \mu\text{s}$  (14.1 T) 펄스시퀀스를 사용하였다. 펄스반복 대기시간은 시료에 따라 0.25 ~ 10초이며, 화학적 차폐의 기준을 설정하기 위하여 TMS( $^{29}\text{Si}$  NMR),  $\text{H}_2\text{O}$  ( $^{17}\text{O}$  NMR) 1 M의  $\text{AlCl}_3$  ( $^{27}\text{Al}$  NMR)가 사용되었다.

## 3. 결과 및 고찰

피스바우어 실험 결과, 철과 알루미늄이 치환된 형태의 비정질 Na-알루미늄규산염 [i.e.,  $\text{Na}(\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Si}_3\text{O}_8$ ,  $X=\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Al})$ ]의 경우  $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 이 약 0.8,  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  비정질의 경우  $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 는 약 0.5,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  비정질은 약 0.3의  $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 의 값을 갖는 것이 확인되었다. 이는  $\text{Na}(\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Si}_3\text{O}_8$  비정질에는  $\text{Fe}^{3+}$ 가 상대적으로 우세하고,  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  비정질에는 비슷한 비율의  $\text{Fe}^{2+}$ 와  $\text{Fe}^{3+}$ 가 공존하고 있으며,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  비정질에는  $\text{Fe}^{2+}$ 가 우세한 환경임을 지시한다. 먼저,  $\text{Fe}^{3+}$ 가 우세한  $\text{Na}(\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Si}_3\text{O}_8$  비정질의 NMR 결과를 살펴보면,  $^{29}\text{Si}$  NMR 실험을 통해 철이

알루미늄을 치환함에 따라 알루미늄이 결핍되어있고 규소가 부화된 네트워크를 지시하는  $Q^4_{Si}(mAl)$  (규소 사면체에 다른  $4-m$ 개의 규소 사면체와  $m$ 개의 알루미늄 사면체가 연결되어 있는 구조)의 신호가 선택적으로 넓어지는 것을 확인하였다. 이는  $Fe^{3+}$ 가 Si-rich framework와 공간적으로 근접하고 있음을 제시한다. 또한  $^{27}Al$  NMR 실험 결과, Al의 함량이 감소하고  $Fe^{3+}$ 가 증가함에 따라 소량의  $^{51}Al$ 이 형성된 증거를 확인하였다. 소량의  $^{51}Al$ 은 상대적으로 이온 반경이 작은  $^{41}Al$  ( $\sim 0.39 \text{ \AA}$ )가  $^{41}Fe^{3+}$  ( $\sim 0.49 \text{ \AA}$ )가 치환됨에 따라 야기되는 입체 장애(steric hindrance)로부터 기인한 것으로 추정된다.

$Fe^{2+}$ 와  $Fe^{3+}$ 가 유사한 비율로 존재하는  $NaAlSi_3O_8 + Fe_2O_3$  비정질의 경우,  $^{29}Si$  NMR 스펙트럼에서는 철 함량 증가에 따른 특정 신호만의 차별적인 변화는 보이지 않는다.  $^{27}Al$  NMR 스펙트럼에서는  $NaAlSi_3O_8$  비정질에  $Fe_2O_3$ 가 10 wt%까지 증가했음에도 불구하고, 즉 상당량의  $Fe^{3+}$ 가 추가되었음에도  $^{51}Al$ 의 흔적이 관찰되지 않았다. 반면,  $^{17}O$  NMR 결과에서는 철 함량 증가에 따른 산소 환경의 변화가 관찰되었다. 철이 포함되지 않은  $NaAlSi_3O_8$  비정질의 경우 비연결산소인  $Na-O-Si$ 가 관찰되지 않고 연결산소인  $Si-O-Si$ 와  $Si-O-Al$ 만이 나타나는데, 이는 모든 네트워크가 연결되어 있고,  $Na^+$ 는 전하 균형 이온으로서의 역할을 수행하고 있음을 드러낸다. 그러나 함철 시료의 실험 결과,  $Fe_2O_3$ 의 증가에 따라  $Na-O-Si$ 가 형성됨이 확인되었다. 이는 중합도가 높은 비정질에 양이온 세기가 높은  $Fe^{2+}$ 가 진입함에 따라 무질서도가 증가하여, 고배위수의 네트워크 형성이 온이 만들어지고 이에 따라 비연결산소가 형성됨을 보여준다. 이 때,  $Na-O-Si$ 의 존재가 확인됨에도 불구하고  $^{27}Al$  NMR 결과에서  $^{51}Al$  신호가 나타나지 않았는데, 이는 Al이 아닌  $Fe^{3+}$ 가 고배위수로 존재하고 있음을 암시한다. 이 결과는  $Fe^{3+}$ 가 Al에 비하여 고배위수로 존재하려는 경향성이 강하다는 것을 제시한다.

$Fe^{2+}$ 가 우세한  $CaAl_2Si_2O_8 + Fe_2O_3$  비정질의 경우,  $Fe^{3+}$ 가 우세한  $Na(Al_{1-x}Fe_x)Si_3O_8$  비정질의  $^{29}Si$  NMR 결과와는 반대로 알루미늄이 부화된  $Q^4_{Si}(mAl)$  신호의 선택적 넓어짐을 보였으며,  $Fe^{2+}$ 의 경우 Al-rich framework와 공간적으로 근접하고 있음을 제시한다. 이는  $^{27}Al$  NMR 결과에서 다른 조성의 신호에 비해 철 함량 증가에 따라 현저히 신호의 너비가 증가하는 현상으로부터, 상자성 효과에 더하여 알루미늄 환경의 위상학적 무질서도가 증가하였다는 사실과도 연결된다. 또한,  $Fe^{2+}$ 가 진입함에 따라  $^{51}Al$ 의 비율이 약간 증가하는 것을 관찰하였는데, 이는  $Ca^{2+}$ 가 단독으로 존재하는 조성에 비하여  $Fe^{2+}$ 가 추가될 경우 양이온 세기가 점차 높아져 비정질의 화학적 무질서도를 증가시켰기 때문이다.

본 NMR 연구 결과는 최고 13.5 wt%의 산화철을 포함한 함철 알루미늄규산염 비정질의 규소, 산소, 그리고 알루미늄의 구조 및 무질서도를 최초로 제시한 직접적 실험 결과이다. 특히,  $Fe^{3+}$ 과  $Al^{3+}$ 간의 고배위수 형성 경향성에 차이가 있음을 확인하였으며, 그 중  $Fe^{3+}$ 가  $Al^{3+}$ 에 비하여 고배위수로 존재하려는 경향성이 강하다는 것을 제시하였다. 또한 양이온 세기가 강한  $Fe^{2+}$ 의 증가가 알루미늄규산염의 화학적 및 무질서도의 증가를 야기함을 확인하였고 이를 통해 본 비정질과 상응하는 조성에 철의 함량이 증가함에 따라 용융체

*Proceedings of the Annual Joint Conference,*  
the Mineralogical Society of Korea and the Petrological Society of Korea,  
May 30-31, 2019, Chuncheon, Korea

점성도가 감소할 것으로 예측할 수 있다. 이처럼 본 연구는 고상 NMR 방법론을 통해 복잡한 조성의 합철 비정질의 구조 정보를 효과적으로 획득할 수 있음을 보였으며, 나아가 자연계에 존재하는 각종 유리질의 구조 분석에 효과적으로 적용될 수 있음을 제시한다.

## 결빙시 철 함유광물의 생지화학적 변이작용

Microbial alteration of Fe-bearing minerals in freezing condition

정재우(Jaewoo Jung)<sup>1</sup> · 김기태(Kitae Kim)<sup>2</sup> · 박영규(Young Kyu Park)<sup>1</sup> ·  
이재일(Jaeil Lee)<sup>2</sup> · 유규철(Kyu-Cheul Yoo)<sup>2</sup> · 김진욱(Jinwook Kim)<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 지구시스템과학과

<sup>2</sup>극지연구소 극지기후변화연구부

남극 지역에서의 유기적/무기적 산화환원 반응에 의한 산화철과 점토광물의 철 용출 반응은 생물학적으로 이용가능한 철의 소스가 될 수 있지만, 빙권 지역의 낮은 온도와 동결 조건에서의 이러한 반응은 연구된 바 없다. 남극에서 분리한 철 환원 미생물인 *Shewanella vesiculosa*를 다양한 온도 조건 (15 °C에서 -10 °C, pH 7)에서 미생물-광물 반응 실험하여 극지방에 분포하는 점토광물 (논트로나이트)과 산화철 (마그헤마이트)의 생지화학적 용해 반응을 이해하고자 하였다. 2번의 동결-용해 주기 실험에서 온도가 점차 감소하면서 동결되기 직전까지는 미생물에 의한 유기적 철 환원 반응이 우세하게 나타났고, 결빙 과정에서는 무기적 철환원 반응이 지배적으로 나타났다. 미생물에 의한 철환원 반응을 겪은 경우 결빙 시 무기적 철 환원 반응이 더 증가한 것으로 관찰되었다. 또한 X선 회절 분석 (X-ray diffraction, XRD), 주사 전자 현미경 (Scanning Electron Microscopy, SEM), 투과 전자 현미경 (Transmission Electron Microscopy, TEM)과 전자 에너지 손실 분광법 (Electron Energy Loss Spectroscopy, EELS)을 이용하여 철함유 광물의 변이에 의한 2차 광물 침전을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 빙하 환경에서 계절적으로 변하는 온도에 따라 미생물의 활동성 (activity)이 촉진되어 퇴적물로부터 주변 환경에 철을 공급하는 하나의 새로운 경로로서의 가능성을 제시한다.

## 수소 저장된 $Ti_{53}Zr_{27}Ni_{20}$ 준결정에 대한 고해상도 $^1H$ MAS NMR 연구

Hydrogenated  $Ti_{53}Zr_{27}Ni_{20}$  quasicrystals probed by high-resolution  $^1H$  MAS NMR

권진중 (Jin Jung Kweon)<sup>1</sup> · 김효임 (Hyo-Im Kim)<sup>2</sup> · 이상화 (Sang-hwa Lee)<sup>3</sup> ·

김재용 (Jae Yong Kim)<sup>3</sup> · 이성근 (Sung Keun Lee)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 기초과학연구원

<sup>2</sup>서울대학교 지구환경과학부

<sup>3</sup>한양대학교 물리학과

핵자기공명 (Nuclear Magnetic Resonance)은 외부 자기장에 반응하여 시료 내의 측정하고자 하는 원자의 주변 환경이 만들어내는 국소적인 자기장의 영향을 신호로 얻게 되어 원자 수준에서 다양한 물질을 연구하는 데 매우 유용하다. 수소저장물질로 관심을 끌고 있는  $Ti_{53}Zr_{27}Ni_{20}$  준결정 시료에 수소를 양을 달리하여 저장하였으며 14.1 T ( $^1H$ , 600 MHz)의 높은 자기장과 시료를 매우 빠르게 회전하는 기법을 이용한 고해상도  $^1H$  MAS (magic-angle spinning) NMR로 수소( $^1H$ )의 신호를 측정하였다. 수소가 저장된 시료에서 관찰된  $^1H$  MAS NMR 신호로부터 수소와 수소가 놓여있는 주변 환경에 대한 분석을 하였다. 수소의 신호가 나타나는 위치인  $^1H$  MAS NMR shift의 크기와 방향은 수소 주변 환경에 대한 정보를 주고, 수소 신호의 선폭은 수소가 가지는 상호작용과 운동성에 대한 정보를 나타내준다.  $Ti_{53}Zr_{27}Ni_{20}$  준결정에 저장된 수소는 금속 원자들과 결합하기보다는 격자 사이의 interstitial sites에 분포하고 있는 것으로 보인다. 수소의 양이 많은 시료에서는 수소가 금속 원자들에 보다 가까이 존재할 수 있으며 수소와의 상호작용이 세기가 커지고 운동성이 작아지는 것으로 보인다.

## 태양계 최초물질에서 발견되는 육방정계 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (dmisteinbergite)의 기원 연구

The origins of hexagonal  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  (dmisteinbergite) in the first solids of our Solar  
System

박창근

극지연구소 지구시스템연구부

태양계에서 가장 먼저 만들어진 것으로 여겨지는 칼슘-알루미늄 부화물 (Ca-Al-rich inclusion; CAI)은 스피넬 ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), 페로브스카이트 ( $\text{CaTiO}_3$ ), 멜릴라이트 ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ - $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ ), Al-Ti-휘석, Ca-사장석 ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) 등 다양한 내화 광물 (refractory mineral)로 이루어져 있다. 이 중 Ca-사장석의 경우, 대부분이 삼사정계 (triclinic)인 anorthite로 산출되나 그동안 anorthite로 여겨졌던 것들 중 일부는 육방정계 (hexagonal)인 dmisteinbergite라는 것이 EBSD와 라만 연구를 통해 밝혀지기도 했다. Dmisteinbergite는 준안정 (metastable) 상태로서, 여러 실험 연구에 의하면 1) 과냉각된 액에서 결정화, 2) 열수변질, 3) Ca-제올라이트의 어닐링 (annealing)으로 생성될 수 있다. CAI에서 발견되는 dmisteinbergite는 액에서 결정화된 자형의 일차 (primary) 광물로 산출되거나 일차 광물인 멜릴라이트를 치환한 이차 (secondary) 광물로 산출된다. 어떤 CAI들에서는 안정 상태의 anorthite와 준안정 상태의 dmisteinbergite가 혼재하기도 한다. 준안정 상태의 dmisteinbergite가 태양계 성운에서 어떻게 결정화되고 자형으로 자랄 수 있었는지, 그리고 멜릴라이트를 치환하고 있는 이차 dmisteinbergite는 소행성의 어떤 환경에서 만들어졌는지는 여전히 규명되지 못하고 있다. 본 연구에서는 CAI에서 산출되는 일차 및 이차 dmisteinbergite의 여러 산출 양상을 보고하고 생성 기작에 대한 논의를 통해 태양계 초기 성운과 소행성의 환경을 고찰해 보고자 한다.

## 제 2 발표장

자연대 5호관 101호  
한국암석학회

- 고압에서 녹렴석 청색편암의 변형과 섭입대에서의 지진파 전파 특성 연구      박용, 정해명
  
- Strain-induced lattice-preferred orientation of chlorite and implications for seismic anisotropy      김도현, 정해명
  
- 섭입대에서 활석 편암의 변형과 지진파 P파 비등방성에 미치는 영향 연구      이정진, 정해명, Reiner Klemd
  
- 중앙인도양해령 반려암질 암석에서 관찰된 멜트-암석 반응의 증거와 멜트-암석 반응이 중앙해령현무암 성분에 미치는 영향      최사람, 박정우, 김종욱, 오지혜, 박창근
  
- 알칼리 마그마의 진화: 남극 북빅토리아랜드 플레이아데스 화산 복합체의 동시기 소돔 및 포타슘 마그마 분화 계열      김지혁, 박정우, 이미정, 이종익, Philip R. Kyle
  
- Interpretation on Changes in Eruptive Styles from Vesicularity and Textural Analyses of Pumice Clasts in the Maljandeung Tuff, Ulleung Island, Korea      황상구, 이소진, 오경식
  
- 경기육괴 서남부 가로림만 지역 지곡리층 혼성편마암의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대와 의미      김지인, 최성희, 이기욱, 이신애
  
- 펠토초 레이저사막 유도결합플라즈마질량분석기를 이용한 저어콘 미량원소 분석      이호선, 정창식
  
- 우리나라 저어콘 분석 현황      정창식
  
- 한반도 북부의 지질 및 광화작용      고상모, 김남훈, 이길재, 유병운
  
- 화성암의 진화과정과 동위원소 분별작용      이승구
  
- Syenite from Ulleung Island: As a Window for Pre-eruptive Shallow Alkaline Magma Dynamics      장윤득
  
- 대형 이차이온질량분석기를 이용한 태양계 최초 물질의  $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  동위원소 시스템 연구      박창근
  
- 울산시 울주군 삼남면-삼동면 남쪽 경계부 양산단층대 일대에 발달하는 압축성 호상선상구조와 제4기 단층운동      류충렬
  
- 충주-괴산 지역 계명산층과 문주리층 구성암류의 특징과 차이점으로부터 옥천열곡작용의 고찰      강지훈
  
- 중국 북서부 North Qaidam 초고압변성대 유카 에클로자이트에서 나타나는 전진/후퇴변성작용과 변형메커니즘에 대한 연구      박문재, 정해명

▣ The Paleoproterozoic igneous and metamorphic activities in the Ji'an Group within the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton and its tectonic meaning

Xiaohan Wan, Chang-Whan Oh,  
Byung-Choon Lee

▣ 영남육괴 고온변성작용과 차노카이트 형성의 시간적 관계

이유영, 조문섭, 김태훈

▣ 북서 베트남 송마 봉합대 남코 부가체 변성이질암의 초기 트라이아스기 고압 변성작용과 후기 트라이아스기 중압 변성작용

부이 빈 하우, 김윤섭, 정연중

## 고압에서 녹립석 청색편암의 변형과 섭입대에서의 지진과 전파 특성 연구

Deformation of Epidote Blueschist at High Pressure and Implications for Seismic  
Properties in Subduction Zone

박용(Yong Park)·정해명(Haemyeong Jung)\*

서울대학교 지구환경과학부 지체구조물리학연구소

섭입하는 판 내부의 암석이 변형됨에 따라 섭입대에서 관측되는 지진과 전파 특성을 밝혀내기 위해, 이탈리아 볼트리 지역에서 산출된 녹립석 청색편암을 이용하여 섭입대의 변형 환경과 유사한 환경을 재현한 단순전단변형실험을 수행하였다. 변형실험은 서울대 지체구조물리학 연구실에 있는 고압고온 암석변형실험기기를 사용하여 녹립석 청색편암의 온도·압력 안정영역 내에서 ( $P=0.9-1.5$  GPa,  $T=400-500$  °C), 전단변형( $\gamma$ )과 전단변형률( $\dot{\gamma}$ )이 각각  $\gamma=0.4-4.5$ ,  $\dot{\gamma}=1.5\times 10^{-5} - 1.8\times 10^{-4}$  s<sup>-1</sup> 인 조건으로 수행되었다. 실험 후에는 변형된 암석들의 변형구조와 구성광물들의 격자선호방향(lattice preferred orientation, LPO)을 각각 전계방출주사전자현미경(FE-SEM)과 전자후방산란회절(EBSD) 기법을 이용하여 관찰하였다. 그리고 변형된 구성광물들의 격자선호방향 형성 메커니즘을 이해하고자 고분해능투과전자현미경(HR-TEM)을 이용하여 변형미구조를 관찰하였다.

실험 결과, 변형된 남섬석(glaucophane)의 격자선호방향은 전단변형 값이 작을 경우( $\gamma \leq 1$ ), 전단변형 값이 증가할수록 (010) 결정면이 전단면에 거의 평행하게 배열되고, [001] 결정축이 전단방향에 아평행한 방향으로 배열되는 양상을 보여주었다 (type-1). 반면 전단변형 값이 클 경우( $\gamma > 2$ ), 남섬석의 [100] 결정축이 전단면에 거의 수직하게 배열되고, [001] 결정축이 전단방향에 아평행한 방향으로 배열되는 양상을 보여주었다 (type-2). HR-TEM 관찰 결과, 남섬석의 type-1 격자선호방향은 상대적으로 낮은 전단변형률로 인하여 결정 내부의 선결함 이동(dislocation creep)을 주요 메커니즘으로 하여 형성된 것으로 보이는 반면, type-2 격자선호방향은 상대적으로 높은 전단변형률로 인하여 결정내부의 선결함 이동과 동시에 파쇄유동(cataclastic flow)이 함께 주요 메커니즘으로 작용하여 형성된 것으로 여겨진다. 한편 변형된 녹립석은 전단변형 값이 작을 경우( $\gamma < 2$ ) 격자선호방향이 약하게 형성 또는 잘 발달되지 못하고,  $\gamma > 2$  일 때부터 격자선호방향이 형성되는 양상을 보였다. 그 결과 전단변형 값이  $2 < \gamma < 4$  일 때에는 녹립석의 [100] 결정축이 전단면에 거의 수직한 방향으로 배열되고, (010) 결정면의 극(pole)이 전단방향에 아평행한 방향으로 배열되는 양상을 보였고,  $\gamma > 4$  일 때에는 (010) 결정면이 전단면에 거의 평행하게 배열되고, [001] 결정축이 전단방향에 아평행한 방향으로 배열되는 양상을 보여주었다. 녹립석의 경우 HR-TEM 관찰이 좀 더 필요하나, 현재까지의 관찰 결과에서는 내부에서 많은 미세균열(microcrack)들과 함께 면이 뒤틀린 결정 구조들이 자주 관찰되었다.

남섬석의 type-1 격자선호방향은 자연암석에서 거의 보고되지 않았으나, 섭입각에 상관없이 섭입대에서 이례적으로 관측되는 해구와 수직한 빠른 S파의 편광 방향을 이해하는데 도움을 줄 수 있다. 한편 남섬석의 type-2 격자선호방향은 자연암석에서 주로 보고된

남섬석의 격자선호방향과 유사한 결과로써, 섭입각이 큰 섭입대의 섭입하는 판의 상부에서 해구와 평행한 빠른 S파의 편광 방향에 기여할 수 있다. 남섬석의 격자선호방향에 따른 지진파 비등방성은, type-1 격자선호방향을 가지는 남섬석의 경우 전단변형 값이 증가함에 따라 P파는 15.2 %, S파는 최대 8.1 %까지 증가하였고, type-2 격자선호방향을 가지는 남섬석의 경우 역시 전단변형 값이 증가함에 따라 P파는 13.1 %, S파는 최대 8.0 %까지 증가하여 섭입대의 상부 판에서 관측되는 지진파 비등방성에 크게 영향을 줄 수 있음을 보여주었다. 그러나 녹렴석의 격자선호방향에 따른 지진파 비등방성은 P파의 경우 5.6 %, S파의 경우 최대 7.2 %로, 남섬석보다는 상대적으로 지진파 비등방성이 작은 결과를 보여주었다. 또한 변형된 남섬석과 녹렴석을 주요 구성광물로 하여 청색편암의 지진파 전파 속도를 섭입대 맨틀에서의 지진파 전파 속도와 비교하였을 때, P파 속도는 약 7-9%, S파 속도는 약 6-7% 감소하는 것으로 계산되었고, 이는 변형된 청색편암이 섭입대의 슬랩 상부에서 주로 관측되는 지진파 저속도층에 기여할 수 있음을 보여주었다.

## Strain-induced lattice-preferred orientation of chlorite and implications for seismic anisotropy

김도현 (Dohyun Kim)·정해명 (Haemyeong Jung)

서울대학교 지구환경과학부 지체구조물리학연구소 (jet0330@gmail.com)

Seismic anisotropy of S-wave (trench-parallel and trench-normal) has been observed in the fore-arc and back-arc regions of subduction zones. However, the mechanism causing this seismic anisotropy is still not well understood. The lattice-preferred orientation (LPO) of olivine and of hydrous minerals such as serpentine and chlorite has been suggested as one of the major causes of trench-parallel seismic anisotropy. By conducting deformation experiments of chlorite under high P-T conditions using the modified Griggs apparatus at the Tectonophysics Laboratory in Seoul National University, we show the development of two different LPOs of chlorite depending on the magnitude of shear strain. The type-1 chlorite LPO, which is characterised by the [001] axes aligned subnormal to the shear plane, developed under low shear strain ( $\gamma \leq 3.1 \pm 0.3$ ). In contrast, the type-2 chlorite LPO, which is characterised by a girdle distribution of [001] axes subnormal to the shear direction, developed under high shear strain ( $\gamma \geq 5.0 \pm 1.5$ ). The type-1 chlorite LPO produced very strong trench-parallel S-wave seismic anisotropy (AVs = 49%), while the type-2 chlorite LPO produced strong trench-normal S-wave seismic anisotropy (AVs = 22%). Our results suggest that anomalous seismic anisotropy in a subducting slab and in the lower part of the mantle wedge can be significantly influenced by the LPO of chlorite.

## 섭입대에서 활석 편암의 변형과 지진파 P파 비등방성에 미치는 영향 연구

A study on the deformation of talc schist and seismic anisotropy of P-wave in  
subduction zones

이정진(Jungjin Lee)<sup>1</sup>, 정해명(Haemyeong Jung)<sup>1,\*</sup>, Reiner Klemm<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구환경과학부 지체구조물리학연구소

<sup>2</sup>Geo-Center of Northern Bavaria, Friedrich-Alexander University of Erlangen-Nürnberg,  
Erlangen, Germany.

지진파 비등방성은 섭입대에서 매우 강하게 관찰되고 있으며, 감람석과 함수광물들의 격자선호방향(lattice preferred orientation; LPO)이 섭입대 지진파 비등방성에 큰 영향을 준다고 알려져 있다. 활석은 섭입대에 존재하는 대표적인 함수광물이며, 탄성적으로 비등방성이 매우 강하다. 이번 연구에서는 처음으로 다결정질 활석의 격자선호방향과 이것이 지진파 비등방성에 어떠한 영향을 주는지 알아보았다. 키르기스스탄-카자흐스탄의 초고압 막발 복합체(ultra-high pressure Makbal Complex)에서 산출되는 석류석-경녹니석-활석 편암 샘플을 분석에 사용하였다. 활석 편암 샘플들은 엽리와 선구조가 뚜렷하게 관찰되었고, SEM/EBSD를 이용하여 활석의 격자선호방향을 측정하였다. 그 결과 활석의 [001]축이 엽리에 거의 수직하게 강한 배열을 나타내었고, 활석의 [100]축과 (010)축은 엽리에 거의 평행한 거들형태의 배열을 나타내었다. 활석의 격자선호방향을 이용하여 구한 지진파 비등방성 결과는, 활석이 매우 높은 P파 방위 비등방성(azimuthal anisotropy)과 높은 S파 비등방성을 나타냄을 보여주었다 ( $AV_p = 69\%$ ,  $AV_s = 23\%$ ). 활석의 P파 방사 비등방성(radial anisotropy)은 활석의 [001]축이 크게 기울어질수록 작아짐을 알 수 있었고, 이는 섭입판의 섭입각이 커질수록 섭입판의 P파 방사 비등방성이 작아지는 현상과 일치했다. 또한 활석의 격자선호방향으로 인한 S파 편파방향은 해구와 평행한 것으로 나타났다. 결론적으로 다결정질 활석이 나타내는 강한 격자선호방향과 이로 인한 강한 지진파 비등방성은 섭입대에서 나타나는 강한 P파 비등방성과 해구-평행한 S파 비등방성에 영향을 줄 수 있음이 밝혀졌다.

## 중앙인도양해령 반려암질 암석에서 관찰된 멜트-암석 반응의 증거와 멜트-암석 반응이 중앙해령현무암 성분에 미치는 영향

Melt-rock reaction in gabbroic rocks from the Central Indian Ridge and the  
influence on MORB

최사랑(Sarang Choi)<sup>1</sup>·박정우(Jung-Woo Park)<sup>1,\*</sup>·김종욱(Jonguk Kim)<sup>2</sup>

오지혜(Jihye Oh)<sup>2</sup>·박창근(Changkun Park)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구환경과학부

<sup>2</sup>한국해양과학기술원 심해저광물자원연구센터

<sup>3</sup>극지연구소 극지지구시스템연구부

### 1. 서론

중앙해령 하부지각에서 멜트-암석 반응(melt-rock reaction)은 흔하다. 중앙해령에서 얻은 지구물리데이터에 따르면 하부지각은 대부분 crystal mush로 구성되어 있다. 이러한 crystal mush에서는 멜트가 밀도 차이에 의한 부력(buoyancy)과 압축력(compaction)에 의해서 상승하게 되는데, 상승하는 멜트는 주변의 crystal framework과 평형이 아니기 때문에 주변과 반응하게 된다. 이러한 반응성 다공질 흐름(reactive porous flow)을 통해 멜트-암석반응을 하여 진화한 멜트는, 마그마 방(magma chamber)에서 분별결정화를 통해 진화하는 멜트와는 상당히 다른 성분을 갖게 된다. 그러므로 멜트-암석 반응을 거친 멜트가 해저로 분출되거나, 분출 가능한 마그마(eruptible magma)와 혼합(mixing)되면 중앙해령현무암(MORB) 성분에 영향을 줄 수 있다. 하지만 하부지각에서 일어나는 멜트-암석반응이 중앙해령현무암 성분에 미칠 수 있는 영향에 대해서는 아직 명확하게 규명되지 않았다.

이번 연구에서는 중앙인도양해령(Central Indian Ridge) 하부지각에서 일어나는 멜트-암석 반응에 대한 증거들을 찾아보았고, 더 나아가 멜트-암석 반응이 해저에 분출된 중앙해령현무암에도 영향을 미치는지 조사하였다. 중앙인도양해령은 느린 확장지역이기 때문에 하부지각에는 오래 지속되는 마그마 방(long-lived magma chamber)이 없고, 대부분 crystal mush로 존재한다. 또한 Kim et al. (2017)에 따르면, 중앙인도양해령의 7° 50' - 8° 25' S에 위치한 segment는 거의 맨틀 불균질성(mantle heterogeneity)에 영향을 받지 않은 것으로 생각되기 때문에, 이 segment내에서의 중앙해령현무암 성분은 멜트-암석 반응에 의해 조절될 가능성이 높다. 따라서 우리는 7° 50' - 8° 25' S에 위치한 하나의 segment내에서 획득한 심성암(plutonic rocks), 중앙해령현무암(MORB) 및 감람석에 포획된 멜트 포유물(olivine-hosted melt inclusion)을 자세히 조사하여, 하부지각에서 일어나는 멜트-암석 반응이 중앙해령현무암에 미치는 영향을 파악하였다.

### 2. 연구 결과 요약 및 결과 해석

우리는 심성암을 조암광물 구성비와 조직을 통해 트록톨라이트(troctolite), 웨를라이트(wehrlite), 감람석 반려암(olivine gabbro), 반려암(gabbro), 산화광물 반려암(oxide

gabbro), 산화광물 반러암노라이트(oxide-gabbronorite), 산화광물 반러암노라이트 밴드(oxide-gabbronorite band)의 7개의 암상으로 구분하였다. 박편관찰결과, 다양한 멜트-암석 반응 조직(melt-rock reaction textures)을 관찰하였다.

멜트-암석 반응에 의해 형성된 조직으로는 감람석과 사장석의 용융 조직, 큰 단사휘석 내에 존재하는 갈색 각섬석 blebs, 단사휘석의 심플렉타이트 조직, 트록톨라이트를 관통하는 산화광물 반러암노라이트 밴드에 존재하는 스리랑카이트(srilankite)가 있다. 감람석과 사장석의 용융 조직은 감람석 반러암에서 관찰되며, 특히 사장석의 용융 조직은 큰 단사휘석 oikocrysts 내에서 관찰된다. Ti 함량이 높은 갈색 각섬석 blebs이 하나의 큰 단사휘석 내에서 발견되는데, 이 각섬석 blebs는 기존에 존재하던 큰 단사휘석과 진화된 멜트가 반응하여 형성된 것이다. 단사휘석의 심플렉타이트 조직은 감람석 반러암과 반러암에서 흔히 관찰되며, 단사휘석이 물이 부화된 유체 또는 멜트와 반응하여 boundary migration이 발생한 것으로 생각된다. 트록톨라이트를 관통하는 산화광물 반러암노라이트 밴드에 스리랑카이트 광물이 사방휘석 근처에서 관찰된다. 이 스리랑카이트는 멜트-암석 반응을 겪어서 상당히 HFSE (High Field Strength Elements)가 부화된 멜트로부터, 사방휘석이 정출되어 부분적으로 HFSE/SiO<sub>2</sub> 비율이 낮아진 곳에서 정출되었다.

단사휘석의 화학분석결과, 반러암, 산화광물 반러암, 산화광물 반러암노라이트의 3가지 암상은 분별결정화 경향성을 잘 따르지만, 트록톨라이트, 웨틀라이트, 감람석 반러암, 산화광물 반러암노라이트 밴드의 4가지 암상은 분별결정화 경향성에서 많이 벗어나는 경향을 보인다. 후자 암상들의 단사휘석은 제한된 Mg에서 상당한 미량원소의 분별을 보이기 때문에, 이 암상들에서 멜트-암석 반응이 발생했음을 파악할 수 있다(그림 1). 또한 멜트-암석 반응이 발생한 부분에서 사장석의 정출을 지지하는 Sr/Sr\* ( $Sr/Sr^* = Sr_N / \sqrt{Pr_N \cdot Nd_N}$ ), N은 콘드라이트로 정규화한 값)과 미량원소 간에 음의 상관관계가 공통적으로 관찰된다. 그러므로 멜트-암석 반응은 사장석의 정출을 수반하여 미량원소의 부화 및 분별을 일으키는 것으로 보인다.

중양해령현무암(MORB)과 멜트 포유물(melt inclusion)은 미량원소 비와 Sr/Sr\* 간에 뚜렷한 음의 상관관계를 보인다(그림 2). 맨틀의 불균질성과 부분용융에 의해서는 Sr/Sr\*와 미량원소 비 사이의 음의 상관관계를 설명할 수 없기 때문에 이 같은 관계성은 사장석 정출을 수반하는 지각의 process에서 기인한 것으로 생각된다. Sr/Sr\*의 감소에 따른 Zr/Y의 증가 경향은 분별결정화 모델과 확연히 다르고, 심성암내의 단사휘석에서 관찰되는 멜트-암석 반응의 경향성과 더 유사하다. 이러한 결과는 연구 지역에서 중양해령현무암과 멜트 포유물의 조성을 형성하는데 멜트-암석 반응이 미치는 영향이 컸음을 의미한다(그림 2, 3). 또한 중양해령현무암과 멜트 포유물은 Sr/Sr\*이 약 0.38보다 큰 단사휘석 멜트 범위에만 분포한다. 이를 통해 Sr/Sr\*이 0.38보다 작은 단사휘석 멜트들은 하부지각 내에 갇혀 중양해령현무암 성분에 영향을 주지 못하지만, Sr/Sr\*이 0.38보다 큰 단사휘석 멜트들은 직접적으로 중양해령현무암 성분에 영향을 미치는 것으로 확인된다(그림 3).

### 3. 결론

본 연구는 플룸(plume)의 영향을 거의 받지 않은 중양인도양해령의 7° 50' - 8° 25' S에 위치한 하나의 segment에서 채취된 심성암, 중양해령현무암 및 멜트 포유물을 자세히 조사하였다. 단사휘석의 화학분석 결과, 트록톨라이트, 웨틀라이트, 감람석 반러암, 산화광물 반러암노라이트 밴드에서 멜트-암석 반응이 증거가 관찰되었다. 멜

트-암석 반응은 사장석의 정출을 수반하여 미량원소의 부화 및 분별을 발생시킨다. 중앙해령현무암과 멜트 포유물도 사장석의 정출을 수반한 미량원소의 부화 및 분별 경향성이 관찰되며, 이 경향성은 MORB와 멜트포유물이 멜트-암석 반응을 통해 분화하였음을 지시한다. 또한 하부지각에서 멜트-암석 반응을 거친 멜트 중에 Sr/Sr\*이 0.38보다 작은 멜트들은 하부지각에 갇혀 MORB에 영향을 주기 Sr/Sr\*이 0.38보다 큰 멜트들은 중앙해령현무암 성분에 영향을 미치는 것으로 확인된다.

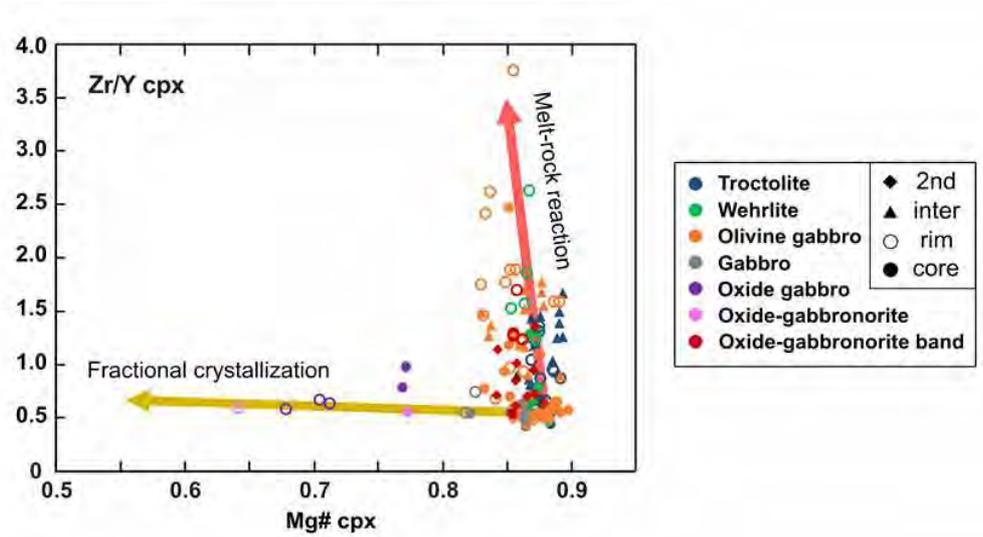


그림 1. 분석된 단사회석의 Zr/Y vs Mg# 그림. 단사회석의 화학성분은 암상 및 조직에 따라 구분된다.

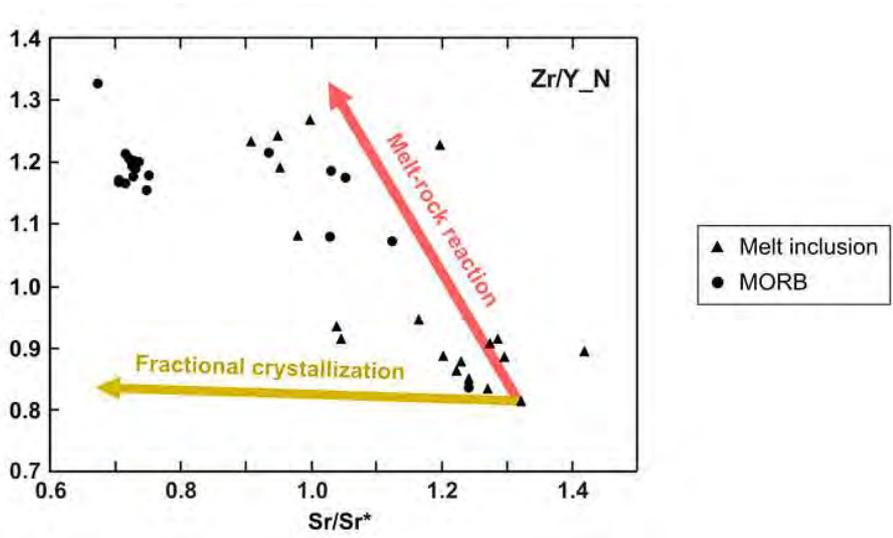


그림 2. 중앙해령현무암(MORB)과 멜트 포유물(melt inclusion)의 콘드라이트로 정규화한 Zr/Y vs Sr/Sr\* 그림. 중앙해령현무암과 멜트 포유물의 Zr/Y은 Sr 아노말리와 음의 상관관계를 보인다.

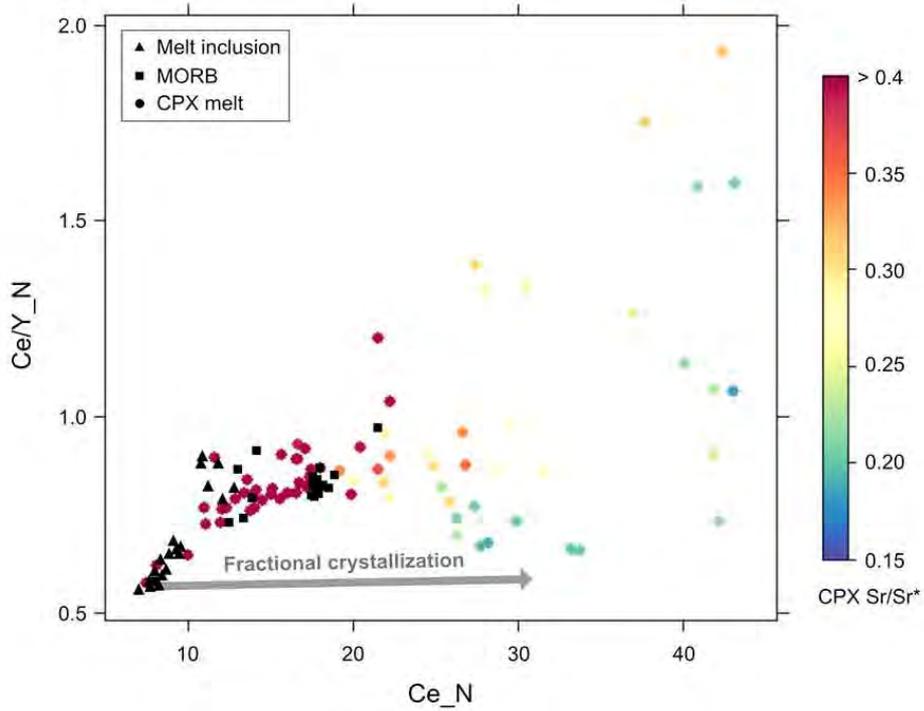


그림 3. 단사휘석의 분배계수를 이용하여 복원된 멜트(CPX melt), 중앙해령현무암(MORB) 및 멜트 포유물(melt inclusion)의 콘트라이트로 정규화한 Ce/Y vs Ce 그림. 중앙해령현무암과 멜트 포유물의 경향성은 Sr/Sr\*이 약 0.38보다 큰 단사휘석 멜트와 유사하다.

## 알칼리 마그마의 진화: 남극 북빅토리아랜드 플레이아데스 화산 복합체의 동시기 소듐 및 포타슘 마그마 분화 계열

Evolution of alkalic magma systems: insight from coeval evolution of  
sodic and potassic fractionation lineages at The Pleiades volcanic complex,  
Antarctica

김지혁(Jihyuk Kim)<sup>1\*</sup>·박정우(Jung-Woo Park)<sup>1</sup>·이미정(Mi Jung Lee)<sup>2</sup>

이종익(Jong Ik Lee)<sup>2</sup>·Philip R. Kyle<sup>3</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구환경과학부

<sup>2</sup>극지연구소 지구시스템연구부

<sup>1</sup>New Mexico Institute of Mining and Technology

플레이아데스 화산복합체의 화산암류 주원소, 미량원소 및 Sr, Nd, Pb 동위원소비를 분석하여 플레이아데스 마그마의 진화 과정과 성인을 해석하였다. 암석기재상의 특징과 전암 성분을 기반으로 플레이아데스 화산암류는 두 가지 분화 계열로 구분할 수 있다. 소듐 계열은 규산염이 불포화되어 있으며 켈슈타이트 반정이 흔하게 발견된다. 포타슘 계열은 중-알칼리의 규산염이 포화되어 있으며 감람석이 항상 발견되나 켈슈타이트는 나타나지 않는다. 단사회석-용융체 평형을 이용해 측정된 온도-압력 조건은 약 1100-1200°C에 하부지각 깊이 조건(9.1-12.5 kbar)으로 두 계열이 유사하다. 전암 및 광물 주원소 성분을 이용한 물질수지 계산을 통해, 소듐 계열의 분화 양상은 감람석이 사라지고 켈슈타이트가 강하게 분별 결정되는 것이 주요한 요인임을 확인했다. 한편, 포타슘 계열의 분화 과정은 장석, 단사회석, 감람석, 티탄자철석 및 인회석 조합의 분별 결정과 함께 약 10%의 지각 혼염으로 설명된다. 포타슘 계열의 분화된 암석이 갖는 높은  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (>0.7035) 비와 낮은  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  (<0.51285) 및  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (<19.3) 비는 지각 혼염을 지지한다. 두 계열의 고철질암 모두에서 높은  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (>19.5) 비와 함께 좁은 범위의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (0.70313-0.70327) 과  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  (0.51289-0.51290) 비가 나타나며 이는 서남극과 뉴질랜드의 신생대 화산암류에서 보고된 HIMU와 닮은(HIMU-like) 동위원소비와 일치한다. 이 HIMU와 닮은 동위원소비는, 원시맨틀 값으로 표준화한 전암 미량원소 패턴에서의 양의 Nb 및 음의 K 비이상성과 함께, 플레이아데스 마그마가 각섬석이 포함된 교대작용을 받은 암석권 맨틀로부터 기원했음을 암시한다. 따라서 플레이아데스 하부의 마그마는 암석권 맨틀에 산재하는 수화 광물이 풍부한 맥이 부분 용융을 받은 후 주변 감람암과의 다양한 정도의 반응을 거쳐 형성된 것으로 해석된다. 물이 빈화된 포타슘 계열의 마그마는 물이 상대적으로 풍부한 소듐 계열의 마그마에 비해 주변 맨틀 감람암과의 반응을 더 많이 겪었다. 초기의 차이는 포타슘 계열이 지각 혼염을 겪어 규산염 포화 상태의 알칼리 계열을 따르게 되면서 더 극명해졌다.

## Interpretation on Changes in Eruptive Styles from Vesicularity and Textural Analyses of Pumice Clasts in the Maljandeung Tuff, Ulleung Island, Korea

Sang Koo Hwang<sup>1,2\*</sup>·So Jin Lee<sup>2</sup>·Kyung Sik Oh<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

<sup>2</sup>Institute of Basic Science, Andong National University

<sup>3</sup>Division of New Material Engineering, Andong National University

In natural systems, pauses and/or abrupt shifts in eruptive intensity are a fundamental yet little studied part of many large explosive eruptions. Transitions in eruption type and intensity are complexly observed in volcanic systems, the complexity highlights the need to investigate the behaviors controlling eruption dynamics and processes, and catching on the interaction between processes.

Eruption dynamics are collectively influenced by processes occurring in (1) the magma chamber, (2) the volcanic conduit, and (3) the vent. In the magma chamber, compositional gradients or the introduction of fresh pulses of new magma may affect the overpressure which drives the eruption (Eichelberger and Izbekov, 2000). In the vent or shallow conduit, environmental factors external to the magma influence eruption conditions, e.g., widening of the conduit, migration of the vent (Carey and Sigurdsson, 1989; Suzuk-Kamata et al., 1993; Wilson and Hildreth, 1997). Conduit and vent conditions also have seriously influenced on eruption dynamics, particularly on ascent velocity and eruption regime (Bursik and Wood, 1991; Jaupart and Allegre, 1991; Woods and Bower, 1995).

In the Maljandeung Tuff, Ulleung Island, eruption styles and such shifts in eruption regime can be heralded by differences in granularities, and changes in the vesicularities and microtextures. Volcanisms of members U-3 (8.4 ka B.P.) and U-2 (5.6 ka B.P.) in Maljandeung first began with phreatomagmatic activities, shifted to magmatic activities in the eruptive style and were dormant for long time, We focus here on the processes leading to the start, shift and termination of these two volcanisms. Pumices from both volcanisms show a lower and similar range 71.8~81.5% in mean vesicularity. In practice, although early erupted pumices of phreatoplinian lapillistones (Episode II) from first volcanism (Member U-3) show a lower similar range 73.7~73.9% in vesicularity, but the values markedly increase into 81.5% toward the top of later plinian pumice deposits (Episode III). In contrast, though early erupted pumices of phreatoplinian lapillistones (Episode IV) from second volcanism (Member U-2) show a higher range 76.7~79.1% in vesicularity, but the values decrease into 71.8% toward the top of later plinian pumice deposits (Episode V). Pumice clasts erupted at the end of each episode represent textural extremes. At the end of Episode III, clasts have very thin bubble walls and a predominance of large bubbles, whereas at the

end of Episode III, clasts have thick bubble walls and more small bubbles. Eruption styles and regimes in 8.4 and 5.6 ka B.P. at Maljandeung appear to have slightly different causes and differences. In 8.4 ka B.P., the phreatoplinian eruptions were more dominantly occurred by the pressurized gases derived from heating ground water than by the exsolved magmatic volatiles. At that time, the magmatic volatiles might still lead to fragmentation of the melt at the level of ground water aquifer. This shift to plinian eruptions is marked by the appearance of progressive increase in vesicularity reflecting the rapidly rising of magma in the conduit. In contrast, at the moment when plinian activities were driven by exsolving magmatic volatiles in the conduit in 5.6 ka B.P, the phreatoplinian activities were perhaps caused by highly pressurized gases derived from the magmatic and phreatomagmatic interactions. At that time, the location of the fragmentation surface by the magmatic volatiles might be almost equal to the level of ground water aquifer. This shift to plinian eruptions is marked by the appearance of bubble collapse reflecting the progressive development of permeability in the melt and the onset of partial degassing.

**Acknowledgements:** Our work was supported by Korea Meteorological Institute grant KMI2018-01610, projected by Korea Meteorological Administration.

## References

- Bursik, M.I., Woods, A.W., 1991, Buoyant, superbuoyant and collapsing eruption columns. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 45, 347-350.
- Carey, S., Sigurdsson, H., 1989, The intensity of Plinian eruptions. *Bull. Volcanol.*, 51, 28-40.
- Eichelberger, J.C., Izbekov, P.E., 2000, Eruption of andesite triggered by dyke injection: contrasting cases at Karymsky Volcano, Kamchatka and Mt. Katmai, Alaska. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A-Math. Phys. Eng. Sci.*, 358, 1465-1485.
- Jaupart, C., Allegre, C.J., 1991, Gas content, eruption rate and instabilities of eruption regime in silicic volcanoes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 102, 413-429.
- Suzuki-Kamata, K., Kamata, H., Bacon, C.R., 1993, Evolution of the caldera-forming eruption at Crater Lake, Oregon, indicated by component analysis of lithic fragments. *J. Geophys. Res.*, 98, 14059-14074.
- Wilson, C.J.N., Hildreth, W., 1997, The Bishop Tuff: new insights from eruptive stratigraphy. *J. Geol.*, 105, 407-439.
- Woods, A.W., Bower, S.M., 1995, The decompression of volcanic jets in a crater during explosive volcanic eruptions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 131, 189-205.

## 경기육괴 서남부 가로림만 지역 지곡리층 혼성편마암의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대와 그 의미

SHRIMP U-Pb geochronology of zircons from Jigokri migmatitic gneisses at  
Garorim bay, southwestern Gyeonggi massif

김지인(Ji-In Kim)<sup>1</sup> · 최성희(Sung Hi Choi)<sup>1,2,\*</sup> · 이기욱(Keewook Yi)<sup>3</sup>

이신애(Shinae Lee)<sup>4</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 대학원 우주·지질학과 (chois@cnu.ac.kr)

<sup>2</sup>충남대학교 지질환경과학과

<sup>3</sup>한국기초과학지원연구원 성과확산부

<sup>4</sup>한국기초과학지원연구원 지구환경연구부

지곡리층은 경기육괴 서남부 지역의 기반암을 구성하는 선캄브리아기 지층으로 해당 지역의 최고기 암군으로 알려져 있다. 그러나 지곡리층을 이루고 있는 암체들에 대한 정밀한 연대 분석이나 암석학 및 지구화학적인 연구는 거의 수행된 바 없다. 본 연구에서는 경기육괴 서남부 가로림만 지역에 위치하는 지곡리층 혼성편마암류 두 개 시료에서 분리한 저어콘에 대하여 SHRIMP U-Pb 연대 측정을 수행하였다. 분석치들은 대개 Tera-Wasserburg 도에서 일치곡선을 벗어나 도시된다. 이는 암체들이 중첩적인 열적활동(화성 및 변성활동)의 영향을 받아 Pb 손실 등의 사건을 겪었기 때문인 것으로 유추된다. 우리는 저어콘의 내부 구조 및 Th/U 비를 기준으로 분석치들을 네 개의 그룹(Group)으로 세분해 지곡리층 혼성편마암의 연대를 해석하였다. Group 1과 2는 누대구조가 잘 발달한 저어콘 상층부에 대한 분석치들로 화성기원을 지시하는 높은 Th/U 비(0.11-1.62)를 가진다. Tera-Wasserburg 도에서 Group 1의 상부교차점 연대는  $2502 \pm 92$  Ma와  $2528 \pm 100$  Ma, Group 2의 상부교차점 연대는  $2051 \pm 25$  Ma이다. 이들은 모두 화성활동 연대로 해석된다. Group 3은 누대구조가 없거나 매우 희미한 저어콘들에 대한 분석치로 상대적으로 낮은 Th/U 비(0.01-0.16)를 보인다. Group 3의 특징들은 변성기원 저어콘에서 흔히 나타나는 것으로, Group 3에서 얻은  $1833 \pm 10$  Ma의 상부교차점 연대는 변성연대를 지시하는 것으로 해석된다. 마지막으로 Group 4는 다른 그룹들에 비하여 상대적으로 높은 Th/U 비(0.44-1.43)를 가지는 특징을 보이며,  $1695.5 \pm 5.4$  Ma의 상부교차점 연대를 가진다. Group 4의 높은 Th/U 비는 고온변성작용에 수반된 모나자이트의 붕괴에 의한 것으로 유추되며, 따라서 Group 4의 연대는 혼성편마암체의 고온변성작용 연대를 나타내는 것으로 해석된다. 지곡리층 혼성편마암의 Group 1과 3의 연대들은 한반도에서 광역적인 화성 및 변성활동이 있었던 시기(약 2.5 Ga와 약 2.0-1.8 Ga)에 해당하며, 한반도 선캄브리아기 암체에서 흔히 보고되는 연대이다. 특히 Group 1의 연대는 연구지역에 인접한 경기육괴 서남부 대이작도의 토날라이트질 혼성암에서 보고된 남한 최고기 지각변동 연대(약 2.5 Ga)와 오차범위에서 일치한다. 그러나 Group 2와 4의 약 2.1 Ga 및 1.7 Ga 연대는 선행 연구에서 거의 보고된 바 없다. 이러한 결과로부터 우리는 경기육괴 서남부 지역에서 약 2.5 Ga와 2.0-1.8 Ga 시기의 광역적인 화성 및 변성활동이 있었을 뿐만 아니라, 약 2.1 Ga와 1.7 Ga 시기에도 국소적인 화성 및 변성활동이 존재했을 가능성을 유추할 수 있다. 경기육괴의 선캄브리아기 지각진화사를 보다 정확하게 이해하기 위해서는 향후 추가적인 정밀 지질연대측정 및 암석학적 연구들이 지속적으로 수행되어야 할 것으로 생각된다.

## 펨토초 레이저삭박 유도결합플라즈마질량분석기를 이용한 저어콘 미량원소 분석

Trace element analysis of zircon using femtosecond laser ablation ICP-MS

이호선(Ho-Sun Lee)<sup>1</sup> · 정창식(Chang-sik Cheong)<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 공동실험실습관

<sup>2</sup>한국기초과학지원연구원 지구환경연구부

다양한 암석에서 부수광물로 수반되는 저어콘은 물리화학적 내구성이 뛰어나며 구성 이온의 확산이 매우 느리게 일어나기 때문에 지각의 진화과정 동안 원암의 지구화학적 특성을 잘 보존한다. 저어콘의 결정 누대 구조에 보존된 성장 역사는 높은 공간분해능을 가지는 in-situ 분석에 의해 드러난다. 저어콘의 원소 및 동위원소에 대한 in-situ 분석은 주로 이차이온질량분석기(SIMS) 및 레이저삭박을 통한 다검출기 또는 사중극자 유도결합플라즈마질량분석기(LA-MC/ ICPMS or LA-Q/ICPMS)와 전자현미분석기(EPMA)를 이용한다. 이 발표에서는 펨토초 레이저삭박 유도결합플라즈마질량분석기를 이용하여 저어콘 표준물질의 미량원소 분석결과를 보고하고자 한다.

저어콘 미량원소 분석은 부산대학교 공동실험실습관의 fsLA-Q/ICPMS(femtosecond Laser Ablation Inductively Coupled Quadrupole Mass Spectrometer)를 이용하였다. 레이저 시스템은 J200 모델(Applied spectra Inc., California, USA)로, 343nm 파장의 펨토초 레이저이며 헬륨가스 시료 챔버 환경에서 30  $\mu$ m 빔 직경으로 삭박하였다. 질량분석기로는 iCapQ 모델(Thermo Fisher Scientific, Bremen, Germany)의 사중극자 유도결합플라즈마질량분석기를 사용하였다.

저어콘 미량원소 분석은 LKZ-1과 91500 저어콘을 함께 분석하였다. LKZ-1은 한국기초과학지원연구원 지구환경연구부에서 표준물질 개발을 위해 스리랑카에서 수입한 단일 결정 저어콘이다. LKZ-1은 포유물이 거의 없는 투명한 결정으로 옅은 노란색을 띠며 음극선발광(cathodoluminescence) 영상에서 균질한 특성을 보인다.

저어콘의 미량원소 농도는 NIST 610 표준물질로 정량화시킨 다음 매질의 차이에 따른 분별을 <sup>29</sup>Si와 <sup>91</sup>Zr을 내부표준원소로 보정하였다. 91500 저어콘의 <sup>29</sup>Si로 보정한 U(83 $\pm$ 14ppm), Th(30 $\pm$ 6ppm) 측정결과는 기존 연구의 동위원소희석법 결과와 잘 일치하였다. 또 <sup>91</sup>Zr로 보정한 91500의 희토류원소 패턴 역시 기존에 보고된 결과와 잘 일치하였다. 이번엔 분석한 LKZ-1 저어콘은 비교적 균질한 특징을 보였으며 따라서 또 다른 표준물질로 충분히 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 우리나라 저어콘 분석 현황

Overview of zircon analysis in Korea

정창식 (Chang-sik Cheong)<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>한국기초과학지원연구원

<sup>2</sup>충남대학교 분석과학기술대학원

저어콘은 연대측정과 동위원소, 미량원소 분석 등을 통해 지각 진화에 대한 중요한 정보를 제공해 왔다. 우리나라에서 저어콘에 대한 연구는 결정 형태학적인 특징과 외국의 열이온화질량분석기를 이용한 U-Pb 연대측정 자료를 바탕으로 시작되었으며 2008년 한국기초과학지원연구원 오창캠퍼스에 고분해능 이차이온 질량분석기(SHRIMP)가 설치됨으로써 마이크론 규모의 U-Pb 연대측정이 가능하게 되었다. 또한 2015년 한국기초과학지원연구원에 설치된 레이저 삭박 다검출기 유도결합 플라즈마 질량분석기를 이용한 저어콘 U-Pb 연대측정과 Hf 동위원소 분석이 가능해 졌으며 최근에는 이 장비를 이용하여 홀로세에 정출한 백두산 천년분화 저어콘에 대한  $^{238}\text{U}-^{230}\text{Th}$  비평형 연대측정 결과도 보고되었다. 우리나라 저어콘에 대한 산소 동위원소 자료는 2016년부터 중국과학원의 고분해능 이차이온 질량분석기(Cameca IMS 1280)를 이용하여 보고되기 시작하였는데 앞으로는 한국기초과학지원연구원 오창캠퍼스에 설치될 동위원소현미경(Cameca IMS 1300)을 이용한 분석이 가능할 것이다. 저어콘에 대한 희토류원소를 포함한 미량원소 정보는 변성 조건과 마그마 진화과정 및 퇴적분지 성격 등을 유추하는데 도움을 줄 수 있는데 최근 부산대학교 공동실험실습관의 펨토초 레이저 삭박 유도결합 플라즈마 질량분석기를 이용하여 신뢰성 있는 자료를 얻는데 성공하였다. 이번 발표에서는 저어콘 표준물질 자료를 중심으로 분석 측면에서의 성과와 향후 과제를 소개하고자 한다.

## 한반도 북부의 지질 및 광화작용

### Geology and mineralization of northern part of Korean Peninsula

고상모(Sang-Mo Koh) · 김남훈(Namhoon Kim) · 이길재(Gilljae Lee) ·

유병운(Byoung Woon You) · 이범한(Bum-Han Lee)

한국지질자원연구원 DMR 융합연구단

한반도 북부는 북중국 지괴 동편 블럭의 일부에 속하기 때문에 북중국 지괴의 형성과 지질학적으로 밀접하게 관련된다. 북중국 지괴를 이루는 대륙 핵들은 시생대에 형성되고 원생대로 가면서 진화-성장하였고, 현생이언에서 여러 지질학적 작용이 중첩-부가 되면서 현재의 대륙 형태를 가지는 한중 지괴를 이루고 있다.

한반도 북부는 고시생대의 장풍층군과 남포층군, 중시생대의 송원층군 및 신시생대의 락산층군, 낭림층군과 무산층군으로 구분한다. 낭림층군은 원암인 퇴적암류가 광역변성작용을 받은 변성퇴적암류로 구성되고, 이에 수반된 변성형 광상인 인상흑연, 인회석, 알루미늄 광상들이 낭림지괴 내에 주로 형성되었다. 무산층군 내에는 해저퇴적분지에서 화산활동에 의해 화산성 퇴적물과 함께 철들이 침전된 호상철광상(BIF)이 배태되며, 광역 변성작용을 받아 현재 변성퇴적암류(철질규암) 및 변성화산암류(철질 각섬암) 내에 철 광체가 분포한다. 무산 철광상은 중국 요령성 안산(Anshan)-번시(Benxi) 철광화대의 철광상들과 지질환경 및 형성과정이 매우 유사하다.

한반도 북부의 고원생대 지층은 증산층군, 마천령층군, 후창층군, 의주층군 지층들로 구분한다. 마천령층군 북대천주층 내에는 석회석, 백운석, 마그네사이트 및 연-아연 광상이 분포하는데 특히 규모가 큰 연-아연 광상은 해저화산활동과 관련된 퇴적분기형(SEDEX) 광상에 속한다. 마천령층군 성진주층의 변성퇴적층 내에도 호상철광상이 배태된다. 또한 북대천주층 내에는 규모가 큰 마그네사이트 광상들이 백운암으로부터 형성되어 분포한다. 고원생대 관입암인 삭주암군은 알카리-섬장암류로 주로 구성되는데, 이 관입암체 내에 대규모 희토류 광상으로 알려진 정주 희토류 광상이 배태한다. 이는 삭주암군 관입암체가 알카리 관입암체로서 희토류 광상의 근원암과 배태암(모암)이기 때문이다. 연-아연 및 마그네사이트 광상들은 중국 요령성 쯤지고우(Zhenzigou) 연-아연 광화대와 다스차오(Dashiqiao) 마그네사이트 광화대와 지질환경과 형성과정이 거의 유사하다. 한반도 북부의 중원생대 변성퇴적암류는 황해층군, 상원초군층(상원계) 지층들로 구성되고, 신원생대 변성퇴적암류는 연탄군층(구현계) 지층들로 구성된다. 이 중 상원초군층 사당우군층 내에는 석회석 및

백운석 광상들이 배태된다. 중-신원생대 관입암체는 벽성암군, 용진암군, 연산암군, 삼해암군으로 이루어져 있다. 이중 벽성암군의 염기성 및 초염기성 관입암체는 Ni, Cu-Ni, Ti-Fe 광상을 형성 시킨 근원암이며, 염기성암류로 구성되는 삼해암군은 Cu-Ni 광상의 근원암이다.

고생대에는 천해성 및 육성 퇴적분지들이 형성되었으며, 퇴적암류들이 평남 분지와 함북습곡대에 주로 분포한다. 고생대 초기의 황주초군층(황주계), 고생대 중기의 임진군층(임진계), 고생대 후기의 평안초군층(평안계)과 두만군층(두만계)으로 이루어져 있다. 이중 천해성 퇴적환경에서 형성된 황주초군층에는 우라늄, 석회석, 백운석, 반토혈암 및 보크사이트 광상들이 배태하고, 육성 퇴적환경에서 형성된 평안초군층과 두만군층 내에는 석탄(무연탄과 갈탄)층이 분포한다. 고생대 염기성 관입암체로서 남강암군과 청진암군이 분포하며, 특히 남강암군은 Ni-Cu 광화작용과 관련되며, 청진암군 사문암에 내에 크롬철석의 산출도 알려져 있다.

중생대에는 여러 개의 소규모 육성 퇴적분지들이 형성 되었으며, 퇴적암류 들은 자성계와 대보계로 이루어져 있고, 관입암은 평강암군(알카리 섬장암류), 계산 암군(화강암류), 단천암군(화강암류), 압록강암군(화강암류)으로 구성된다. 중생대에는 콜라판과 태평양판이 한반도와 중국 대륙쪽으로 섭입이 일어나면서 화성활동이 매우 격렬하게 일어나는 시기이다. 특히 단천암군과 압록강암군이 관입하는 쥐라기와 백악기에는 열수광상인 Fe, Cu, Pb, Zn, Au, Mo, W, Sn, Hg, Sb 광상들이 많이 형성되었다.

신생대에는 여러 지역(함흥, 길주-명천, 회령-온성 등)에서 육성 및 해성 소 분지들이 형성되고 화산활동이 초래 되었다. 이 시기에는 주로 갈탄, 고령토 및 벤 토나이트광상들이 형성되었다.

## 화성암의 진화과정과 동위원소 분별작용

Evolution processes of igneous rocks and isotope fractionation

이승구(Seung-Gu Lee)

한국지질자원연구원 국토지질연구본부

질량분석기의 발달은 미량원소 및 동위원소 지구화학의 연구기법은 지구와 행성의 진화사를 이해하는데 많은 영향을 주어왔다. 방사성 동위원소 지구화학은 지구를 포함한 태양계의 형성년대 뿐만 아니라 지구를 구성하고 있는 맨틀과 지각의 형성사를 정량적으로 이해하게 해주고 있다 (Banner, 2004). 아울러 미량원소 지구화학은 화성암의 형성과정 및 조구조 환경을 유추하게 해주는 귀중한 자료로서 활용되어지고 있다. 특히 초기원시운석내의 함량을 기준으로 비교한 암석과 광물에서의 희토류원소의 분포도 (Masuda, 1957)는 지구과학분야에서 지구화학적 연구방법의 유용함을 보여준 지구화학적 연구기법의 대표적인 예라고 볼 수 있다.

특히 1990년대 초반에 개발된 MC-ICP-MS(Multi-collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)는 방사성 동위원소 뿐만 아니라 안정동위원소에서 발생하는 동위원소간의 분별작용을 찾아낼 수 있게 해줌으로서 지구시스템내에서 발생하는 여러 가지 지질학적/지구화학적 환경변화과정을 추적할 수 있는 연구를 가능하게 해주고 있다 (Teng et al., 2017). 우리나라에도 최근 이 MC-ICP-MS가 여러 연구기관에 많이 보급되면서 안정동위원소를 이용한 동위원소 지구화학 혹은 환경지구화학 분야가 발달할 수 있는 계기가 만들어졌다고 본다. 이와 관련하여 본 발표자 또한 최근에 희토류원소 중의 하나인 Eu의 안정동위원소 분석법을 개발하여 보고한 바 있다 (Lee and Tanaka, 2019). 오늘의 발표에서는 Eu과 같은 무거운 원소의 안정동위원소가 지구시스템의 진화과정에서 분별작용을 일으킬 수 있다는 가능성과 미래의 지구화학의 새로운 연구주제로서의 희토류원소의 동위원소 분별작용연구를 토의하고자 한다. 이 분야의 연구 시초는 2000년대 중반 (Moynier et al., 2006)부터 시작되었지만, 미국, 유럽, 일본에서 조차 실험법과 이에 따른 해석법이 아직 정립되지 않은 미개척분야라 할 수 있다.

Banner, J.L (2004) *Earth-Science Reviews*, 65, 141-194.

Lee, S-G., Tanaka, T. (2019) *Spectrochimica Acta Part B*, 156, 42-50.

Masuda, A. (1957) *Journal of Earth Science of Nagoya University*, 5, 125-134.

Moynier, F., Bouvier, A., Blichert-Toft, J., Telouk, P., Gasperini, D., Albarede, F. (2006) *Geochimica Cosmochimica Acta*, 70, 4287-4294.

Teng, F-Z., Watkins, J.M., Dauphas, N. (2017) *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 82, 885p.

## Syenite from Ulleung Island: As a Window for Pre-eruptive Shallow Alkaline Magma Dynamics

장윤득 (Yun Deuk Jang)

경북대학교 지구시스템과학부 지질학전공

### 1. Introduction

The diversity of alkaline magma manifests through the fractional crystallization of a series of minerals such as clinopyroxene, amphibole and alkali-feldspar, associated crustal or sea-water contamination, and magma mixing. Alkaline volcanism spurts various products that have crystallized in the magma chamber and transports underground samples from inaccessible places to the surface. These entrained lithic fragments, which range from subsurface hypabyssal-plutonic to mantle samples, allow us to understand the geological processes at work. In particular, holocrystalline fragments can reflect pre-eruptive magma dynamics as a plutonic equivalent of the volcanic stage, including the above processes, thus act as a window alluding to an insight for magma evolution of a volcano.

Although no syenitic body is exposed on the surface of this island, syenite fragments are observed in the Ulleung volcanic sequence, suggesting that the syenitic ejecta preserved the counter-part characteristics of the associated erupted lavas. Information regarding the magma dynamics can be deduced through careful interpretation of the mineral chemistry and textural constraints of the syenite fragments. In particular, various predicting models that are based on the mineral chemistry, such as clinopyroxene, amphibole, biotite, and alkali-feldspar, can be applied for this purpose.

Magma mixing underneath Ulleung Island was discovered in this study. Therefore, this study (1) reports textural evidence related to magma mixing processes in syenitic magma via detailed illustration of the petrographic characteristics, (2) tracks the magma mixing conditions through the predicting models mentioned above, (3) suggests a modified model for the plumbing system of the Ulleung Island, and (4) considers the effect of magma mixing on effusive versus explosive eruption styles through pre-eruptive shallow alkaline magma dynamics by comparison with several well-studied volcanoes.

### 2. Methods

In-depth field work was conducted to understand the comprehensive distributions of the syenite fragments in the Ulleung volcanic sequence. In total, 32 syenites were collected from the Stage III and Stage IV volcanics.

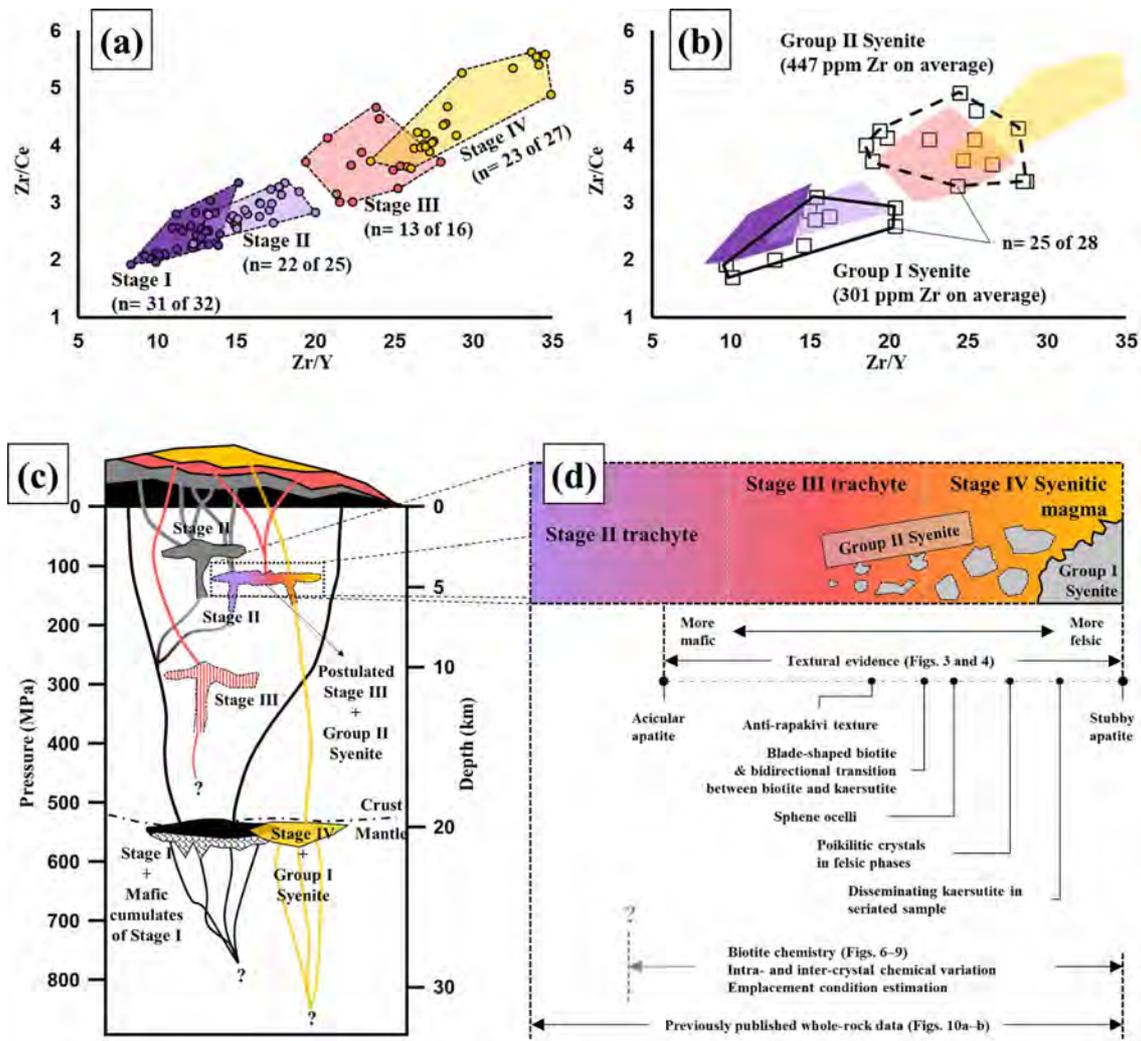
The polished thin sections were analyzed by using a JEOL JXA-8530F electron microprobe (EMP) with wavelength-dispersive spectrometry (WDS) to obtain quantitative compositional data at the Kyungpook National University Scientific Instruments Center. The operating conditions were 15-kV accelerating voltage, 20-nA beam current, 5- $\mu$ m beam size, and 20-s duration of the peak position. Alongside the data that were obtained during this study, published whole-rock and mineral compositions were used for further discussion.

### 3. Conclusions

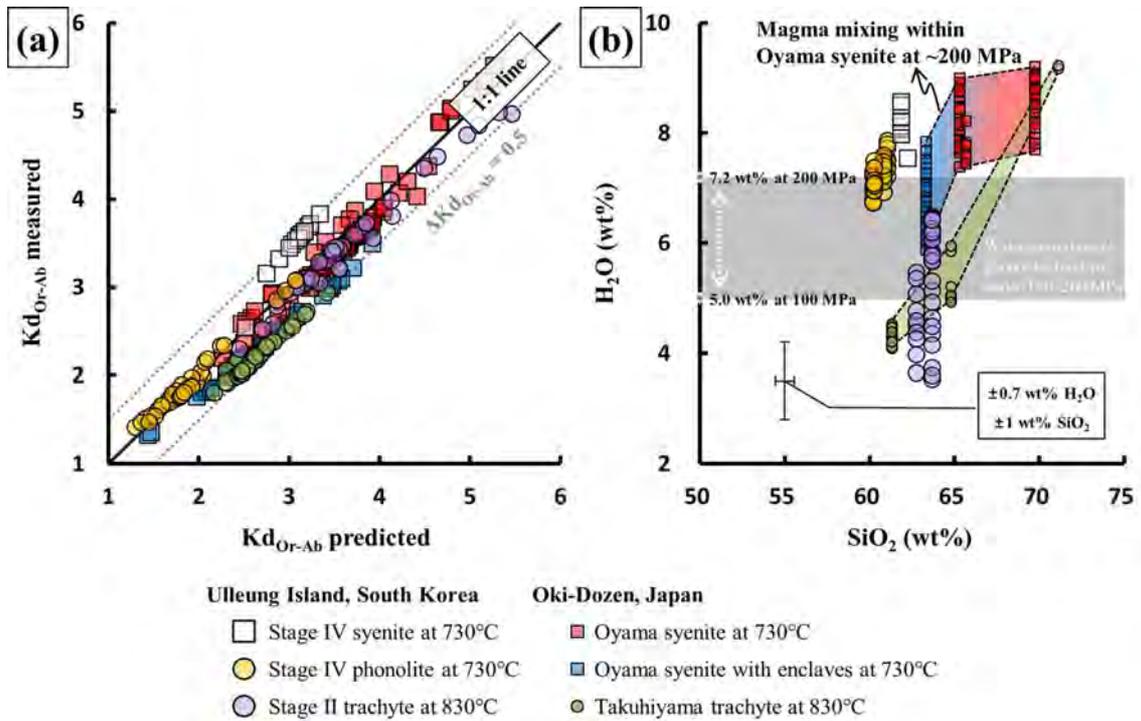
The Quaternary alkaline magmatism of Ulleung Island consists of basalts (Stage I), effusive trachytes (Stage II-III), and explosive phonolite (Stage IV) (Figs. 1a and b). The syenite fragments preserve comprehensive magma mixing features between Stage II and IV during the final shallow emplacement of syenite (Fig. 1), acting as a window for pre-eruptive shallow alkaline magmatism.

The aforementioned textural assemblage implies magmatic conditions such as quenching of hotter magma, overgrowth of orthoclase-rich feldspar, and disequilibrium of kaersutite (Fig. 1d). The temperature and pressure ranges of the magma mixing in the syenites were constrained as ~690-740°C and 77-180 MPa from biotite geothermobarometric models (Fig. 1c) through predominant Ti-substitution, although the thermobarometric conditions from the Na-clinopyroxene and kaersutite did not likely represent the primary magmatic conditions because of their instability during mixing. Furthermore, the syenites were subdivided into two distinctive groups in the Zr/Ce versus Zr/Y plot (Figs. 1a and b): Group I represents fractionated felsic cumulates from Stage IV and Group II records the magma mixing. In particular, the Group II syenites allude to the origin of the Stage III trachyte in Ulleung Island.

Although the eruption style of a volcano can be affected by the interactions between magma and external water such as groundwater, the explosive eruption of Stage IV in Ulleung Island is induced by the transportation and saturation of magmatic water during mixing (Figs. 1 and 2). Furthermore, a comparison with other well-studied volcanoes suggests that an explosive eruption through magma mixing requires at least two factors (Table 1): the transportation and saturation of volatile components and a short stagnant period.



**Fig. 1.** (a) Geochemical plots showing the transitional trend of Stage III between the Stage I-II and Stage IV magmas based on data from Brenna et al. (2014), Hwang et al. (2017), Kim et al. (2008), Kim et al. (1999), Kim and Fujimaki (1987), and Song et al. (1999). (b) Two groups of syenites. (c) Schematic illustration of the holistic plumbing system of Ulleung Island, modified from Brenna et al. (2014). The imbricated area represents mafic cumulates from Stage I, and the striped area indicates the stagnant depth of the Stage III magma from Brenna et al. (2014). The gradational area shows the location in which magma mixing occurred to create the Stage III. (d) Comprehensive evidence for magma mixing discussed in this study.



**Fig. 2.** (a) Diagram for alkali–feldspar–melt equilibria (Mollo et al., 2015). (b) Estimated water contents by using data from Ulleung (Brenna et al., 2014) and Oki–Dozen (Brenna et al., 2015) Islands.

**Table 1.** Comparison of Ulleung Island to other volcanoes.

Sites	Ulleung <sup>a</sup>	Furnas <sup>b</sup>	Astroni <sup>c</sup>	Oki-Dozen <sup>d</sup>
Magma mixing	O	O	O	O
Temperature (°C)	~690–740	~900	~870	~800
Pressure (MPa)	77–180	~100	~80	~200
H <sub>2</sub> O content (wt%)	5.0–7.5	2.4–6.0	2.0–4.8	4.0–9.2
Volatile saturation	O	O	O	O
Lifespan (kys)	~16	~5	~0.4	~1000
External water	X	X	X	X
Eruption style	Explosive	Explosive	Explosive	Effusive

<sup>a</sup>Ulleung Island (South Korea): this study, Brenna et al. (2014), and Kim et al. (2014); <sup>b</sup>Furnas volcano (Sao Miguel, Azores, Portugal): Jeffery et al. (2016); <sup>c</sup>Astroni volcano (Campi Flegrei, Italy): Astbury et al. (2018) and Stock et al. (2018); <sup>d</sup>Oki–Dozen Island (Japan): Brenna et al. (2015).

## 대형 이차이온질량분석기를 이용한 태양계 최초 물질의 $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$ 동위원소 시스템 연구

$^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  systematics of the first solids in our Solar System using a large  
geometry secondary ion mass spectrometer

박창근(Changkun Park)\*

극지연구소 지구시스템연구부

태양계의 나이 45억 6천 7백만년은 태양계에서 가장 먼저 만들어진 것으로 여겨지는 물질인 칼슘-알루미늄 부화물(Ca-Al-rich inclusion; CAI)의 우라늄-납 동위원소 연대 측정을 통해 얻어진 것으로, 이 때를 일반적으로 타임 제로( $t_0$ )라고도 한다. CAI를 구성하는 광물은 Al/Mg 비가 매우 낮은 침정석( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ )이나 Al-Ti-투회석부터 Al/Mg 비가 매우 높은 히보나이트( $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ ), 회장석( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )까지 두루 포함되어 있어 단반감기 동위원소  $^{26}\text{Al}$ ( $^{26}\text{Mg}$ 으로 붕괴, 반감기 약 70만년)를 이용하여 태양계 초기 수십만 년 역사를 이해하기 위한 연구가 활발하게 이루어져 왔다. 최근에는 Cameca사의 대형 이차이온질량분석기(ims-1XX0 시리즈)를 이용하여 수 마이크로미터 크기의 광물도 정밀하게 분석할 수 있게 되면서 태양계의 생성과 초기 진화에 대해 더 많이 이해할 수 있게 되었다. 하지만 이런 정밀 분석을 통해 논쟁적인 이슈들도 동시에 부각되고 있는데, 그 중 가장 첨예한 것이 과연 태양계 생성 당시  $^{26}\text{Al}$ 이 균질하게 분포하였는가 하는 문제이다. 이는  $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  시스템이 과연 연대 측정에 적합한지에 대한 근본적인 의문을 던지는 것이어서 매우 중요한 문제이다. 본 연구에서는 Al-Mg 동위원소 시스템과 대형 이차이온질량분석기를 이용한 in-situ 측정 방법을 소개하고, Al-Mg 동위원소 연구와 관련된 이슈들에 대해 논의하고자 한다.

## 울산시 울주군 삼남면-삼동면 남쪽 경계부 양산단층대 일대에 발달하는 압축성 호상선상구조와 제4기 단층운동

Quaternary Faulting and Compressive Arc-shaped Lineaments Developed around  
Yangsan Fault Zone on the Southern Boundary between Samnam-myeon and  
Samdong-myeon, Ulju-gun, Ulsan, Korea

류충렬(Chung-Ryul Ryo)<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원

<sup>2</sup>부산대학교 지구과학교육과

### 1. 서언

양산단층대를 따라 다수의 활성단층과 제4기 단층들이 발달하고 있으며, 울산의 언양과 양산의 통도사 구간에서 이들 신기단층들이 집중적으로 확인되어 조사되었다(Jun et al., 1992; Okada et al., 1994; Chwae et al., 1998, 2000; Lee et al., 1998, 1999; Kyung et al., 1999, 2002; Ryo et al., 1999, 2000, 2002, 2003, 2006). 최근에도 이미 신기단층선상구조로 논의된 연봉 일대에서의 트렌치 조사에서도 제4기 단층이 확인되고 있다(최성자, 2019, 개인적 의견교환). 한편, 최근 2016년에는 규모 5.8의 경주지진이 양산단층대에서 발생하였다. 이러한 활성단층 운동과 지진은 응력이 누적된 지역에서 변형강도의 약화에 따라 대체로 이전에 존재하였던 단층들이 재활동하면서 발생하게 된다. 이러한 신기의 단층운동과 지진과의 상관성을 논의하고 활성지구조를 이해하기 위해서는 이 일대에 발달하는 특징적인 지질구조의 분석이 매우 기본적이다. 지질구조 조사와 함께 지형지구조 분석에 의하면, 삼남면과 삼동면의 남쪽 경계부인 양산단층대 부근에서 집중적으로 서쪽으로 볼록한 호상의 선상구조가 특징적으로 발달하고 있다. 이 일대에서 이미 연봉단층(Lee et al., 1998; Chwae et al., 1998, 2000; Ryo et al., 2000), 조일단층(Lee et al., 1999; Chwae et al., 2000), 그리고 최근에는 연봉단층의 연장부 선상구조로 추정된 바 있는(Okada et al., 1994) 남쪽의 서편에서 트렌치로 제4기 단층이 확인되었다(Choi, 2019, 개인적 의견교환; Kang et al., 2019). 이들은 대부분 제4기의 구조운동을 반영하고 있으며, 실제로 이들 호상의 선상구조와 관련성을 보이며 제4기 단층이나 활성단층이 추가로 확인되고 있다. 따라서 이들 호상의 선상구조와 그 구조를 논의하고 이와 관련되어 새로이 확인된 제4기 단층(연봉지 단층)을 간단히 소개하고자 한다.

### 2. 호상의 선상구조와 제4기 단층

양산단층대의 남부인 언양-통도사 지역에 대한 지형지구조 분석에 의하면, 서쪽 또는 북서쪽으로 볼록한 선상구조의 발달이 뚜렷하다. 특히, 삼남면 가천리, 방기리, 그리고 상천리와 삼동면의 조일리 경계부인 양산단층대 부근에서 집중적으로 서쪽으로 볼록한 호상의 선상구조가 특징적으로 발달하고 있다(Fig. 1). 이들은 대부분 제4기의 구조운동을 반영하고 있으며, 실제로 이들 호상의 선상구조를 따라 주로 제4기 단층이나 활성단층이 확인되고 있다. 이들 호상의 선상구조를 따라 삼남면 상천리의 남단 울산-밀양간 신설고속도로와 경부고속도로가 만나는 남서측의 우회도로 진입도로 개설사면(연봉저수지 동측 100m 지점)에서 새로이 제4기 단층(연봉지 단층) 확인되었다. 이 제4기 단층은 기반암인 화강암과

이를 관입하는 염기성 또는 산성암맥들을 변형시키며 발달한 남-북 방향의 주향에 폭 10 m 내외의 주단층대(양산단층대의 주 또는 준 주단층대로 추정)의 동측과 서측에서 이들을 부정합으로 피복하는 제4기의 역층을 역단층으로 올라타고 있는 양상을 보인다(Fig. 2).

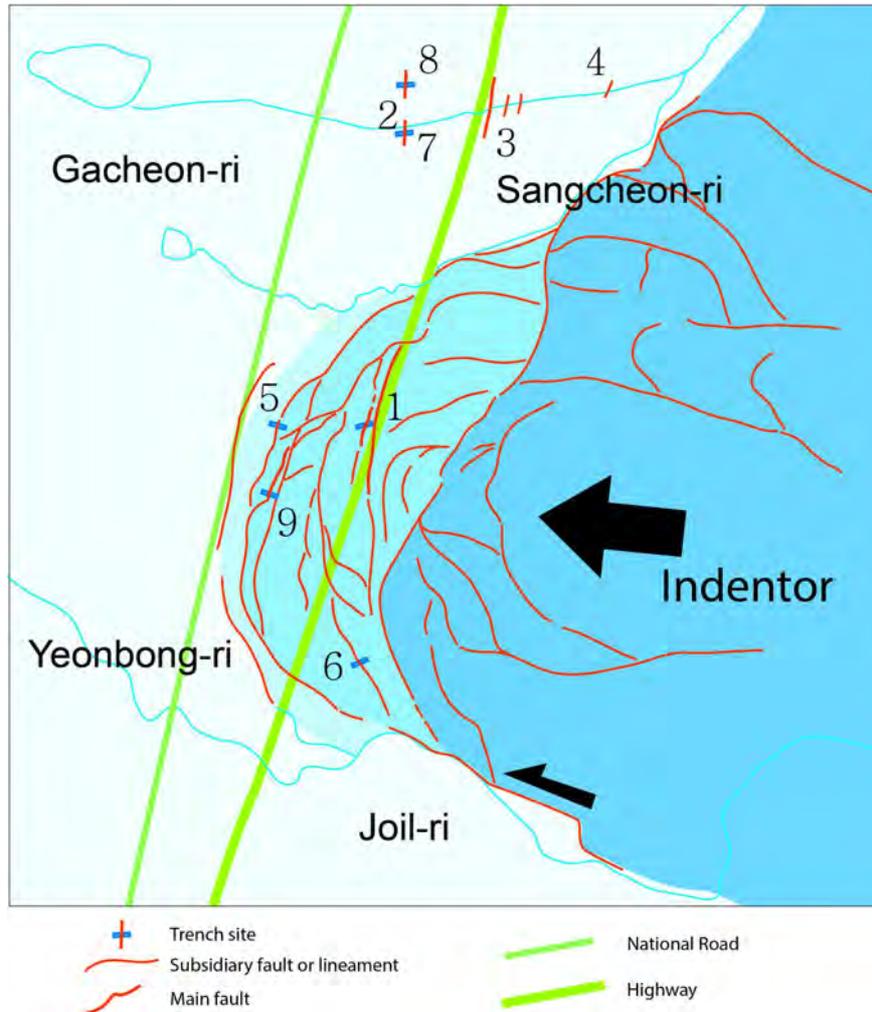


Fig. 1. Compressive arc-shaped lineaments convex to the west with Quaternary faults developed around Yangsan Fault Zone on the southern boundary between Samnam-myeon and Samdong-myeon, Ulju-gun, Ulsan, Korea. 1=Yeonbongji Fault (this study), 2=Gacheon 1 Fault (Lee et al., 1999; Chwae et al., 2000; Ryoo et al., 2000, 2002), 3=Main gauge zone of the Yangsan Fault (Ryoo et al., 2002), 4=Gacheon 2 Fault (Chwae et al., 2000), 5=Yeonbong Fault (Lee et al., 1998; Chwae et al., 1998, 2000; Ryoo et al., 2000), 6=Joil Fault (Lee et al., 1999; Chwae et al., 2000), 7=Gacheon 1 Fault-Trench 1 (Kyung et al., 1999, 2002), 8=Gacheon 1 Fault-Trench 2 (Kwon et al., 2019), 9=possible extension of the Yeonbong Fault-Trench 1 (Choi, 2019, personal communication; Kang et al., 2019).

제4기 역층은 대부분 원마도가 양호한 최대 크기 수 십 cm에 달하는 역들로 구성되며,

주로 양산단층의 서측 산록에서 유래되고 운반된 유천층군의 화산암 역이 대부분을 이루고 있으며, 화강암과 염기성암맥과 그리고 산성암맥으로부터 유래된 역들도 포함하고 있다. 역들의 일반적인 장경은 2-20 cm가 우세한 편이다(Fig. 2). 남-북 방향인 주단층대의 양측에 발달하는 제4기 단층들은 동쪽의 것은 서측의 기반암(단층비지대)이 올라탄 양상(Fig. 2)을, 서쪽의 것은 동측의 기반암인 단층비지대가 서측의 역층보다 상승한 구조양상을 보임이 특징적이다. 기반암에 발달하는 주 단층대와 비지대는 남-북 방향의 단층주향에 거의 수평인 단층조선, 그리고 단층비지대 내의 비대칭적인 시그모이드상의 우향이동을 지시하는 전단구조를 근거로 주로 우향의 주향이동단층 운동이 우세했던 것임을 보이나(Fig. 2), 제4기 단층들은 주향이동 성분과 함께, 거의 동-서 방향의 압축에 의해 동과 서 양측으로 팽압(pop-up)된 양상을 보인다.

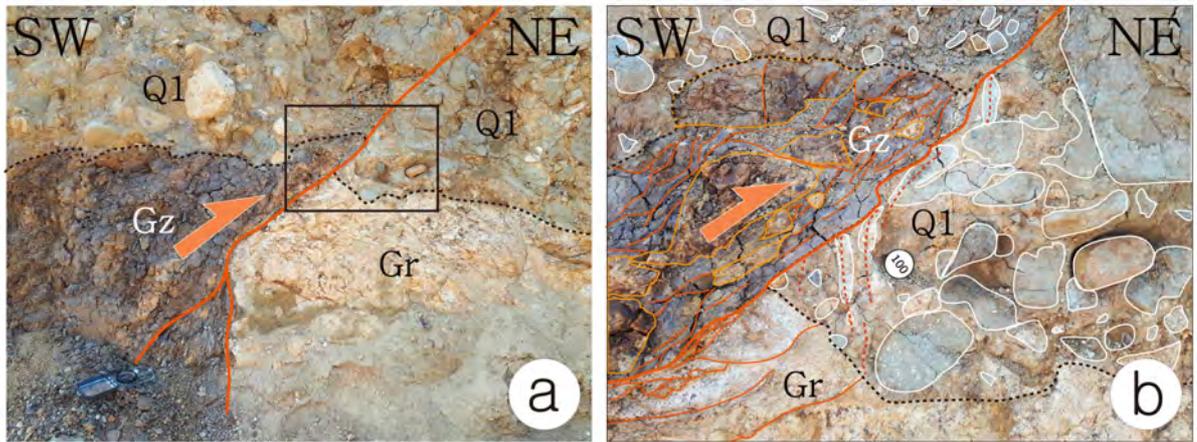


Fig. 2. Quaternary fault (Yeonbongji Fault) developed in the southernmost part of Sangcheon-ri, Samnam-myeon, Ulju-gun, Ulsan, Korea.

### 3. 결과 및 고찰

양산단층대 남부의 언양-통도사 구간에서는 서쪽이나 북서쪽으로 볼록한 선상구조가 관찰된다. Okada et al.(1994)은 이 일대의 양산단층대의 제4기 지형지구조 논의에서 단층의 자취가 매우 직선상임(extremely straight)을 제시한 바 있다. 그러나 이러한 제안과는 달리 이 지역은 특징적으로 서쪽으로 볼록한 호상구조인 신기지형지구조를 집중적으로 보이고 있다. 활성단층운동과 고지진 해석을 통한 지진단층의 발달을 이해하기 위해서는 신기지형지구조의 특징을 정확히 파악하는 것은 기본적인, 매우 중요한(extremely important) 것이다. 특히 연봉 일대에는 이러한 서쪽으로 볼록한 선상구조가 수 개조 집중적으로 발달하고 있어 특징적으로 제4기 구조운동을 받고 있는 곳으로 분석된다. 이러한 지형지구조적 해석에 부합하는 제4기 단층이나 활성단층이 이 일대에서 집중적으로 관찰되고 있어, 응력 집중과 신기지구조 변형의 주요한 전단부임을 지시한다. 서쪽으로 볼록한 선상구조의 양상으로 보아 동쪽에서 서쪽으로 밀려 올라간 구조들을 보일 것으로 추정되며, 동시에 심한 압축변형도 내재할 것으로 해석된다. 이번에 확인된 연봉지 단층에서 역시 기존의 남-북 방향의 단층비지대가 압축작용을 받아 주향이동성분과 함께, 양측의 제4기층을 비집고 상승한 기하학적인 형태를 보이고 있다. 기반암의 주 단층대와 비지대는 남-북 방향의 단층주향에 거의 수평인 단층조선, 그리고 우향의 전단구조를 근거로 주로 우향의 주향이동단층이 우세한 것임을 보이나, 제4기 단층들은 거의 동-서 방향의 압축(Kim et al.,

2016)에 의해 짜여져 솟아오른 구조 양상을 보임이 특징적이다. 이는 주변의 기반암에 비해 응력에 버팀성이 약했을 단층비지대가 동-서 방향의 압축에 의해 집중적으로 압축을 받은 영향으로 해석된다. 그러나 근처에서 이미 확인된 월평단층, 신평단층, 조일단층, 연봉단층, 가천 제1단층의 경우, 동측의 기반암인 백악기 퇴적암이 서측의 역층을 고각도로 올라타고 있으며, 가천 제2단층의 경우도 동측의 기반암이 서측의 역층과 거의 수직으로 접하고 있다(e.g., Chwae et al., 1998, 2000). 최근의 트렌치에서도 동측의 기반암이 서측의 역층을 고각도로 올라타고 있는 양상을 보이고 있다(Choi, 2019, 개인적 의견교환; Kang et al., 2019; Kwon et al., 2019). 따라서 이 연봉호상구조대의 일반적인 구조양상은 주요 단층비지대에서의 국지적인 짜여져 오름 현상도 수반했지만, 대체적으로 동쪽의 상반이 서측의 하반 위를 올라타며 이동한 역단층성 운동을 주로 한 결과로 해석된다.

### 참고문헌

- Chwae, U., Ryoo, C.-R., and others, 1998, Final report of the re-evaluation to the design base earthquake considering the Yangsan fault (1). Report KR-B-255-1998, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 1694 p.
- Jun, M.-S., Jeong, S.H., Chi, H.-C., Jeon, J.-S., Shin, I.-C., 1992, Seismological study, KIGAM Research Report, KR-92-1G-3, 1-53.
- Kang, D., Ha, S., Lee, S., Kang, H.-C., Son, M., 2019, Characteristics of microstructure and anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) of faulted rocks of the Quaternary faults distributed in the major tectonic lines of the southeastern Korean Peninsula. Proceedings of the 2019 Joint Conference of the Geological Science & Technology of Korea, 79-80.
- Kim, M.-C., Jung, S., Yoon, S., Jeong, R.-Y., Song, C.W. and Son, M., 2016, Neotectonic crustal deformation and current stress field in the Korean Peninsula and their tectonic implications: a review. Journal of the Petrological Society of Korea, 25, 169-193.
- Kwon, S.H., Cho, S.I, Choi, W.H., 2019, Determination of faulting age of the Gacheon 1 Fault site in Ulju-gun, Korea using additional trench surveying results. Proceedings of the 2019 Joint Conference of the Geological Science & Technology of Korea, 81.
- Kyung, J.B., 2002, Trench survey for neo-fault movement Sangchon-ri area in the southern part of Yangsan fault zone. Annual Conference of Geological Society of Korea, The Korean society of economic and environmental Geology, The Korean Society for Geosystem Engineering and The Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, p.293-297.
- Kyung, J.B., Lee, K. and Okada, A., 1999a, A paleoseismological study of the Yangsan Fault - analysis of deformed topography and trench survey. Journal of the Korean Geophysical Society, 2, 155-168.
- Kyung, J.-B., Lee, K., Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y., and Takemura, K., 1999b. Study of fault characteristics by trench survey in the Sangchon-ri

- area in the southern part of Yangsan fault, southeastern Korea. Journal of Korean Earth Science Society 20, 101-110.
- Lee, B.J., Choi, S.-J., Chwae, U.-C., and Ryoo, C.-R., 1999, Characteristics of the quaternary faulting of the Wolpyeong, Yangsan, S.E. Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 35, 179-188.
- Lee, B.J., Ryoo, C.-R., Cho, D.-L., Choi, S.-J. and Chwae, U., 1999, Quaternary crustal deformation in the south-eastern part of the Korean Peninsula. Gondwana Research, 2, 578-582.
- Lee, B.J., Ryoo, C.-R., and Chwae, U.-C., 1998, Quaternary faults in Korea. Proceedings of the 53th Symposium, Geological Society of Korea.
- Okada, A., Watanabe, M., Sato, H., Jun, M.S., Jo, W.R., Kim, S.K., Jeon, J.S., Chi, H.C. and Oike, K., 1994, Active fault topography and trench survey in the central part of the Yangsan fault, Southeast Korea. Journal of Geography, Japan, 103, 111-126.
- Ryoo, C. -R., Chwae, U., and Choi, S. -J., 2002, Development characteristics of geological structure and quaternary faults in Sangcheon-ri and Gacheon-ri areas of Samnam-myeon, Ulju-gun, Ulsan Megacity, The 2002 Spring Meeting of the Korea Society of Engineering Geology, p.193-200.
- Ryoo, C.-R., Kang, J.-H., Son, M., Choi, S.-J., Chwae, U.-C, 2003, Quaternary fault in the Sinheung of the Eonyang in the southern Yangsan Fault Zone: Sinheung Fault. Proceedings of the 1st Conference of the Society of Structural Geology, Korea, 1, 1-21.
- Ryoo, C.-R., Kang, J.-H., Son, M., Choi, S.-J. and Chwae, U., 2006, Geological structure of the Sinheung Fault developed along Yangsan Fault in the northern Eonyang, Ulsan, Korea. KIGAM Bulletin, 10, 3-17.
- Ryoo, C.-R., Lee, B.J., Chwae, U., 2000, Quaternary fault and its remote sensing image in the southeastern Korea. CCOP(Coordinating Committee for Costal and Offshore Geoscience Programmes in East and Southeast Asia) Technical Bulletin, Vol. 29, 5-28.
- Yang, J.S. and Lee, H.K., 2012, ESR dating of fault gouge from the Gacheon 1 site on the Yangsan fault zone. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 459-472.
- Yang, J.-S. and Lee, H.-K., 2014, Quaternary fault activity of the Yangsan Fault Zone in the Samnam-myeon, Ulju-gun, Ulsan, Korea. Economic and Environmental Geology, 47, 17-27.

## 감사의 말

이 연구는 한국지질자원연구원에서 수행하는 과학기술정보통신부 과제인 ‘국토 대단층계(양산단층 중부지역) 위험요소 평가연구’의 일환으로 진행된 결과임을 밝힙니다.

## 충주-괴산 지역 계명산층과 문주리층 구성암류의 특징과 차이점으로부터 옥천열곡작용의 고찰

Considering of the Ogcheon Rifting from Characteristics and Difference of the  
Constituent Rocks of Gyemyeongsan Formation and Munjuri Formation in the  
Chungju-Goesan Area, Korea

강지훈(Ji-Hoon Kang)

안동대학교 지구환경과학과

옥천변성대의 북서부에 위치하는 충주-괴산 지역은 옥천변성대의 주요 구성 지층인 계명산층, 향산리돌로마이트층, 대향산규암층, 문주리층, 운교리층, 황강리층과 이들 지층을 관입하는 중생대 화성암류가 분포한다. 특히 이 지역의 계명산층과 문주리층에는 대륙판 내부의 옥천열곡작용과 관련된 쌍봉형 화성활동의 산물인 화산암과 심성암 기원의 변성화성암류가 다량 산출된다. 그러나 계명산층과 문주리층은 단일 암층이 아니라 다양한 암종으로 구성되어 있고, 최근까지 이들 지층을 구성하는 암석들의 종류 및 분포와 산상적인 특징에 대한 정보는 거의 제공된 바가 없기 때문에 충주-괴산 지역에서 옥천퇴적분지의 형성 및 진화과정, 열곡작용과 화성활동 사이의 관계를 파악하고 논의하는데 많은 어려움을 겪었다. 따라서 이 연구에서는 이들 주요 지층 사이의 지질학적 관계를 직접 조사할 수 있는 충주-괴산 지역에서 이들 지층에 대한 암상단위 구분에 의한 상세한 지질도를 작성하여 이들 지층 사이의 구성암류의 특징과 차이점을 파악하고, 이들 구성암류에 대한 기존 연구자들의 지구연대학적 및 지구화학적 연구결과(e.g. 강지훈 외, 2017, 2018)를 참고하여 충주-괴산 지역에서 옥천퇴적분지의 열곡작용과 옥천변성대의 지체구조를 고찰해 보았다. 문주리층의 구성암류는 변성심성산성암, 변성반심성산성암, 변성화산산성암, 변성염기성암, 변성역질암 등으로 주로 화성기원의 변성암류로 구성되어 있다. 반면에 계명산층은 이들 변성화성암류와 함께 변성이질암, 화강암질편마암, 함철규암, 변성사질암, 규암, 결정질 돌로마이트질석회암 등과 같은 퇴적기원의 변성암류가 다수 산출된다, 또한 충주도폭의 대향산규암과 향산리 돌로마이트질석회암에 상응하는 규암과 결정질 돌로마이트질석회암은 계명산층에서도 연장성 있게 반복하여 산출되는 반면에 문주리층에서는 관찰할 수 없다. 대륙판 내부의 열곡작용에 수반된 경동운동의 산물인 변성역질암은 계명산형, 문주리형, 황강리형 등 3종류로 구분된다. 이들 중에 계명산형 변성역질암은 주로 화산산성암의 기질부에 다양한 크기의 아원형~아각형의 화산 및 심성 산성암을 주 구성역으로 하고, 전기 신원생대 화성활동의 산물인 계명산층의 변성 화산 및 심성 산성암(약 852~892 Ma)과 함께 산출된다. 반면에 문주리형 변성역질암은 계명산형 변성역질암 보다 구성역의 크기가 더 크고, 기질보다 역의 함량이 더 많다. 또한 계명산형 변성역질암과 달리 화산 및 심성 산성암 이외에 변성역질암을 주 구성역으로 하는 특징적인 산출양상을 보이고, 중기 신원생대 화성활동의 산물인 문주리층의 변성화산산성암(약 747~762 Ma)과 함께 산출된다. 이러한 연구결과는 옥천변성

대 북서부에서 대륙판 내부의 열곡작용과 이에 수반된 화성활동은 전기 신원생대와 중기 신원생대 등 적어도 2회 발생하였으며, 전기 신원생대 열곡작용에 수반된 경동운동의 산물인 계명산형 변성역질암은 중기 신원생대 열곡작용에 수반된 경동운동의 산물인 문주리형 변성역질암에 구성역으로 재포함되었을 가능성을 시사한다. 그리고 전기 신원생대 열곡작용은 변성화성암류와 함께 퇴적기원의 변성암류가 다수 산출되는 계명산층과 향산리돌로마이트층 그리고 대향산규암층을 포함하는 계명산 지구조단위를 중심으로 그리고 중기 신원생대 열곡작용은 변성화성암류가 우세하게 산출되는 문주리층과 운교리층을 포함하는 지등산 지구조단위를 중심으로 발생하였음을 지시한다.

사사: 본 연구는 한국지질자원연구원의 ‘국내 희유금속자원 탐사 및 활용기술개발 사업’ 과 행정안전부의 ‘방재안전분야 전문인력 양성사업’ 의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

강지훈, 이덕선, 노신영, 정진우, 고상모, 2017, 옥천변성대 북서부 충주-괴산지역의 지질 및 구성암류: 옥천열곡분지의 형성 및 진화과정에 수반된 화성활동사 고찰. 지질학회지, 53, 51-77.

강지훈, 이덕선, 고상모, 2018, 옥천변성대 북서부 충주-괴산지역의 구성암류와 방사능 값: 옥희토류 광체의 기원암과 그 분포 및 특성 고찰. 지질학회지, 54, 383-398.

## 중국 북서부 North Qaidam 초고압변성대 유카 에클로자이트에서 나타나는 전진/후퇴변성작용과 변형메커니즘에 대한 연구

Study on the prograde/retrograde metamorphisms and deformation mechanisms  
from the Yuka eclogite, North Qaidam UHPM belt, NW China

박문재(Munjae Park)<sup>1</sup>, 정해명(Haemyeong Jung)<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구환경과학부

\*email: hjung@snu.ac.kr

조산운동과 연관된 섭입, 충돌, 노출과 같은 지구조 현상들은 조산대 내에 분포하는 중요한 변성암인 에클로자이트에 기록될 수 있다. 이러한 지구조 현상들에 따라 전진/후퇴변성작용들이 일어나고 이에 수반되는 온도/압력과 변형메커니즘에 따라 각각 다른 변형미구조들이 기록될 수 있다. 따라서 이러한 변형미구조들에서 획득한 데이터는 섭입, 충돌, 및 노출과 관련된 지구조 현상들에 대한 핵심적인 정보를 제공해 줄 수 있다. 중국 북서부 North Qaidam 초고압변성대는 북동쪽의 Qilian Block, 남서쪽의 Qaidam Block, 북서쪽의 Altyn Tagh 단층과 접하고 있으며, 유카 에클로자이트는 North Qaidam 초고압변성대의 북서쪽에 위치하고 있다. 수 미터의 에클로자이트들이 이질편마암 내에 부딘화된 렌즈형태로 분포하며, 이 두 암상 모두 변성작용에 의해 발달한 엽리와 선구조가 잘 관찰된다. 유카 에클로자이트는 석류석, 옴파사이트, 펜자이트, 각섬석, 금홍석, 석영 등의 광물들로 구성되어 있으며, 특히 옴파사이트와 펜자이트의 경우 입자가 길게 신장된 형태로 선구조와 아평행하게 잘 배열되어 있다. 구성 광물들의 조직, 입자배열양상, 변형미구조, 격자선호방향 등의 특징들에 근거하였을 때, 석류석, 옴파사이트, 펜자이트의 경우 전진변성작용 동안에 전위 크리프(dislocation creep)와 같은 연성변형에 의해 형성된 것으로 여겨진다. 반면, 각섬석의 경우 유체가 풍부한 환경에서 발생한 후퇴변성작용(e.g., exhumation) 동안에 각섬석이 옴파사이트의 원래 결정구조를 따라 치환되는 확산 크리프(diffusion creep)에 의해 형성된 것으로 해석될 수 있다. 이러한 메커니즘으로 형성된 각섬석의 경우 자연상에서 일반적으로 관찰되는 각섬석의 격자선호방향과는 다른 패턴으로 분류될 수 있으며, 펜자이트를 함유한 에클로자이트의 지진파의 비등방성에는 상대적으로 미약한 영향을 주는 것으로 밝혀졌다.

## The Paleoproterozoic igneous and metamorphic activities in the Ji' an Group within the Jiao–Liao–Ji Belt, North China Craton and its tectonic meaning

Xiaohan Wang<sup>1\*</sup>·Chang–Whan Oh<sup>1</sup>·Byung–Choon Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences and The Earth and Environmental  
Science System Research Center, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of  
Korea

<sup>2</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

### 1. Introduction

The North China Craton (NCC) formed by continental collision along the three orogenic belts namely Jiao–Liao–Ji Belt (JLJB), Trans–North China Belt and Khondalite Belt (Inner Mongolia suture zone) from east to west at around 1.9 Ga (Zhao et al., 2012; Zhao and Zhai, 2013). The JLJB is the Paleoproterozoic collision belt between the Longgang Block in the northeast NCC and the Nangrim Block in the Korean Peninsula. The belt mainly consists of meta–sedimentary and meta–volcanic secessions with granitic and mafic intrusions (Liu et al., 2015a). The sedimentary rocks of the JLJB can be divided into two parts; the sedimentary rocks in northern part including the Fenzishan Group (Jiaobei area), North Liaohe Group (Liaoning Province) and Laolin Group (Jilin Province) and those in the southern part including Jingshan Group (Jiaobei area), South Liaohe Group (Liaoning Province) and Ji' an Group (Jilin Province) (He and Ye, 1998; Liu et al., 2015a; Zhao et al., 2012). Previous studies identified two different P–T paths within JLJB; a clockwise P–T path in the northern part of JLJB and a counterclockwise P–T path in the southern part (He and Ye, 1998; Li et al., 2001);(Zou et al., 2018). However, recent studies also identified clockwise P–T paths with granulite–facies metamorphism in the southern part of the JLJB (Cai et al., 2017; Liu et al., 2017; Liu et al., 2013; Liu et al., 2015b; Tam et al., 2011; Tam et al., 2012a; Tam et al., 2012b; Tam et al., 2012c). The Jilin area is one of the areas which should be studied in more detail for the understanding on the tectonic evolution of the JLJB because in the area P–T path and metamorphic age are still uncertain and there were limited studies on the igneous rocks including post collisional granitoids which will give important information on the tectonic evolution. Therefore, we focus on Jilin area and collected two migmatitic gneisses, one porphyroblastic granitoids, one granite and one metabasite samples to figure out the metamorphic conditions and P–T path in the study area and try to proposed a possible tectonic evolution.

### 2. Method

In this study, we analyzed whole rock geochemistry (major element) and mineral chemistry of migmatitic gneisses from Jilin area using XRF and EPMA to determine the metamorphic P–T conditions of magmatic gneisses by applying the analyzed data to conventional geothermobarometer and Perple\_X program. The whole rock geochemistries (major and trace elements) of metabasite, metagranite and porphyroblastic granitoids were analyzed using ICP–MS to determine the tectonic origin of the igneous rocks. The intrusion and metamorphic ages of zircons were identified by using a sensitive–high–resolution ion microprobe (SHRIMP) and the metamorphic ages of monazites were investigated by LA–ICP–MS. Finally, we interpreted the tectonic evolution of the study area and JLJB including the direction of subduction by combining the results of above works and those of previous studies in the study area.

### 3. Result and discussion

The migmatitic gneisses mainly contain garnet, biotite, sillimanite, plagioclase, k–feldspar, cordierite and quartz. Combining petrographic observation, conventional geothermobarometer, and pseudosection analysis, a clockwise P–T path with granulite facies metamorphism can be confirmed from the top layer of South Liaohé and Ji' an Groups. The peak metamorphic assemblage is to be garnet + biotite + plagioclase + k–feldspar + sillimanite + quartz + ilmenite formed at of ~7–8.5 kbar and 800–760° C. Then the migmatitic genesis underwent retrograde metamorphism at ~5–3.5 kbar and 740–680° C with forming cordierite and muscovite. The zircon SHRIMP age dating and monazite LA–ICP–MS age dating represent that porphyroblast granitoids and granite intruded at 1.84 Ga and 2.13 Ga, respectively. The metabasite shows metamorphosed age of 1.84 Ga but clear intrusion age. The monazite age dating reveals that migmatitic gneisses rocks were metamorphosed at ~1.84 Ga. According to above results and geochemistry data in this study and previous papers, it can be concluded that, the JLJB experienced subduction before 2.15 Ga and formed a continental arc and then followed by extension of back–arc area with mafic rock intrusion and extrusion at 2.15–2.06 Ga. The continental collision was occurring during 1.95–1.90 Ga and followed by post–collision intrusion related metamorphism at 1.86–1.84 Ga. Depend on all these features, we proposed a tectonic model in which the Longgang Block subducted under Nangrim Block during the collision along the JLJB.

Cai, J., Liu, F., Liu, P., Wang, F., Meng, E., Wang, W., Yang, H., Ji, L., and Liu, L., 2017, Discovery of granulite–facies metamorphic rocks in the Ji' an area, northeastern Jiao–Liao–Ji Belt, North China Craton: Metamorphic P–T evolution and geological implications: *Precambrian Research*, v. 303, p. 626–640.

- He, G., and Ye, H., 1998, Two types of Early Proterozoic metamorphism and its tectonic significance in eastern Liaoning and southern Jilin areas: *Acta Petrologica Sinica*, v. 14, no. 2, p. 152–162.
- Li, S., Han, Z., Liu, Y., Yang, Z., and Ma, R. J. G. R., 2001, Continental dynamics and regional metamorphism of the Liaohe Group, v. 47, no. 1, p. 9–18.
- Liu, F., Liu, P., Wang, F., Liu, C., and Cai, J., 2015a, Progresses and overviews of voluminous meta-sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic/mobile belt, North China Craton: *Acta Petrologica Sinica*, v. 31, no. 10, p. 2816–2846.
- Liu, P., Cai, J., and Zou, L. J. A. P. S., 2017, Metamorphic PTt path and its geological implication of the Sanjiazhi garnet amphibolites from the northern Liaodong Peninsula, Jiao-Liao-Ji belt: Constraints on phase equilibria and Zircon U-Pb dating, v. 33, no. 9, p. 2649–2674.
- Liu, P., Liu, F., Liu, C., Wang, F., Liu, J., Yang, H., Cai, J., and Shi, J., 2013, Petrogenesis, P-T-t path, and tectonic significance of high-pressure mafic granulites from the Jiaobei terrane, North China Craton: *Precambrian Research*, v. 233, p. 237–258.
- Liu, P., Liu, F., Wang, F., Liu, C., Yang, H., Liu, J., Cai, J., and Shi, J. J. A. P. S., 2015b, PTt paths of the multiple metamorphic events of the Jiaobei terrane in the southeastern segment of the Jiao-Liao-Ji Belt (JLJB), in the North China Craton: Implication for formation and evolution of the JLJB, v. 31, no. 10, p. 2889–2941.
- Tam, P. Y., Zhao, G., Liu, F., Zhou, X., Sun, M., and Li, S. J. G. R., 2011, Timing of metamorphism in the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt: new SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites, gneisses and marbles of the Jiaobei massif in the North China Craton, v. 19, no. 1, p. 150–162.
- Tam, P. Y., Zhao, G., Sun, M., Li, S., Iizuka, Y., Ma, G. S.-K. i., Yin, C., He, Y., and Wu, M. J. P. R., 2012a, Metamorphic P-T path and tectonic implications of medium-pressure pelitic granulites from the Jiaobei massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton, v. 220, p. 177–191.
- Tam, P. Y., Zhao, G., Sun, M., Li, S., Wu, M., and Yin, C., 2012b, Petrology and metamorphic P-T path of high-pressure mafic granulites from the Jiaobei massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: *Lithos*, v. 155, p. 94–109.
- Tam, P. Y., Zhao, G., Zhou, X., Sun, M., Guo, J., Li, S., Yin, C., Wu, M., and He, Y. J. G. R., 2012c, Metamorphic P-T path and implications of high-pressure pelitic granulites from the Jiaobei massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton, v. 22, no. 1, p. 104–117.
- Zhao, G., Cawood, P. A., Li, S., Wilde, S. A., Sun, M., Zhang, J., He, Y., and Yin, C., 2012, Amalgamation of the North China Craton: key issues and discussion: *Precambrian Research*, v. 222, p. 55–76.

*Proceedings of the Annual Joint Conference,*  
the Mineralogical Society of Korea and the Petrological Society of Korea,  
May 30-31, 2019, Chuncheon, Korea

Zhao, G., and Zhai, M., 2013, Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: review and tectonic implications: *Gondwana Research*, v. 23, no. 4, p. 1207–1240.

Zou, Y., Zhai, M., Santosh, M., Zhou, L., Zhao, L., Lu, J., Liu, B., and Shan, H., 2018, Contrasting P–T–t paths from a Paleoproterozoic metamorphic orogen: Petrology, phase equilibria, zircon and monazite geochronology of metapelites from the Jiao–Liao–Ji belt, North China Craton: *Precambrian Research*, v. 311, p. 74–97.

## 영남육괴 고온변성작용과 차노카이트 형성의 시간적 관계

Temporal relationship between high-temperature metamorphism and  
charnockite formation in the Yeongnam Massif, Korea

이유영(Yuyoung Lee)<sup>1\*</sup>, 조문섭(Moonsup Cho)<sup>2</sup>, 김태훈(Taehoon Kim)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국기초과학지원연구원 지구환경연구부

<sup>2</sup>충북대학교 지구환경과학과

<sup>3</sup>한국지질자원연구원 지질자원분석센터

Incipient charnockites are orthopyroxene-bearing granitic gneisses that are commonly considered to be a product of infiltration of CO<sub>2</sub>-rich fluids during high temperature dehydration in the granulite terrane. Greenish patches of charnockitic gneisses are locally present and hosted by granitic gneiss in the Sancheong-Hadong anorthosite complex, southern Yeongnam Massif. Both lithologies are foliated and show a variety of field evidence for partial melting and melt crystallization. Granitic leucosomes and garnet-rich residua are ubiquitous along ductile shear bands and/or penetrative foliations in the gneiss. Based on phase equilibria modeling, P-T conditions of peak metamorphism are constrained at 3.5-8.5 kbar and 770-840 °C. The sensitive high-resolution ion microprobe (SHRIMP) U-Pb analyses of inherited cores and overgrowth rims of zircon from a charnockite yielded the weighted mean <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb ages of 1880 ± 5 Ma (n = 24) and 1861 ± 4 Ma (n = 27) which are interpreted as the times for magmatic crystallization and subsequent anatexis of granitic protolith, respectively. This timeline is consistent with that determined from the host granitic gneiss. In addition, the zircon overgrowth age is identical to the weighted mean <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb age of monazite, 1861 ± 6 Ma (n=29), estimated from the granitic gneiss. In marked contrast, however, monazite grains from the charnockite yielded the weighted mean <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb age of 1842 ± 8 Ma (n = 15), suggesting that an influx of aqueous fluid took place ~20 m.y. after the crystallization of granitic melt. Although both charnockitic and granitic gneisses underwent high-temperature metamorphism and partial melting at 1.86 Ga, the former only was subject to a discrete fluid influx at 1.84 Ga apparently localized and characterized by monazite growth in association with the retrogression of orthopyroxene to ferromagnesian amphibole-rich aggregates. Our result is incompatible with previous models suggesting that post-metamorphic peak infiltration of CO<sub>2</sub>-rich fluid is responsible for the charnockite formation. Further studies are necessary for deciphering petrogenetic implications of charnockite in the Yeongnam Massif, particularly in light of the linkage between granulite-facies metamorphism and fluid-rock interaction during the waning stage of orogenesis.

북서 베트남 송마 봉합대 남코 부가체 변성이질암의 초기 트라이아스기  
고압 변성작용과 후기 트라이아스기 중압 변성작용

Early Triassic High-*P* and Late Triassic Medium-*P* metamorphism of metapelites  
in the Nam Co accretionary complex, Song Ma suture zone, NW Vietnam

부이 빈 하우(Bui Vinh Hau)<sup>1,2</sup>, 김윤섭(Yoonsup Kim)<sup>1</sup>, 정연중(Youn-Joong Jeong)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 지구환경과학과

<sup>2</sup>하노이지질광산대학교

<sup>3</sup>한국기초과학지원연구원

The *P-T* evolution and monazite geochronology of metapelitic schists from the central Nam Co complex, central Song Ma suture zone, Vietnam, were investigated in order to reveal two-stage metamorphic and deformation records during the Indosinian orogeny. Representative mineral assemblage of the metapelites consists of chlorite + white mica + albeite + quartz ± garnet ± biotite + monazite ( $M_2$ ), and an aggregate of white mica and chlorite defines the major foliations ( $S_n$ ). Earlier metamorphic event ( $M_1$ ) was partly recorded by relict mineral inclusions such as rare garnet + white mica + chlorite + graphitic material inside albeite porphyroblasts, and the inclusions commonly define straight to sigmoidal internal fabrics ( $S_i$ ) discontinuous to  $S_n$ . Porphyroblastic garnet contains a paucity of inclusions except for rare quartz and titanium-oxide needles in the core, and shows compositional zonation typified by a bell-shaped spessartine profile balanced by increasing almandine content. On the other hand, rare garnet inclusion within albeite porphyroblast is richer in almandine content but lower in spessartine content relative to porphyroblastic garnet in the matrix. The phengite compositions of white mica are relatively higher in inclusion phases (~3.3–3.4 Si apfu) than those in the matrix (~3.1 Si apfu). The *P-T* conditions of  $M_1$  based upon isochemical phase diagrams are estimated as 460–475°C and 15–17 kbar whereas those of  $M_2$  as 440–520°C and 8–12.5 kbar. The results are consistent with the *P-T* conditions 410–510°C and 7–14 kbar based upon the garnet–chlorite geothermometry and the garnet–plagioclase–phengite–quartz geobarometry. Monazite occurs not only in the matrix but also within albeite as an inclusion. The compositions of monazite in the matrix are depleted in Th and Si, but are enriched in P, La, Ce relative to those of monazite inclusions. The U–Th–Pb composition of the former and latter monazite yielded the weighted mean  $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$  ages of  $242 \pm 12$  Ma ( $2\sigma$ ) and  $221 \pm 4$  Ma ( $2\sigma$ ). The Early Triassic  $M_1$  is consistent with the ages of arc magmatic rocks in the region, and the Late Triassic  $M_2$  might be accompanied by the collisional stage between the Indochina and South China cratons.

# 포스터 발표장

자연대 1호관 109호

---

▣ 안동호와 임하호의 퇴적물 및 유입 부유물질의 중금속 특성 연구	서정민·홍수민·김영훈·김정진
▣ 안동호 퇴적물의 중금속 용출 특성 연구	서정민·홍지은·김영훈·김정진
▣ 남극지방 수은 및 반응성 수은 화합물 침적의 원자단위의 기원에 대하여	이유수·한영철·이성근
▣ 충주지역 제철유적 출토 철광석의 산지해석을 위한 예비연구	문동혁·권혁남·곽병문·이은우
▣ 버네사이트의 합성시 양이온 조건에 따른 도로카이트로의 상전이 특성	민소영·김영규
▣ 산성광산배수에서 발견되는 흰색침전물의 상전이의 특성	여진우·김영규
▣ Na-, K-, Cs-버네사이트 분자동역학 시뮬레이션 연구	박수정·권기덕
▣ 빙기-간빙기 동안의 스�멕타이트의 화학 성분 분포를 이용한 기원지 분석: 남극 드레이크해협 및 벨링스하우젠 해	박영규·이재일·정재우· Claus-DieterHillenbrand· 유규철·김진욱
▣ 몽골 무슈가이-후닥과 한국 홍천 지역의 희토류 광화작용에 대한 비교 연구	오토곤·에르덴다바수렌·이범한·유봉철· 고상모
▣ 페루 중부 오염 다중금속광화대의 황동위원소값	호르게 아고스타·허철호
▣ 흡착된 비산염, 크롬산염, 그리고 셀레늄산염이 페리하이드라이트의 상변화에 미치는 영향	김규례·김영규
▣ 14 GPa의 고압에서 탄소를 포함한 비정질 $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 의 고상 NMR 연구	김은정·이성근
▣ 필릭 및 아질릭 열수변질광물의 분광학적 특성	심규훈·유재형·고상모·이범한
▣ 탄산염광물의 분광학적특성과 광체탐지	정바로·유재형·고상모·이범한
▣ 옥천변성대 충주-괴산 지역의 구성암류와 지질: 옥천 충상단층 및 지구조단위 고찰	강지훈·이덕선·노신영·정진우·고상모
▣ 울릉도 말잔등응회암의 입도 및 구성원 분석과 화산분화 유형	황상근·이소진·한기환

- ▣ 통영 서부 사랑도응회암의 마그마 진화

이소진·황상구·송교영
- ▣ 백령도, 평택 및 아산 지역 후기 신생대 알칼리 현무암의 근원물질 종류에 대한 예비연구

김선규·최성희
- ▣ 경기육괴 서남부 당진지역과 경기육괴 북부 고남산 지역에 나타나는 신원생대 화성작용 대비

이보영·오창환·이기욱
- ▣ 포항-영덕 지역의 페름기-트라이아스기 화강암류에 대한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대 및 암석 성인에 대한 예비 연구

최현옥·최성희·김승섭
- ▣ 고군산군도지역의 신원생대 방축도층과 이를 관입한 화성암의 형성시기 및 지구조환경

김원정·오창환·이승환·김진석·신명호·정지완
- ▣ Formation and Evolution of the Lithospheric Mantle beneath Southern Vietnam

Hoang Thi Hong Anh·  
최성희·유영재·  
Pham Trung Hieu
- ▣ 대마도 마이오세 관입암류의 지구화학적 특징: 예비연구

이은지·최성희·김지인·이정현
- ▣ 화천군 사내면 일대에 분포하는 쥐라기 화강암질암의 성인에 대한 암석화학적 연구

한충희·전혜수·박영록
- ▣ ICP-MS를 이용한 지질시료에서의 희토류원소 함량 분석 시에 발생하는 Ba, Ce, Pr의 산화물과 희토류원소 분포도의 상관성

김태현·이승구·유재영

안동호와 임하호의 퇴적물 및 유입 부유물질의 중금속 특성 연구  
Studies on the Characteristics of Heavy Metals in Sediments and  
Suspended Materials of Andong and Imha Lake

서정민(Jeong Min Seo)<sup>1</sup> · 홍수민(Su Min Hong)<sup>1</sup> · 김영훈(Young Hun Kim)<sup>2</sup> ·  
김정진(Jeong Jin Kim)<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과, 경북 안동시 경동로 1375

<sup>2</sup>안동대학교 환경공학과, 경북 안동시 경동로 1375

## 1. 서언

집중 강우시 댐 내로 유입되는 부유물질은 대부분 댐 내에 퇴적되어 저수량을 줄이는 역할을 하고 오염된 부유물질이 유입될 경우 오염물질이 용출되어 수질 특성을 변화시킬 수 있다. 호수로 유입되는 부유물질의 양은 주로 강우 강도, 암석의 풍화 정도, 경작지의 분포 등에 따라 달라지며 부유 물질의 물리화학적 특성은 지질 및 토양의 특성에 의해 결정된다. 안동댐 상류의 경우 폐금속광산이 다수 분포되어 있고 임하댐의 경우 소수의 폐금속 광산이 분포하고 있어 이들에 의한 부유물질의 오염도는 매우 다르게 나타난다. 안동호와 임하호로 유입되는 부유물의 특성에 따른 호소 퇴적물의 특성 변화를 밝히고 그 결과를 기초로 향후 부유물에 의한 호소내 퇴적물의 중금속 오염 변화 추이를 추정할 수 있는 기본 자료를 제공하는 데 그 목적이 있다.

## 2. 실험 방법

퇴적물 시료는 안동댐과 임하댐 저수 구역에서 각각 1점씩 그랩샘플러를 이용하여 채취하였으며, 부유물질 시료는 안동댐 상류 낙동강의 단천교와 임하댐 상류 반변천의 합강교에서 채취하였다. 또한 상류에 오염원이 전혀 없다고 판단되는 낙동강 지류인 와야천의 상아교에서 부유물질 시료를 채취하여 안동댐과 임하댐에 유입되는 부유물질의 특성과 비교하였다. 부유물질은 집중 강우 후 탁도가 높을 때 약 20 L 정도의 탁수를 채취하여 침전 및 원심분리 방법을 이용하여 시료를 준비하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 퇴적물의 중금속

퇴적물의 금속원소는 수은, 비소, 셀레늄, 아연, 카드뮴, 납, 니켈, 철, 망간, 크롬, 구리가 검출되었다. 퇴적물의 비소는 안동댐 퇴적물에서 47.9 mg/kg, 42.0 mg/kg, 54.2 mg/kg으로 2개의 항목이 호소퇴적물 오염평가 기준 3등급으로 오염된 결과를 보여주었으며, 안동댐 LD2 시료에서 비소는 호소퇴적물 오염평가 기준 2등급을 만족하고 있었다. 대조군인 임하댐은 비소는 21.4 mg/kg로 1등급을 만족하고 있었으며, 카드뮴은 검출되지 않았다.

도한, 비소는 2등급을 만족하고 있었다. 나머지 원소는 호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준의 1등급을 만족하고 있다.

### 3.2. 부유물질의 중금속

부유물질은 수은, 비소, 셀레늄, 아연, 카드뮴, 납, 니켈, 철, 망간, 크롬, 구리가 검출되었다. 유입 부유물질에 대한 중금속은 오염평가를 할 기준이 없어 평가하지 못하였으며, 따라서 퇴적물의 오염도와 비교하였다. 부유물질 대부분 퇴적물과 비슷하거나 높은 농도로 검출되었다. 안동댐 SS1 시료의 비소는 퇴적물과 비교하였을 때, 83.67 mg/kg으로 가장 높은 농도를 가지고 있으며, 카드뮴도 24.05 mg/kg으로 퇴적물보다 높은 농도를 가졌다. 부유물질은 안동댐 퇴적물의 호소퇴적물 오염평가 기준 비소 3등급과 카드뮴 4등급의 기준보다 높은 농도의 수치를 보여주고 있다.

안동댐 SS1의 납과 아연, 구리에서 안동댐의 퇴적물보다 높은 오염도를 보여주며, 각각 87.93 mg/kg, 1282.62 mg/kg, 70.62 mg/kg의 수치를 보여주고 있다. 이는 안동댐 SS1은 부유물질의 유입은 적었으나 미세질의 입자로 판단된다. 일반적인 미세입자는 각종 중금속 원소를 다량 포함하고 있으며, 안동댐 SS1 시료의 중금속 농도는 미세입자로 인한 결과라고 판단된다. 또한, 안동댐 SS2 시료의 중금속 농도는 안동댐의 퇴적물과 비슷한 구성 관계를 보여주며, 안동댐의 퇴적물 오염은 부유물질의 연관성이 높다고 판단된다. 또한, 상아교는 안동댐의 하류에서 유입되는 지천이며, 상류의 오염원이 존재하지 않는 곳으로써 상아교에서 측정된 부유물질의 중금속은 임하댐, 안동댐의 퇴적토 및 부유물질보다 낮은 중금속 수치를 보여준다. 안동댐의 유입되는 부유물질 중금속 평균과 안동댐에 존재하는 오염된 퇴적토 유해물질의 분석결과 구성비율이 비슷하였으며, 임하댐의 부유물질 및 퇴적토와 다른 결과를 보여주었다.

표 1. 안동댐 일대 부유물과 퇴적물 시료의 중금속 분석 결과

단위 : mg/kg

구분	시료명	Hg	As	Se	Zn	Cd	Pb	Ni	Fe	Mn	Cr	Cu
부유물질	상아교	0.04	6.68	ND	305.71	0.38	37.02	10.64	44602.66	1151.56	18.77	29.94
	안동댐1	0.46	83.67	3.5	1282.62	24.05	87.93	39.11	35096.38	1822.79	41.27	70.62
	안동댐2	0.55	53.05	2.3	700.78	9.52	75.32	58.8	35112.18	1828.43	46.58	53.17
	임하댐	0.08	13.99	2.5	247.65	1.19	45.65	42.23	36892.91	1550.2	84.09	48.26
퇴적물	안동댐1	0.14	47.89	0.4	447.25	8.03	55.63	29.53	33975.03	432.03	45.02	33.82
	안동댐2	0.12	41.96	1.9	416.31	6.18	60.82	30.86	32713.52	421.43	45.53	34.92
	안동댐3	0.28	54.23	ND	675.03	14.39	53.67	28.77	35214.15	665.72	39.05	34.27
	임하댐	0.09	21.44	ND	106.71	0.24	20.8	27.67	35009.77	1225.94	46.69	20.13

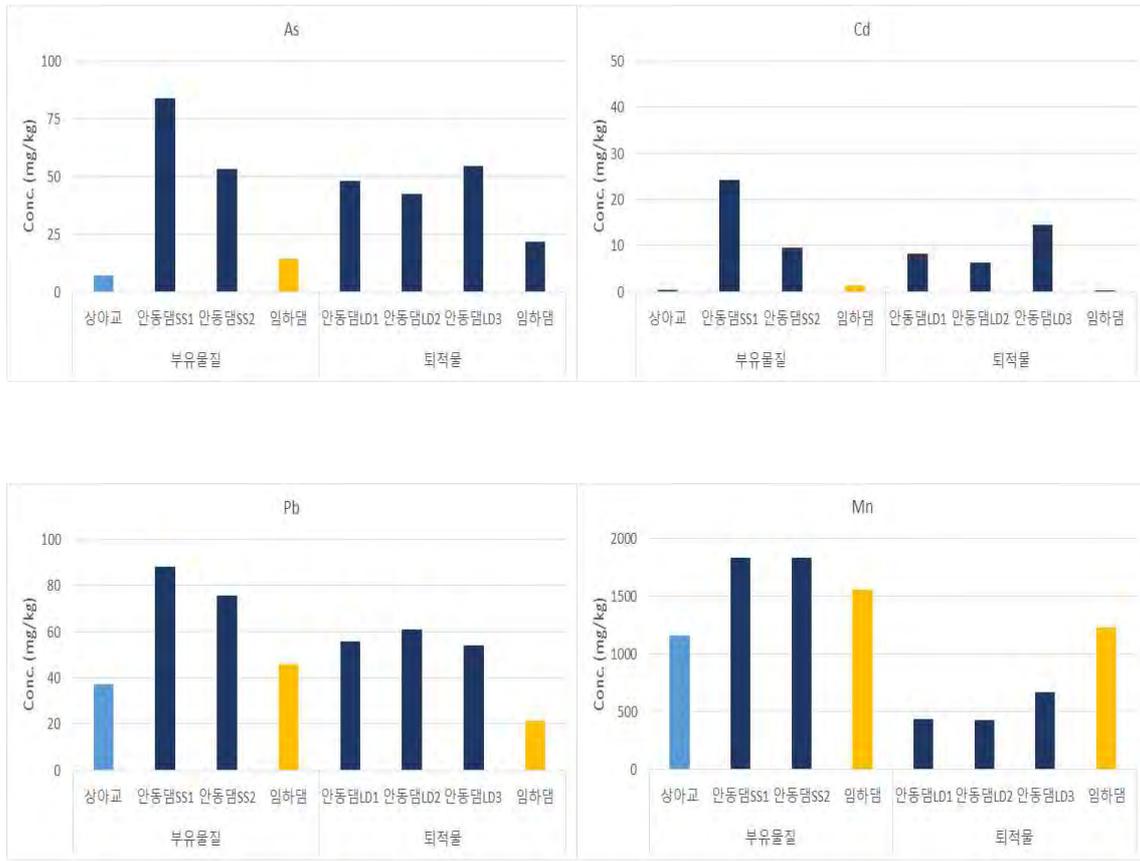


그림 1. 안동댐 일대 부유물과 퇴적물 시료의 중금속 분석 결과

## 안동호 퇴적물의 중금속 용출 특성 연구

# Studies on the Releasing Characteristic of Heavy Metal in Sediments of Andong Lake

서정민(Jeong Min Seo)<sup>1</sup> · 홍지은(Ji Eun Hong)<sup>1</sup> · 김영훈(Young Hun Kim)<sup>2</sup> ·

김정진(Jeong Jin Kim)<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과, 경북 안동시 경동로 1375

<sup>2</sup>안동대학교 환경공학과, 경북 안동시 경동로 1375

### 1. 서언

안동댐은 낙동강 상류의 청정 지역에 위치하지만 높은 퇴적물 오염도, 상류 오염원의 존재로 인하여 환경적 관심의 대상이 되고 있다. 과거부터 안동호는 상류유역에 위치한 휴폐광산 등 다수의 오염원에 의한 수질오염 문제가 제기되어 왔으며, 수자원에 대한 지역 주민들의 불안감은 최근까지 점진적으로 축적되고 있다. 본 연구는 중금속 오염도가 높은 안동댐 퇴적물의 용출실험을 통해 댐 내 퇴적물의 중금속 용출량과 용출특성을 밝히는 것이다.

### 2. 실험 방법

안동댐 퇴적물에서의 중금속 용출을 확인하기 위한 퇴적물 중금속 용출실험을 진행하였다. 중금속 용출실험은 안동댐 퇴적물에 대하여 정지상태와 교란상태의 두 가지 조건으로 진행되었다. 원수는 댐의 조건을 모방하기 위해 각 댐 퇴적물 채취지점의 용수를 채취하여 원수로 하였다. 퇴적물 용출은 호기성 상태로 10일간 진행하였으며, 10일간 용출된 결과와 초기의 중금속 농도를 비교하여 용출 판단을 하였다. 용출 반응조의 퇴적물과 용수의 비율은 1:9를 형성하였으며, 크기는 직경 13 cm, 높이 20 cm를 가진다. 퇴적물 용출용액 분석방법은 수질오염공정시험기준에 준수하여 중금속 항목 구리, 납, 니켈, 비소, 수은, 아연, 카드뮴, 크롬, 망간, 철, 셀레늄, 바륨에 대하여 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 정지상태 퇴적물 용출실험

10일 동안 실시한 안동댐 퇴적물의 용출 실험에서 크롬, 철 구리, 아연의 경우 원수의 초기농도 보다 오히려 약간 줄어들어 용출되지 않은 것으로 보이며, 카드뮴, 납, 수은은 초기 원수와 10일간 용출 실험 용액모두 검출되지 않았다. 바륨은 13.25 $\mu\text{g/L}$ 에서 13.71 $\mu\text{g/L}$ 로, 비소는 3.18 $\mu\text{g/L}$ 에서 5.24 $\mu\text{g/L}$ 로, 니켈은 0.50 $\mu\text{g/L}$ 에서 0.78 $\mu\text{g/L}$ 로 약간 용출되는 경향이 보였으며, 셀레늄은 계속 검출되지 않다가 10일째에 1.95 $\mu\text{g/L}$  으로 약간 용출되었다. 망간이 5.76 $\mu\text{g/L}$ 에서 131.40 $\mu\text{g/L}$  으로 가장 많이 용출 되었다. 각 중금속들의

용출량은 없거나, 크지 않았으며 그중 망간이 가장 많이 용출 되었다.

### 3.2 교란상태 퇴적물 용출실험

셀레늄과 수은은 초기 원수와 10일간 용출 실험 용액 모두 검출되지 않았으며 남은 실험 2~6시간 사이 용출되었다가 다시 검출되지 않았다. 철은 초기 교란 시 농도가 높게 올라가다 다시 줄어들어 3일 부터는 검출되지 않았다. 나머지 중금속 항목들은 모두 용출되었는데, 크롬과 비소, 구리는 0.07~1.8 $\mu\text{g/L}$ 으로 미량 용출되었다. 아연이 초기 원수 농도 4.46 $\mu\text{g/L}$ 에서 10일간 용출 실험 용액 1154.93 $\mu\text{g/L}$ 으로 가장 많이 용출 되었으며, 다음으로 바륨이 초기 원수 농도 13.25 $\mu\text{g/L}$ 에서 116.83 $\mu\text{g/L}$ 으로 많이 용출 되었다. 니켈과 카드뮴, 망간은 7~47 $\mu\text{g/L}$ 으로 용출 되었다. 용출이 일어난 중금속 니켈, 구리, 아연, 카드뮴, 바륨은 모두 용출 실험을 수행한지 3일부터 용출이 많이 되는 경향을 보인다.

표 1. 정지상태의 안동댐 퇴적물 중금속 용출결과

단위 :  $\mu\text{g/kg}$

퇴적물 정지	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Ba	Pb	Hg
원수	0.17	5.76	163.36	0.50	1.22	4.46	3.18	ND	ND	13.25	ND	ND
0.5 hr	0.08	43.06	56.29	0.50	1.97	3.15	3.31	ND	ND	13.25	ND	ND
1 hr	0.06	46.75	25.74	0.73	1.21	6.34	2.65	ND	ND	10.92	ND	ND
2 hr	0.17	43.48	13.12	0.43	1.05	3.03	3.84	ND	ND	11.80	ND	ND
6 hr	0.14	45.32	49.07	0.36	1.16	3.31	4.44	ND	ND	11.97	ND	ND
12 hr	0.03	50.84	42.90	0.50	1.11	3.19	3.51	ND	ND	11.80	ND	ND
1 day	0.10	61.28	41.05	0.40	1.05	2.13	3.78	ND	ND	13.08	ND	ND
3 day	0.05	77.60	40.11	0.93	1.36	2.09	3.64	ND	ND	14.12	ND	ND
5 day	0.05	110.45	115.19	0.90	2.44	2.94	4.18	ND	ND	14.59	ND	ND
7 day	ND	60.06	84.59	0.96	1.75	2.94	3.05	ND	ND	11.91	ND	ND
10 day	0.03	131.40	30.75	0.78	1.13	3.15	5.24	1.95	ND	13.71	ND	ND

표 2. 교란상태의 안동댐 퇴적물 중금속 용출결과

단위 :  $\mu\text{g/kg}$

퇴적물 교란	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Ba	Pb	Hg
원수	0.17	5.76	163.36	0.50	1.22	4.46	3.18	ND	ND	13.25	ND	ND
0.5 hr	0.09	1104.88	3207.89	1.66	0.97	6.38	37.25	ND	ND	22.55	ND	ND
1 hr	0.23	1008.11	2892.99	1.05	0.72	3.64	28.50	ND	ND	20.98	ND	ND
2 hr	0.34	884.90	2260.66	1.02	0.71	3.88	14.78	ND	ND	16.16	0.27	ND
6 hr	0.25	628.66	888.84	1.55	1.13	8.05	5.90	ND	ND	18.07	0.27	ND
12 hr	0.04	404.65	51.06	0.57	0.42	1.76	3.78	ND	ND	13.19	ND	ND
1 day	0.02	465.87	31.23	0.52	0.31	3.64	2.39	ND	0.13	18.60	ND	ND
3 day	0.28	47.55	ND	2.14	3.26	106.78	2.25	ND	0.39	47.25	ND	ND
5 day	0.10	53.05	ND	6.29	1.94	637.35	2.98	ND	6.39	75.79	ND	ND
7 day	0.12	53.55	ND	7.84	2.37	1015.96	3.11	ND	12.59	98.57	ND	ND
10 day	0.27	52.76	ND	7.99	3.03	1154.93	3.25	ND	15.87	116.83	ND	ND

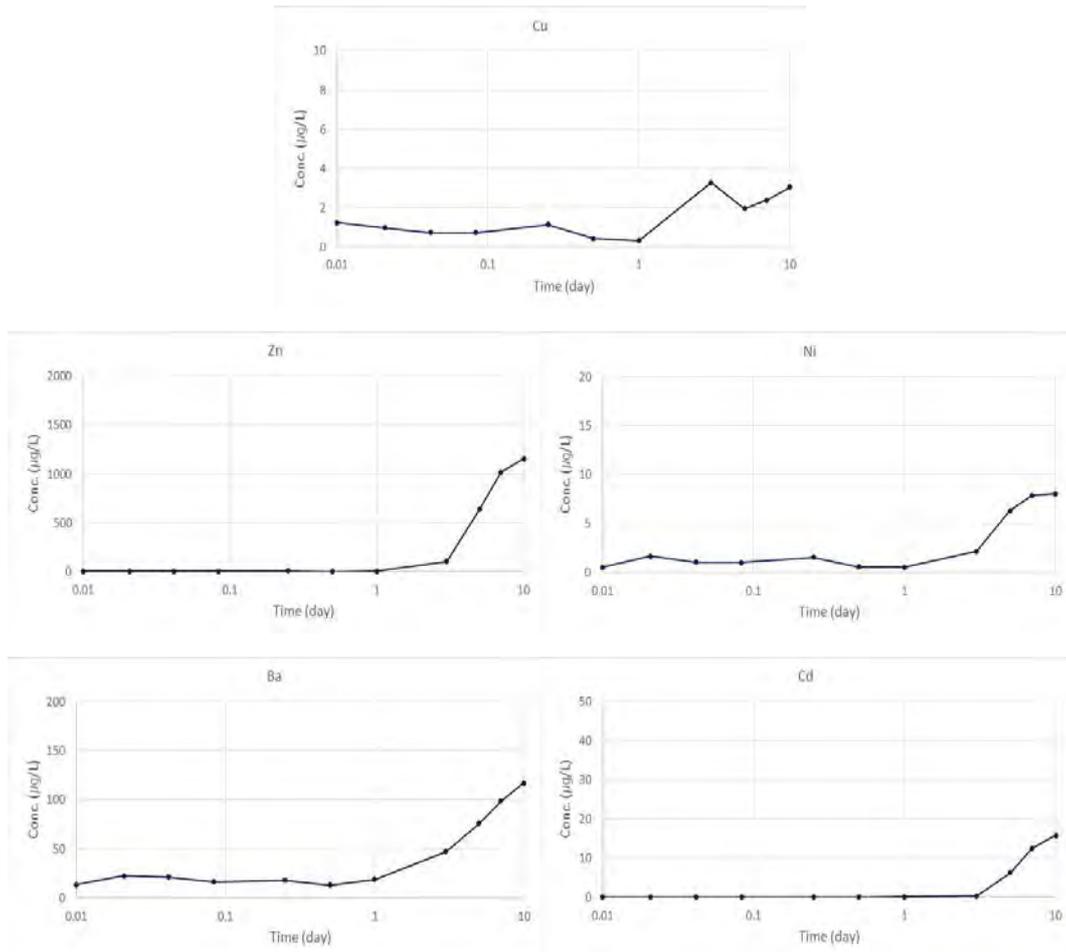


그림 1. 교란상태 안동댐 퇴적물의 중금속 용출 결과

## 남극지방 수은 및 반응성 수은 화합물 침적의 원자단위의 기원에 대하여

Atomic deposition of Hg(II) and its reactive compounds

to the Antarctic snowpack: Insights from the *ab initio* calculations

이유수(Yoo Soo Yi)<sup>1\*</sup> · 한영철(Yeong Cheol Han)<sup>1</sup> · 이성근(Sung Keun Lee)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>극지연구소, 극지고환경연구부

<sup>2</sup>서울대학교, 지구환경과학부

### 1. 서언

남극 대륙의 빙상 표면에는 다양한 물질들이 침적되고 있지만, 수은(Hg)의 경우 특이하게 활발한 양방향 교환이 관찰되고 있다. 자외선에 의한 광화학 반응으로 산화된  $\text{Hg}^{2+}$ 와 반응성 수은 화합물은 빙상 표면에 침적되지만, 많은 양의 수은이 빙상 표면 부근에서의 광화학 반응과 광해리를 거치며  $\text{Hg}^0$ 로 환원되어 대기로 재방출된다. 이때, 일부 수은이 빙상에 반영구적으로 잔류하여 추후 시추 된 빙하코어에서 검출되고 있다. 빙상에 잔류하고 있는 수은은 빙상에 함께 존재하는 에어로졸 또는 얼음과 상호작용하며 잔류할 것이라 추측하고 있지만, 어떠한 과정에 의하여 수은이 빙상 내부에 잔류하게 되는지 원자단위에서 명확하게 밝혀내지 못하였다. 본 연구에서는 양자화학계산을 이용하여 수은( $\text{Hg}^{2+}$ 와 반응성 수은 화합물)이 빙상 내의 에어로졸 및 얼음과 어떠한 상호작용을 하고 있는지 원자단위에서 조사하고, 이것이 빙상에서의 Hg 침적에 어떠한 기여를 할 수 있는지 토의하였다.

### 2. 계산 방법

대기 중의 수은은 일반적으로 반응성이 낮은  $\text{Hg}^0$  상태로 존재하고 있지만, 반응성이 높은 할로겐 화합물(예,  $\text{BrO}$ ,  $\text{ClO}$ , 등)이 참여하는 광화학 반응을 통하여 산화된  $\text{Hg}^{2+}$ 가 형성되고 다시금 반응성이 높은 수은 화합물(예,  $\text{HgCl}_2$ ,  $\text{HgBr}_2$ , 등)을 형성된다. 본 연구에서는 수은이 흡착되는 반응을 모사하는 과정에서  $\text{Hg}^0$ 가 아닌 상대적으로 반응성이 높은  $\text{Hg}^{2+}$  및 반응성 수은 화합물( $\text{HgO}$ ,  $\text{HgCl}_2$ ,  $\text{HgBr}_2$ ,  $\text{HgClBr}$ ) 그리고 비교를 위하여  $\text{Hg}^0$ 의 흡착 과정을 살펴보았다.

#### 수은 흡착을 위한 얼음과 에어로졸

수은이 흡착될 물질로 눈과 얼음의 대표 구성 입자인 ice-Ih, 빙하코어에서 수은의 농도 변화와 강한 상관관계를 보이는 해염(sea salt; halite), 빙하코어에서 Hg과 함께 검출되는 Ba-S-O 화합물(barite), 그리고 에어로졸 물질로 수은과 함께 거동하는 것으로 알려진 점토광물들(illite, muscovite)를 선택하였다. 각 물질의 표면 구조에 따라 표면 반응성이 달라지기 때문에 다양한 표면 구조 모델을 준비하였다.

### 표면 흡착 및 해리 에너지(binding and dissociation energy)

$\text{Hg}^0$ ,  $\text{Hg}^{2+}$  그리고 반응성 수은 화합물이 흡착 가능할 것으로 보이는 위치에 각 이온 및 분자를 근접시킨 이후 구조 최적화 계산을 통하여 흡착 가능 여부를 판단하였다. 각 물질 사이의 흡착 친화도는 결합 또는 해리 에너지를 계산하여 확인할 수 있다. 일반적인 표면 흡착 에너지( $E_{\text{bind}}$ )는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$E_{\text{bind}} = E_{\text{AB}} - (E_{\text{A}} + E_{\text{B}})$$

여기서, A는 흡착되는 물질 그리고 B는 흡착제의 표면 구조를 의미한다:  $E_{\text{AB}}$ 는 A가 B에 흡착된 상태,  $E_{\text{A}}$ 는 흡착 반응 이후 B를 제거한 상태, 그리고  $E_{\text{B}}$ 는 흡착 반응 이후 A를 제거한 구조에 대하여 개별적으로 계산된 에너지를 의미한다. 즉,  $E_{\text{A}} + E_{\text{B}}$ 는 흡착 반응 이후에 B에서 A를 멀리 이동시킨 이후에 계산된 에너지 값으로,  $E_{\text{bind}}$ 는 위 식의 정의에 따라 A를 B에서 해리하는데 필요한 에너지를 뜻한다(계산된 결과가 음의 값을 갖고 그 절대 값이 커질수록 표면과 흡착된 물질 사이에 강한 상호작용이 있음을 의미). 본 연구에서는 안정적인 전하를 띠고 있는  $\text{Hg}^0$  및 반응성 수은 화합물 이외에도  $\text{Hg}^{2+}$ 에 대한 흡착 반응을 살펴보기 때문에 결합 에너지를 계산할 때 전하의 재분배(redistribution)에 의한 에너지 변화를 함께 고려해야만 했다.

### 3. 결과 및 고찰

위와 같이 얻어진 결과를 통하여 수은이 빙상 내부에 침적될 때 제안된 흡착제 물질들과 어떤 상호작용을 하는지 원자단위에서 확인할 수 있었다. 각 물질의 표면 구조에 따라 흡착 친화도에 변화는 있었지만, halite, illite, muscovite 그리고 ice-Ih도 수은( $\text{Hg}^0$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ , 반응성 수은 화합물)을 각 표면에 안정시킬 수 있었으며, 특히 ice-Ih가 예상 밖으로 수은 침적에 큰 역할을 할 수 있음을 확인할 수 있다. 본 연구는 시추 빙하코어에서 고기후 환경을 복원하기 위하여 이용되는 물질들의 고해상도 시계열 자료들이 보이는 상관관계가 어떠한 상호작용을 통하여 나타나는지, 기존의 연구에서는 밝혀내지 못했던 원자단위의 기원을 체계적으로 파악하려는 첫 번째의 연구이다. 이와 같은 연구 방법은 추후 수은을 포함한 다양한 물질들에 대하여 응용이 가능할 것이라 기대된다.

충주지역 제철유적 출토 철광석의 산지해석을 위한 예비연구  
A preliminary study for the provenance of iron ore excavated in the  
Chungju area

문동혁(Dong Hyeok Moon)<sup>1</sup>, 권혁남(Hyeok Nam Kwon)<sup>1</sup>, 광병문(Byongmoon Kwak)<sup>2</sup>,  
이은우(Eunwoo Lee)<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>국립문화재연구소 보존과학연구실

<sup>2</sup>국립중앙문화재연구소(uno23@korea.kr)

충주지역 내 발굴조사가 진행되고 있는 제철유적에서 출토된 철광석의 산지해석 인자의 연구를 위하여 『세종실록지리지』, 『신증동국여지승람』 등의 고문헌자료와 『광산조사연구보고(국립광업연구소, 1970)』, 『폐금속광산 토양오염실태 개황조사(충남·충북 권역; 환경부, 2005)』 등을 참고하여 고대부터 현대에 이르기까지 철광석을 채취한 것으로 확인되는 충주지역 내 7지점(창동, 금곡, 만정, 삼신, 연수, 대교, 유상)과 제천 및 괴산 등 충주주변지역에서 철광산으로 등록된 기록이 있는 6지점(제천, 연풍도양, 원풍, 입석, 황석, 보영) 등 총 13지점의 광산을 선정하였다. 본 연구에서는 상기 13개 조사지점에 대한 현장 조사를 실시하여 폐석이나 폐광 된 갱구 주변 노두에서 총 31점의 광석시료를 획득하였으며, 이들을 충주지역 내 제철유적지 5개소(탑평리, 노계마을, 완오리, 본리, 칠금동)에서 출토된 철광석 총 12점과 광물조성, 미량원소 및 희토류원소 조성의 비교분석을 통하여 그들의 산지해석인자로서의 활용 가능성을 검토하였다.

충주지역 내 제철유적에서 출토 된 광석의 경우 대부분 자철석-적철석-석영의 광물조합을 가지며, 일부 침철석(goethite)이 수반되는 광석이 존재하는 것으로 나타났다. 현지조사를 통하여 확보한 광석의 경우 충주지역의 철광산 시료들은 제철유적의 경우와 유사하게 자철석과 적철석이 혼재하는 경우가 대부분이며 일부 침철석을 수반하는 시료도 존재하는 반면, 제천 및 괴산 등 충주주변지역의 철광산 시료들에서는 자철석만이 존재하는 것으로 나타났다. 맥석광물의 경우에서도 충주지역의 시료들은 석영-운모류-녹니석-각섬석류-휘석류-장석류-인회석 등의 조합을 가지는 반면, 주변지역의 시료들은 주로 방해석-백운석-형석-석류석-석영-운모류-녹니석-각섬석류-휘석류-장석류 등의 조합을 보여 명확하게 충주지역의 철광석과 구분되는 것으로 판단된다. 이들의 미량 및 희토류원소 분석 결과에서도 알칼리족원소들과 란탄족 원소들의 함량이 제천지역, 괴산지역, 충주지역의 순으로 높아지는 경향을 보여 지역별로 구분되는 한편, 충주 제철유적지 출토 철광석은 충주지역 광산들의 철광석과 유사한 분포특성을 보인다.

이와 같은 광석광물조성과 지화학적 특성의 유사성을 통하여 충주지역 내 제철유적지에서 출토된 광석은 제천 및 괴산 등 충주주변지역에 위치한 철광산에 비하여 충주지역 내에 위치한 철광산의 광석시료들과 높은 연관성을 가지는 것으로 판단된다.

버네사이트의 합성시 양이온 조건에 따른 토도로카이트로의 상전이 특성  
Phase transformation characteristics of birnessite to todorokite according  
to the synthesis condition of cation combination

민소영(Soyoung Min) · 김영규(Yeongkyoo Kim)\*

경북대학교 지구시스템과학부

망간이온은 30 가지 이상의 망간 산화물 또는 수산화물로 쉽게 산화되어 나타나고 스피넬(spinel) 구조, 층상(layered)구조, 일차원 터널(tunnel)구조 등 다양한 구조로 존재한다. 다양하게 나타나는 망간 산화물 중에서 해양 망간단괴는 구성원소인 망간이온이 구리, 니켈, 코발트와 기타 전락금속들을 최대 1 % (W/W)까지도 함유할 수 있기 때문에 경제적으로 가치가 높은 것으로 평가된다. 일반적으로 망간단괴를 이루고 있는 주된 망간산화물은 버네사이트(birnessite, 7 Å manganate,  $\delta$ -MnO<sub>2</sub>)와 토도로카이트(todorokite, 10 Å manganate, OMS-1), 버나다이트(vernadite)로 알려져 있다. 버네사이트는 층상 망간산화물로 층간에 수화된 1가 양이온이 intercalation되어 단일 물층을 가지는 구조이며, 이 구조에서 Mg<sup>2+</sup>을 치환한 부저라이트(buserite, hydrated birnessite)가 토도로카이트 전구물질(precursor)이 된다. 층상구조 내의 Mg<sup>2+</sup> 이온 치환은 Na-버네사이트가 K-버네사이트보다 수월하기 때문에 토도로카이트의 전구물질로 적합하다. 수화된 버네사이트의 열수변성 생성물인 토도로카이트는 MnO<sub>6</sub> 팔면체가 모서리를 공유하며 3×3(6.9 Å×6.9 Å)일차원 터널구조가 특징적이고 이로 인해 나타나는 고유특성들을 확인하고 응용하기 위해 다양한 합성법들이 존재한다.

본 연구에서는 기존에 연구된 합성방법들 가운데 산화-환원 기작 합성법인 Feng et al.(2004a)와 Luo et al.(1998), 환원반응을 합성기작으로 하는 Ma et al.(1999)를 참고하여 염기(OH<sup>-</sup>)와 과망간산(MnO<sub>4</sub><sup>-</sup>)시약의 양이온을 Na<sup>+</sup>와 K<sup>+</sup> 조합으로 총 12 가지 버네사이트를 합성하였다. 합성된 각 버네사이트를 전구물질로 한 부저라이트를 열수처리한 생성물을 분말화하여 X-선 회절분석을 수행하여 광물을 동정한 결과 합성방법마다 다른 경향성이 나타났다. 산화-환원법기작 합성법에서 두 방법에서 공통적으로 허스마나이트와 페크니타이트가 부산물로 생성되었고 Feng et al.(2004a)에서는 망가나이트 상이 나타나기도 했다. 산화-환원 기작 버네사이트는 염기는 Na, 과망간산은 K로 하여 합성한 시료에서 공통적으로 상전이를 확인하였다. 환원법에서는 단일 상의 버네사이트 합성이 가능했고 Na<sup>+</sup> 이온의 조합으로만 합성한 버네사이트에서만 토도로카이트로의 상전이를 확인하였다.

## 산성광산배수에서 발견되는 흰색침전물의 상전이의 특성 Characteristics of Phase Transition of White Precipitates Found in the Acid Mine Drainage

여진우(Jin Woo Yeo) · 김영규(Yeongkyoo Kim)\*

경북대학교 지구시스템과학부

산성광산배수는 광산 지역 내 황철석의 산화로 인해 발생하며, 주로 황색의 철 광물과 흰색의 알루미늄 광물의 침전이 나타난다. 이 중 철 광물에 대해서는 국내외에서 널리 산출되기 때문에 많이 연구되어져 왔지만, 알루미늄 광물은 특수한 환경에서 주로 나타나므로 여전히 연구의 성과가 미진한 상태이다. 일반적으로 산성광산배수에서 알루미늄 광물의 침전은 pH가 상대적으로 높은 하천수와 만나 섞일 때 알루미늄의 용해도가 급격히 낮아지기 때문에 주로 발생한다. 이 침전물을 구성하는 광물은 철 광물과 유사하게 산성광산배수 내 중금속 등을 흡착, 공침하여 이들 중금속의 거동에 중요한 역할을 한다. 이러한 흰색 침전물을 구성하고 있는 광물들은 추후 상변화를 거치며 그러한 과정 중에 중금속의 용해, 재흡착 등이 일어날 수 있다. 본 연구는 이러한 상전이 과정에 대한 특성을 알아내기 위하여 수행되었다.

본 연구에서는 도계광업소 주변의 하천에서 채취한 흰색 침전물을 대상으로 서로 다른 pH와 온도의 조건에서 시간이 지남에 따라 일어나는 광물상의 변화를 살펴보았다. 또한  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 농도가 높은 산성광산배수에 고온 및 pH 변화를 통해 반응속도를 빠르게 촉진시켜 광산배수 내 존재하는 흰색 침전물의 최종적인 상전이 산물을 알아보려고 했다. 흰색 침전물은 주로 basaluminite와 비정질  $\text{Al}(\text{OH})_3$  및 미량의  $\text{Al}_{13}$ -tridecamer의 혼합물로 구성되며, 이들은 주로 XRD, XANES,  $^{27}\text{Al}$  MAS NMR 등으로 그 존재를 알 수 있다. 흰색 침전물 내 반응은 basaluminite의 부조화용해가 먼저 일어나 비정질  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 의 함량이 증가한 이후, pseudoboehmite의 전구물질 단계를 거쳐서 pseudoboehmite가 최종 침전되는 상전이 과정을 거친다. 80°C의 온도에서는 이러한 일련의 과정이 잘 나타났지만, 비교적 낮은 온도에서는 basaluminite와 비정질  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 가 공존하는 초기 침전물 상태로 남아있었다. 그리고 높은 pH는 basaluminite 내 outer-sphere complex로 존재하는  $\text{SO}_4^{2-}$ 기의 탈착을 유도하여 pseudoboehmite 전구물질로의 상전이를 촉진하였다. 시간이 지남에 따라 광물의 용해 및 상전이에 의하여 용액의 pH는 낮아지는 경향을 보였으며, SEM관찰 결과 pseudoboehmite가 형성되어도 약간의 입자의 크기 증가만 관찰되고 완전한 결정질의 형태는 보이지 않았다. 그리고  $\text{SO}_4^{2-}$ 가 존재하는 산성광산배수 내 흰색침전물의 최종 상전이 산물은 약 16주가 지난 상태에서도 pseudoboehmite로 남아 있었다. 더 높은 pH에서는 XRD상에서 35° 피크를 나타내는 추가적인 광물상이 존재하는 것으로 나타났다.

Na-, K-, Cs-버네사이트 분자동역학 시뮬레이션 연구  
A molecular dynamics simulation study of Na-, K- and Cs-birnessite

박수정 (Sujeong Park) · 권기덕 (Kideok D. Kwon)\*

강원대학교 자연과학대학 지질학과, 강원도 춘천시 강원대학길 1

토양 및 심해저 망간단괴에서 매우 흔히 산출되는 산화망간 버네사이트 (birnessite; Bi)는 넓은 비표면적을 가져 주변 양이온들에 대한 흡착 능력이 매우 뛰어나지만 아니라, 구조적 층간(interlayer) 내에서도 양이온 교환 현상이 활발하게 일어난다. 현재 버네사이트는 중금속과 방사성 핵종 등 오염물질의 거동을 조절하기 위한 핵심 광물로서 주목받고 있다. 과거 연구에 의하면 버네사이트와 주변 양이온의 반응 양상은 층간 내 양이온의 종류 및 물/양이온 함량비에 따라 크게 좌우되기 때문에 버네사이트의 층간 구조에 대한 원자 수준의 이해가 매우 중요하다고 강조하고 있다. 그러나 버네사이트는 대부분 나노(nano) 크기로 산출되면서 결정도 또한 낮아 실험적인 방법으로 이들의 층간 구조를 원자 수준에서 연구하는 데에는 한계가 있다. 이번 연구에서는 기존의 여러 실험적 데이터들 간의 불확실성을 해석하기 위한 이론적 자료를 제공하기 위해, 고전 분자동역학 시뮬레이션(classical molecular dynamics simulations)을 사용하여 버네사이트 층간 양이온( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cs}^+$ )의 종류 및 물/양이온 함량에 따른 원자 수준의 구조적 변화를 관찰하였다. 합성 버네사이트를 이용한 기존 연구들은 시료에 따라 버네사이트 화학조성 내의 물과 양이온 함량이 모두 차이를 보여 층간 양이온과 물의 함량에 대해서는 불확실성이 존재한다. 계산 결과,  $\text{Na-Bi} < \text{K-Bi} < \text{Cs-Bi}$  순으로  $d$ -spacing이 증가하는 양상을 보였으나 이는 기존 실험 연구(Lopano *et al.*, 2007, 2009)에서 얻어진  $\text{K-Bi} < \text{Na-Bi} < \text{Cs-Bi}$ 의 경향과 달랐다. 계산결과와 실험결과들 간의 차이를 규명하기 위해 버네사이트 층간 내 양이온과 물의 비율을 다양하게 조절하여 계산한 결과, 일정 수준의 비율 [ $\text{H}_2\text{O}/\text{M}^+ = 2.87$  ( $\text{M} =$  층간  $\text{K}^+$  또는  $\text{Na}^+$ )]에 도달했을 때  $d$ -spacing 크기의 역전을 관찰하였다. 층간 양이온과 화학적 결합을 이루는 물 분자의 배위환경이 버네사이트의  $d$ -spacing에 큰 영향을 미치는 것으로 예측된다.

## References

- Lopano, C.L., Heaney, P.J., Post, J.E., Hanson, J. and Komarneni, S. (2007) American Mineralogist, 92, 380-387.
- Lopano, C.L., Heaney, P.J. and Post, J.E. (2009) American Mineralogist, 94, 816-826.

빙기-간빙기 동안의 스멕타이트의 화학 성분 분포를 이용한 기원지 분석: 남극  
드레이크해협 및 벨링스하우젠 해

Identification of sediment provenance using elemental composition of  
smectite during the glacial-interglacial period: Example of  
sediments in the Bellingshausen Sea and Drake Passage

박영규 (Young Kyu Park)<sup>1</sup>, 이재일 (Jae Il Lee)<sup>2</sup>, 정재우 (Jaewoo Jung)<sup>1</sup>,  
Claus-Dieter Hillenbrand<sup>3</sup>, 유규철 (Kyu-Cheul Yoo)<sup>2</sup>, 김진욱 (Jinwook Kim)<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 지구시스템과학과, 서울특별시 서대문구 신촌동

<sup>2</sup>극지연구소, 인천광역시 연수구 송도미래로

<sup>3</sup>British Antarctic Survey, Cambridge, United Kingdom

\*Corresponding author: jinwook@yonsei.ac.kr

남극 퇴적환경에서 빙하기-간빙기 동안의 점토광물의 함량비 변화는 퇴적물 기원지를 추적하는 방법으로 많이 사용되었다. 하지만, 점토광물 중 스멕타이트는 기원지의 기반암 종류에 따라 생성된 스멕타이트의 화학성분 비가 다르기 때문에, 다양한 퇴적물 기원지로부터 공급된 스멕타이트를 구분할 필요가 있다. 스멕타이트를 구분하기 위해서 우리는 투과 전자현미경을 이용하여 나노 스케일에서 스멕타이트의 화학 성분을 측정하였다. 스멕타이트의 화학성분 분포를 이용한 기원지 분석을 적용해보기 위해 남극 드레이크 해협에서 채취한 GC05-DP02 코어를 분석하였다. 기존의 REE와 Nd 동위원소 결과를 통해 이 코어의 간빙기에는 빙하기와 다르게 웨델 해로부터 퇴적물이 공급 될 수 있다고 제시하였는데, 실제로 스멕타이트의 화학성분 분포에서 간빙기에만 웨델 해의 라센 빙봉 지역의 스멕타이트의 특징인 Al이 풍부한 스멕타이트가 관찰되었다. 또한, 벨링스하우젠 해에서 채취한 GC360 코어에 대해서도 같은 방법으로 기원지 분석을 진행하였다. 퇴적상에서 다이어믹타이트가 관찰되는 빙하기의 스멕타이트의 화학성분을 분석한 결과, Al이 풍부한 스멕타이트와 그렇지 않은 스멕타이트들로 두 그룹의 분포를 보였다. 이는 빙하기에 빙봉에 의해 퇴적물이 침식 되면서 Oligocene 이전 시기의 퇴적물에 포함된 Al이 풍부한 스멕타이트가 함께 공급된 결과로 보인다. 이러한 결과는 GC360 근처에 위치한 GC359 코어에서 빙하기에 스멕타이트의 함량비가 다르게 나타나는 결과에 대한 이유를 보여준다. 그러므로, 점토광물의 함량비 변화와 함께 스멕타이트의 화학성분 분포를 확인하는 것은 퇴적물 기원지를 규명하는데 매우 중요한 방법으로 사용 될 것이다.

## A comparison study on REE mineralization between Mushgai–Khudag complex, Mongolia and Hongcheon area, Korea

오트곤-에르덴 다바수렌 (Otgon-Erdene Davaasuren)<sup>1,3</sup> · 이범한 (Bum Han Lee)<sup>2,3,\*</sup>

유봉철 (Bong Chul Yoo)<sup>2,3</sup> · 고상모 (Sang-Mo Koh)<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 광물자원연구본부 자원탐사개발연구센터

<sup>2</sup>한국지질자원연구원 DMR융합연구단

<sup>3</sup>과학기술연합대학원대학교 (UST) 광물 · 지하수자원학전공

Alkaline province in Southern Mongolia is one of the most economically significant rare-earth elements (REE) mineralization belts in Mongolia, including the Mushgai–Khudag and Lugiin gol deposits. The REE mineralization in these deposits is spatially and temporally associated with carbonatite type. In the central Gyeonggi massif, Hongcheon area is a unique carbonatite locality in South Korea. In this study, we attempt a comparison study of the REE mineralization characteristics between Mushgai–Khudag and Hongcheon deposits. The Mushgai–Khudag carbonatite–alkaline complex, which is composed of sheet-like magnetite–apatite ore bodies along the contact of the Jurassic syenite porphyry and the host Paleozoic sedimentary rocks, whereas Fe and REE ore bodies in the Hongcheon area occur within carbonatite dikes composed mostly of Fe–dolomite, which is intruding Precambrian basement gneiss. Four main mineralization zones were recognized in the Mushgai–Khudag complex: Main zone (MZ), Apatite hill zone (AHZ), Tumurtui zone (TZ), and High–grade zone (HGZ). Petrographic and geochemical studies were carried out on samples from AHZ, which is REE-rich mineralization zone. Main constituent minerals of the AHZ zones are apatite, magnetite, hematite goethite, fluorite, phlogopite, pyrite, monazite, and accessory minerals are phosphosiderite, rutile, ilmenite, quartz, fluorite and zircon, while Hongcheon carbonatites are composed of dolomite, ankerite, siderite, magnetite, monazite, apatite, strontianite and pyrite with subordinate quartz, barite, columbite, fergusonite, and calcite. Monazite is the most dominant REE mineral, occurring along crystal boundary, crack and growth zone of apatite crystals in AHZ. These primary mineralization properties are similar to Hongcheon deposit. Considering

trace elements and REE contents of apatite in Mushgai–Khudag complex, the rocks are characterized by enrichment in high field strength elements (HFSE, i.e., Th, U, La, Ce, Eu, Pr and Y) and depleted in large ion lithophile elements (LILE, i.e., Rb, Nb, Zr and Ti) in primitive mantle normalized REE diagram. On the other hand, Hongcheon complex shows more enrichment in LILE, especially in K and Ba, and light REEs but depleted in HFSEs (Y, Ti, Zr, and Nb). In chondrite–normalized REE pattern, they have similar characteristics that shows enrichment of light REE relative to high REE with small negative Eu anomalies. Based on the geochemical data, we suggest that the Mushgai–Khudag complex in southern Mongolia is related to the lithospheric mantle source, and interpreted as formed in within–plate tectonic environment and associated with extensional rift zone, which are consistent with characteristics of Hongcheon area, Korea. Therefore, Mushgai–Khudag and Hongcheon deposits contain high LREE.

페루 중부 오온 다중금속광화대의 황동위원소값

Sulfur isotope values in Oyon polymetallic mineralized zone,  
central Peru

호르헤 아코스타(Jorge Acosta)<sup>1</sup> · 허철호(Chul-Ho Heo)<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>페루 지질광업제련연구소

<sup>2</sup>한국지질자원연구원 광물자원연구본부 자원탐사개발연구센터

<sup>3</sup>과학기술연합대학원대학교 광물·지하수자원학과

페루 중부 오온 다중금속광화대 내 7개 광상(이스카이크루즈, 라우라, 후아론, 우츠크차쿠아, 인빅타, 충가르 및 이슬라이)형성과 관련된 열수유체의 기원 및 진화를 규명하기 위해 각 광상에서 산출되는 총 37개 황화광물(황동석, 방연석, 황철석 및 섬아연석)을 대상으로 캐나다 액트랩에서 황동위원소 분석을 실시하였다. 본 역에 부존하는 광상의 유형은 다중금속 교대형, 스카른 및 저/중간 유황형 천열수광상이다. 대부분의 광화작용은 심부에 위치한 또는 근접한 관입체와 관련있는 것으로 사료된다. 분석대상 황화광물의 황동위원소값( $\delta^{34}\text{S}$ )은  $-3.2\sim+6.85\%$ 이며 최저값은 인빅타(Invicta)에서 최고값은 충가르(Chungar) 및 이스카이크루즈(Iscaycruz)에서 확인되었다. 이들 황동위원소값은 광화작용의 근원이 티탄철석계열 또는 자철석 계열의 관입암 또는 안산암과 관계가 있음을 지시하고 있다. 인빅타 천열수 광상의 황동위원소값은  $-3.2\sim-1.6\%$ 이며, 광화작용이  $-11\sim+2\%$ 의 황동위원소값을 지니는 마그마로부터 유래하였을 것으로 해석된다. 인빅타 광상의 광화작용 근원은 약 20km 떨어진 사얀(Sayan) 화강암 및 토날라이트로 사료되며, 대자율은  $0.33\sim 1.36 \times 10^{-3}$  SI로 티탄철석계열 화강암의 대자율과 일치한다. 충가르(Chungar), 이슬라이(Islay), 후아론(Huaran), 이스카이크루즈(Iscaycruz), 말라이(Mallay) 및 우츠크차쿠아(Uchuchacua)와 같은 다중금속 교대형 및 스카른 광상들에서, 황동위원소값은  $+1.1\sim+6.85\%$ 로 다양하다. 이 값들은 황동위원소값이  $+1\sim+9\%$ 인 자철석계열 화강암의 산화 마그마와 관계있을 것으로 사료된다. 이러한 추정은 후아론 광산의 몬조나이트 반암에서 확인되는데, 대자율값은  $5.15\sim 12.2 \times 10^{-3}$  SI이다. 그러나, 라우라 광산에서는 반대현상이 나타난다. 광화작용과 관련된 산화 마그마 기원으로 사료되는 몬조나이트 및 석영안산암질 반암과 관련된 황동위원소값은  $+2.2\sim+4.6\%$ 이며  $1 \times 10^{-3}$  SI보다 낮은 대자율을 가진다. 이들 반암의 대자율은 티탄철석계열의 환원 마그마와 관계된다. 그리고, 높은  $\delta^{34}\text{S}$ 값은 후마샤(Jumasha)층의 탄산염암으로부터  $^{34}\text{S}$ 의 부화와 관련된 것으로 추정된다.

## 흡착된 비산염, 크롬산염, 그리고 셀레늄산염이 페리하이드라이트의 상변화에 미치는 영향

### Effects of adsorbed arsenate, chromate, and selenate on the phase transformation of 2-line ferrihydrite

김규례(Gyurye Kim) · 김영규(Yeongkyoo Kim)\*

경북대학교 지구시스템과학부

#### 1. 서언

페리하이드라이트(2-line ferrihydrite)는 산화 철 광물(Iron Oxides) 중 하나이며, 적갈색을 띠고, 산성광산배수를 포함한 자연환경에서 흔히 발견할 수 있는 광물이다. 또한, 침철석(goethite)과 적철석(hematite) 같은 다른 산화 철 광물보다 결정도가 매우 낮으며, 이로 인해 비표면적이 크고 높은 흡착 능력을 가지고 있다(Cornell and Schwertmann, 2003). 이러한 특성으로 인해 페리하이드라이트는 자연환경에서 여러 오염물질의 거동을 제어하는데 중요한 역할을 수행한다(Manceau and Charlet, 1994; Jiang et al., 2015; Mamun et al., 2017). 하지만, 페리하이드라이트는 열역학적으로 안정하지 않아 시간에 따라 광물상이 변화하는 준안정 광물이며, 일반적으로 상변화를 거치면서 결정질 광물의 성장으로 비표면적이 감소하여 흡착 자리(adsorption sites)가 줄어든다. 이로 인해 흡착된 오염물질이 시간에 따라 다시 수계로 방출될 수 있다. 또한, 페리하이드라이트의 상변화는 공침되거나 흡착된 이온들에 의해 지연 혹은 촉진되거나 최종 생성물이 달라질 수 있지만(Das et al., 2011), 이에 대한 종합적인 연구는 상대적으로 많지 않다. 본 연구에서는 페리하이드라이트에 흡착된 비산염(arsenate), 크롬산염(chromate) 및 셀레늄산염(selenate)의 세 산화음이온(oxyanions)이 페리하이드라이트의 상변화에 미치는 영향에 대하여 일반 자연에서의 환경과 같은 실온 및 pH 8 조건에서 비교 연구하였다.

#### 2. 실험 방법

상변화 실험에 사용된 페리하이드라이트는 Cornell and Schwertmann (2003)의 방법을 따라 합성되었다. 약 0.2 M  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  수용액 500 mL에 1 M KOH 수용액 330 mL를 첨가하며 빠르게 교반하여 생긴 침전물을 3차 증류수를 통해 수차례 씻어주고 원심분리 및 동결건조 후에 고형물을 취하였다. 합성된 페리하이드라이트의 광물감정은 X-선 회절분석(X-ray diffraction, XRD)을 통해 수행하였으며, 주사전자현미경법(Field Emission Scanning Electron Microscopy, FE-SEM)과 Brunauer-Emmett-Teller(BET) 비표면적 분석법을 통하여 합성된 페리하이드라이트의 표면물성을 분석하였다.

그리고, 페리하이드라이트 표면에 흡착된 각 산화음이온이 상변화에 미치는 영향을 비

교하기 위해 시계열(time-series) 배치 실험을 수행하였다. 세 가지 농도, 1, 3, 그리고 15 mM 의 비산염, 크롬산염, 그리고 셀레늄산염 수용액 2 L에 10 g의 합성 페리하이드라이트를 첨가하고 NaOH 혹은 HCl 수용액을 이용하여 pH 8 로 조절하였다. 실험은 산화음이온을 흡착시키지 않은 순수 페리하이드라이트 배치를 포함하여 전체 10개 배치를 통해 수행하였으며, 온도는 건조오븐을 이용하여 27 °C로 항온유지 하였다. 이 후에, 시간 경과에 따라 시료를 채취하여 X-선 회절분석을 수행하여 상변화를 측정하고 비교하였다.

### 3. 결과 및 고찰

18 주에 걸쳐 진행된 상변화 실험 동안 1, 2, 4, 6, 8, 10, 14, 그리고 18 주의 시료를 채취하여 X-선 회절분석을 수행하고 회절패턴을 수집하였다. 전반적으로, 페리하이드라이트의 상변화는 시간종속(time-dependent)적 특성을 보이고, 수용액 속의 각 산화음이온 초기농도가 높을수록 상변화가 지연되었다. 또한, 실험 기간 동안에 적철석으로의 상변화는 확인할 수 있었지만 침철석으로의 상변화는 나타나지 않았다. 구체적으로, 순수 페리하이드라이트는 4 주째의 회절패턴에서 적철석 피크가 나타나기 시작하였다. 또한, 6 주에 모든 셀레늄산염 배치에서 상변화가 진행됨을 확인하였으며, 8 주 이후, 초기농도 1 mM 의 크롬산염 배치에서 상변화를 확인하였다. 10 주 이후에는 비산염을 배치를 제외한 모든 배치에서 상변화가 관찰되었다. 반면에, 전체 상변화 실험기간 동안에 비산염을 흡착시킨 배치에서는 상변화가 관찰되지 않았다. 이는 비산염이 페리하이드라이트 표면에서 inner-sphere(monodentate or bidentate) complexes를 형성하여 강하게 결합하고, 상변화를 지연시킨다는 기존 연구 결과와 일치한다. 또한, 상변화 속도는 대체적으로 순수시료, 셀레늄산염, 크롬산염, 그리고 비산염 흡착시료 순으로 감소하는 것을 확인하였고, 이는 페리하이드라이트의 상변화 속도가 수용액에 존재하는 산화음이온의 농도 뿐 아니라, 흡착된 각 물질의 흡착특성에 따라 달라진다는 것을 보여준다.

### 참고문헌

- Cornell R.M., Schwertmann U., *The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrences and uses*, 2nd ed., Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2003.
- Das S., Hendry M.J., Essilfie-Dughan J., Effects of adsorbed arsenate on the rate of transformation of 2-line ferrihydrite at pH 10, *Environ. Sci. Technol.* **45** (2011) 5557-5563.
- Das S., Hendry M.J., Essilfie-Dughan J., Transformation of two-line ferrihydrite to goethite and hematite as a function of pH and temperature, *Environ. Sci. Technol.* **45** (2011) 268-275.
- Jiang X., Peng C., Fu D., Chen Z., Shen L., Li Q., Ouyang T., Wang Y., Removal of arsenate by ferrihydrite via surface complexation and surface

*Proceedings of the Annual Joint Conference,*  
the Mineralogical Society of Korea and the Petrological Society of Korea,  
May 30-31, 2019, Chuncheon, Korea

precipitation, *Appl. Surf. Sci.* **353** (2015) 1087–1094.

Mamun A.Al., Morita M., Matsuoka M., Tokoro C., Sorption mechanisms of chromate with coprecipitated ferrihydrite in aqueous solution, *J. Hazard. Mater.* **334** (2017) 142–149.

Manceau A., Charlet L., The mechanism of selenate adsorption on goethite and hydrous ferric oxide, *J. Colloid Interface Sci.* **168** (1994) 87–93.

## 14 GPa의 고압에서 탄소를 포함한 비정질 $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 의 고상 NMR 연구 A solid-state NMR study of carbon-bearing $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ glasses at high pressure up to 14 GPa

김은정(Eun Jeong Kim)<sup>1,\*</sup> · 이성근(Sung Keun Lee)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 기초과학연구원, 서울 관악구 관악로 1

<sup>2</sup>서울대학교 지구환경과학부, 서울 관악구 관악로 1

### 1. 서언

맨틀은 지구 상에서 가장 큰 탄소 저장고 중의 하나로, 맨틀 내에서의 탄소 화학종 변화와 그에 따른 규산염 용융체의 생성이 지구 물질의 물성 변화에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 최근 지진과 연구에서 지하 ~380 km 깊이에 존재하는 30-70 km 두께의 지진과 저속도층이 발견되었다(Hier-Majumder and Tauzin, 2017; Revenaugh and Sipkin, 1994). 해당 저속도층은 주변과 뚜렷한 경계를 보이므로, 온도 구배로 인한 저속도층이 아니라 조성 변화 및 휘발성 기체로 인해 형성된 규산염 용융체로 인한 저속도층으로 유추된다.  $\text{CO}_2$ 나  $\text{H}_2\text{O}$ 와 같은 휘발성 기체는 규산염 암석의 녹는점을 낮춰 저속도층을 형성하는데 영향을 준다. 이 중 탄소 화학종의 존재가 12~14 GPa의 조건에서 규산염 용융체를 형성하고 지진과 저속도층을 생성한 것으로 유추된다(Hier-Majumder and Tauzin, 2017). 14 GPa까지 고압 환경에서 탄소를 포함한 규산염 용융체의 존재가 지진과 탐사를 통해 제시되고 있음에도 불구하고, 실험적인 한계로 인해 고압 환경에서 탄소를 포함한 규산염 용융체의 구조 변화 및 거시적 성질 변화에 대한 연구는 현재까지 진행된 바 없다. 본 연구에서는 규산염 용융체의 모델시스템으로 이성분계의 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 를 상정하고, 14 GPa까지의 압력 조건에서 탄소를 포함한 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 에서의 구조 변화를 고상 핵자기 공명 분광분석(solid-state nuclear magnetic resonance, NMR)을 통해 분석했다.

### 2. 실험 방법

고압 실험을 위한 초기 물질인 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 는 1 기압 하에서  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 와  $\text{SiO}_2$ 를 1:3의 비율로 혼합하고 백금 도가니에 혼합된 분말상의 시료를 넣은 후, 750 °C에서 1시간 동안 탈탄산염 과정을 거치고 950 °C도에서 30분간 용융시킨 후 급속냉각하여 획득했다. 고압 환경에서 탄소를 포함한 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 를 합성하기 위해 1 기압 하에서 합성된 초기 물질에  $^{13}\text{CO}_2$ 가 99.7% 부화(enrich)된  $\text{Na}_2^{13}\text{CO}_3$ 와  $\text{SiO}_2$ 를 화학량론에 맞게 혼합했다. 고압 실험용 백금 튜브에 혼합된 시료를 넣은 후 서울대학교 지구물질과학연구원 구실에 있는 1100톤 멀티 앤빌 프레스(multi-anvil press)를 이용하여 최대 14 GPa까지의 압력 조건에서 시료를 합성하였다. 혼합된  $\text{Na}_2^{13}\text{CO}_3$ 의 양은 4 GPa 이하의 압력에서 측정된 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$  내의 탄소 용해도로부터 외삽하여 구하였다. 시료 내에 탄소를 포

화시키기 위해서 외삽으로 구한 탄소 용해도에 3배에 해당하는  $\text{Na}_2^{13}\text{CO}_3$ 를 시료에 추가했으나, 현미경 상에서 시료 내의  $\text{CO}_2$  유체 포획물은 발견되지 않았다.  $^{17}\text{O}$ 가 부화된 탄소를 포함한 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 는 동일 조건에서  $^{17}\text{O}$ 가 부화된  $\text{SiO}_2$ 를 이용하여 합성되었다. 탄소가 없는 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 는 1 기압 하에서  $^{17}\text{O}$ 가 부화된 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 를 합성한 후, 해당 시료를 백금 튜브에 넣고 1100톤 멀티 앤빌 프레스를 이용하여 9.2 GPa에서 가압하여 합성했다.

$^{13}\text{C}$  MAS NMR과  $^{17}\text{O}$  3QMAS NMR 실험은 Varian 400 MHz 고상 NMR(9.4 T)에서 3.2 mm 프로브를 사용하여 획득했다.  $^{13}\text{C}$  MAS NMR는 100.58 MHz의 라모어 진동수(Larmor frequency)에서 아다만탄(adamantane,  $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$ )의 왼쪽 피크를 38.56 ppm 기준으로 삼았다. 17 kHz의 시료 회전속도에서 1.2  $\mu\text{s}$ 의 단일 펄스( $30^\circ$  펄스)를 가하고 5초의 펄스반복 대기시간으로 스펙트럼을 획득했다.  $^{17}\text{O}$  3QMAS NMR는 54.23 MHz의 라모어 진동수에서 물( $\text{H}_2\text{O}$ )의 원자 환경을 0 ppm 기준으로 획득하였다. 15 kHz의 시료 회전속도에서 고속 진폭 변조 (fast-amplitude modulation, FAM) 기반의 에코 펄스 시퀀스(shifted-echo pulse sequence)를 사용하여 3.3  $\mu\text{s}$ 의 강한 펄스와 두 번의 1.0  $\mu\text{s}$ 의 펄스, 그리고 11  $\mu\text{s}$ 의 약한 펄스를 주어 획득하였다. 펄스반복 대기시간은 1초이다.

### 3. 결과 및 고찰

14 GPa까지의 고압환경에서 탄소를 포함한 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 의  $^{13}\text{C}$  MAS NMR 스펙트럼은 ~171 및 ~160 ppm에서 적어도 2개의 탄소 원자 환경을 보이며, 각각은 자유 탄산염(free carbonates,  $\text{Na}^+\cdots\text{CO}_3^{2-}$ )와 연결 탄산염[bridging carbonates,  $\text{Si}(\text{CO}_3)\text{Si}$ ]로 생각된다(Kim et al., 2018). 압력의 증가에 따라 시료 내의 탄소 함량이 증가하며, 이것은 초기 물질에 넣은  $^{13}\text{CO}_2$ 의 함량과 일치한다. 6 GPa 이상에서는 연결 탄산염의 존재가 확인된다. 8 GPa 이하의 압력에서는 ~160 ppm에서 피크가 보이나, 9 GPa 이상에서는 피크의 중심이 ~165 ppm으로 이동하는 것처럼 보인다. 이것이 압력에 따른 연결 탄산염의 구조 왜곡(structural distortion)에 의한 것인지, 새로운 탄산염 구조의 생성으로 기인한 것인지에 대해 양자 계산을 통한 연구가 필요하다. 해당 피크를 연결 탄산염으로 가정하는 경우, 압력이 증가함에 따라 연결 탄산염의 비율이 증가하여 14 GPa에서는 최대 60%에 해당하는 탄소 화학종이 연결 탄산염으로 존재한다.

9 GPa에서 합성된 탄소를 포함한 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 와 탄소를 포함하지 않은 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 의  $^{17}\text{O}$  3QMAS NMR 스펙트럼은 비연결 산소(non-bridging oxygen, NBO)인  $\text{Na}-\text{O}-^{[4]}\text{Si}$ 와  $\text{Na}-\text{O}-^{[5,6]}\text{Si}$ , 연결 산소(bridging oxygen, BO)인  $^{[4]}\text{Si}-\text{O}-^{[4]}\text{Si}$  및  $^{[4]}\text{Si}-\text{O}-^{[5,6]}\text{Si}$ 의 존재를 보여준다.  $^{17}\text{O}$  3QMAS NMR 스펙트럼을 isotropic 차원으로 투영한 스펙트럼에서  $\text{Na}-\text{O}-^{[4]}\text{Si}$ 와  $\text{Na}-\text{O}-^{[5,6]}\text{Si}$ 는 각각 ~-25 ppm과 ~-35 ppm에서 나타나며,  $^{[4]}\text{Si}-\text{O}-^{[4]}\text{Si}$  및  $^{[4]}\text{Si}-\text{O}-^{[5,6]}\text{Si}$ 는 각각 ~-45 ppm 및 ~-65 ppm에서 나타난다(Lee et al., 2003). 탄소를 포함한  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 에서는 탄소를 포함하지 않은 비정질

$\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 에 비해  $\sim -40$  ppm 및  $\sim -65$  ppm에서 피크 세기를 높게 나타나며,  $\sim -30$  ppm에서는 탄소를 포함한 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 에서의 피크 세기가 탄소가 없는 경우보다 낮다. 해당 피크에 대한 원자 구조의 명명은 양자 계산을 통한 NMR 화학적 이동값을 계산한 후에 가능할 것으로 생각된다. 양자 계산을 수행하기에 앞서서 피크 넓이 계산을 통해서 탄소를 포함하고 있는 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 에서의 산소 원자 환경의 변화가 연결탄소로부터 기인한 구조 변화인지를 유추할 수 있었다. 탄소를 포함한 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 에서 나타나는 피크 증가분은 전체 넓이의 약 9%이다. 9 GPa 시료에 용해된 탄소 함량은 22 mol%이다.  $^{13}\text{C}$  MAS NMR 결과에서 계산된 연결 탄산염의 분율은 40%로, 9 GPa에서 존재하는 전체 22 mol%의 탄소 중  $\sim 40\%$ 의 탄소가 연결 탄산염을 형성한다면 연결 탄산염으로 인한 산소 원자 환경 변화는  $\sim 9\%$ 에 해당한다. 따라서, 탄소를 포함한 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 의  $^{17}\text{O}$  3QMAS NMR 스펙트럼에서 나타나는 피크 증가는 연결 탄산염의 형성으로 기인한 산소 원자 환경 변화로 생각된다. 본 연구에서는 고압 환경에서 존재하는 탄산염 및 규소 사면체의 연결을 처음으로 실험적으로 확인했다. 이러한 구조 정보로부터 규산염 마그마 내의 탄소 용해도와 탄소 용해로 인한 규산염 마그마의 구조 변화에 대한 정보를 제공한다. 이로부터 초기 지구에서 탄소를 포함한 규산염 마그마를 통한 지구 내부로의 탄소 분포 및 거동에 대한 정보를 제공할 것으로 예상된다. 또한 앞으로 시료 내 탄소 함량을 높여 탄산염 마그마의 모델 시스템에 대한 NMR 구조 분석 연구를 진행하면 고압 환경에서 탄산염 마그마의 형성 기작에 대한 원자 단위에서의 정보를 제공할 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 탄소를 포함한 비정질  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ 에서의 구조 변화를  $^{13}\text{C}$  및  $^{17}\text{O}$  NMR을 통해 분석했다.  $^{13}\text{C}$  MAS NMR 스펙트럼에서 자유 탄산염과 연결 탄산염의 존재가 확인되었다. 압력의 증가에 따라 시료 내의 탄소 화학종 중 연결 탄산염의 분율이 증가하며, 14 GPa에서는 연결 탄산염의 분율이 최대 60%에 달한다.  $^{17}\text{O}$  3QMAS NMR 데이터는 탄소의 존재로 인한 피크 세기 변화가 관찰되었으며, 피크 넓이와 연결 탄산염에 연결된 산소 원자 환경의 분율 비교로부터 이것이 연결 탄산염의 형성으로 기인한 것임을 확인했다. 본 연구에서는 고압 환경에서 규산염 내에 존재하는 연결 탄산염 구조에 대한 탄소 및 산소 원자환경을 실험적으로 확인했다. 이러한 정보는 앞으로 초기 지구에서 규산염 마그마를 통한 지구 내부로의 탄소 이동 및 분포에 대한 정보를 제공할 것으로 생각된다.

#### 5. 참고문헌

- Hier-Majumder, S. and Tauzin, B. (2017) Pervasive upper mantle melting beneath the western US. *Earth and Planetary Science Letters* 463, 25–35.
- Kim, E.J., Fei, Y. and Lee, S.K. (2018) Effect of pressure on the short-range structure and speciation of carbon in alkali silicate and aluminosilicate glasses and melts at high pressure up to 8 GPa:  $^{13}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{17}\text{O}$  and  $^{29}\text{Si}$  solid-state NMR

*Proceedings of the Annual Joint Conference,*  
the Mineralogical Society of Korea and the Petrological Society of Korea,  
May 30-31, 2019, Chuncheon, Korea

study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 224, 327–343.

Lee, S.K., Fei, Y.W., Cody, G.D. and Mysen, B.O. (2003) Order and disorder in sodium silicate glasses and melts at 10 GPa. *Geophysical Research Letters* 30.

Revenaugh, J. and Sipkin, S.A. (1994) Seismic evidence for silicate melts atop the 410-km mantle discontinuity. *Nature* 369, 474–476.

필릭 및 아질릭 열수변질광물의 분광학적 특성  
Spectral Characteristics of Phyllic and Argillic Hydrothermal  
Alteration Minerals

심규훈(Kyuhun Shim)<sup>1</sup>·유재형(Jeahyung Yu)<sup>2\*1</sup>·고상모(Sang-Mo Koh)<sup>3</sup>.

이범한(Bum Han Lee)<sup>4</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 우주·지질학과,

<sup>2</sup>충남대학교 지질환경과학과,

<sup>3</sup>한국지질자원연구원 DMR융합연구단

<sup>4</sup>한국지질자원연구원 광물자원기술연구팀

\*jaeyu@cnu.ac.kr

열수 변질대의 금속광상의 탐사에 있어 매우 중요한 탐사지시 요소 중의 하나이다. 광상의 생성환경 및 열수와 모암과의 반응 특성에 따라 열수변질대는 대상의 분포를 이루게 되고, 각각의 변질대를 정의하는 주요 열수변질 광물조합이 존재한다. 분광분석은 광물을 동정하는 비파괴분석법의 일종으로 정확도는 기존 분석법에 비해 떨어지나 분석결과를 저비용, 저노동의 투자로 빠르게 얻을 수 있는 장점이 있다. 특히 분광분석의 결과는 무인항공기 등 원격탐사적 접근을 통해 열수변질대의 분포양상을 파악하는 데 효율적으로 활용될 수 있다. 본 연구는 열수 변질대 중 필릭 변질대의 주요 광물인 견운모, 명반석과 고(산성)점토 변질대의 주요 광물인 파이로필라이트, 디카이트의 분광분석을 실시하고, 분광특성을 정의하였다. 또한 주요 조암광물과의 비교분석을 통해 열수변질대 탐지에 있어 효율적인 전자기파를 고찰하였다. 그 결과 열수변질광물은 물(H<sub>2</sub>O), OH 및 Al-OH 등의 조성으로 인해 발생하는 특징적인 분광특성이 존재함을 확인하였고, 단파적외선 영역이 효율적으로 활용될 수 있음을 인지하였다.

## 탄산염광물의 분광학적특성과 광체탐지

### Spectral characteristics of carbonate minerals and ore exploration

정baru(Baru Chung)<sup>1</sup> · 유재형(Jaehyung Yu)<sup>2\*</sup> ·

고상모(Sang-MoKoh)<sup>3</sup> · 이범한(Bum-Han Lee)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 우주·지질학과

<sup>2</sup>충남대학교 지질환경과학과

<sup>3</sup>한국지질자원연구원 DMR융합연구단

탄산염광물은 탄산을 주성분으로 하는 광물로 방해석, 백운석 등이 대표적인 탄산염 광물이다. 또한 내화성 공업 재료 및 경량화 재료, 시멘트의 원료, 제철과 제강의 용제 및 토질개량 등 용도가 다양한 경제적 가치가 높은 산업광물이다. 따라서 이들은 용도에 따라 광체의 개념으로 분류되며, 이들의 분포양상을 현장에서 구분하는 것이 매우 중요하다. 현미경 관찰 및 XRD 등의 실험 방법은 많은 시간과 비용 그리고 노력이 소모된다. 분광분석은 광물과 전자기파와의 반응 특성에 따라 광물을 동정하는 비파괴 분석법으로 빠른 처리와 광범위한 분석이 가능한 장점이 있다. 또한 분광특성을 통해 무인항공기탐사 등을 활용하여 이들의 분포양상을 정의할 수 있는 장점도 있다. 본 연구는 주요 탄산염 광물이자 산업광물인 마그네사이트, 돌로마이트, 석회암, 대리암 및 활석을 대상으로 분광특성을 분석하였고, 이들의 분광학적 차이를 통해 광물동정에 활용하고자 하였다. 연구결과 통계적으로 탄산염광물들의 분광특성이 장파장에 위치할수록 유사한 결과를 보였다. 1000nm - 1400nm, 2300nm - 2500nm 구간에서 시료 들간의 큰 차이를 보였으며, 특히 2340nm - 2450nm 구간에서 큰 차이를 보였다. 이를 기반으로 한 영상처리기법을 적용한 결과 광물의 구분이 매우 효율적으로 가능하였다.

## 옥천변성대 충주-괴산 지역의 구성암류와 지질:

### 옥천 충상단층 및 지구조단위 고찰

Geology and Constituent Rocks of the Chungju-Goesan Area  
in the Ogcheon Metamorphic Zone, Korea:

Considering on the Ogcheon Thrust Fault and Tectonic Unit

강지훈(Ji-Hoon Kang)<sup>1\*</sup> · 이덕선(Deok-Seon Lee)<sup>2</sup> · 노신영(Sin-Young Noh)<sup>1</sup> ·

정진우(Jin-Woo Jeong)<sup>1</sup> · 고상모(Sang-Mo Koh)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과

<sup>2</sup>울산광역시 재난관리과

<sup>3</sup>한국지질자원연구원 DMR융합연구단

계명산층, 대향산돌로마이트층, 대향산규암층, 문주리층, 운교리층, 황강리층 등 옥천변성대 북서부의 주요 지층들이 분포하고, 이들 지층 사이의 지질학적인 관계를 직접 조사할 수 있는 충주 아래산, 철광산, 남산, 향산리, 옥너봉 지역들과 괴산 검승리 지역(이하 충주-괴산 지역)에서 이들 주요 지층에 대한 정밀한 야외지질조사를 통하여 암상단위 구분에 의한 상세한 지질도를 작성하고, 충주-괴산 지역의 구성암류와 지질을 파악하여 옥천변성대의 북서부 충상단층과 지구조단위의 발달에 관해 고찰해 보았다. 충주-괴산 지역의 구성암류는 크게 신원생대~고생대 변성암류와 이들을 관입하는 중생대 화성암류로 구분된다. 변성암류는 변성이질암, 화강암질편마암, 함철규암, 변성심성산성암, 변성반심성산성암, 변성화산산성암, 변성염기성암, 변성역질암, 변성사질암, 규암, 결정질 돌로마이트질석회암 등으로 구성되어 있으며, 화성암류는 페그마타이트, 흑운모화강암, 반려암, 섬록암, 화강반암, 염기성암맥 등으로 구분된다. 계명산층은 퇴적기원과 화성기원의 변성암류로 구성되어 있는 반면에 문주리층은 운교리층의 구성암류는 동일하고 주로 화성기원의 변성암류로 되어 있다. 변성역질암은 3종류로 구분된다. 계명산형은 주로 화산산성암 기질에 화산 및 심성 산성암을 주 구성역으로 하고, 주로 계명산층에 산출된다. 문주리형은 주로 화산산성암 기질에 화산 및 심성 산성암과 변성역질암을 주 구성역으로 하며 주로 문주리층과 운교리층에서 산출된다. 황강리형은 주로 이질암 기질에 석회암을 주 구성역으로 하고, 주로 황강리층에서 산출된다. 충주-괴산 지역에는 3개의 지구조단위들이 발달한다. 계명산 지구조단위는 주로 전기 신원생대 옥천열곡작용(약 852~892 Ma)의 산물인 다량의 화산 및 심성 산성암류와 함께 이와 교호하는 계명산형 변성역질암을 포함하는 계명산층, 향산리돌로마이트층, 대향산규암층으로 구성되어 있다. 지등산 지구조단위는 주로 중기 신원생대 옥천열곡작용(약 747~762 Ma)의 산물인 다량의 화산 및 심성 산성암류와 함께 이와 교호하는 문주리형 변성역질암을 포함하는 문주리층과 운교리층으로, 황강리 지구조단위는 주로 중기 고생대 옥천열곡작용(약 330~398 Ma)의 산물인 다량의 황강리형 변성역질암과 이에 교호하는 화산산성암류로 각각 구성되어 있다. 이는 구조적 상부로부터 각각 위치하는 계명산, 지등

산, 황강리 지구조단위들 사이의 지체구조적인 관계는 층상단층 관계에 있음을 지시한다. 옥천변성대 북서부에서는 중생대 전기 쥬라기(약 183~199 Ma)와 중기 쥬라기(약 160~180 Ma)의 화성활동이 있었다. 전기 쥬라기 화성암류는 주로 계명산층, 문주리층, 운교리층의 내부에서 압주상 내지 암맥상으로 산출되며, 중기 쥬라기 화성암류는 주로 계명산층, 문주리층, 운교리층의 외부에서 저반상 내지 압주상으로 산출된다.

사사: 본 연구는 한국지질자원연구원의 ‘국내 희유금속자원 탐사 및 활용기술개발 사업’과 행정안전부의 ‘방재안전분야 전문인력 양성사업’의 지원으로 수행되었습니다.

울릉도 말잔등응회암의 입도 및 구성원 분석과 화산분화 유형  
Granulometry and component analyses and volcanic eruption types  
of the Maljandeung tuff, Ulleung Island, Korea.

황상구<sup>1,2</sup> · 이소진<sup>2</sup> · 한기환<sup>3</sup>

안동대학교 지구환경과학과<sup>1</sup>

안동대학교 기초과학연구소<sup>2</sup>

주식회사 서정엔지니어링<sup>3</sup>

## 1. 서 언

이 연구에서 우리는, 수증기마그마성 활동의 산물을 인식하기 위한 실마리로서 또한 중요한 화산폭발의 종류를 지배하는 환경을 이해하기 위해, 화성쇄설층의 입도 자료와 구성원 패턴을 조합하여 사용하였다. 이 연구를 위해서는 분화구 근처에 분포하는 근역부보다 중역부 화성쇄설층을 선택하는 것이 효과적이다. 왜냐하면 분화유형은 강하 화성쇄설층을 대상으로 분산면적(D)과 파쇄작용(F)에 따라 분류되고 정의되기 때문이다(Walker, 1973). 울릉도에서 폭발성 규질 화산작용의 분화유형 연구를 위해 말잔등응회암을 선택하였다. 왜냐하면 울릉도는 높은 지하 투수성 때문에 지하수와 마그마의 폭발적 상호작용에 대한 이상적 환경을 나타내고, 선택된 말잔등응회암은 마그마성 분화에서 분명한 수증기마그마성 분화를 포함하기 때문이다.

## 2. 지질배경

울릉도의 화산층서는 화산유희 및/혹은 부정합을 기준으로 할 때, 도동현무암질암류(Ar-Ar 1.43 Ma), 울릉층군, 성인봉층군과 나리층군 등의 4개 층군으로 묶었다(Hwang et al., 2012). 울릉층군은 화산쇄설암류(Ar-Ar 1.25 Ma)와 하부 조면암질암류(Ar-Ar 0.75 ~0.53 Ma)로 구성되고, 성인봉층군은 상부 조면암질암류(Ar-Ar 0.33~0.17 Ma)와 포놀라이트질 암류로 구성되며, 최후기의 나리층군은 칼데라형성 화산암류와 조면안산암질암류로 구성된다.

말잔등응회암에 대한 방사성탄소 연대는 동해에서 해저 퇴적물 코아를 기초로 9.3 ~6.3 ka B.P. 사이로 측정되었다고 보고되었다(Arai et al., 1981; Machida et al., 1984). 최근에 Okuno et al. (2010)은 탄화목과 부석질 토양 시료를 이용하여 일련의 칼데라 외부 테프라층에 대하여 약 11, 9, 5.6 ka B.P.의 방사성탄소연대를 보고하였다. 한편 Im et al. (2012)은 일련의 칼데라 내부 화성쇄설 퇴적물에 대하여 약 19, 8.4, 5.6 ka B.P.의 14C 연대를 보고하였다. Okuno et al. (2010)와 Shiihara et al. (2011)는 화산회층으로부터 방사성탄소 연대와 지구화학적 분석에 기준하여 테프라층서를 수정하였고, 따라서 U-4의 연대를 약 11 ka B.P로 수정하였다.

### 3. 말잔등응회암

말잔등응회암은 나리 칼데라의 외륜부로부터 외곽부의 산사면에 넓게 분포한다. 말잔등 서쪽 계곡부에서 이 응회암층은 두께가 최고 약 70 m를 가진다(Kim et al., 2014). 이 암층은 주로 화성쇄설암(조립 응회암과 라필리암)과 부석층으로 구성되며 라필리암은 텅질 화산재를 비교적 많이 포함하여 대개 반고화 상태이기 때문에 엉성한 부석층과 구별된다. 전반적으로 화성쇄설암은 부석층보다 근역부에서 우세하지만 중역부에서는 그 반대이다.

칼데라 외측부에서 말잔등응회암은 부석층과 화성쇄설암이 호층으로 산출된다. 이 호층대는 칼데라의 동부와 남부에서 발견되며, 침식면 혹은 토양 층준에 의해 상부에서 하부로 U-2, U-3, U-4 단위 혹은 멤버로 구분하였으며(Shiuhara et al., 2011), 각각 칼데라 만곡부의 멤버 N-2, N-3, N-4와 대비할 수 있다고 하였다(Kim et al., 2014). 이들은 주로 조면암질 혹은 포놀라이트질 부석으로 구성되고, 혼한 반정으로 각섬석류, 단사휘석과 알칼리장석을 함유한다(Shiuhara et al., 2011; Hwang et al., 2012).

### 4. 칼데라외부 말잔등응회암의 특징

칼데라 외륜에서 말잔등응회암의 단면은 동쪽으로 1.7 km에 위치하는 내수전 고개 부근의 사면에 약 4 m 두께로 노출되어 있다. 이 단면은 강하 분산축에 놓이는 단면이고 분출순서의 거의 모두를 기록하고 있다. 그러나 이 단면의 기저부는 상부에서 흘러 내려온 풍화물로 덮여있으며, 하부 1 m는 심하게 풍화되어, 퇴적학적 관찰과 지구화학적 분석을 방해한다. 반면에 상부 1.8 m는 꽤 신선한 화성쇄설암층과 본질 부석층의 호층을 이루며, 침식면 혹은 얇은 토양층에 의해 U-4, U-3, U-2 멤버로 구분할 수 있다.

말잔등응회암의 다른 단면은 남동쪽으로 3.0 km에 위치하는 저동 고개 부근의 사면에 약 2 m 두께로 노출되어 있다. 이 단면은 모두 여러 개의 부석층으로 구성되며 기저부가 노출되지 않고 응회암층 혹은 라필리암층이 협재되지 않기 때문에 U-2 멤버에 대비되는 것으로 생각된다.

### 5. 토의

울릉도의 화산분화는 플리니언에서 스트롬볼리언의 넓은 에너지 스펙트럼을 가지는데, 말잔등응회암은 칼데라 외부의 중역부에서 암상, 입도와 구성원 분포 패턴의 연구에 기초하면 수증기마그마상에서 마그마상으로 전이를 명확하게 구별할 수 있다.

수증기마그마성 화성쇄설암층은 같은 연속체 내에서도 마그마성 층과 매우 다른 패턴을 가진다. 즉 수증기마그마성 화성쇄설암층은 암편/본질 비의 증가, 본질 부분의 우선 과쇄작용, 결정/본질 비율의 증가와 같은 특징을 나타낸다. 연속체내의 개별 층에서, “수증기마그마성” 구성원 분포 패턴을 가지는 화성쇄설층 중에 얼마는 누적라필리와같은 스템 응축의 증거를 나타내고 얼마는 그렇지않다. 그러므로 이들은 화성쇄설층의 “습윤” 수증기마그마성 성인에 대한 증거로 충분하지만 진단을 위해 반드시 필요한 특징은 아니다

(Sheridan and Wohletz, 1983). 한편 이러한 조직적 특징이 없는 “건조” 수증기마그마성 화성쇄설층은 가열된 스팀을 생산하고 오래 유지케 하는 다른 에너지 환경과 더 잘 부합된다.

## 6. 결론

울릉도의 나리 칼데라 외측부에서 말잔등응회암의 화성쇄설층에 대해 입도와 구성원 분석을 수행하였으며, 주요 분화유형을 추론하고 그 에피소드에 대해 역학적 기구를 해석하였다. 말잔등응회암은 나리 칼데라 외측부에서 3개 멤버로 구분되며, 각각 조립 응회암층 및 라필리암층, 부석층과 세립 응회암층 등의 암상으로 구성된다. 응회암층 및 라필리암층은 순수한 부석층과 구별되는 특징적인 입도 및 구성원 분포패턴을 가진다. 부석층에 비하여 응회암층 및 라필리암층은 암편/본질 비와 결정/본질 비의 증가, 본질 부분의 우세한 파쇄작용 등의 특징을 가진다. 응회암층 및 라필리암층에서 암편과 결정의 풍부성은 (1) 지하수의 폭발적기화로 인해 대수층을 가진 주인암의 파쇄작용 (2) 분출 구름으로 본질 세립의 이동에 의해 결정 및 암편의 간접적 부화 (3) 화도에 대량의 스팀이 유입된 뒤에 아마다 초과압력 환경에 관련된 나팔상 화구형성 등과 같은 이유 때문일 수 있다.

위의 자료에 의하면, 말잔등응회암은 명확히 구별될 수 있는 수증기마그마성 활동상에서 마그마성 활동상으로 이동을 나타낸다. 즉 응회암층 및 라필리암층은 지하수가 화도로 접근하여 마그마가 물과 폭발적 상호작용에서 유래되는 수증기마그마성 분화(수증기플리니언 분화)를 암시하며, 부석층은 본질가스압에 의한 마그마성 폭발작용(플리니언 분화)에서 유래되는 화성쇄설물을 나타낸다.

화산분화에서 일차적 마그마 파쇄작용의 정도는 열교환 표면에 대한 마그마/물 비가 확실히 상호작용의 효율성과 에너지 평형을 지배하는 주요 요인이다. 초기에는 마그마기동이 낮을 때 정압 지하수가 화도에 접근하여 마그마와 폭발적인 상호작용으로 수증기플리니언 분화를 일으켰으며, 후기에 마그마기동의 상승으로 마그마성 가스압이 지하수압보다 커져 화도로의 지하수 접근을 막음으로서 마그마성 휘발성성분에 의해서만 일어나는 플리니언 분화로 전환되었다.

## 사사

이 연구는 「기상지진See-At기술개발연구」(KMI2018-01610)의 지원으로 수행되었다.

## 참고문헌

- Hwang, S.K., Hwang, J.H. and Kwon, C.W., 2012, Geological report of the Ulleung Sheet. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 84 p.
- Im, J.H., Shim, S.H., Choo, C.O., Jang, Y.D. and Lee, J.S., 2012, Volcanological and paleoenvironmental implications of charcols of the Nari Formation in Nari

- Caldera,  
Ulleung Island, Korea. *Geosciences Journal*, 16, 105–114.
- Kim, G.B., Cronin, S.J., Yoon, W.S. and Sohn, Y.K., 2014, Post 19 ka B.P. eruptive history of Ulleung Island, Korea, inferred from an intra-caldera pyroclastic sequence. *Bulletin of Volcanology*, 76, 802–828.
- Okuno, M., Shiihara, M., Torii, M., Nakamura, T., Kim, K.H., Domitsu, H., Moriwaki, H. and Oda, M., 2010, AMS radiocarbon dating of Holocene tephra layers on Ulleung Island, South Korea. *Radiocarbon*, 52, 1465–1470.
- Sheridan, M.F. and Wohletz, K., 1983, Hydrovolcanism: basic considerations and review. In: M. Sheridan and F.Barberi (Editors), Explosive volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17, 1–29.
- Shiihara, M., Torii, M., Okuno, M., Domitsu, H., Nakamura, T., Kim, K.H., Moriwaki, H. and Oda, M., 2011, Revised stratigraphy of Holocene tephras on Ulleung Island, South Korea, and possible correlatives for the U-Oki tephra. *Quaternary International*, 246, 222–232.
- Walker, G.P.L., 1973, Explosive volcanic eruptions – a new classification scheme. *Geologische Rundschau*, 62, 431–446.

## 통영 서부 사랑도응회암의 마그마 진화 Magma Evolution of the Saryangdo Tuff in Western Tongyeong

이소진<sup>2</sup> · 황상구<sup>1·2</sup> · 송교영<sup>3</sup>

안동대학교 지구환경과학과<sup>1</sup>

안동대학교 기초과학연구소<sup>2</sup>

한국지질자원연구원 국토지질연구부<sup>3</sup>

### 1. 서 언

사랑도 지역에 대해 선행된 연구로는 사랑도의 지질과 연안환경(You *et al.*, 2005)에서 본역의 지질을 개략적으로 설명하였고 이 외에는 사랑도를 포함하는 도폭지질조사가 수행된 것이 전부이며(Chi *et al.*, 1983; Hwang *et al.*, 2016), 이 도폭지질조사로 최근에야 사랑도 전 지역의 층서가 수립되었다. 이처럼 사랑도응회암에 대한 암석학적 연구는 거의 이루어지지 않았으며 도폭지질조사 이외에는 화산암류에 대한 암석기재학적 연구 및 암석화학적 연구도 체계적으로 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 우리는 이 논문에서 경상분지 남부에 위치한 통영 서부 지역에 분포하는 사랑도응회암을 대상으로 화산활동 양상을 파악하고 더 나아가 암석화학적 고찰을 통해 궁극적으로 사랑도응회암의 마그마 성인과 조성누대 및 분출과정을 제시하는 것을 목적으로 한다.

### 2. 지질배경

이 지역은 백악기 후기의 화산암류가 집중적으로 분출한 후에 심성암류가 관입하고 있는 곳이며, 한반도에서 백악기에 발달하는 북동-남서 방향의 여러 화산호들 중에서 경상분지 남동부에 발달하는 경상호 중앙부의 남동 경계부에 해당하는 곳이다(Hwang and Kim, 1994a; Hwang, 2012). 사랑도와 그 주변 섬들의 지질은 크게 백악기 후기의 유천층군 화산암류와 이들을 관입하는 불국사 관입암군, 그리고 이들을 부정합으로 피복하는 제4기 충적층으로 구성된다. 본 연구의 대상이 되는 백악기 화산암류는 연구지역의 전역에 분포하고 있으며, Hwang *et al.*(2016)은 이 화산암류를 4개의 아층군으로 구분하였고 이에 따르면 본역의 화산암류는 하부로 부터 주사산아층군의 윗섬안산암과 운문사아층군의 풍화리응회암, 그리고 육지아층군의 아랫섬안산암과 사랑아층군의 오비도층, 남산유문암, 사랑도응회암으로 구성된다.

### 3. 사랑도응회암

이 암층은 대부분 청회색, 회갈색 내지 갈색을 띠며 입도에 따르면 대부분 응회암에서 라필리응회암에 해당되고, 구성원에 의하면 결정립이 풍부하고 부석편과 안산암편을 소량 함유하는 결정질 응회암(crystal tuff)에 가깝다. 또한, 이 응회암은 전체적으로 분급되어 있지 않고 층리가 없으며 대부분 심히 용결되어 있어 용결엽리를 나타내는 내부 특징을 가진다(Hwang *et al.*, 2016).

현미경 하에서 관찰한 바에 따르면, 수우도에서 채취한 시료는 석기에 사장석 반정과 석영립을 포함하며 결정이 매우 풍부하다. 용결엽리는 거의 나타나지 않으며, 약간의 변질이 관찰된다. 아랫섬 북부의 시료는 석기에 사장석 반정과 샤아드를 포함하며 소량의 석영 결정립과 압편이 관찰된다. 수우도의 시료와 비교하여 샤아드가 더 풍부함을 알 수 있고, 부석의 압착·신장으로 인해 동-서 방향으로 배열되어 용결엽리를 한눈에 관찰할 수 있다.

#### 4. 암석화학적 특징

사량도 지역의 화산암류를 화학적으로 분류하기 위해 TAS도(Le maitre *et al.*, 1989)에 도시하였다. 윗섬안산암은 현무암, 현무암질 조면암에 속하고 아랫섬안산암은 안산암, 조면암에 속하며 사량도응회암은 대부분 유문암에 속하지만 조면암과 데사이트에 도시되기도 한다. 그리고 비유동적이라고 알려진 고장력 원소들을 이용한 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> 분류도(Winchester and Floyd, 1977)에서 본역의 화산암류는 대체로 안산암-데사이트-유문데사이트 영역에 도시된다. SiO<sub>2</sub> 함량에 따른 선택된 주원소와 미량원소, 희토류원소에서 특징적인 점은 윗섬안산암, 아랫섬안산암과 사량도응회암의 세 그룹으로 확연하게 구분된다는 것이다. 또한, 세 주원소에서 세 암층 간에 나타나는 변화경향은 연속적이라고 설명하기 곤란하며 단속적이라는 것이 더 신빙성 있는 해석이라는 점이다. 따라서 이 세 암층은 각각 별도의 마그마체로부터 유래되었다는 해석이 가능하다. 본역의 화산암류는 Pearce *et al.*(1984)에 의해 고안된 (Y+Nb)-Rb 판별도에서 모두 화산호 환경을 지시하는 영역에 속한다. 그리고 화산호는 La/Yb-Th/Yb 비의 판별도에서 대륙연변호에 해당되는 위치임을 알 수 있다.

##### 4.1 사량도응회암

화산암류는 (Ce/Yb)<sub>N</sub>-Ce<sub>N</sub> 관계도에서 그 성인을 판별할 수 있다. 이 관계도에 사량도응회암을 도시해보면 분별결정작용선과 대륙지각 부분용융선 사이에 직선으로 배치된다. 또한, Martin(1987)의 La-La/Yb 판별도에 도시해보면 전체적으로 분화에 의한 성인을 지시하는 영역에 직선적으로 배치된다.

사량도응회암에서 채취된 시료 6개를 대상으로 작성한 주원소의 수직적 변화를 살펴보았다. 이 암층에서 SiO<sub>2</sub>와 K<sub>2</sub>O의 함량 변화는 하부에서는 증가하다가 상부로 갈수록 거의 일정해지는 경향을 보이고, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, TiO<sub>2</sub>와 MnO는 대체로 하부에서는 감소하다가 상부로 갈수록 거의 일정해지는 경향을 보인다.

다음으로 미량원소에 대한 사량도응회암의 수직적 변화를 살펴보았다. 몇몇 돌출되는 시료를 제외한다면, Sc을 제외한 모든 원소가 하부에서 상부로 갈수록 증가하는 양상을 보인다. 일반적으로 불호정성 미량원소는 매끈한 암석보다 켈식한 암석에서 그 함량이 풍부하다고 알려져있는데, 이 수직 변화도에서 그 특징이 잘 드러난다. 그러나 예외적으로 Sc만 하부에서 상부로 갈수록 감소하는 양상을 보이는데, 이것은 Sc이 Ni, Cr, Co, V 등의 원소

들과 유사하게 거동하는 호정성원소로서 규장질 암석보다 고철질 암석에서 그 함량이 더 풍부하기 때문이다.

## 5. 토의

사랑도응회암의 초기 마그마챔버 내부는 아마도 데사이트질 마그마가 존재했을 것이다. 그러나 시간이 흐르면서 서서히 챔버 내부의 마그마 온도가 낮아지기 때문에 결정의 정출작용이 일어날 것이다. 챔버의 연변부는 상대적으로 온도가 낮기 때문에 비교적 켈식한 사장석과 매찍한 광물들이 초기에 정출되고, 이에 따라 보다 켈식한 용융물은 챔버의 중심부로 약간 이동하게 될 것이다. 또한, 챔버의 중심부에서도 연변부에서처럼 초기에 결정작용이 일어날 것이고 점도가 더 낮기 때문에 아래로 가라앉을 것이다. 그러나 챔버 상단부와 연변부는 중심부보다 상대적으로 온도가 낮아 점도가 더 높기 때문에 정출된 결정이 가라앉지 않고 그 자리에 머무를 것이다.

이렇게 조성누대를 형성한 마그마챔버를 전제로 하여 사랑도응회암의 분출과정을 살펴보면, 약 69.72 Ma에 마그마챔버 최상부의 결정이 풍부한 데사이트질 마그마로부터 분출이 시작되었을 것이고 이 분출로 인해 데사이트질 조성의 화쇄류가 쌓인 후 약 69.16 Ma에 마그마챔버 최상부의 데사이트질 마그마보다 약간 아래에 위치한 유문암질 마그마로부터 다시 분출이 시작되어 현재의 사랑도응회암의 상부를 형성하였을 것이다.

즉, 사랑도응회암에서 조성누대는 상향규장질 누대를 나타내는데, 이것은 마그마챔버의 중심부로 향하여 규장질 누대를 갖는 마그마챔버에서 점진적 하향출조를 나타낸다. 따라서 지하의 마그마챔버의 연변부에 누적된 데사이트질 조성대의 상단부에서 먼저 출조되어 대규모 회류 형성 분출을 일으켰다. 이러한 분출이 계속되어 그 아래로 출조 위치가 내려가게 되었으며, 결국 마그마챔버의 중심부에 자리잡은 유문암질 조성대에서 출조되어 역시 회류 형성 분출을 일으켰다.

## 6. 결론

통영 서부의 지질은 크게 백악기 후기의 유천층군 화산암류와 이들을 관입하는 불국사 관입암군, 그리고 이들을 부정합으로 피복하는 제4기 충적층으로 구성된다. 유천층군 화산암류는 크게 주사산아층군의 윗섬안산암, 운문사아층군의 풍화리응회암, 육지아층군의 아랫섬안산암과 사랑아층군의 남산유문암과 사랑도응회암으로 구분된다.

이 화산암류는 안산암-데사이트/유문데사이트에 도시되며 칼크알칼리 계열에 속한다. 주원소와 미량원소 변화도 및 REE 패턴에서 윗섬안산암과 아랫섬안산암, 사랑도응회암이 각각 다른 마그마챔버에서 분화되어 분출되었음을 지시한다. 또한 모두 조산대에 속하고 화산호 환경을 지시하는 조구조적 배경을 나타낸다.

사랑도응회암의 마그마 성인은 분화작용에 의한 것으로 나타나며 지각의 천부 레벨로 상승하는 과정에서 약간의 지각물질의 혼입을 겪은 것으로 생각된다. 사랑도응회암의 마그마챔버 내에서의 조성누대는 챔버의 최하부에는 초기 켈식 사장석과 매찍 광물의 낙하로

안산암질 조성대가 존재했을 것이고 연변부에서는 초기 결정작용의 연변누적으로 데사이트질 조성대로, 중심부에는 규장질 성분의 이동으로 유문암질 마그마로 조성대를 이루었을 것이다.

마지막으로, 사랑도응회암은 초기에 챔버 상부의 결정의 함량이 풍부한 데사이트질 조성대로부터 분출하고, 점차 중심부의 유문암질 조성대로부터 분출하였던 것으로 해석할 수 있다.

## 백령도, 평택 및 아산 지역 후기 신생대 알칼리 현무암의 근원물질 종류에 대한 예비연구

Preliminary study on the mantle source lithologies of late Cenozoic alkali basalt  
from Baengnyeong island, Pyeongtaek and Asan areas.

김선규(Seongyu Kim)<sup>1</sup> · 최성희(Sung Hi Choi)<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 우주·지질학과

<sup>2</sup>충남대학교 지질환경과학과

동아시아에는 신생대에 분출한 판내부 현무암이 넓게 분포하고 있다. 한반도 내에서는 백두산, 전곡, 백령도, 아산, 평택, 간성, 보은, 포항, 제주도 등지에서 산출되고 있다. 선행연구 결과에 의하면 한반도 내 현무암들은 LILE(Large Ion Lithophile Elements)가 중앙해령에 비해 부화되어 있고, HFSE(High Field Strength Elements)의 결핍이 나타나지 않으며, Sr-Nd-Pb-Hf 동위원소 조성에서 해양도현무암(OIB, Ocean Island Basalts)과 유사한 화학조성을 보인다. 더불어 맨틀 포획암의 동위원소 데이터와의 비교를 통해 그 기원이 암석권 맨틀보다는 연약권에 기인한 것으로 판단됐다. 공간적 분포에 따라 한반도 북부에 위치하는 현무암들은 맨틀 도메인으로 DMM-EM1 조성을 보였고, 남쪽으로 갈수록 DMM-EM2로 동위원소 조성의 변화가 관찰되었다. 백두산, 전곡, 백령도, 평택, 아산의 현무암들은 한반도 내에서 북쪽 지역에 위치해 DMM-EM1 조성을 나타낸다. 그러나 이들 내에서도 희토류원소, 미량원소 및 동위원소 조성에서 차이가 관찰되었다. 희토류원소 분포도와 거미도에서 백두산과 전곡 현무암은 Eu 양(+)의 이상과 LILE에 해당되는 원소인 Ba, Rb, K, Sr 등이 부화되어 있는 경향을 보이는 반면, 다른 지역의 현무암들은 그런 경향성을 나타내지 않는다. 평택 현무암의 경우, Th이 다른 지역 현무암에 비해 상대적으로 부화되어 있는 것이 특징적이다. 그러나 분별된 Nb/Ta 비와 Ti에서의 부(-)의 이상 및 P에서의 양의 이상 등은 이들 현무암들에서 공통적으로 발견되는 특징이다. Sr-Nd와 Pb-Pb 동위원소상관도에서 백령도 현무암류는 백두산이나 전곡 현무암류에 비해서 결핍된 중앙해령 현무암류에 보다 근접하는 동위원소성분비를 가지는 것이 특징이다. 평택 현무암의 경우,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 과  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  동위원소 상관도에서는 백두산 현무암의 범위 내에 도시되나,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  상관도에서는  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  비 대비 매우 부화된  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  비를 가져 Th이 상대적으로 부화되어 있는 결과와 부합된다. 지금까지의 결과를 종합하면, 위 현무암류를 생성한 근원물질에는 석류석 페리도타이트와 함께 재활성화된 함금홍석-튜이트(tuite) 에클로자이트가 공통적으로 존재하나, K-hollandite를 포함하는 K가 풍부한 섭입된 원양성 퇴적물은 백두산과 전곡 지역에 국한되어 분포하는 것으로 사료된다. 평택의 경우는 점토광물이 풍부한 퇴적물이 근원물질에 포함되어 있을 가능성이 있다. 그러나 백령도, 아산, 평택 지역 현무암류에 대한 현재까지 이용 가능한 데이터가 매우 제한적이므로, 통계적으로 유의미한 결론을 도출하기 위해서는 보다 많은 데이터를 추가 확보할 필요가 있다.

## 경기육괴 서남부 당진지역과 경기육괴 북부 고남산 지역에 나타나는 신원생대 화성작용 대비

The comparison between the Neoproterozoic igneous activities around the  
Gonamsan area in the northern part of Gyeonggi Massif and Dangjin area in the  
southwestern part of Gyeonggi Massif

이보영<sup>1</sup> · 오창환<sup>1,\*</sup> · 이기욱<sup>2</sup>

<sup>1</sup>전북대학교 지구환경과학과 및 지구환경시스템 연구소

<sup>2</sup>한국기초과학지원연구원

(E-mail: <sup>1</sup>dlqhdud486@hanmail.net, <sup>\*</sup>ocwhan@jbnu.ac.kr)

로드니아 초대륙 형성 및 분열과 관련된 신원생대 암석이 북중국과 남중국 그리고 한반도에서 보고되었다. 본 연구에서는 경기육괴 북부의 고남산 지역과 경기육괴 서남부의 당진 지역에 위치한 신원생대 화성암을 연구하였다. 당진 지역의 신원생대 화성암은 지화학 적 자료를 바탕으로 세 종류의 각섬암과 흑운모 편마암으로 분류된다. 첫번째 각섬암은 833-793 Ma의 화산호 환경에서 형성되었으며, 두번째 각섬암은 797 Ma에 후배호 환경에서 형성되었다. 그리고 세번째 각섬암은 760 Ma에 판내부 환경에서 형성되었다. 흑운모 편마암은 833-809 Ma에 화산호환경에서 관입하였다. 기존연구와 함께 이번 연구는 당진-홍성 지역이 900-809 Ma 동안 화산호 환경이었으며 최종적으로 이 지역은 774-703 Ma 경 열곡대 환경으로 바뀌었음을 지시한다. 고남산 각섬암은 판내부 환경에서 873-851 Ma 경에 관입하였다. 당진지역은 연대 분석을 실시한 각섬암 내 저콘의  $\epsilon\text{Hf}(t)$  값은 -11.6에서 16.8을 보여주며, 고남산 지역에서 연대 분석 실시한 각섬암 내 저콘의  $\epsilon\text{Hf}(t)$  값은 1.6에서 6.2을 보여준다. 이 자료들은 당진-홍성 지역이 890 Ma 이전에 화산호 환경이 800-760 Ma 열곡과 관련된 화성암 관입이 일어난 남중국의 북쪽 가장자리와 대비된다는 것을 제시하며, 고남산 지역은 당진 지역과는 달리 상원계와 함께 925-810 Ma 경에 열곡대 환경이 형성되었던 북중국판의 남쪽 경계에 대비됨을 지시한다.

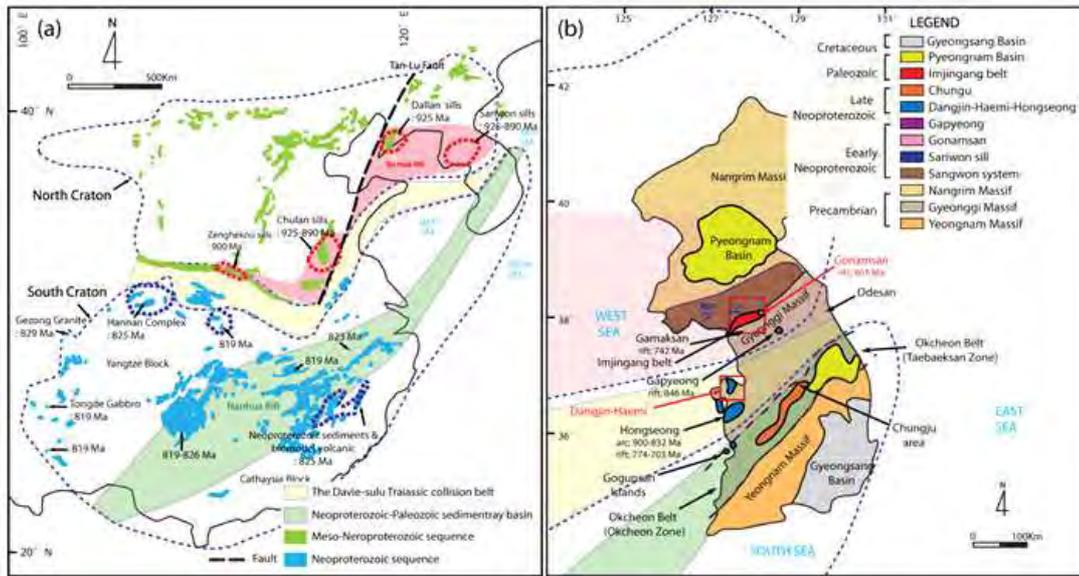


Figure 1. (a) Schematic map showing the distribution of Meso- to Neoproterozoic rocks in North and South China Cratons and their correlation with the Neoproterozoic rocks in Korean Peninsula (modified after Kim et al., 2006; Oh et al., 2009; Peng et al., 2011; Wang et al., 2012), (b) Simplified tectonic map of the Korean peninsula showing the distribution of Neoproterozoic rocks in Korean Peninsula with their correlation with those in the North and South China Cratons. (modified after KIGM, 1995; Oh et al., 2009).

## 포항-영덕 지역의 페름기-트라이아스기 화강암류에 대한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대 및 암석 성인에 대한 예비 연구

A preliminary study on SHRIMP zircon U-Pb ages and petrogenesis of  
Permian-Triassic granitoids from Pohang and Yeongduck in southeastern Korea

최현옥(Hyun-Ok Choi)<sup>1</sup> · 최성희(Sung Hi Choi)<sup>2</sup> · 김승섭(Seung-Sep Kim)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 자연과학연구소

<sup>2</sup>충남대학교 지질환경과학과

본 연구에서는 포항분지내 심부 기반암과 경상분지 북동부 영덕 지역에 분포하고 있는 장사리/영덕 화강암체를 대상으로 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정을 수행하고, 주/부성분 분석 자료를 통해 그 성인을 알아보고자 한다. 이번 연구에서 사용된 포항 시료는 분지 내 두 개의 심부시추공(PX-1, PX-2)으로부터 획득한 기반암이다. PX-1 시추공에서는 심도 3658m와 3676m 구간의 시추 파편 시료를, PX-2 시추공에서는 심도 4219m 부근의 코어 시료와 심도 4160m, 4169m, 4174m 구간의 파편 시료들을 대상으로 화학성분분석을 실시하였다. 영덕과 장사리 지역의 시료는 노두 시료이다. TAS 분류도에서 포항 시료들은 반려암질 섬록암-섬록암-화강암으로 구분된다. 장사리 시료들은 반려암질 섬록암-몬조섬록암-화강암질 섬록암-석영몬조나이트-화강암으로, 영덕 시료들은 몬조섬록암-몬조나이트-화강암질 섬록암으로 구분된다. K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 상관도에서 포항과 영덕 시료들은 칼크-알칼리 계열에 속하지만, 장사리 시료들 대개 칼크-알칼리에서 고 칼륨 칼크-알칼리 계열 영역에 도시된다. 연구대상 시료들은 공통적으로 SiO<sub>2</sub> 함량이 증가할수록 MgO, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>\*</sup>, CaO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 원소들이 감소하는 경향을 보이지만, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, Sr, Zr 원소들은 지역에 따라 변화 양상이 다르다. 이는 정출된 주요 광물종의 분별시기가 암체에 따라 다르기 때문인 것으로 해석된다. 초기 맨틀 값으로 표준화한 미량원소 분포도에서 연구 시료는 모두 친석원소(LILE; large ion lithophile element)에 부화된 특징을 보이며, Nb, Ta, Ti 원소들에서 부의 이상, Pb 원소에서 양의 이상이 관찰되는데 이는 전형적인 섭입대 기원 암석의 특징에 해당한다. Rb-Y+Nb 지구조판별도에서 모든 시료들은 섭입대 화강암 영역에 도시되어 위의 결과를 지지한다. 그러나 Sr/Y-Y 상관도와 La/Yb-Yb 상관도에서 포항과 장사리 시료들은 대개 전형적인 섭입대 화성암 영역에 도시되는 반면, 영덕 시료들은 모두 아다카이트(adakite) 영역에 도시되는 차이점이 발견된다. 포항시료에 대한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정 결과, PX-1 시료는 260.0 ± 1.9 Ma, PX-2 시추 코어 시료는 283.0 ± 1.8 Ma로 연구대상 시료 중 가장 오래된 가중평균연령이 구해졌다. 장사리 시료 중에서 고철질의 반려암질 섬록암과 몬조섬록암 시료들은 각각 258.1 ± 3.7 Ma와 260.6 ± 1.6 Ma의 가중평균값을 나타내었고, 규장질의 석영 몬조나이트와 화강암 시료들은 258.5 ± 1.9 Ma, 255.8 ± 3.3 Ma, 259.2 ± 1.2 Ma의 연대를 보여 양자간의 유의미한 생성연대의 차이는 관찰되지 않았다. 영덕 시료의 경우는 몬조섬록암-몬조나이트 시료에서 249.3 ± 2.7 Ma, 249.5 ± 1.1 Ma의 연대를, 화강암질 섬록암에서 252.5 ± 3.4 Ma, 250.1 ± 2.4 Ma의 가중평균연대를 연대를 얻었다. 위 결과를 종합하면 페름기 초기에 포항분지내 심부 화강암류가 형성되기 시작했으며 페름기 말기부터 트라이아스 초기동안 장사리와 영덕 화강암류가 형성 되었을 것으로 보인다. 이들의 생성 환경은 섭입대였을 것으로 추정되지만 이들의 근원물질과 암석성인 및 진화과정에 대해서는 향후 Sr-Nb-Pb 등의 동위원소 데이터 확보와 함께 추가 연구가 필요하다.

## 고군산군도지역의 신원생대 방축도층과 이를 관입한 화성암의 형성시기 및 지구조환경

The age and tectonic environment of the Neoproterozoic Bangchuk formation and intrusive rocks in the Gogunsan islands

김원정(Won Jeong Kim)<sup>1,\*</sup>·오창환(Chang Whan Oh)<sup>1</sup>·이승환(Seung Hwan Lee)<sup>1</sup>

김진석(Jin Seok Kim)<sup>1</sup>·신명호(Myeong Ho Shin)<sup>1</sup>·정지완(Ji Wan Jeong)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>전북대학교 지구환경과학과

(E-mail: \*kwj2205@hanmail.net)

최근 남한에서는 기존에 보고되지 않았던 신원생대 암석이 여러 곳에서 확인되고 있다 (Kim et al., 2018). 이들 암석은 중국과의 대비를 통해 한반도와 동북아시아의 신원생대 지구조진화 해석에 중요한 정보를 제공할 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 고군산군도중 말도, 보농도, 명도, 광대도, 방축도, 소횡경도 그리고 횡경도를 잇는 지역에 나타나는 신원생대 퇴적암과 화성암에 대하여 연구를 실시하였다.

고군산군도지역은 경기육괴 남서부의 군산지역에 속하는 도서지역이며 저변성의 사암, 역암, 역질사암, 이암으로 구성되어 있는 방축도층과 이를 관입한 산성 및 염기성화성암으로 구성되어 있다. 사암 내에는 연흔과 사층리를 포함한 퇴적구조가 잘 발달되어 있으며, 남북 방향의 압축운동에 의해 형성된 동서 방향의 습곡축을 갖는 대규모 습곡이 나타난다. 또한 고군산군도지역 내의 화성작용이 산성 및 염기성으로 구분되는 것은 쌍모식 화성작용이 일어났음을 지시하며, 명도에서 국지적으로 관찰할 수 있는 얼룩무늬의 암석은 산성과 염기성 마그마가 거의 동시에 관입하여 서로 섞인(mingling) 결과로 생각된다. 방축도층의 사암과 이암은 규암과 운모 천매암으로 변성되었고 이를 관입한 산성 및 염기성 화성암도 각각 변성을 받았다. LA-MC-ICPMS 기기를 이용한 연령 측정 결과 말도 서쪽에 위치한 2개의 천매암들로부터 2.9 Ga에서 0.9 Ga까지 범위의 쇠설성 저어콘이 인지되었으며 이들 천매암으로부터 가장 젊은 쇠설성 저어콘의 연령으로 각각  $905.9 \pm 6.2$  Ma (MSWD=3.3)와  $901.8 \pm 1.6$  Ma (MSWD=1.5)를 얻었다. 그리고 변성퇴적암류를 관입하고 있는 변성받은 산성화성암의 저어콘으로부터  $896.0 \pm 2.3$  Ma (MSWD=1.5) 관입연령을 얻었으며, 변성퇴적암류를 관입하고 있는 변성받은 여러 개의 염기성화성암들의 저어콘으로부터  $930.6 \pm 6.5$  Ma에서  $893.9 \pm 11$  Ma의 관입연령을 얻었다. 변성을 받은 산성화성암과 변성염기성화성암인 각섬암을 대상으로 한 지화학 분석결과 산성화성암의 전암 성분은 지구조 분별도에서 화산호 영역에 도시되는데 반해 각섬암의 전암 성분은 화산호 영역뿐 아니라 대양저산맥 및 관내부 열곡대 등 다양한 영역에 도시된다. 이는 연구지역의 암석들은 후배호 분지 지구조환경에서 형성되었을 가능성을 지시하며 좀 더 정확한 해석을 위해 향후에 추가적인 연구가 필요하다.

## 참고문헌

Kim, S.W., Cho, D.-L., Lee, S.-B., Kwon, S.W., Park, S.-I., Santosh, M., Kee, W.-S., 2018. Mesoproterozoic magmatic suites from the central-western Korean peninsula: Imprints of Columbia disruption in East Asia. *Precambrian Research* 306,155-173.

## FORMATION AND EVOLUTION OF THE LITHOSPHERIC MANTLE BENEATH SOUTHERN VIETNAM

Hoang Thi Hong Anh<sup>1,\*</sup> · Sung Hi Choi<sup>1,2</sup> · Yongjae Yu<sup>1,2</sup> · Pham Trung Hieu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Astronomy, Space Science and Geology, Chungnam National University  
(chois@cnu.ac.kr) · <sup>2</sup>Department of Geological Sciences, Chungnam National University · <sup>3</sup>Ho  
Chi Minh City University of Science

Major and trace element compositions of minerals as well as Sr–Nd–Hf isotopic compositions of clinopyroxenes from peridotite xenoliths entrained in Late Cenozoic alkali basalts (Ia Bang, Gia Lai province and Don Duong, Lam Dong Province), and mineral chemistry of Early Paleozoic ultramafic massif along the Tam Ky–Phuoc Son suture zone have been studied to provide constraints on the geochemical characteristics and evolution of the lithospheric mantle beneath Southern Vietnam. Most of the ultramafic massif are highly serpentinized (~95–99%). Presence of abundant mesh texture with bastites, however, indicates that their protoliths were harzburgites or dunites. The mantle xenoliths are fresh and mainly spinel lherzolites with rare pyroxenite. The minerals of the ultramafic massif are highly refractory with Cr# of 21–77 in spinels and Fo of 90–95 in olivines, overlapping with the field of supra–subduction zone peridotites, whereas the spinel and olivine compositions (Cr# = 9–15; Fo = 89–90) of peridotite xenoliths are comparable with those of abyssal peridotite but extended toward more fertile compositions. Estimated equilibrium temperatures range from 860 to 1050°C, and from 600 to 790°C for the peridotite xenoliths and the ultramafic massif, respectively. Based on the olivine–spinel compositional relationships, the ultramafic massif are products of relatively high degree of partial melting (up to 40%). Meanwhile, the correlation between (Yb)<sub>n</sub> and (Y)<sub>n</sub> of clinopyroxenes from peridotite xenoliths indicate that they represent residual mantle after <10% degrees of partial melting. The rare earth element (REE) patterns of clinopyroxenes in peridotite xenoliths varied from light REE (LREE) depleted to spoon shaped to LREE enriched, reflecting secondary overprinting by metasomatic melts or fluids. The calculated trace element patterns of metasomatic melts equilibrated with LREE enriched clinopyroxenes exhibit enrichment of Th, U and LREE but depletion in Nb. These observations, together with elevated Ti/Eu ratios in these clinopyroxenes, reflect the role of hydrous silicate melts/fluids rather than carbonatitic melts as the prevalent metasomatic agent. The Sr–Nd–Hf isotopic compositions of the xenolith clinopyroxenes are generally plotting within the field of the mid–ocean ridge basalt (MORB), indicating that the lithospheric mantle beneath southern Vietnam might have been newly formed. The geochemical differences between the two suites of ultramafic rocks indicate that the early Paleozoic highly refractory cold lithospheric mantle beneath Southern Vietnam have been replaced by hotter and more fertile Cenozoic one.

## 대마도 마이오세 관입암류의 지구화학적 특징: 예비연구

Geochemical characteristics of Miocene intrusive rocks from Tsushima, Japan:  
Preliminary study

이은지(Eun Ji Yi)<sup>1</sup>·최성희(Sung Hi Choi)<sup>1,2,\*</sup>·김지인(Ji In Kim)<sup>1</sup>·이정현(Jeong-Hyun Lee)<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 대학원 우주·지질학과

<sup>2</sup>충남대학교 자연과학대학 지질환경과학과

대마도는 한반도와 일본 규슈 사이에 위치한 섬으로 동해의 형성 및 발달과 밀접한 관계를 가지는 곳에 위치한다. 따라서 이곳에 분포하는 신생대 암석의 암석화학적 특징은 동해 확장에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있다. 본 연구에서는 대마도에 분포하는 신생대 관입암류를 대상으로 저어콘 U-Pb 연대측정과 전암의 주성분 및 미량원소 성분분석을 수행하였다. 연구지역 암종은 화강암류와 조립현무암(dolerite)으로 바이모달(bimodal) 화성활동의 특성을 보인다. 화강암류는 석영과 사장석 반정에 석영, 사장석, 흑운모 및 K-장석의 석기로 구성된 반상질 조직을 보인다. 한 시료에서는 퍼사이트(perthite)와 K-장석 반정이 함께 관찰된다. 모드 조성비에 따른 QAP도에서 화강암류는 화강암과 화강섬록암 영역에 도시된다. 조립현무암 중 비교적 신선한 한 시료는 사장석, 단사회석과 변질된 감람석으로 구성되어 있다. 그러나 나머지 시료는 사장석, 녹니석, 석영, 녹립석과 방해석으로 구성되어 있다. 이 중 녹니석, 녹립석, 방해석은 변질되어 생성된 2차 광물로 생각된다. 고분해능 이차이온질량분석기(SHRIMP)를 활용하여 화강암 시료 내 저어콘의 U-Pb 연대를 측정할 결과 신생대 마이오세 중기( $16.23 \pm 0.16$  Ma)에 해당하는 생성 연대를 얻었다. 이는 필리핀판의 북상으로 인해 대마도에 북서-남동 방향으로 작용하던 인장력이 북북서 방향의 압축력으로 변화하던 시기이다. TAS 분류도에서 모든 암석은 비알칼리 계열에 도시된다.  $\text{SiO}_2$  대  $\text{K}_2\text{O}$ 도에서 화강암류는 High-K 칼크-알칼리 계열로, 조립현무암은 Medium-K 칼크-알칼리 계열로 분류된다. 모든 화강암류는 A/CNK 대 A/NK 도에서 I-type 화강암 영역에 도시되며 고알루미나질(peraluminous)에서 중알루미나질(metaluminous)의 전이적인 성분 특성을 보인다. 콘드라이트 값으로 표준화한 희토류원소 분포도에서 화강암류는 경희토류원소에 부화되어 있으며  $[(\text{La}/\text{Yb})_N=3.0\sim 8.1]$ , Eu에서 부(-)의 이상을 보인다. 조립현무암도 경희토류에 부화되어 있으나  $[(\text{La}/\text{Yb})_N=3.6\sim 4.9]$ , Eu에서 부의 이상은 관찰되지 않는다. 초기 맨틀 값으로 표준화한 미량원소 함량 분포도에서 화강암류와 조립현무암 모두 K, Rb, Pb와 같은 LILE (large ion lithophile element)에 부화된 양상을, Nb, Ta, Ti와 같은 HFSE (high field strength element)에서 결핍된 양상을 보인다. 이는 섭입대 화성활동의 특징이다. Y 대 Nb 조구조환경 판별도에서 모든 화강암류는 화산호 기원 화강암류의 범주에 도시된다. 그러나 (Y+Nb) 대 Rb 조구조환경 판별도에서는 충돌후기(post-collision) 기원에 도시된다. Ba-Rb-Sr 삼각도에서 화강암류는 고-Ba-Sr 화강암류와 저-Ba-Sr 화강암류의 경계부위에 도시된다. 위 관찰사실을 종합하면, 대마도 관입암류는 섭입대와 확장대의 전이적 환경에서 생성된 것으로 사료된다. 그러나 위 화강암류와 조립현무암을 형성한 근원 물질의 특성을 정밀 규명하기 위해서는 향후 Sr-Nd-Pb-O 동위원소성분분석 등의 추가적인 자료확보가 필요하다.

## 화천군 사내면 일대에 분포하는 쥐라기 화강암질암의 성인에 대한 암석화학적 연구

Geochemical Studies on the Petrogenesis of Jurassic Granitic Rocks in Hwacheon.

한충희(Chung Hee Han)<sup>1</sup>·전혜수(Hye Su Jeon)<sup>1</sup>·박영록(Young-Rok Park)<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 강원대학교 지질지구물리학과

경기육괴 북부 강원도 화천군 사내면 일대에 분포하는 쥐라기 화강암질암은 운모 화강암, 복운모 화강암, 함석류석 복운모 화강암, 반상 흑운모 화강암으로 이루어져 있다. 주원소 자료를 이용하여 AFM 다이어그램에 도시한 결과, 이 암석들은 비알칼리(subalkaline)계열 중 칼크-알칼리(calc-alkaline)계열에 해당하며, Al 포화지수를 계산한 후 A/C+K+N vs. A/K+N 다이어그램에 도시할 때, 알루미늄과질(peraluminous) 암석에 해당함을 알 수 있다. 이들 화강암질암을 형성한 마그마의 근원암의 성질을 알아보기 위해  $Al_2O_3/TiO_2$  vs.  $CaO/Na_2O$  다이어그램에 도시한 결과, 반상 흑운모 화강암은 사질 조성(psammite)을 가지는 근원암, 운모 화강암, 복운모 화강암, 함석류석 복운모 화강암은 이질 조성(pelite)을 가지는 근원암의 부분 용융에 의해 형성되었음을 알 수 있다. 하커 다이어그램과 AFM 다이어그램을 통해 연구지역에 분포하는 다양한 화강암질암은 하나의 마그마로부터 분별 정출을 통해 형성된 것이 아니며, REE 다이어그램에서 Eu의 부(-)의 이상치가 나타나는 것으로 보아 이 암석들은 사장석의 분별정출작용을 경험한 잔류 마그마로부터 형성되었음을 알 수 있다. 스파이더 다이어그램에서 친석원소인 Cs, Rb, Ba의 값이 부화되어 나타나고, 고장력 원소인 Ta, Nb, P, Ti의 값이 결핍된 값의 지화학적 특성(negative trough)을 보이는 것으로 보아, 연구지역의 쥐라기 화강암질암은 섭입대 환경에서 형성된 것으로 해석된다.

## ICP-MS를 이용한 지질시료에서의 희토류원소 함량 분석 시에 발생하는 Ba,Ce,Pr의 산화물과 희토류원소 분포도의 상관성

A relationship between Ba,Ce,Pr oxides and chondrite-normalized REE patterns in REE  
analysis from the geological samples by ICP-MS

김태현(Tae-Hyeon Kim)<sup>1,2\*</sup>·이승구(Seung-Gu Lee)<sup>1</sup>·유재영(Jae-Young Yu)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 국토지질연구본부

<sup>2</sup>강원대학교 지질 지구물리학과

### 1. 서언

희토류 원소(Rare earth elements, REE)는 주기율표상의 원자번호 21번 Sc , 39번 Y 그리고 57번 La부터 71번 Lu의 란타넘족 원소(Lanthanoids) 15개를 포함하는 총 17개 원소를 지칭하는 용어이다. 이중에서도 란타넘족의 15개 원소는 그 물리화학적 특성이 유사하여 하나의 묶음(set)으로 거동하는 성질이 강하다, 이로 인해 지질시료에서의 REE 함량 분석 및 패턴 연구는 해당 시료에 대한 많은 정보를 주기 때문에 지구화학적 연구도구로서 널리 활용되고 있다. 그리고 지질시료의 REE 함량 분석에는 유도결합 플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, ICP-MS)가 가장 많이 이용된다. 하지만, ICP-MS는 미량원소 정량에 있어서 좋은 결과를 도출할 수 있는 분석기능을 갖추고 있음에도 불구하고, 몇 가지 단점을 가지고 있다. 그 중 하나는 주변원소의 산화물 및 수산화물 형성으로 인해 발생하는 동일 원자량을 가지는 성분들의 구분이 불가하여, 측정 원소가 간섭 물질(Interference Material)의 영향을 받게 된다면 분석결과에 영향을 받게 된다는 것이다. 예를 들어 본 연구에서 다뤄진 다양한 동위원소를 가지는 원자번호 56번 Ba(<sup>130</sup>Ba, <sup>132</sup>Ba, <sup>134</sup>Ba, <sup>135</sup>Ba, <sup>136</sup>Ba, <sup>137</sup>Ba, <sup>138</sup>Ba)는 BaO, BaOH<sup>+</sup>와 같은 산화물 및 수산화물을 형성하여 희토류 원소 내에 속하는 원자번호 63번과 64번에 해당하는 Eu(<sup>151</sup>Eu, <sup>153</sup>Eu)와 Gd(<sup>155</sup>Gd, <sup>157</sup>Gd)의 분석치에 영향을 줄 수 있으며, 이와 같은 원리로 원자번호 58번의 Ce(<sup>136</sup>Ce, <sup>138</sup>Ce, <sup>140</sup>Ce, <sup>142</sup>Ce)와 원자번호 59번의 Pr(<sup>141</sup>Pr)는 Gd(<sup>155</sup>Gd, <sup>157</sup>Gd)와 원자번호 65번의 Tb(<sup>159</sup>Tb)에 영향을 줄 수 있다. 이러한 간섭의 영향은 시료 측정 전 간섭 원소의 산화물 및 수산화물 합성물을 측정하는 것으로 분석결과를 보정함으로써 대부분 제거할 수 있지만, 앞서 언급한 Ba, Ce, Pr과 같은 간섭을 일으키는 원소들의 함량이 매우 높은 특정 지질시료에서는 일반적인 보정으로는 이러한 간섭이 잘 제거되지 않아, 데이터 해석에 오류를 일으키는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 ICP-MS를 이용하여 Ba, Ce, Pr 함량을 증가시킨 인공시료를 측정하여 그 결과에 어느 정도 영향을 미치는 지 연구하고 실제 지질시료에서의 적용에 대해 고찰해보았다.

### 2. 실험 방법

지구화학 표준시료중 하나인 JG1a(일본지질조사소 화강섬록암의 화학조성 표준암

석시료)의 희토류원소 농도를 바탕으로 하여 인위적으로 3배 농축한 자체 제작 시료 (JG1a-3x)에 임의로 ACCU Standard사의 Plasma Emission Standard Ba, Ce, Pr을 첨가시켜 이들 세 원소의 산화물 및 수산화물의 영향을 조사하고자 하였다. 측정은 한국지질자원연구원의 ICP-MS(Perkin Elmer사의 NexION350)를 이용하였다. 또한 인공 제작 시료뿐만 아니라 실제 시료에서의 영향을 알아보기 위해 Ba 함량이 매우 높은 지구화학 표준 시료인 JLS-1를 이용하여 간섭 원소의 산화물 및 수산화물의 영향이 데이터 어느 정도 영향을 주었는지 확인해보았다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구 결과 보정을 거친 후 REE 함량 분석치 중 15개 원소 중 자연적으로 존재하지 않는 Pm과 앞서 언급한 간섭을 받는 Eu, Gd, Tb 3개 원소를 제외한 11개 원소는 추천값과 5%내의 오차를 보이며 잘 일치하였다. 그러나 Eu, Gd, Tb의 경우에는 보정을 거쳤음에도 불구하고 오차가 상당히 크게 나타났다. 이는 간섭을 일으키는 원소의 함량이 높은 경우에는 다른 실험 과정이나 보정 방법을 선택해서 분석을 진행해야 한다는 것을 의미한다. 또한 Ba 함량이 높은 석회암 표준시료인 JLS-1의 분석치도 일반적인 암석시료의 실험 과정 및 보정 과정을 거쳐 REE 함량 분석을 실시하였을 때 대부분의 희토류 원소들은 추천값과 잘 일치하였다. 그러나 Ba의 산화물 및 수산화물의 간섭을 크게 받는 원소인 Eu의 분석치는 추천값에 비해 상당히 큰 값으로 분석이 되어 +이상(anomaly)을 보여주었다. 이와 같은 결과는 특정 간섭원소의 함량이 너무 높은 경우에는 보정과정을 거쳐도 정확한 데이터를 얻기가 힘들다는 것을 의미한다. 본 연구 결과들을 통하여 분석 대상이 될 지질 시료의 특성에 따라 적절한 실험 방법과 보정 과정을 선택해야 한다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 이러한 과정이 잘 이루어졌을 경우에 더욱 양질의 분석 결과를 얻을 수 있을 것이다.



# 입회신청서

주민등록번호:

성 명	인 또는 서명		
	영문:	한자:	
주 소 (학회지/소식지를 받아보실 주소)	Ⓢ	직장	
		직위	
연 락 처	Tel.		Fax
	E-mail		
회원구분	학회지 구독 <input type="checkbox"/> 학회지 비구독 <input type="checkbox"/> 기관 <input type="checkbox"/> 종신 <input type="checkbox"/>		
전공 및 관심분야			
주요학력			
최종학위 취득학교		최종학위 취득년도	
추 천 인			
※ 정회원 1인 이상의 추천을 요하나, 불가한 경우에는 학회 추천을 통해 입회할 수 있음. ※ 학생회원인 경우 지도교수나 학과장 추천을 받으면 됩니다.			
소 속			
성 명	인 또는 서명		

☐ 우송처 : 부산광역시 남구 용수로 45 부경대학교 지구환경과학과 내 한국암석학회

Tel: 051-629-6627, Fax: 051-627-6840, E-mail: office@pskorea.or.kr (한국암석학회 간사)

## 한국암석학회장 귀하

(사)한국광물학회 · 한국암석학회  
 2019년 공동학술발표회 논문집

**2019년도 (사)한국광물학회 · 한국암석학회 공동학술발표회 논문집**

---

인쇄일 2019년 5월 28일 인쇄 (사)한국광물학회

발행일 2019년 5월 30일

발행인 (사)한국광물학회 · 한국암석학회

편집인 (사)한국광물학회 · 한국암석학회

발행소 (사)한국광물학회

36729 경상북도 안동시 경동로 1375, 자연과학대학 지구환경과학과

대표전화: 82-54-820-6990

팩스: 82-54-822-5467

Homepage: <http://www.mskorea.or.kr> E-mail: [mskorea1986@naver.com](mailto:mskorea1986@naver.com)

---

본 논문집에 수록된 논문의 내용, 그림 및 도표의 저작권은 한국암석학회 · (사)한국광물학회에 있으므로 양 학회의 허락 없이 무단 복제 및 무단 전사할 수 없다.

# 2019년도

## (사)한국광물학회 · 한국암석학회

### 공동학술발표회 논문집

준비위원장: 이석훈 · 정창식

준 비 위 원:

- (사)한국광물학회: 권기덕, 박미연
- 한국암석학회: 김윤섭, 박지영

발 행: (사)한국광물학회 · 한국암석학회

- ◎ (사)한국광물학회 <http://www.mskorea.or.kr>  
경상북도 안동시 경동로 1375, 자연과학대학 지구환경과학과  
Tel : 54)820-6990 Fax : 054)822-5467 E-mail : mskorea1986@naver.com
- ◎ 한국암석학회 <http://www.pskorea.or.kr>  
충청북도 청주시 서원구 충대로 1 충북대학교 S1-3동 104호  
Tel : 043)261-3483 Fax : 043)263-3488 E-mail : office@pskorea.or.kr

나는 철광석입니다.

북한의 무산에서 태어나

이곳 남한으로, 한반도의 내일을 준비하기 위해 왔습니다.

나는 DMR융합연구단의 다양한 연구를 통해  
한반도를 자원기술강국으로 만드는 밑거름이 될 것입니다.

나는 통일한국의  
희망입니다



**새로운 자세, 새로운 각오로  
고객의 입장에서 변화를 추구하는 클라리언트!**

**우리나라의 다양한 산업분야에서 사용되는 벤토나이트 제품과,  
각종 염/안료 및 첨가제를 중심으로 하는 기능성 화학제품과,  
고객의 다양한 요구에 따라 각종 석유화학제품의 다양한 화학  
반응에 사용되는 촉매를 서비스하는 기업 클라리언트코리아(주)**

클라리언트코리아 주식회사

Clariant (Korea) Ltd.

본사, 공장 : 경북 포항시 남구 대송면 철강로 492번길 78

TEL : 054-278-2141~6 | Fax : 054-278-3202

대구지사 : 대구광역시 수성구 동대구로 400, 11층

TEL : 053-745- 3446 홈페이지 : [www.clariant.com](http://www.clariant.com)

**what is precious to you?**

# 誠愛敬信

성신은 고객을 소중히 여깁니다.고객에 대한 정성과 믿음, 인간에 대한 사랑과 공경  
성신이 추구하는 기본 가치입니다.

# 堅實節儉

성신은 기본을 지켜 나갑니다. 화려하지 않으나 튼튼하고 내실 있는 기업  
성신이 지향하는 모습입니다.

# 創意改善

성신은 변화를 추구합니다. 현실에 안주하지 않는, 미래를 향한 변화와 도전  
성신의 정신입니다.

1984년 성신광업을 창업하여 30여년이란 시간동안 비금속 광물 분야의 한 길을  
걸어온 주식회사 성신은 '성애경신' '견실절검' '창의개선' 이란 세가지 가치를  
지향하며 21세기 광업 선도 기업을 향해 나아가고 있습니다.



주식회사 성신  
www.ssmining.co.kr

충청북도 충주시 산척면 명서리 74  
Tel 043-851-5855 Fax 043-852-797

# 건물 전체에 방화복을 입힐 수 없을까?



## [화재를 이겨내는 KCC 내화자재]

KCC의 불연자재와 내화도료는  
생명을 구하는 골든 타임을 늘려줍니다  
불에 타지 않아 유해가스가 나오지 않고  
건물 붕괴 시간을 지연시켜 줍니다  
기술이 화재를 미리 막을 순 없지만  
화재의 피해를 최소화할 수는 있습니다



[www.kccworld.co.kr](http://www.kccworld.co.kr) / KCC상담실 080-022-8200



모래와 유리로 만들어  
유독가스를 발생시키지 않는  
**무기단열재**

\* KCC 무기단열재·미네랄울, 그라스울



무기질 재료를 보강하여  
화재의 확산을 억제하는  
**방화석고보드**



화재시 도장면이 부풀어오르며  
열 전달을 차단하는  
**내화도료**

# Introducing a Breakthrough Mineralogy Technique

- For mining and geosciences:
- femto gram and <1ppm sensitivity (>100X SEM-EDS)
  - microns-scale resolution
  - fast and quantitative

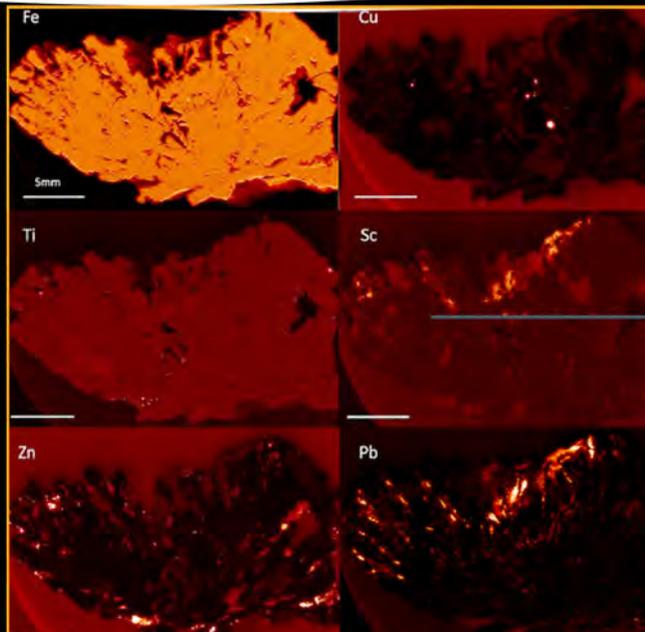
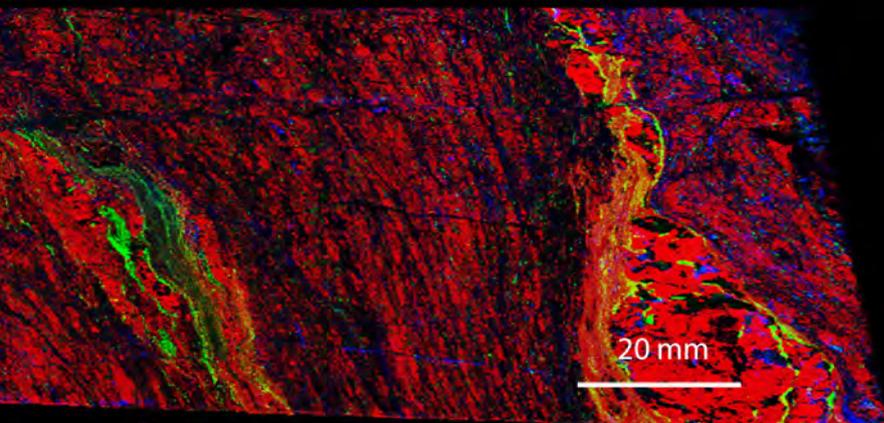
## General Mapping for :

- Mining • Geology
- Petroleum exploration

### Simultaneous

### Acquisition:

Distribution maps of all elements, including trace elements



### Rapid Acquisition:

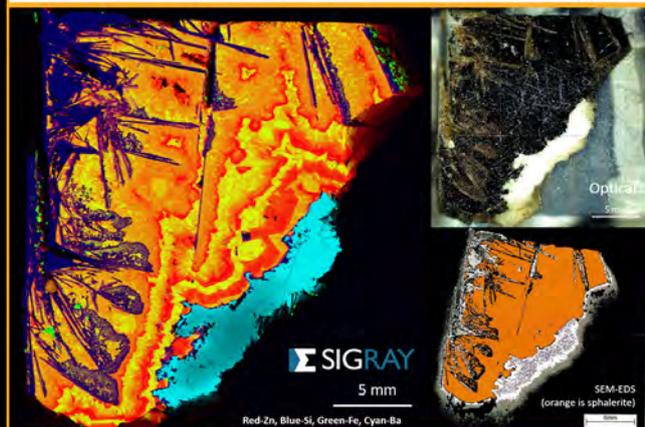
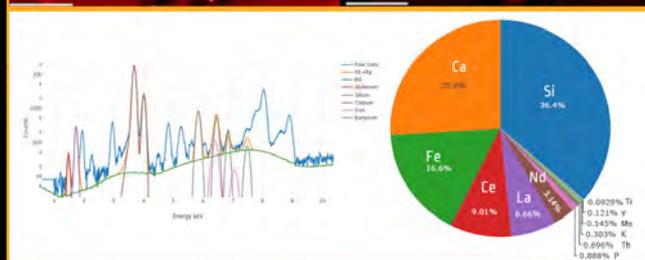
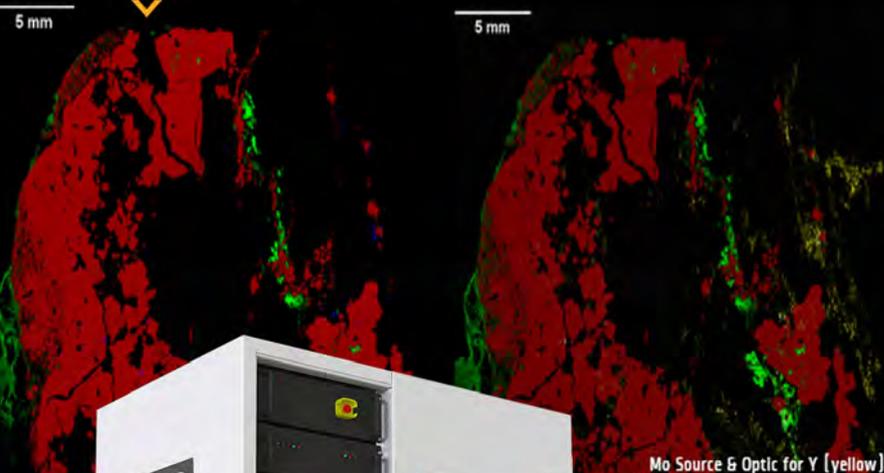
For mapping large samples

### Patented Multi-Energy Approach:

Maximized sensitivity to different elements of interest by push-button selection of source and optics

### Quantitative:

Composition can be calculated from Fundamental Parameters or use of standards



### Correlative:

Comparison to SEM-EDS & optical microscopy

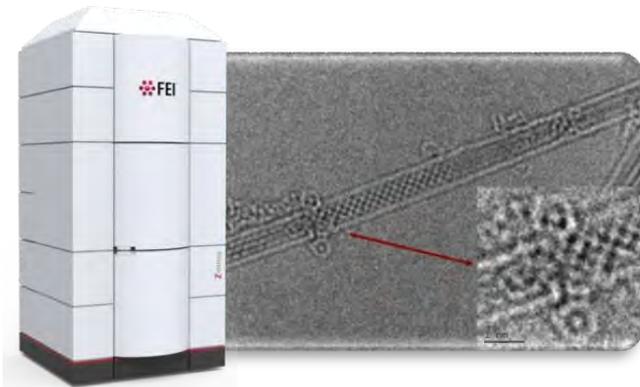


the **AttoMap** XRF microscope



# Change Your World With Electron Microscope Solutions

## Themis Z™ TEM



- The Ultimate in optical performance, reproducibility and flexibility
- Low damage, high sensitivity imaging and analysis of materials in 2D, 3D and 4D
- Best atomic characterization
- Best environmental stability and in situ dynamic research
- Widest range of materials science research covered in one tool

## Talos F200™ TEM



- High resolution and high throughput STEM imaging
- Fast, precise and quantitative 3D EDS analysis
- Dynamic and high resolution TEM imaging with fast navigation
- Remote control with environmental immunity

## Helios G4™ DualBeam



- Fastest and easiest preparation of highest quality samples for HR S/TEM and APT
- Extreme high resolution imaging with the most precise contrast
- Access highest resolution, multi-scale and multi-modal subsurface and 3D information
- Fast, accurate, and precise milling and deposition of complex structures with critical dimensions of less than 10nm

## Apreo™ SEM



- Unique compound final lens delivers an exceptional resolution of 0.8nm at 1kV
- Best resolution on tilted or topographic samples
- Best performance on sensitive, insulating sample
- The widest range of charge mitigation strategies
- Easiest sample handling and navigation

# IMS 1300-HR<sup>3</sup>

## The New Generation Ion Microprobe for Path-breaking Advances in Geoscience

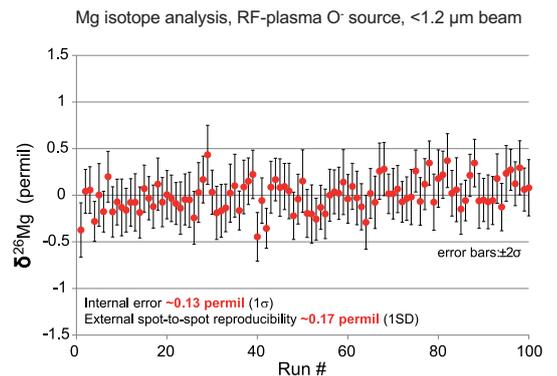
Successor of the internationally acclaimed IMS 1280-HR, the IMS 1300-HR<sup>3</sup> addresses the growing demand for small scale, high resolution, in situ isotopic measurements at high precision and productivity.

Advances & benefits:

- High brightness RF-plasma ion source greatly improving spatial resolution, reproducibility and throughput
- Automated sample loading system with motorized sample height adjustment, significantly increasing analysis precision, ease-of-use and productivity
- UV-light microscope for enhanced optical image resolution (developed by University of Wisconsin, USA)

... and more!

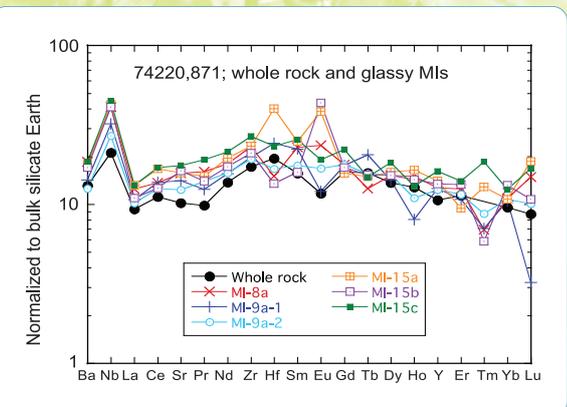
The first IMS 1300-HR<sup>3</sup> in Korea will be installed at Korea Basic Science Institute (KBSI) Ochang center by end of September, 2019.



# IMS 7f-GEO

## Mono-collection SIMS for Geoscience Laboratories

Combining the well-proven features of the IMS 7f with a specific detection system including two Faraday cups and one Electron Multiplier, the IMS 7f-GEO is specifically designed to perform high precision / high throughput measurements in geological samples, i.e. stable isotopes, REE (Rare Earth Elements), trace elements... It is also used for material sciences analyses and environmental studies.

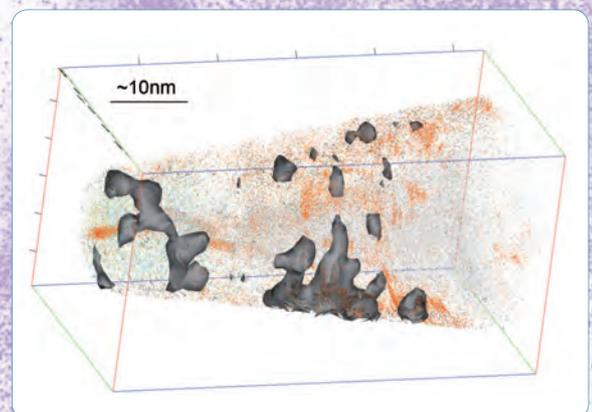


# LEAP 5000<sup>®</sup>

## State-of-the-Art 3D Atom Probe

Atom Probe Tomography is a powerful and promising technique for the nanoscale isotopic and elemental analysis of geological and extraterrestrial materials, as well as biomineral samples... The LEAP offers superior detection efficiency with more than 40% extra atoms detected per nm<sup>3</sup> analyzed.

APT reconstruction of clusters of nanodiamonds.  
Each dot represents a detected atom, C black, Cu orange, Al cyan, H yellow, Si grey.  
C isosurfaces are shaded grey and visualize C density inhomogeneities.



# 미래자원과 환경을 생각하는기업 대신자원

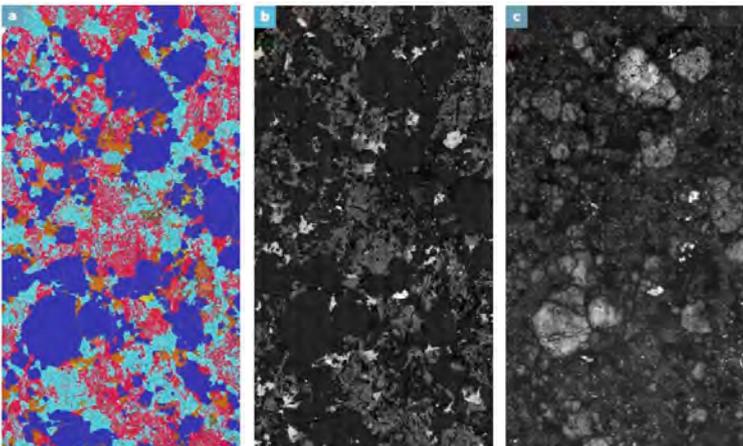
우수한 품질의 광물 개발과 안정적인 공급을 위해 최선을 다하겠습니다.

031.714.9440 / FAX. 031.714.6415 / admin@idaesan.com

Hyundai Petro-COKES DISTRIBUTOR

## TIMA-X

TESCAN Integrated Mineral Analyzer



Granitic Rock : a) EDS Phase Map b) BSE image c) CL image

- Resolution : SE – 1.0nm @ 30keV  
BSE – 2.0nm @ 30keV
- Up to 4 EDS detectors (SDD)
- Sample capacity: 100 Epoxy block
- Sample exchange rate: 12 exchanges / hour
- Fast and quantitative mineral analyses
- Fully automated analyses



석회석은 **65개** 주요산업군에 사용되는 기초소재로  
우리나라에 매장되어 있는 비금속 광물중 83%이상을 점유하는  
풍부하지만 소중한 자원입니다.



한국석회석가공업협동조합  
KOREA LIMESTONE INDUSTRY COOPERATION

서울특별시 동대문구 장한로 18 콘크리트 공업회관 5층  
TEL : (02)2247-6551~3 FAX : (02)2247-6554  
[www.klime.org](http://www.klime.org)

**(사)한국광물학회**

<http://www.mskorea.or.kr>

경상북도 안동시 경동로 1375, 안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과  
Tel: 054)820-6990 Fax: 054)822-5467 E-mail: mskorea1986@naver.com

**한국암석학회**

<http://www.pskorea.or.kr>

충청북도 청주시 서원구 충대로 1 충북대학교 S1-3동 104호  
Tel: 043)261-3483 Fax: 043)263-3488 E-mail: office@pskorea.or.kr