남극 중앙해령, 해저산 및 화산암의 멜트 포유물 연구

Melt inclusion study on Antarctic mid-ocean ridge (MOR)

KOPRI
극지연구소

인하대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극 열개구조와 남극 중앙해령 하부의 맨틀 상호 연관성 규명”과제의 위탁연구 “남극 중앙해령, 해저산 및 화산암의 멜트 포유물 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

KOPRI 극지연구소

2020. 1. 31

(본과제) 총괄연구책임자 : 박 용 철

위탁연구기관명 : 인 하 대 학 교

위탁연구책임자 : 서 정 훈

위탁참여연구원 : 이 준 희

“ : 이 동 하

“ : 박 솔

“ : 이 현 주

보고서 초록

위탁연구과제명	남극 중앙해령, 해저산 및 화산암의 멜트 포유물 연구				
위탁연구책임자	서정훈	해당단계 참여연구원수	5	해당단계 연구비	30,000,000 원
연구기관명 및 소속부서명	인하대학교 에너지자원공학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		

요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)	보고서 면수	45

1. 남극 중앙해령 및 해저산 글라스 분석
   - 2016/17 남극 중앙해령 탐사에서 채취한 화산암질 글라스를 선별하여 epoxy mount로 제작함
   - Epoxy mount의 탄소코팅 소요 시간을 줄이기 위하여 탄소막대를 얇게 만들어 코팅함
   - EPMA를 이용하여 암석의 주원소(10개)와 F, Cl, S를 분석함

2. 할로겐 원소 분석을 위한 외부표준물 정량화
   - 할로겐 원소 정량분석을 위한 SIMS 외부표준물질(KOIH-1)의 정확한 RSF를 구하기 위하여 베른대학교 INAA 분석방법과 중국지질대학교 SF-ICP-MSF 분석방법을 이용하였음

3. LA-ICP-MS를 이용한 불균질한 멜트 포유물 분석
   - 균질화가 되지 않은 감람석 멜트 포유물의 LA-ICP-MS를 이용한 미량원소 분석을 시도함

4. 화산암의 멜트 포유물 균질화 실험
   - LINKAM TS1400XY을 이용하여 사장석의 멜트 포유물 재균질화 실험에 성공함
   - 감람석 내 멜트 포유물의 경우 LINKAM TS1400XY를 사용할 경우 산화되는 경우가 매번 발생함
   - Redox states를 유지할 수 있게 argon gas를 이용하는 furnace를 사용하여 멜트 포유물 균질화에 성공하였으며, 멜트 포유물 지화학분석 시 대량의 멜트 포유물이 필요함으로 이에 대한 알맞은 균질화 실험 방법으로 생각됨

5. 균질화한 멜트 포유물에 대한 주원소, 미량원소 그리고 Pb 동위원소 분석
   - 여러 지화학 분석을 통한 맨틀 조성 및 성인 연구를 진행함

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	중앙해령, 현무암질 글라스, 할로겐 원소, 정량분석, 멜트 포유물, 납 동위원소
	영 어	Mid-ocean ridge, Basaltic glass, Halogen elements, Quantitative analysis, Melt inclusion, Pb isotope

KOPRI 극지연구소

요 약 문

Ⅰ. 제 목

남극 중앙해령, 해저산 및 화산암의 멜트 포유물 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

- 남극 중앙해령 화산암질 glass 및 멜트 포유물을 분석하여 남극 중앙해령 인근 해양지각 하부 맨틀의 지구화학적 특성 규명
- 질란디아-남극 맨틀 특성 연구

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

- 화산암질 glass의 할로겐 원소 정량분석 방법 개발
- 감람석과 사장석 내의 멜트 포유물 균질화 실험
- 멜트 포유물 내의 주원소, 미량원소 그리고 Pb 동위원소 분석

Ⅳ. 연구개발결과

- 한번의 실험으로 대량의 멜트 포유물 균질화 실험에 성공
- 감람석 또는 사장석 내의 멜트 포유물을 SHRIMP를 이용한 Pb 동위원소 분석에 성공
- 화산암질 glass 할로겐 원소 정량분석을 위한 여러 대학교와 공동연구를 진행 중에 있음

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

- 화산암질 glass 할로겐 원소 정량분석을 통한 남극 중앙해령 전반적인 할로겐 원소 분포도 확인
- SHRIMP을 이용한 남극 중앙해령 멜트 포유물의 Pb 동위원소 분석

KOPRI 극지연구소

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Melt inclusion study on Antarctic mid-ocean ridge (MOR)

II. Purpose and Necessity of R&D

- Geochemical characteristic of the lower mantle near Australian-Antarctic Ridge using by volcanic glass and melt inclusions from Australian-Antarctic Ridge
- Study of Zealandia-Antarctic mantle characteristic

III. Contents and Extent of R&D

- Development of quantitative analysis of halogens for volcanic glass method
- Olivine- and plagioclase-hosted melt inclusions of homogenization experiment
- Major, trace and Pb isotope analysis for melt inclusion

IV. R&D Results

- Succeeded in experiments with mass melt inclusions homogenization
- Succeed in Pb isotope analysis using by SHRIMP for olivine- and plagioclase-hosted melt inclusions
- Co-work with various universities for quantitative analysis for halogens of volcanic glass

V. Application Plans of R&D Results

- Determination of overall distribution of halogen elements in Australian-Antarctic Ridge by quantitative analysis for halogens of volcanic glass
- Pb isotope by SHRIMP for melt inclusions from Australian-Antarctic Ridge

KOPRI 극지연구소

목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

KOPRI 극지연구소

제 1 장 서론

마그마는 지표면으로 상승하여 분출되기까지 분별결정작용, 혼합과정 그리고 동화작용 등을 걸쳐서 원시마그마와 다른 조성을 보인다(O'Hara, 1968; Duncan and Green, 1987; Langmuir et al., 1992; Rubin et al., 2009; Shorttle, 2015). 마그마가 지표면으로 상승함에 따라 압력이 낮아지면서 휘발성 물질들은 기체화가 되고 마그마 용액과 분리되는 현상이 나타난다. 그러므로 원시마그마의 휘발성 원소들을 분석하기는 매우 어렵다. 하지만 멜트 포유물은 마그마 진화과정 동안 초기에 아직 분화되지 않은 마그마와 휘발성 물질들이 광물 안에 포획되어 형성된 것으로 (Anderson, 1974; Cloc-chiatti, 1975; Sobolev and Kostyuk, 1975; Sobolev, 1983; Roedder, 1984) 멜트 포유물을 연구함에 따라 마그마 결정화 온도, 마그마 냉각에 따른 상 변화, 마그마 냉각속도, 원시마그마의 휘발성 원소 함량 등을 알 수가 있다 (Roedder 1979). 따라서 멜트 포유물은 원시마그마에 대한 많은 정보를 얻을 수 있는 귀중한 자료이다. 화산암 글라스도 마그마가 급격히 상승하여 차가운 바닷물과 만나 급냉하여 광물의 결정을 만들지 못하고 글라스 형태로 생성되므로, 이를 통해 원시마그마의 성인과 마그마 내의 휘발성 원소 등의 연구가 가능하다.

마그마 내에 포함된 휘발성 원소들은 화산의 폭발성을 좌우하며, 할로겐 원소들 중 특별하게 Cl/Br 비율 그리고 I과 F의 양 등은 다양한 지질학적 저장소에서, 예를 들어 바닷물, 해양지각, 상부맨틀, 하부맨틀에서 독특하게 나타난다. 바닷물의 열수 교대작용과 섭입환경의 지구 내부의 할로겐 순환은 지각형성과 화산작용, 지구기후변화에 매우 중요하다. 휘발성원소의 분석은 화산을 형성시키는 마그마의 기원을 추적할 수 있는 중요한 도구가 될 것이다. 남극 내 화산을 형성시키는 마그마의 휘발성 원소는 화산암 글라스 또는 반상질 화산암의 반정 내에 포함된 멜트 포유물에 잘 유지가 되어 있을 것이라 생각된다.

멜트 포유물은 자연 상에 대부분 불균질한 상태로 존재하므로 이를 균질화하는 과정이 필요하다. 그래서 화산암내의 가장 먼저 결정화가 되는 감람석 및 사장석을 선별하여 멜트 포유물을 확인하였고 LINKAM TS1400XY를 이용하여 사장석 및 감람석 내 멜트 포유물의 재균질화 실험을 실시하였으며, 사장석은 재균질화에 성공하였다. 하지만 감람석은 산화되는 과정이 나타나 균질화에 실패하였다. 이를 보완하기 위해 argon gas를 이용하여 산화-환원 상태의 유지가 가능한 furnace를 이용할 예정이다.

화산암 글라스의 SIMS(secondary ion mass spectrometry)를 통한 휘발성원소 분석을 위해 외부표준물질(KOIH-1)를 제작하여 정량분석을 시도하였다. 외부표준물질에 대한 많은 RSF(relative sensitivity factor)값을 구하였다. 보다 정확한 RSF값이 필요하였고, 이를 위해 베른대학교와 공동연구로 할로겐 원소 및 불활성 기체 동위원소를 측정할 수 있는 INAA(instrumental neutron activation analysis)를 이용하여 외부표준물질(KOIH-1)의 정확한 농도를 측정을 시도하였다. 그리고 중국지질대학교에서 SF-ICP-MS를 통한 할로겐 원소 측정을 할 수 있는 방법이 개발되어 공동연구를 통해 할로겐 원소 분석을 하였다. 다만, SIMS 데이터와 잘 맞지 않은 점이 있어 추후에 중국지질대학교에서 추가 분석을 할 예정이다.

2016/17 남극 중앙해령 탐사에서 채취한 화산암 글라스를 선별하여 epoxy mount로 제작하고 EPMA를 이용하여 주원소 및 F, Cl, S를 분석하였다. 그리고 균질화에 성공한 사장석을 멜트 포유물이 최대한 많이 노출될 수 있도록 하여 epoxy mount를 제작하였고, 감람석 내의 불균질한 멜트 포유물들도 epoxy mount로 제작하여 LA-ICP-MS를 이용한 미량원소 시범 분석도 실시하였다.

대량의 멜트 포유물 균질화 실험을 위해서 argon gas를 이용한 전기로를 통해 균질화 실험을 시도하여 성공하였다. 이를 바탕으로 많은 양의 멜트 포유물이 관찰되는 사장석과 감람석을 이용하여 epoxy mount로 제작하였다. 제작한 epoxy mount를 이용해서 주원소, 미량원소 그리고 Pb 동위원소 분석을 하여, 마그마 근원 및 성인 연구를 진행하였다.

KOPRI 극지연구소

제 2 장 국내외 기술개발 현황

국내에서 화성암의 할로겐 원소를 포함한 휘발성 원소 연구는 미약하다. 하지만 국외에서는 많은 연구자들이 관심을 가지고 연구하고 있다. 특히 Br, I의 경우에는 정량분석이 매우 힘들어 많은 연구 자료가 없다. 하지만 우리가 개발하고 있는 SIMS를 이용한 화성암 휘발성 원소 연구는 정성적으로 Br, I 함량이 정확히 나타나 이를 정량분석으로 농도를 구할 수 있다면 매우 중요한 자료가 될 것이다. 아직 정확한 RSF 값을 구하지 못하여 베른대학교와 공동연구를 통해 기존에는 할로겐 원소 및 불활성 기체 분석에 사용한 INAA를 통하여 정확한 SIMS 분석을 위한 외부표준물질의 농도를 측정해서 보다 정확한 RSF 값을 구할 수 있을 것으로 예상하였지만 분석 자료를 얻지 못하였다. 다시 정확한 RSF 값을 얻기 위하여 중국지질대학교와 공동연구를 통해 SF-ICP-MS를 이용하여 할로겐 원소 분석을 실시하였다. 다만 우리가 분석한 SIMS 자료와 잘 맞지 않은 부분이 있어서 이에 대한 보완점을 연구 중에 있으며, 추후에 중국지질대학교에서 할로겐 원소 분석방법들을 배우며, 추가적으로 분석할 예정이다.

멜트 포유물 연구는 국내에서 많지는 않은 상태이고, 국외에서는 많은 연구자들이 관심을 가지고 있는 연구이다. 국내에서는 아직 멜트 포유물 균질화에 대한 연구는 거의 없는 실정임을 감안하면, 이번에 성공한 LINKAM TS1400XY를 이용하여 사장석 내의 멜트 포유물을 균질화한 것은 매우 큰 성과이다. 비록 감람석의 경우 멜트 포유물 균질화 과정에서 산화되는 현상이 나타나서 실패하였으나, 추후 실패한 결과를 토대로 inert gas를 주입하여 고온에서 산화-환원 상태 유지가 가능한 furnace를 이용하여 성공하였다. 따라서 감람석과 사장석 내의 멜트 포유물 균질화 실험을 대량으로 할 수 있게 되었다.

균질화한 멜트 포유물을 epoxy mount로 제작하고 극지연구소에서 EPMA, LA-ICP-MS를 이용하여 주원소 및 미량원소를 분석하였다. 한국기초과학지원연구원 오창센터의 SHRIMP를 이용하여 멜트 포유물의 Pb 동위원소를 분석하였다. 이는 국내에서는 최초로 시도하였던 방법이고 국외에서도 비슷한 기기인 IMS-1280을 이용하여 분석하였지만, 동일한 기기를 이용하여 분석한 적은 없었다. 기존과 비슷한 기기분석 조건을 설정하여 시도하였으며 의미 있는 분석 결과를 얻을 수 있었다.

균질화된 멜트 포유물은 화성암 글라스와 비슷한 조성을 가지는 유리질 물질이므로 우리가 개발하고 있는 화성암 글라스 휘발성 원소 분석 방법을 이용할 수 있을 것으로 생각한다. 이를 토대로 원시마그마 성질을 가지고 있는 멜트 포유물과 화산암 글라스에 대한 휘발성 원소의 거동 등의 연구가 가능할 것으로 생각된다. 이는 아직 국내외적으로 거의 없는 연구로 휘발성 원소에 대한 연구에 큰 도움이 될 것으로 기대가 된다.

KOPRI
극지연구소

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3-1 남극 중앙해령 및 해저산 글라스 분석

2016/17 남극 중앙해령 탐사에서 R/V 아라온의 락코어와 드렛지를 이용하여 화산암 시료를 채취하였다. 탐사지역은 기존에 연구하였던 KR1, KR2 그리고 새롭게 탐사한 KR3, KR4 지역이며, KR1, KR2 지역에서는 탐사하지 못한 해저산을 중점으로 드렛지를 실시하였으며, KR3, KR4 지역에서는 락코어를 중심으로 화산암 시료를 채취하였다. 채취한 화산암 글라스 중에 신선한 부분만을 선별하여 epoxy mount로 제작하였다. epoxy mount에 탄소코팅 소요시간을 줄이기 위하여 탄소막대를 얇게 만들어 탄소코팅을 실시하였다. 그리고 락코어 시료(27개)와 드렛지 시료 20개를 EPMA를 이용하여 암석의 주원소(10개)와 일부 휘발성 원소(F, Cl, S)를 분석하였다.

그림 1. R/V 아라온에서 이용한 락코어 및 드렛지 그리고 채취 시료 사진.

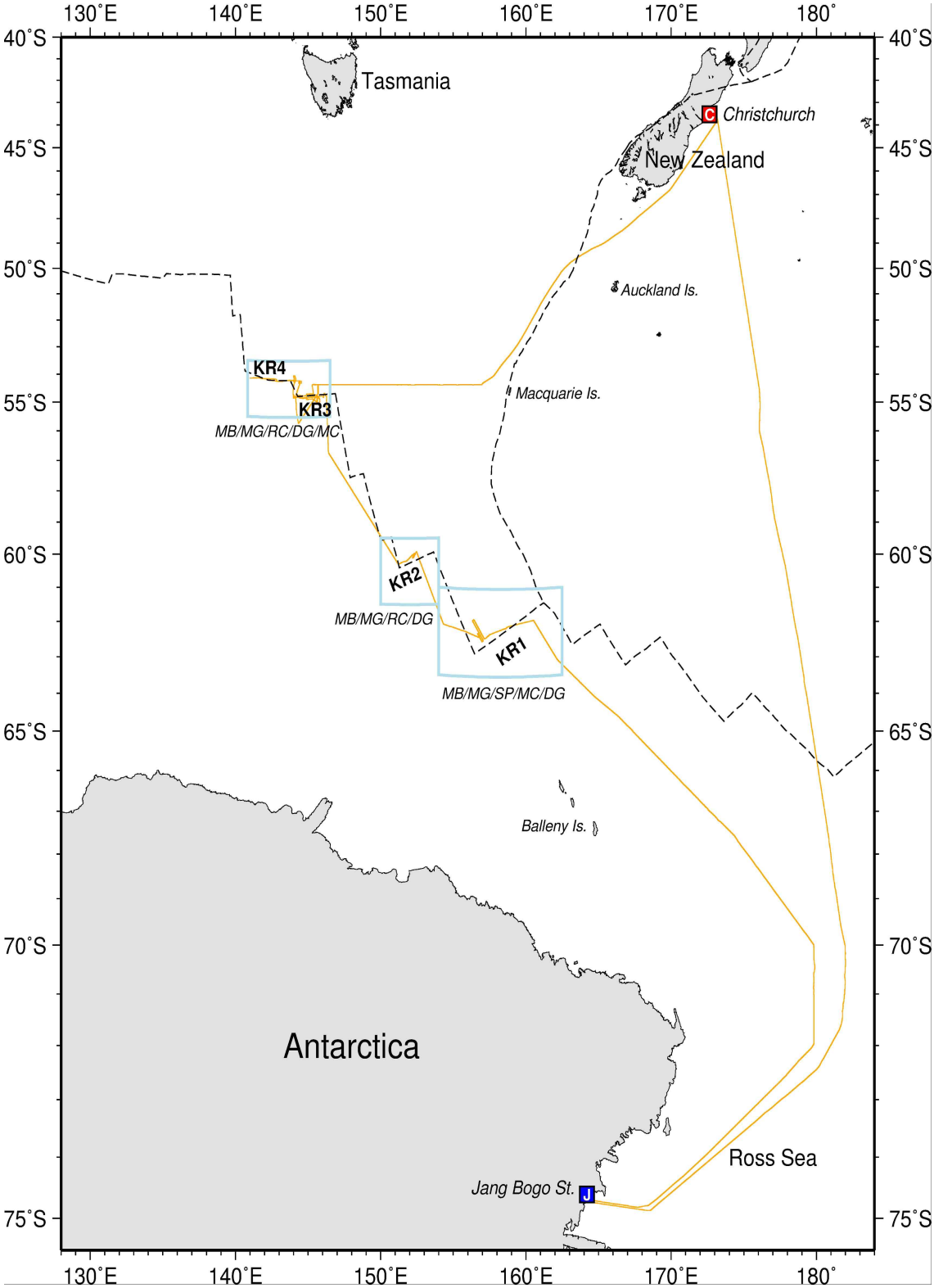

그림 2. 2016/17 아라온의 항적도 및 탐사가 수행된 중앙해령 KR1-KR4 지역.

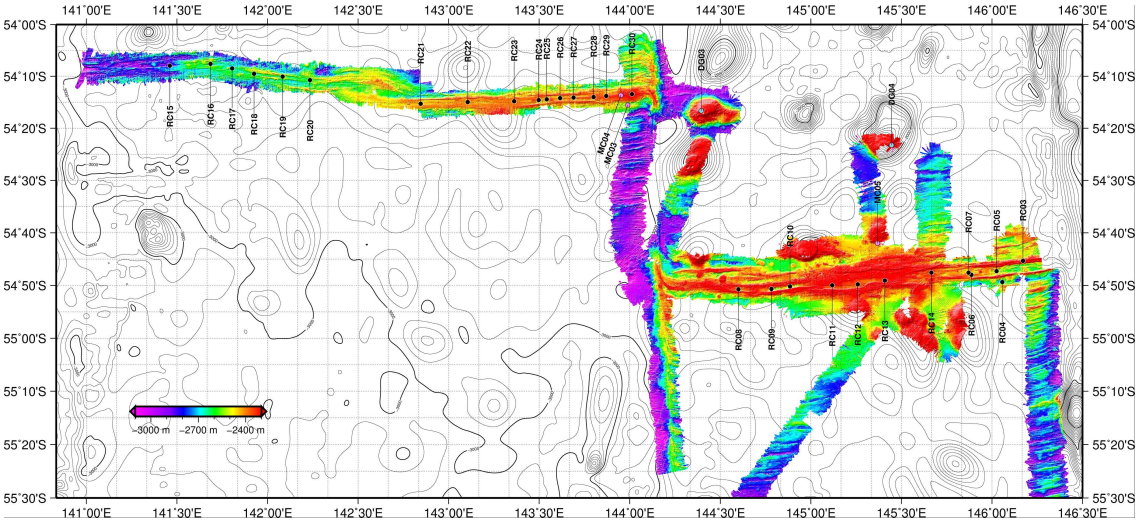

그림 3. 이번에 새롭게 탐사한 KR3, KR4 해정지형도 및 락코어 샘플 채취 위치. 락코어를 중심으로 채취하였으며, 드렛지도 2번 시도하여 암석 샘플을 채취하였다.

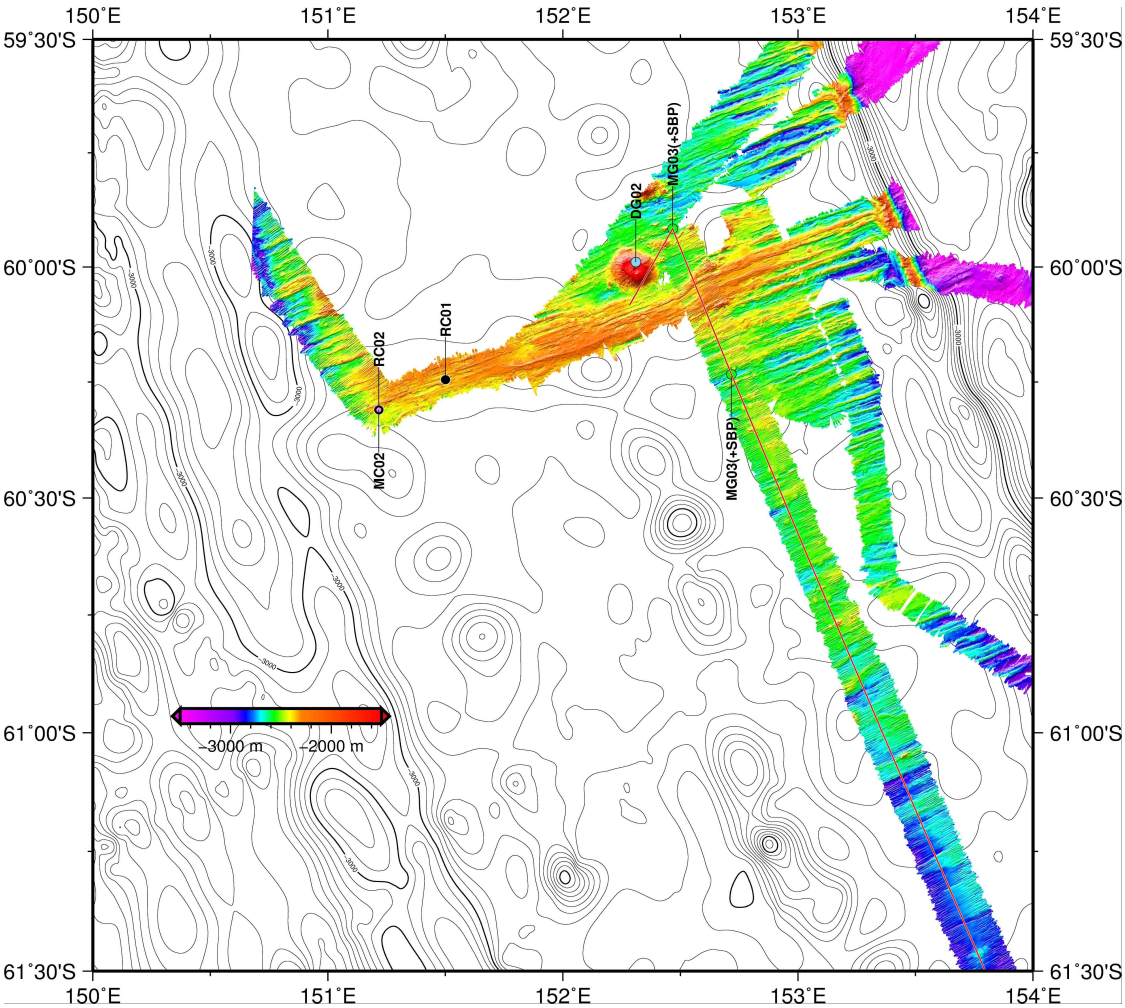

그림 4. KR2 해저지형도 및 락코어 및 드렛지 샘플 채취 위치.

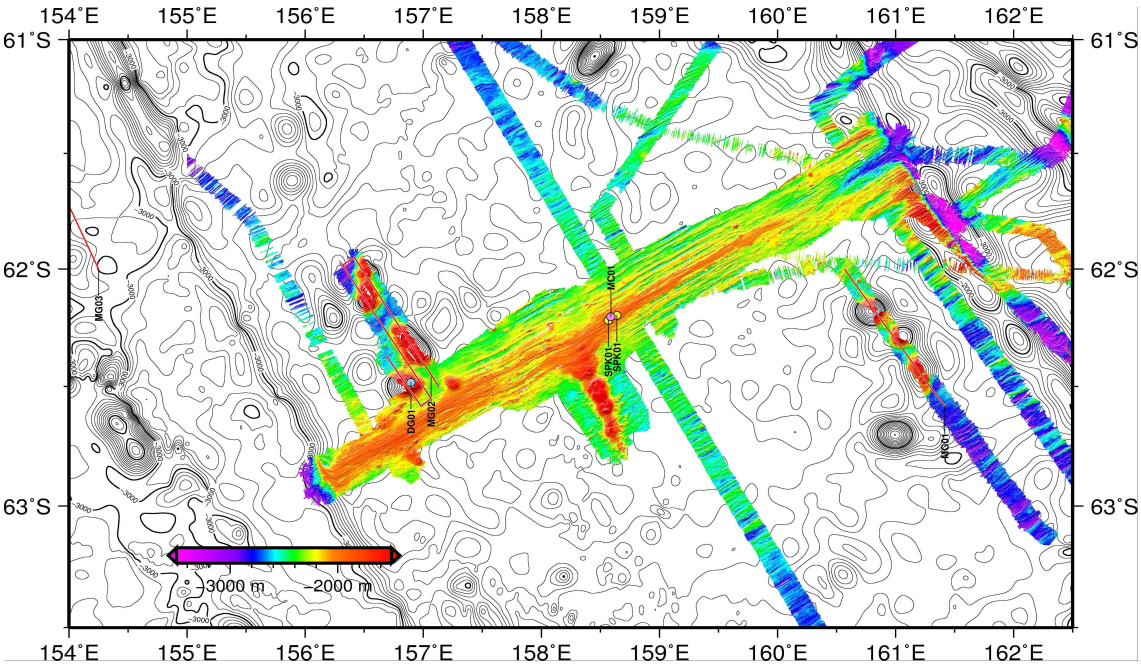

그림 5. KR1 해저지형도 및 드렛지 샘플 채취 위치.

그림 6. EPMA 및 SEM 분석을 위한 탄소코팅을 하기 위해서 사용하는 탄소코팅기기. Epoxy mount는 전도성이 없으므로 EPMA 또는 SEM의 전자빔에 의해 charge 현상이 나타나므로 이를 방지하기 위하여 탄소코팅을 반드시 해야하며, 탄소코팅 시간이 길어지는 경우 epoxy가 녹는 현상이 나타날 수도 있으므로 탄소코팅은 최대한 짧은 시간 안에 완료하도록 한다.

그림 7. 극지연구소가 보유한 FE-EPMA(JEOL JXA-8530F). 위 기기를 이용하여 화성암 글라스의 주원소 및 일부 휘발성 원소를 분석하였다.

EPMA 분석 조건은 15 kV, 10 nA, 20μm이며, JEOL oxide와 Smithsonian glass standard mineral을 위주로 standardization을 실시하였다. F는 fluirute를 이용하였으며, Cl은 scapolite를 이용하고, S는 pyrite를 이용하였다. Na 원소에서 migration 현상이 나타나므로 되도록 짧은 시간에 분석을 실시하였다. 추후에 기존의 화성암 글라스 분석 및 휘발성 원소를 많이 분석하였던 Tulsa 대학교의 화산암 글라스 스탠다드를 얻어서 standardization를 통하여, 보다 정확한 데이터를 얻을 예정이다.

표 1. EPMA를 이용하여 얻어진 주원소 및 휘발성 원소 분석 결과표.

Sample	MgO	Na_2O	SiO_2	Al_2O_3	F	CaO	K_2O	SO_3	TiO_2	Cl	P_2O_5	FeO	MnO	Total
KRR4_RC_02	5.97	3.68	49.97	16.03	0.07	10.51	1.03	0.25	2.03	0.08	0.42	8.91	0.16	99.11
KRR4_RC_03	4.10	3.59	53.16	12.69	0.10	0.41	7.43	0.31	0.56	2.31	0.49	13.45	0.25	98.85
KRR4_RC_05	7.76	2.77	50.33	15.07	0.07	11.93	0.12	0.29	1.47	0.01	0.13	9.65	0.19	99.79
KRR4_RC_06	7.30	2.79	50.38	14.66	0.00	11.52	0.12	0.34	1.75	0.01	0.11	10.90	0.21	100.10
KRR4_RC_07	7.40	2.70	50.01	14.69	0.01	11.71	0.11	0.31	1.53	0.01	0.12	10.13	0.20	98.93
KRR4_RC_08	8.37	2.41	49.40	15.41	0.05	12.16	0.08	0.28	1.29	0.01	0.14	9.38	0.18	99.17
KRR4_RC_09	6.98	3.07	50.49	14.56	0.05	11.14	0.14	0.33	1.95	0.02	0.19	11.13	0.21	100.25
KRR4_RC_10	8.03	2.43	50.24	15.13	0.06	12.32	0.08	0.27	1.31	0.00	0.10	9.96	0.19	100.12
KRR4_RC_11	7.46	2.90	50.16	14.90	0.07	11.70	0.14	0.32	1.62	0.01	0.16	10.14	0.19	99.77
KRR4_RC_12	7.88	2.83	49.42	15.75	0.04	11.63	0.19	0.27	1.53	0.01	0.13	9.48	0.17	99.33
KRR4_RC_13	6.68	2.93	49.62	14.13	0.06	10.76	0.18	0.34	1.69	0.01	0.22	11.31	0.21	98.14
KRR4_RC_14	7.46	2.85	49.55	14.72	0.05	11.64	0.11	0.29	1.55	0.01	0.17	10.33	0.20	98.93
KRR4_RC_15	7.85	2.34	49.36	14.76	0.05	11.63	0.07	0.29	1.51	0.02	0.15	10.46	0.19	98.69
KRR4_RC_16	9.18	2.38	49.23	16.90	0.02	12.04	0.05	0.26	1.05	0.01	0.09	8.78	0.16	100.14
KRR4_RC_17	8.50	2.62	50.56	16.04	0.03	12.12	0.08	0.28	1.25	0.00	0.11	8.98	0.18	100.75
KRR4_RC_18	6.48	2.67	49.47	13.63	0.07	10.28	0.15	0.37	2.41	0.01	0.21	12.61	0.23	98.60
KRR4_RC_19	7.55	2.59	50.26	14.79	0.04	11.24	0.11	0.32	1.64	0.01	0.19	11.05	0.20	99.98
KRR4_RC_20	7.17	2.48	50.50	14.10	0.05	11.26	0.13	0.33	1.43	0.01	0.16	11.25	0.20	99.05
KRR4_RC_22	8.99	2.43	49.35	16.59	0.02	12.35	0.04	0.26	1.14	0.01	0.07	8.97	0.16	100.38
KRR4_RC_23	8.44	2.56	50.07	16.18	0.02	11.76	0.08	0.29	1.37	0.01	0.11	9.91	0.20	100.97
KRR4_RC_24	9.01	2.40	49.41	16.54	0.00	12.12	0.06	0.25	1.22	0.01	0.10	9.22	0.17	100.51
KRR4_RC_25	8.69	2.63	48.97	16.02	0.08	11.71	0.07	0.28	1.32	0.00	0.10	9.24	0.17	99.28
KRR4_RC_26	8.39	2.46	49.46	15.51	0.12	11.89	0.08	0.28	1.36	0.00	0.09	9.78	0.20	99.61
KRR4_RC_27	8.48	2.29	48.09	15.09	0.04	11.13	0.06	0.26	1.07	0.01	0.11	7.95	0.15	94.72
KRR4_RC_28	7.35	2.64	50.35	14.18	0.04	11.30	0.10	0.33	1.71	0.01	0.14	11.27	0.20	99.61
KRR4_RC_29	7.32	2.62	50.60	14.48	0.06	11.36	0.10	0.33	1.67	0.02	0.16	11.05	0.20	99.97
KRR4_RC_30	7.44	2.64	50.48	14.49	0.06	11.34	0.10	0.32	1.67	0.01	0.15	10.87	0.22	99.80
KRR4_DG_01_A1	8.06	2.72	49.34	15.65	0.04	12.18	0.18	0.26	1.38	0.02	0.14	9.19	0.18	99.34
KRR4_DG_01_A2	8.14	2.75	49.64	15.56	0.01	12.17	0.19	0.26	1.35	0.01	0.11	9.23	0.18	99.61
KRR4_DG_01_A3	8.09	2.71	49.46	15.61	0.03	12.14	0.18	0.26	1.28	0.02	0.14	9.21	0.18	99.31
KRR4_DG_01_A4	8.06	2.69	49.55	15.64	0.02	12.23	0.19	0.26	1.34	0.01	0.14	9.26	0.17	99.57
KRR4_DG_01_A5	8.13	2.80	49.57	15.74	0.03	12.15	0.18	0.27	1.29	0.01	0.13	9.15	0.17	99.64
KRR4_DG_01_A6	8.11	2.74	49.95	15.82	0.08	12.17	0.19	0.27	1.32	0.03	0.14	9.13	0.16	100.11
KRR4_DG_01_B1	8.43	2.78	49.81	15.80	0.04	12.01	0.18	0.27	1.31	0.01	0.14	9.06	0.17	100.01
KRR4_DG_01_B2	7.97	2.74	49.97	16.00	0.07	12.18	0.20	0.28	1.36	0.02	0.15	9.18	0.16	100.26
KRR4_DG_01_C1	8.56	2.67	49.23	16.24	0.10	12.29	0.10	0.28	1.20	0.01	0.09	9.05	0.18	100.00
KRR4_DG_01_C2	8.48	2.68	49.18	15.91	0.01	12.34	0.11	0.28	1.20	0.01	0.11	9.19	0.18	99.68
KRR4_DG_01_C3	8.53	2.71	48.87	16.01	0.08	12.25	0.10	0.28	1.25	0.01	0.11	9.16	0.17	99.54
KRR4_DG_01_D1	7.66	2.85	49.83	15.61	0.00	12.28	0.19	0.29	1.39	0.02	0.15	9.33	0.17	99.77
KRR4_DG_01_D2	7.66	2.71	49.65	15.84	0.12	12.32	0.18	0.28	1.36	0.03	0.16	9.24	0.17	99.71
KRR4_DG_02_A1	8.18	2.75	50.10	15.62	0.04	12.21	0.15	0.27	1.21	0.04	0.10	9.10	0.15	99.94
KRR4_DG_02_A2	8.21	2.76	50.05	15.50	0.05	12.21	0.15	0.28	1.24	0.03	0.09	9.06	0.17	99.81
KRR4_DG_02_B	6.88	3.03	50.61	15.58	0.08	11.78	0.23	0.26	1.39	0.03	0.14	9.19	0.16	99.37
KRR4_DG_02_C	7.86	2.75	50.25	15.68	0.04	12.30	0.16	0.26	1.21	0.04	0.11	8.93	0.17	99.76
KRR4_DG_02_D	7.94	2.74	50.04	15.55	0.10	12.30	0.16	0.28	1.19	0.04	0.14	8.88	0.17	99.52
KRR4_DG_02_E	7.50	2.94	50.48	14.90	0.04	11.87	0.18	0.28	1.34	0.02	0.14	9.52	0.16	99.37
KRR4_DG_02_F	7.89	2.78	49.97	15.61	0.05	12.30	0.15	0.27	1.21	0.04	0.11	8.97	0.16	99.51

3-2 휘발성 원소 분석을 위한 외부표준물 정량화

할로겐 원소를 포함한 휘발성 원소 정량 분석을 위하여 SIMS를 이용하였다. SIMS 분석 시에 는 휘발성 원소에 대한 외부표준물질이 필요하므로 자체적으로 제작하였다. 제작한 SIMS 분석용 외부표준물질(KOIH-1)에 대해 EPMA 및 LA-ICP-MS를 통해 주원소 및 미량원소 그리고 일부 휘발성 원소(F, Cl, S, Br)에 대한 정량분석을 실시하였다. SIMS 분석은 한국기초과학지원연구원 부산센터에 있는 CAMECA ims-6f를 이용하였으며, 할로겐 원소에 대해 정량분석을 시도하였다. SIMS 분석 조건은 15 keV, 20nA이며 150*150 μm 이다.

그림 8. 기초과학지원연구원 부산센터에 설치된 Cameca 6F SIMS 기기.

SIMS분석에서 얻어진 intensity을 이용하여 농도로 계산하기 위하여 각 원소 별로 RSF(Relative Sensitivity Factor)를 구하여야 한다. 이전 연구에서 EPMA를 이용하여 암석의 주원소 분석에 대한 정량분석을 진행하였다. 따라서 이미 주원소 농도를 알고 있으므로 이에 대한 각 할로겐 원소의 RSF를 구하는 식은 다음과 같다.

$$Concentration_{(Halogen)} = RSF * (Intensity_{(halogen)}/Intensity_{(Si)}) * Concentration_{(Si)}$$

$Concentration_{(Halogen)}$ = 할로겐 원소 농도
RSF = Relative Sensitivity Factor
$Intensity_{(halogen)}$ = 할로겐 원소 측정한 intensity
$Intensity_{(Si)}$ = Si 원소(internal standard) 측정한 intensity
$Concentration_{(Si)}$ = Si 원소(internal standard) 농도 (EPMA 사용)

위 식을 이용하여 Mark Kendrick의 시료를 이용하여 각 할로겐 원소(Cl, Br, I)의 RSF를 구하였다. 하지만 동일한 RSF 값을 구하지는 못하였고 각각의 다른 RSF 값을 구하였다. 그래서 가장 공통적인 RSF 값을 가진 2PD43시료의 값을 이용하여 KOIH-1의 할로겐 원소 정량화를 시도하였다. 하지만 이 값은 정확하지 못한 값으로 생각되어 베른대학교와 공동연구를 통하여 할로겐 원소 및 불활성 기체를 분석하는 INAA를 이용하여 외부표준물질(KOIH)에 대한 정확한 RSF 값을 구할 예정이다. RSF 값을 구한 후 이를 SIMS 분석에 적용하여 남극 중앙해령 글라스에 대한 할로겐 원소 정량 분석을 완료할 예정이다.

3-3 화산암의 멜트 포유물 균질화 실험

화산암의 멜트 포유물 균질화 실험에 사용한 시료는 남극반도와 남셰틀랜드 군도 아래의 브랜스필드 해협 서쪽 끝에 위치한 디셉션 섬에서 채취한 화산암이다. 디셉션 섬은 브랜스해협은 남셰틀랜드 군도의 배호분지로 여겨지며, 새로운 해양지각이 형성되고 있으며, 제 4기 폭발적인 화산활동으로 만들어진 칼데라를 가지게 되었고, 추후에 해수에 잠김으로서 지금의 형태를 이룬다. 기본적인 지화학 분석은 이루어졌으나, 현재까지 멜트 포유물에 대한 실험은 없는 것으로 알려져 있다.

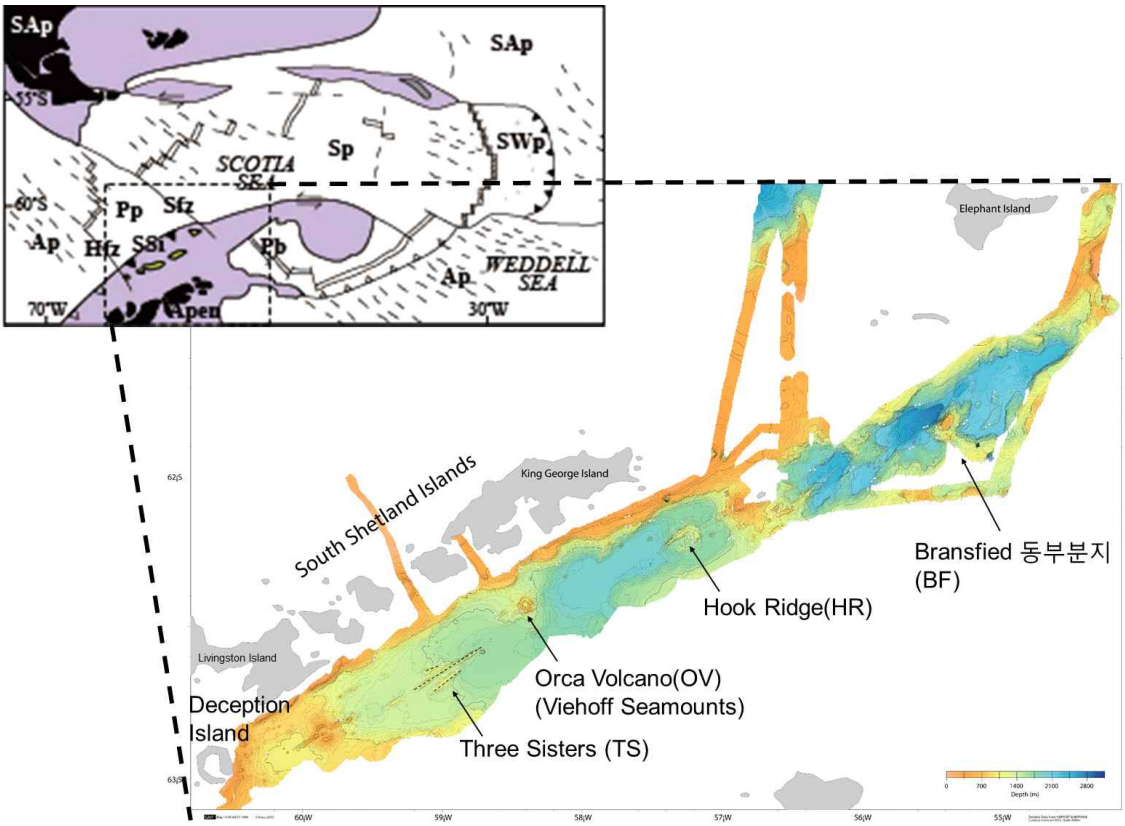

그림 9. 브랜스필드 해협 및 디셉션 섬.

디셉션섬 화산암은 사장석 및 감람석 반정이 함께 나타나고, 불균질화한 멜트 포유물을 포함하는 것으로 실체현미경에서 관찰되었다. 멜트 포유물을 포함하고 있는 사장석 및 감람석을 선별하였고 LINKAM TS1400XY라는 기기를 편광현미경에 부착하여 멜트 포유물 균질화 실험을 실시하였다. TS1400XY는 기존에 이용한 TS1500에서 X, Y축을 이동할 수 있으며, 균질화 실험이 끝나고 급냉할 수 있는 큰 이점이 있는 기기이고, 편광현미경으로 균질화 과정을 관찰할 수 있으므로, 균질화

에 대한 정확한 온도, 균질화 시간 등 많은 정보를 획득할 수 있다. 하지만 TS1400XY를 이용한 멜트 포유물 균질화 실험에는 작은 3-4개 광물만을 한번에 할 수 있어서, 많은 수의 멜트 포유물 균질화 실험시에는 매우 많은 시간이 소요되는 단점이 있다.

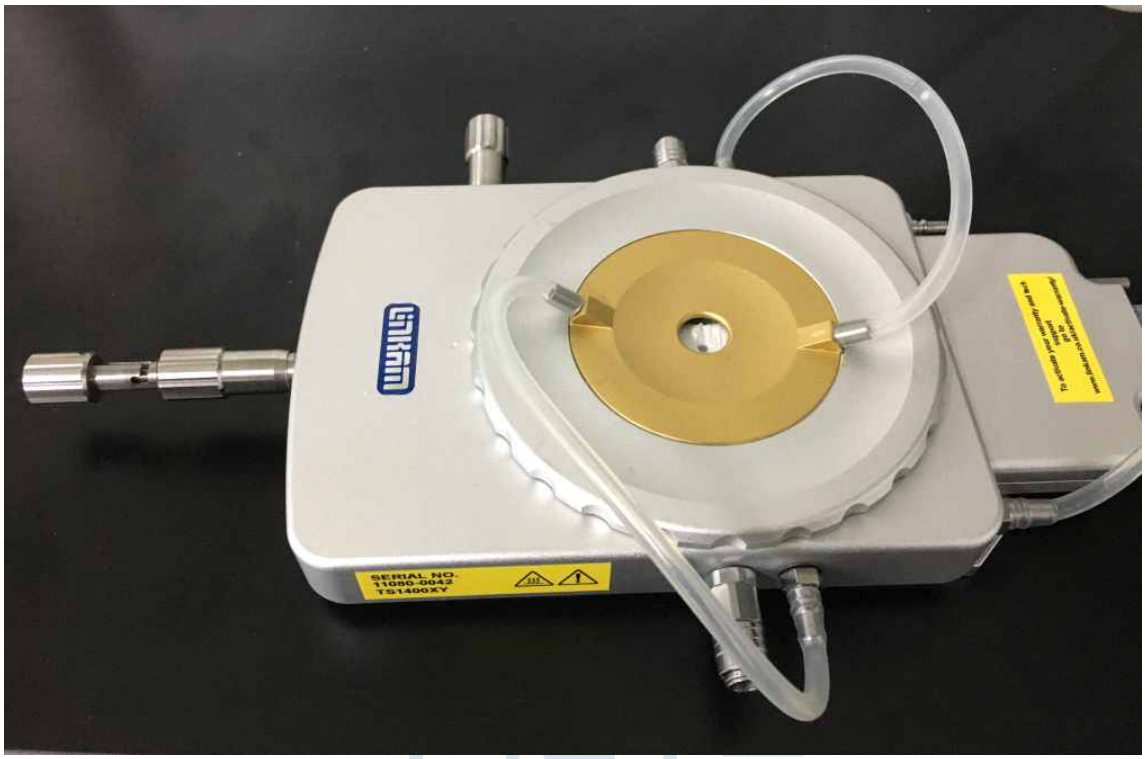

그림 10. LINKAM TS1400XY.

사장석은 균질화 실험에 성공함에 따라 대부분 멜트 포유물을 균질화 하였다. 감람석은 균질화 실험 중에 산화되는 현상이 나타나서 균질화 후에 편광현미경에서 관찰할 수 없었다. 이는 고온의 상태에서 멜트 포유물에 있던 물과 FeO 반응하여 자철석을 생성하고(1), 자철석 생성하는 온도보다 높은 온도에서는 적철석을 생성하는 것으로 알려져 있다(2)(danyushevsky 2003).

$$2H_2O_{melt} + 6FeO_{melt} = 2H_2\uparrow + 2Fe_3O_4 \quad (1)$$

$$H_2O_{melt} + 2FeO_{melt} = H_2\uparrow + Fe_2O_{3melt} \quad (2)$$

이러한 산화과정을 피하기 위하여 inert gas를 사용하여야 한다. 추후에 inert gas를 이용할 수 있는 furnace를 구매하여 감람석 내의 멜트 포유물 균질화 실험을 할 예정이다. inert gas를 이용할 수 있는 furnace는 한번에 대량의 멜트 포유물 균질화 실험이 가능하다는 장점도 있다. 하지만 균질화 과정을 육안으로 확인할 수 없기에, TS1400XY와 병행하여 멜트 포유물 균질화 실험을 실시한다면, 보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

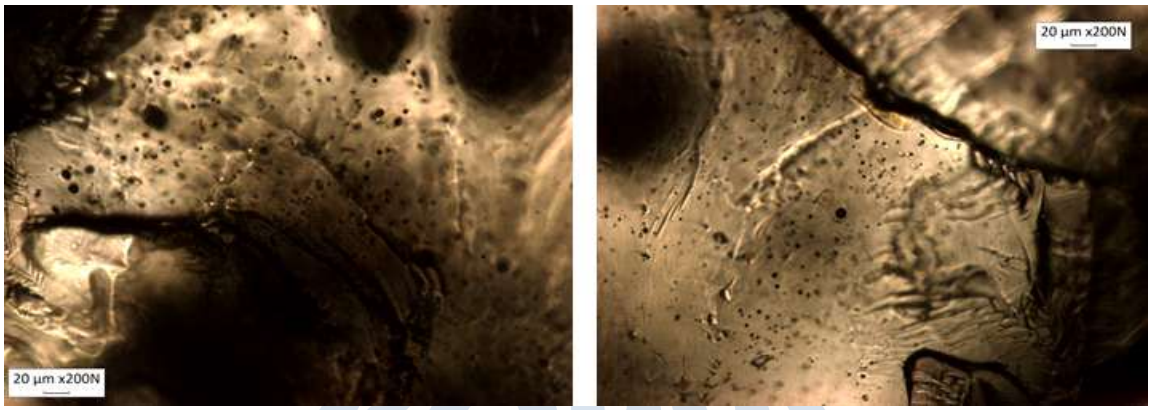

그림 11. 사장석 내의 멜트 포유물 균질화 실험. 사장석의 멜트 포유물은 감람석에 비해 대체적으로 크기가 작은 것을 확인할 수 있음.

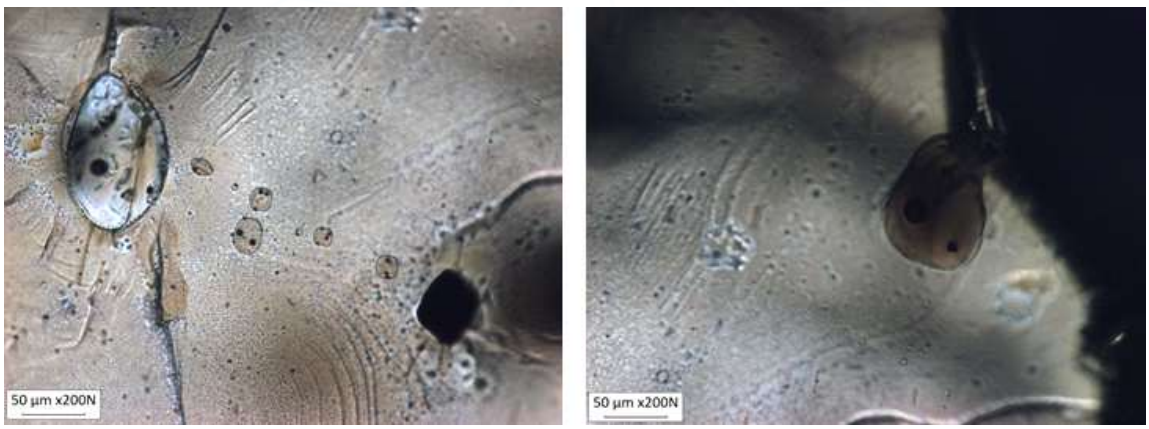

그림 12. 감람석 내의 멜트 포유물 균질화 실험. 간혹 Cr-spinel도 관찰됨.

Inert gas 중 argon gas를 이용하여 전기로 내의 산화-환원 상태를 유지할 수 있는 furnace를 사용하여 디셉션 섬 화산암에서 감람석 및 사장석 결정을 선별하여 균질화 실험을 실시하였다. 감람석과 사장석 내의 멜트 포유물의 균질화 온도는 1150℃, 시간은 약 1시간이 소요되어 균질화 되는 것을 확인하였다. 감람석 멜트 포유물은 대부분 10-100um 다양한 크기로 나타났으며, 주로 20um크기 정도였다. 이에 반해 사장석 멜트 포유물은 5-50um으로 감람석 멜트 포유물에 비해 작았다.

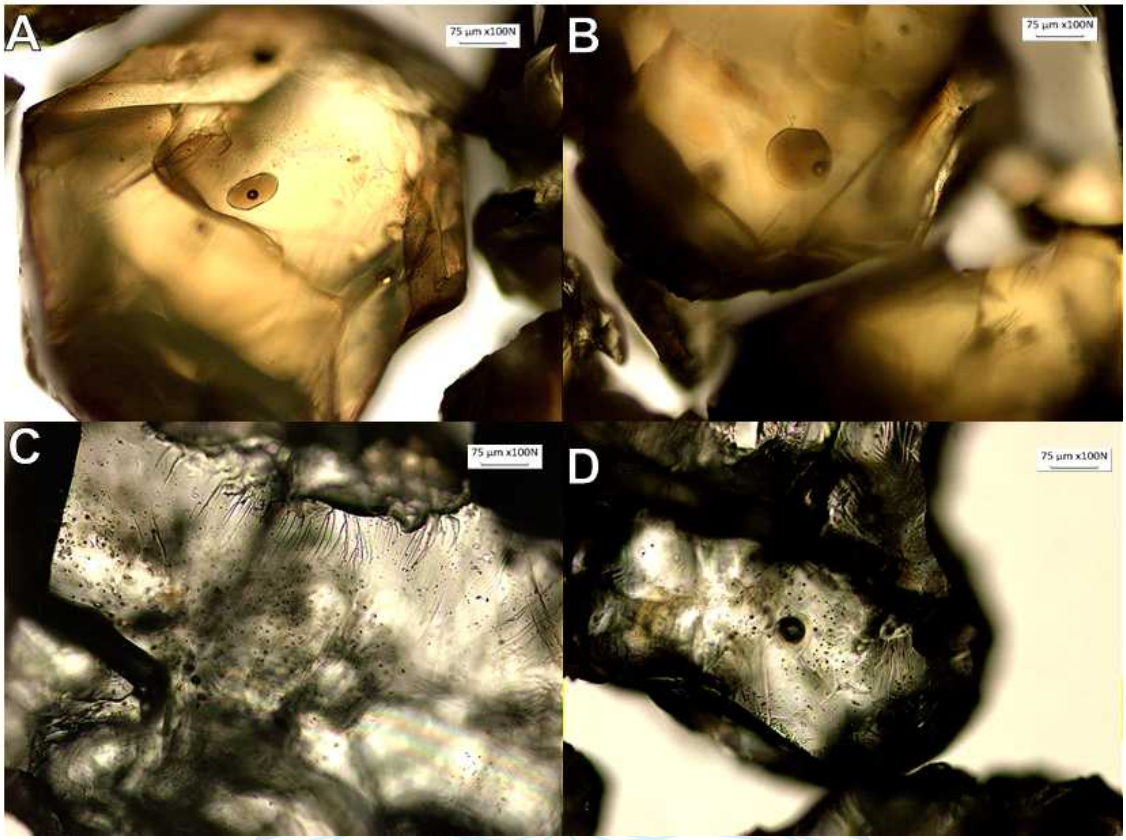

그림 13. 균질화 실험 후 감람석과 사장석 내의 멜트 포유물들. (A) 및 (B)는 감람석 내의 멜트 포유물 균질화 후 사진, (C) 및 (D)는 사장석내의 멜트 포유물 균질화 후 사진.

극지연구소

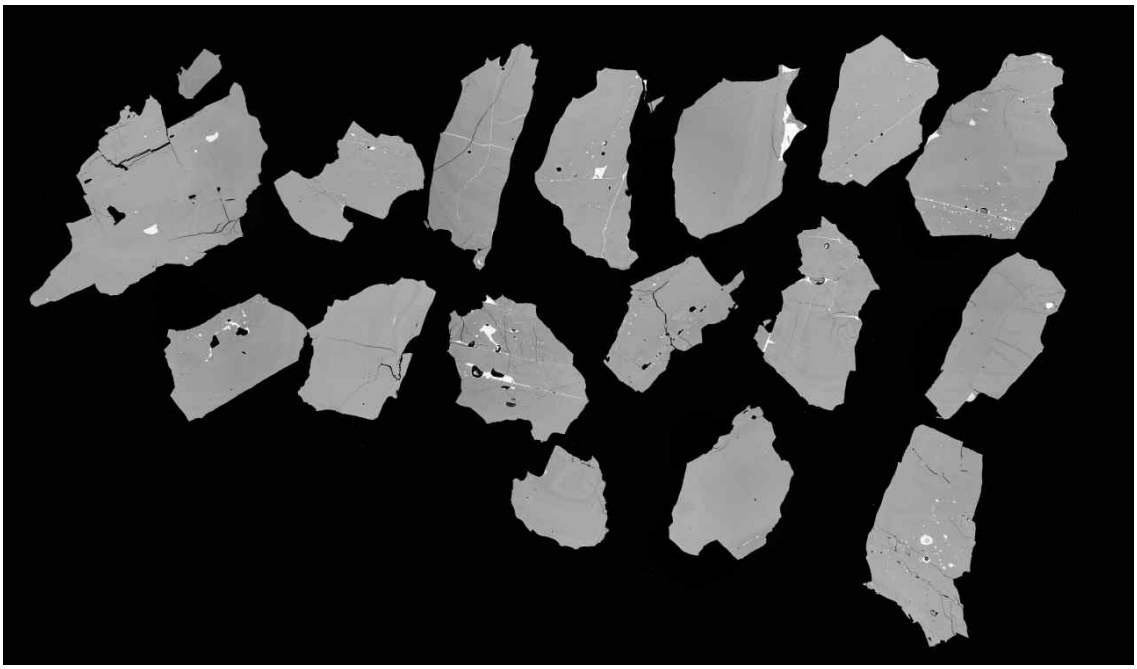

그림 14. 사장석 내의 멜트 포유물의 BSE(Back Scattered Electron) 이미지.

3-4 LA-ICP-MS를 이용한 불균질한 멜트 포유물 분석

불균질한 멜트 포유물은 마그마가 광물 속에 포획되어 오랜 시간을 걸쳐 분화된 멜트 포유물이다. 그러므로 부분분석 시에 일부분만을 분석하기 때문에 많은 오류가 생긴다. 하지만 LA-ICP-MS는 레이저를 이용하여 분석하고자 하는 시료의 표면을 삭마하여 ICP-MS에 보내어 화학분석을 하는 기기이므로 불균질한 멜트 포유물 전체를 레이저로 삭마하여 보내어 분석한다면 균질화하는 과정이 필요 없이 화학분석이 가능하다.

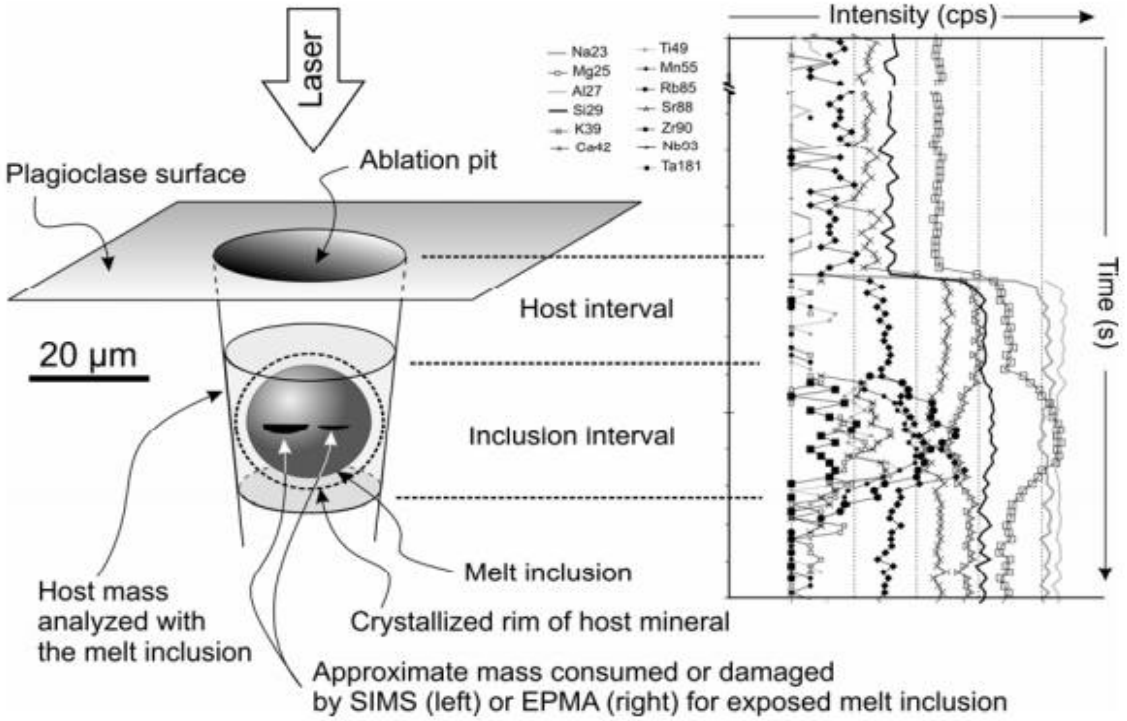

그림 15. 멜트 포유물 미량원소 분석을 위해 LA-ICP-MS 기기를 이용하여 분석하여 laser를 이용해서 멜트 포유물을 성분 변화에 따라서 분석이 되는지에 대한 설명 및 이에 따른 intensity 변화를 나타낸 그림.

남극 중앙해령에서 획득한 시료(KRR3-DGO3-1) 중 편광현미경 상에서 감람석 반정 내에 불균질한 멜트 포유물을 확인하였으며(그림 16) 몇몇의 반정을 epoxy mount로 제작하였다. 본격적인 분석에 앞서 2개 정도의 감람석을 이용하여 분석을 시도하였으나, 기존에 LA-ICP-MS 운용방법과 다른 운용방법을 이용하지 않아 분석이 어려웠다. 사장석 균질화 실험에 성공함에 따라 추후에 균질화한 후 다시 분석할 예정이다.

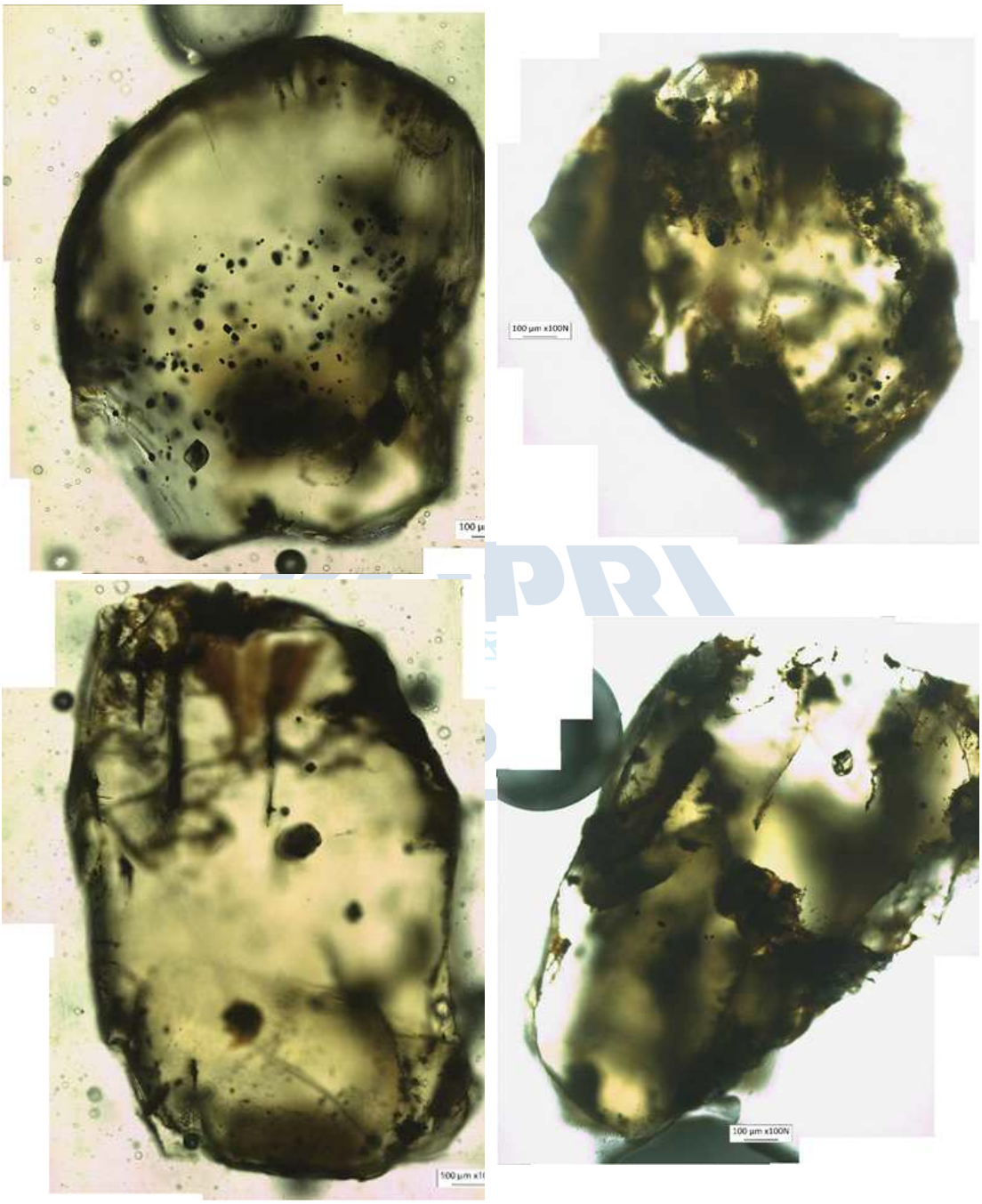

그림 16. 감람석 내의 불균질한 멜트 포유물 사진.

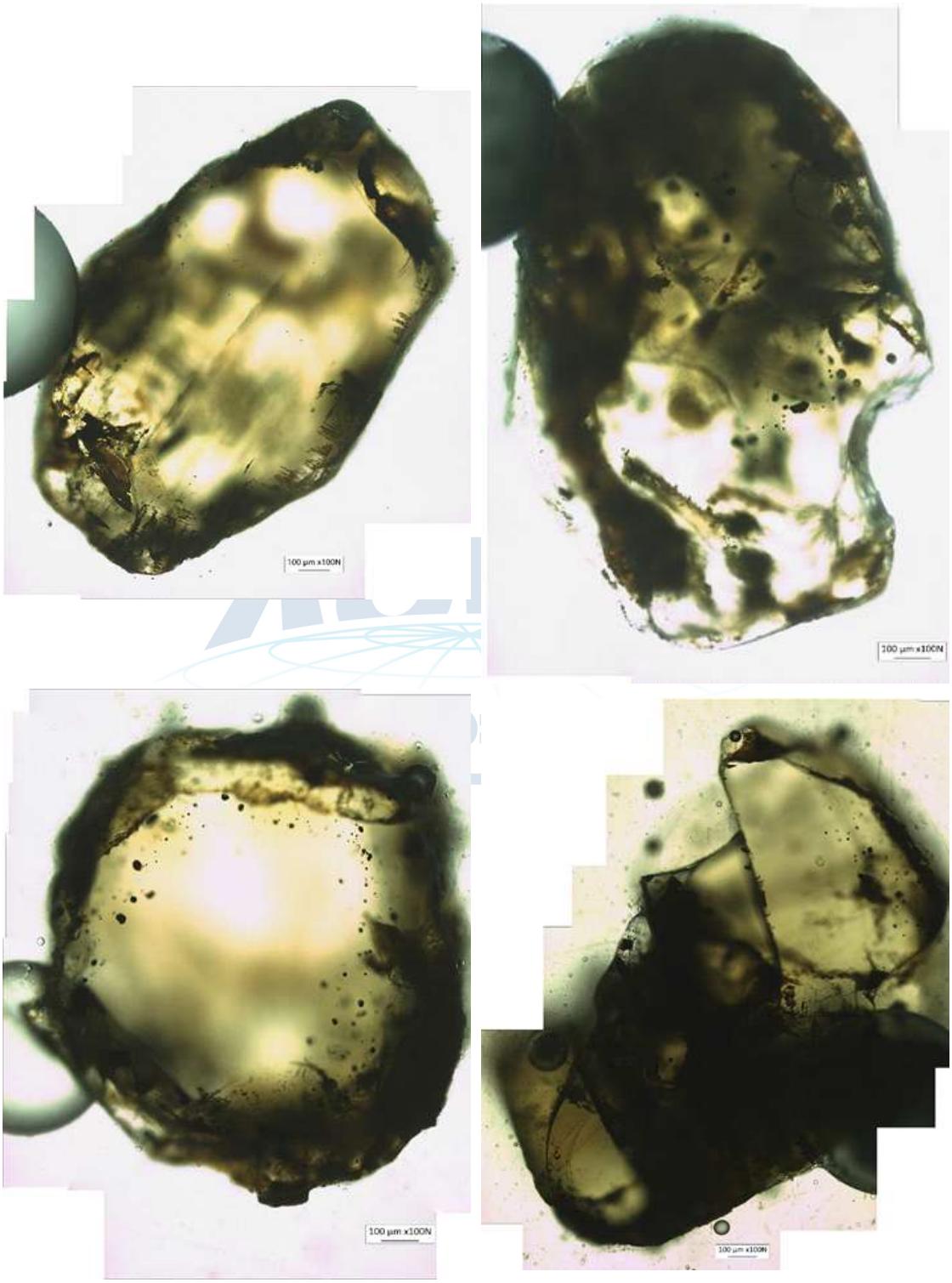

그림 16. (계속)

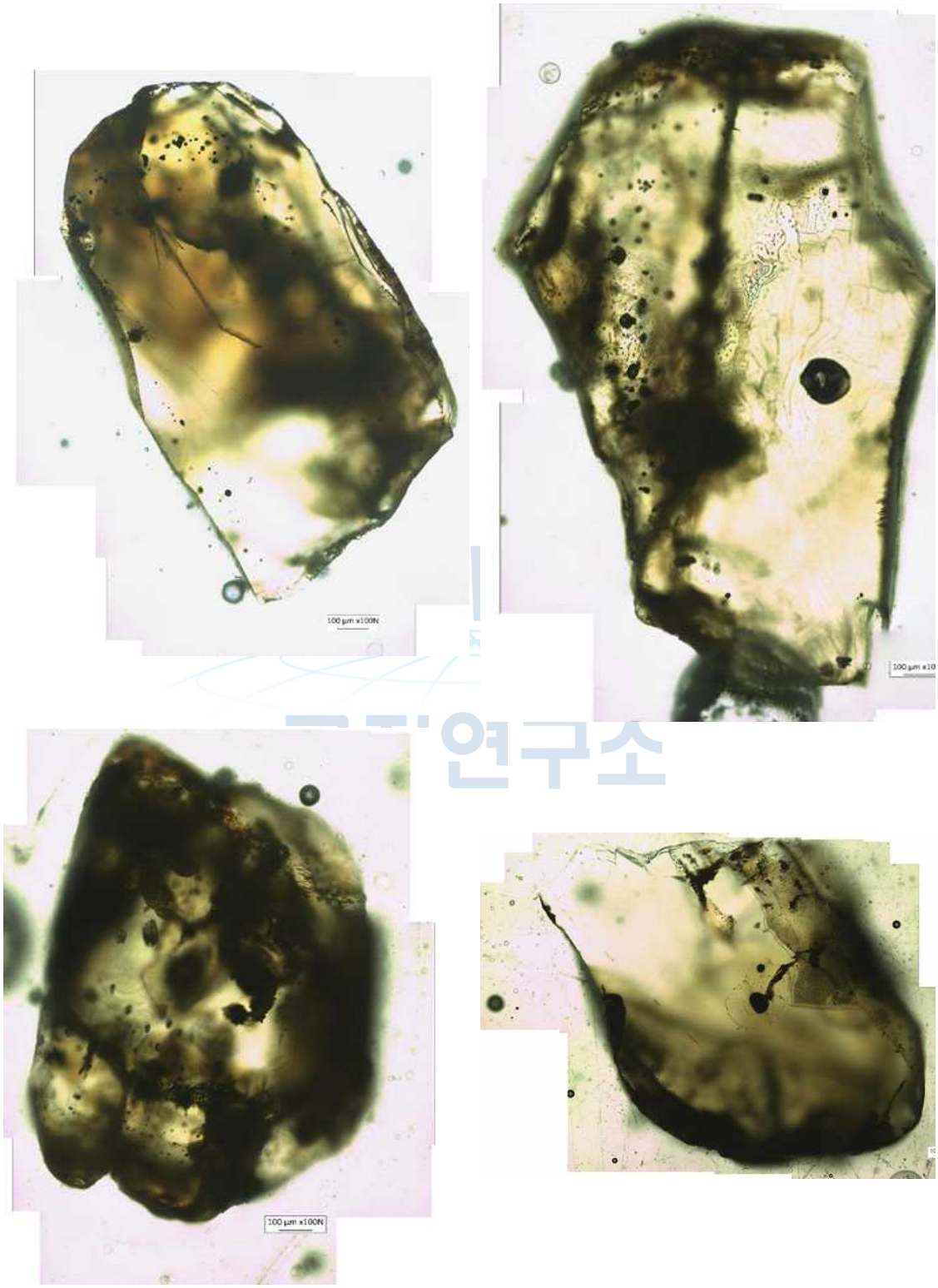

그림 16. (계속)

그림 17. 멜트 포유물 미량원소 분석에 이용하였던 LA-ICP-MS 기기 사진.

3-5 감람석과 사장석 내의 멜트 포유물에 대한 주원소, 미량원소 그리고 Pb 동위원소 분석

감람석과 사장석 내의 균질화된 멜트 포유물에 대해서 에폭시 마운트로 제작하였다. 탄소코팅을 한 후 SEM을 이용하여 BSE 이미지를 얻어 먼저 분석할 포인트를 정하였다. EPMA 분석 조건은 15 kV, 10 nA, 3μm이며, JEOL oxide와 Smithsonian glass standard mineral을 위주로 standardization을 실시하였다. Na 원소에서 migration 현상이 나타나므로 되도록 짧은 시간에 분석을 실시하였다. 주원소 분석 결과 대체적으로 전암과 비슷한 calc-alkaline 계열 분포를 나타났으나, 일부 사장석 내의 멜트 포유물에서 alkaline계열 분포도 나타났다.

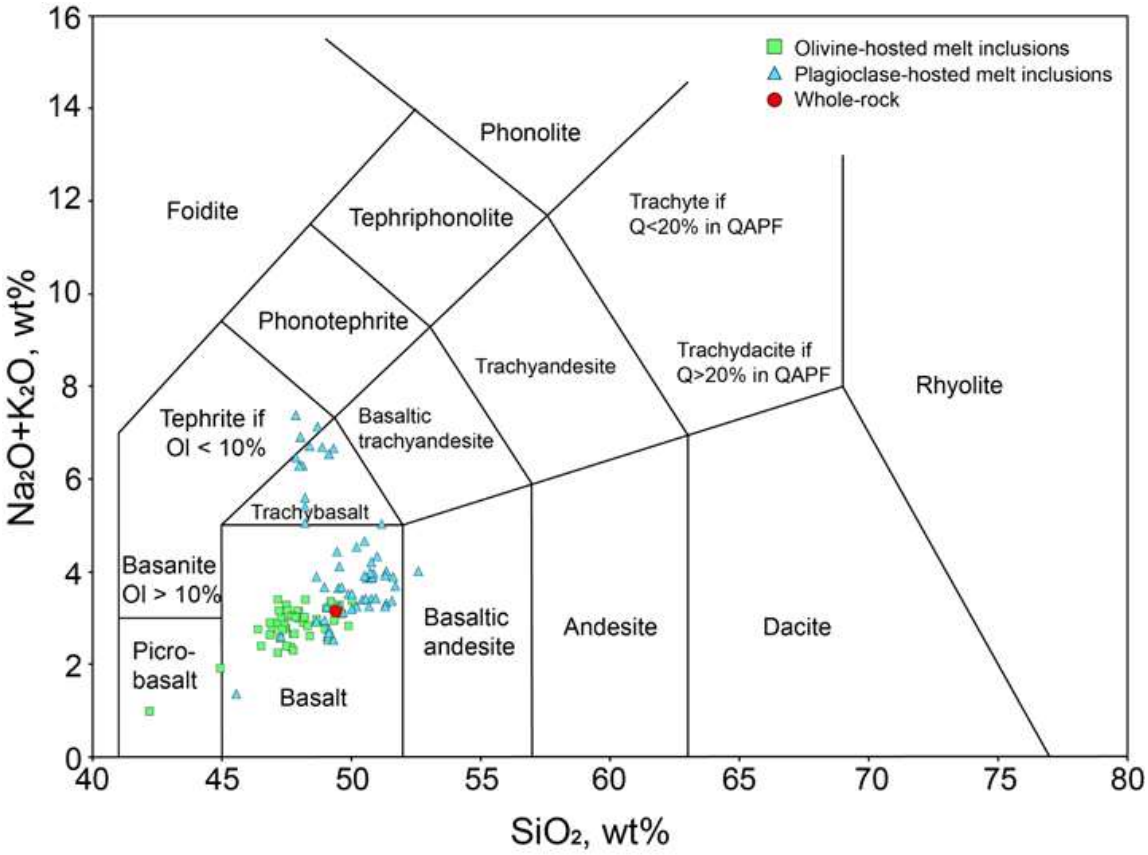

그림 18. 감람석과 사장석내의 멜트 포유물 주원소에 대한 TAS 다이어그램.

감람석과 사장석 내의 균질화된 멜트 포유물로 제작한 에폭시 마운트로 주원소 분석 후 탄소코팅을 제거한 후에 LA-ICP-MS를 이용하여 미량원소 및 희토류원소를 분석하였다. 감람석과 사장석 내의 멜트 포유물은 미량원소 중에 Large Ion Lithophile Elements(Rb, Ba, U, Pb)는 전암보다 높았다. Sr은 전암과 비슷하거나 대부분 작게 나타났다. 이는 사장석 정출 시에 지각물질이 혼합되었을 가능성을 나타낸다. 또한 미량원소 중 High Field Strength Elements(Zr, Hf)은 전암에 비해 높게 나타났다. Pb와 U은 음의 상관관계가 있었으며, Ta은 전암에 비해 낮게 나타났다.

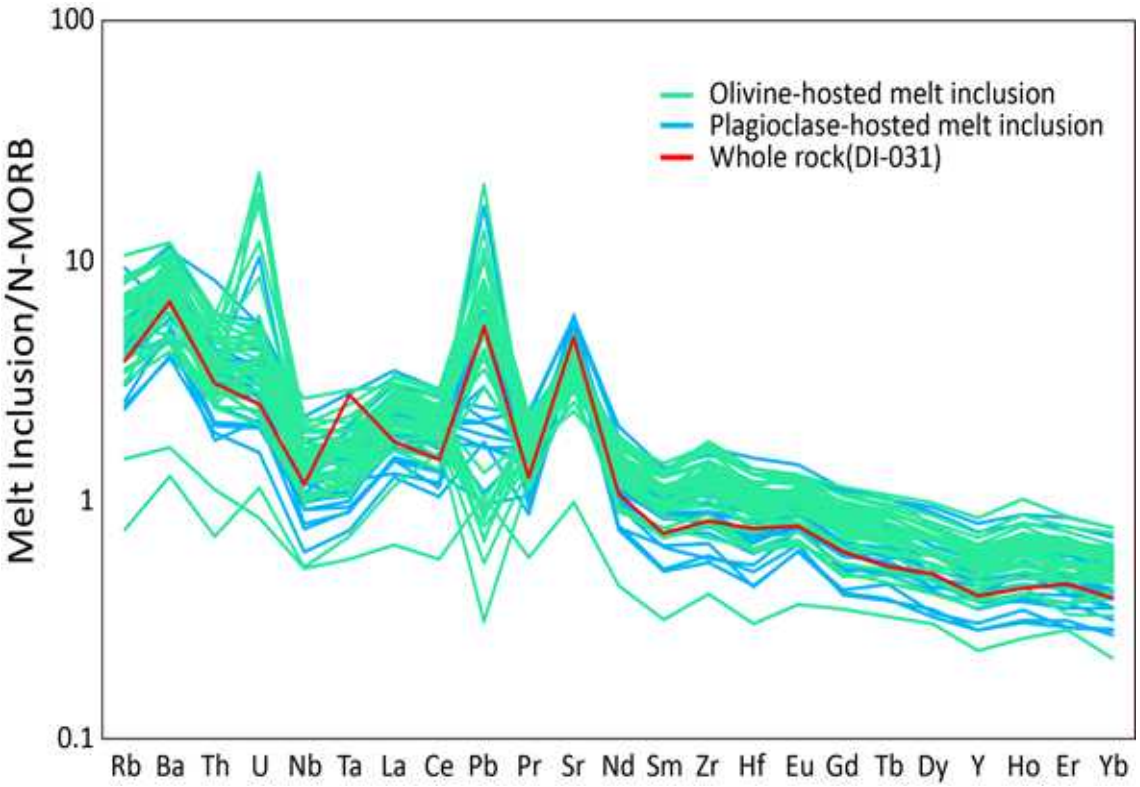

그림 19. 감람석과 사장석내의 멜트 포유물에 대한 미량원소를 normal MORB로 평균화한 미량원소 변화를 나타낸 다이어그램.

감람석과 사장석내의 멜트 포유물은 전암과 REE 패턴이 유사하게 나타났다. 하지만 N-MORB 보다 E-MORB에 비슷하다. 그리고 E-MORB 보다 경희토류원소(LREE)가 부화되며, 중희토류원소(HREE)는 결핍되어 있음을 알 수 있었다. 이는 arc magma 특징과 유사하다. 또한 감람석 내의 멜트 포유물은 약한 Ce positive anomaly를 나타내는데, 이는 ferromaganisiannodule의 존재 가능성 또는 carbonate 퇴적암과 관련이 있음을 짐작할 수 있다.

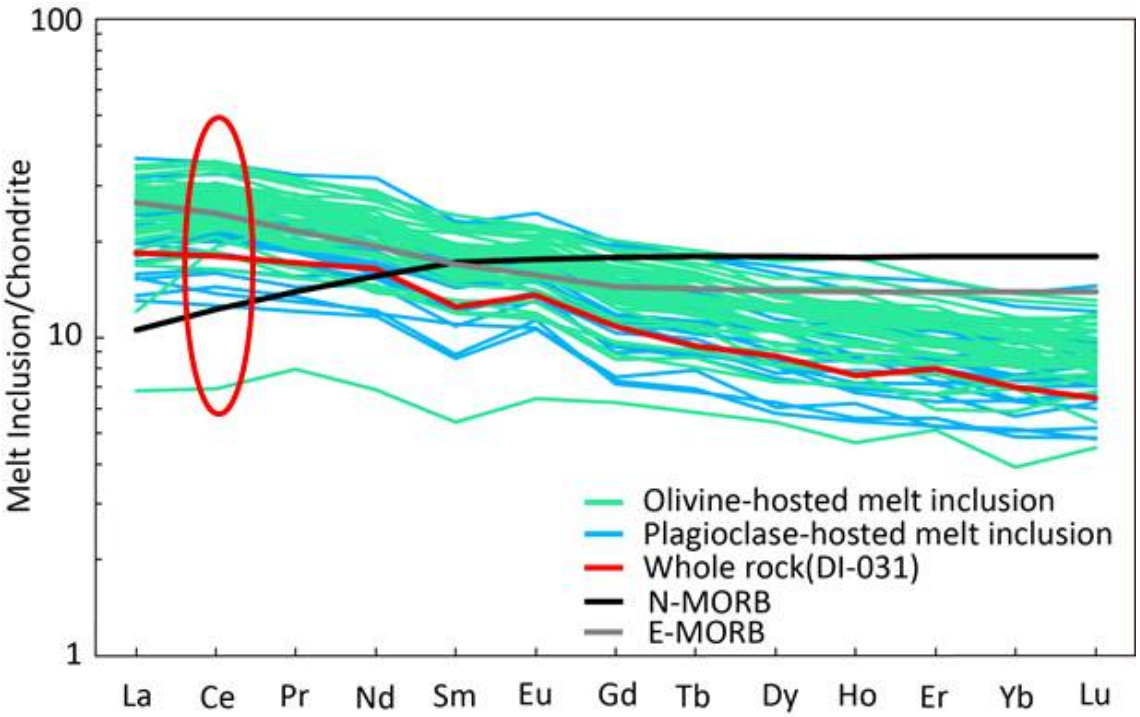

그림 20. 감람석 및 사장석 내의 멜트 포유물 및 전암, N-MORB 그리고 E-MORB을 chondrite(Sun and McDonough, 1989)에 평균화한 REE pattern.

Th, Yb 그리고 Nb은 arc 지역 또는 BAB(Back Arc Basin) 지역에서 맨틀의 성분 또는 지각 성분 혼합에 대한 지시자로 사용되는 원소들이다. 이를 이용하여 Th/Yb와 Nb/Yb 다이어그램에 도시하였을 때, 감람석 및 사장석 내의 멜트 포유물은 E-MORB 근처에 대부분 분포하는 것을 알 수 있다. 감람석 내의 멜트 포유물은 사장석 내의 멜트 포유물보다 다양한 지역에 도시됨에 따라 감람석 내의 멜트 포유물이 사장석 내의 멜트 포유물 보다 더 다양한 마그마(N-MORB 또는 E-MORB)에서 만들어졌을 가능성을 나타낸다. 사장석 내의 멜트 포유물은 magma-crust interaction이 감람석내의 멜트 포유물보다 큰 것으로 확인됨에 따라 원래 마그마 성질이 아닌 지각물질과 혼합된 성질을 나타내고 있음을 알 수 있다.

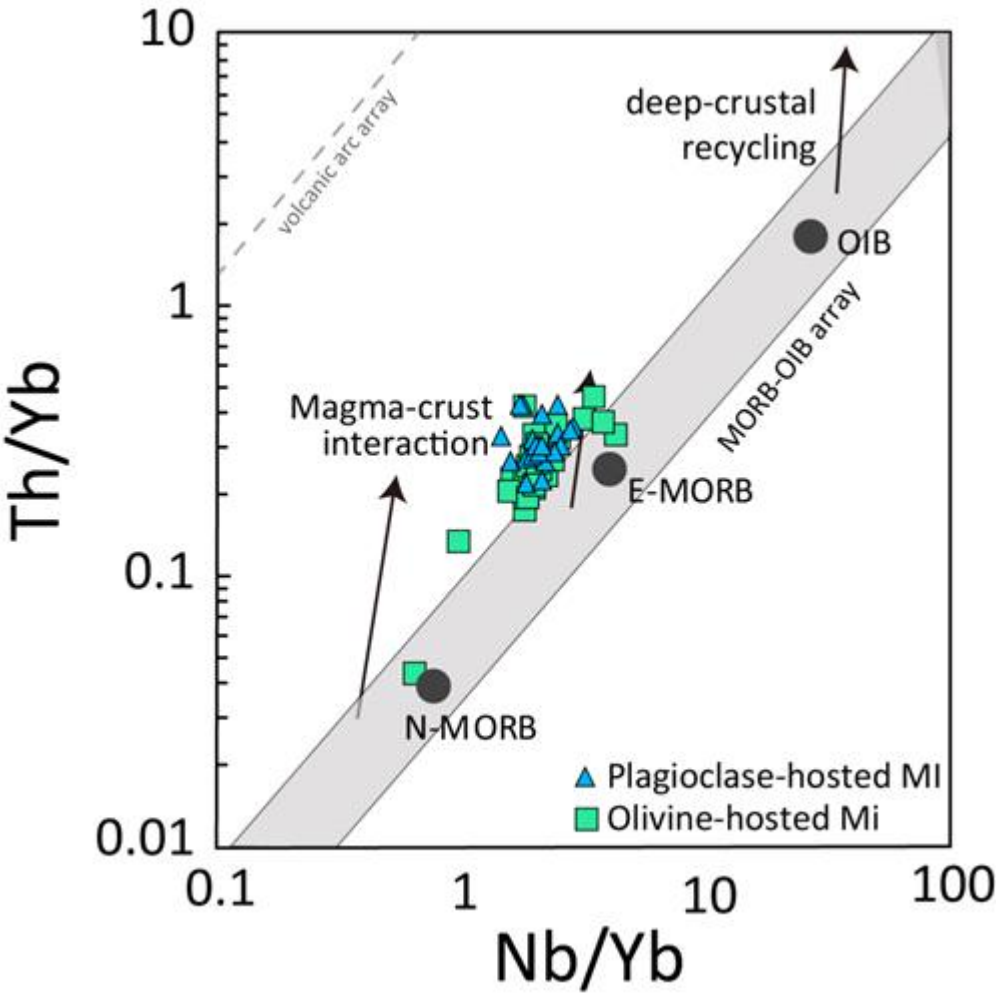

그림 21. Th/Yb와 Nb/Yb 다이어그램.

멜트 포유물의 Pb 동위원소 분석은 한국기초과학지원연구원 오창센터에 설치된 SHRIMP(Sensitive High Resolution Ion Microprobe)을 이용하였다. Primary ion($^{16}O^-$) beam은 20 keV로, Primary ion currents는 40 ~ 45 nA로 분석을 실시하였다. Ion current에 따라 빔 크기는 변화하였고, 이에 따라 빔 크기는 25um ~ 30um 이다. Mass resolution은 ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb은 대략 4000 정도였고, 가장 작은 동위원소 양을 지닌 ^{204}Pb가 2600 정도였다. 감람석 또는 사장석 내의 멜트 포유물 Pb 함량은 이전의 LA-ICP-MS로 분석한 결과 수십- 수 ppm 정도로 극히 낮았다. 외부표준물질로는 MPI-DING 글라스를 이용하려고 하였으나, 하지만 하나의 마운트에 심어서 표준물질로 삼기에는 양이 극히 작아서, 그나마 쉽게 구할 수 있는 NIST614(Pb 3-4 ppm)와 이전 탐사에서 얻었던 RC08 glass를 외부표준물질로 이용하였다.

그림 22. SHRIMP(Sensitive High Resolution Ion Microprobe) 기기 사진.

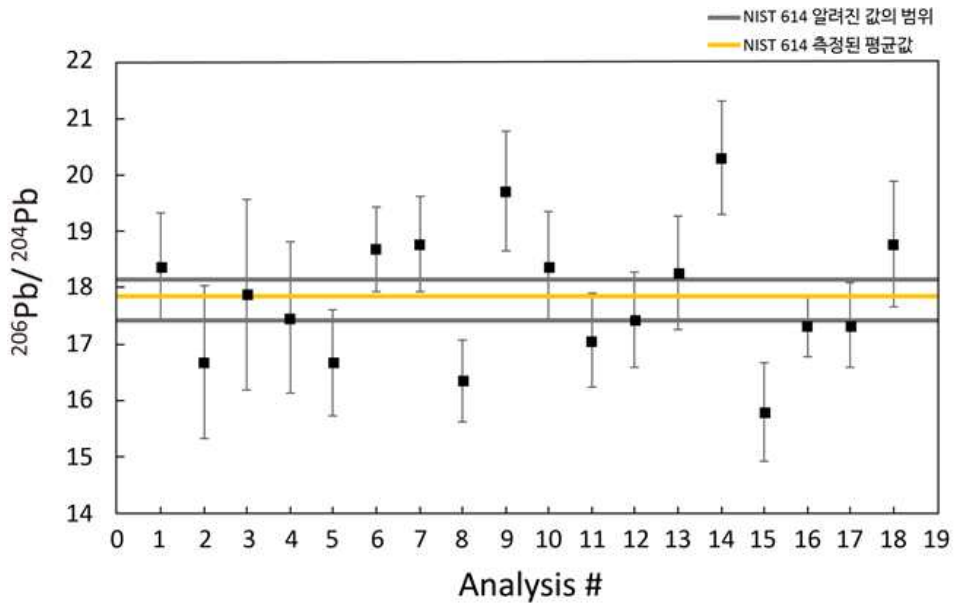

그림 23. NIST614의 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 재현성 실험. NIST614의 $^{206}Pb/^{204}Pb$을 SHRIMP로 이용하여 분석한 값을 이미 분석되어 알려진 값의 범위 안으로 들어오는 것을 확인할 수 있다.

NIST 614와 RC08 glass에 대한 재현성 실험에서는 이미 알려진 값의 범위 안에 측정한 값의 평균값이 들어오는 것을 확인하였다. 이는 표준물질이 재현성과 함께 분석에 충분히 사용 가능함을 알 수 있다.

감람석과 사장석내의 멜트 포유물 그리고 전암의 $^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ 비를 비교 했을 때, 감람석 내의 멜트 포유물의 납 동위원소가 특별히 높은 것을 확인 할 수 있다. 이는 크게 3가지의 가능성을 가지고 있다. 첫 번째는 변성퇴적암과 혼화 또는 지각 물질이 마그마에 녹아서 납 동위원소가 높았을 가능성이고, 두 번째는 열수변질을 통해 납 동위원소가 상승할 가능성, 그리고 세 번째는 재균질화 실험 시에 감람석과 멜트 포유물이 반응하여 ^{204}Pb가 보다 많이 변하게 되어서 상승할 가능성이 있다.

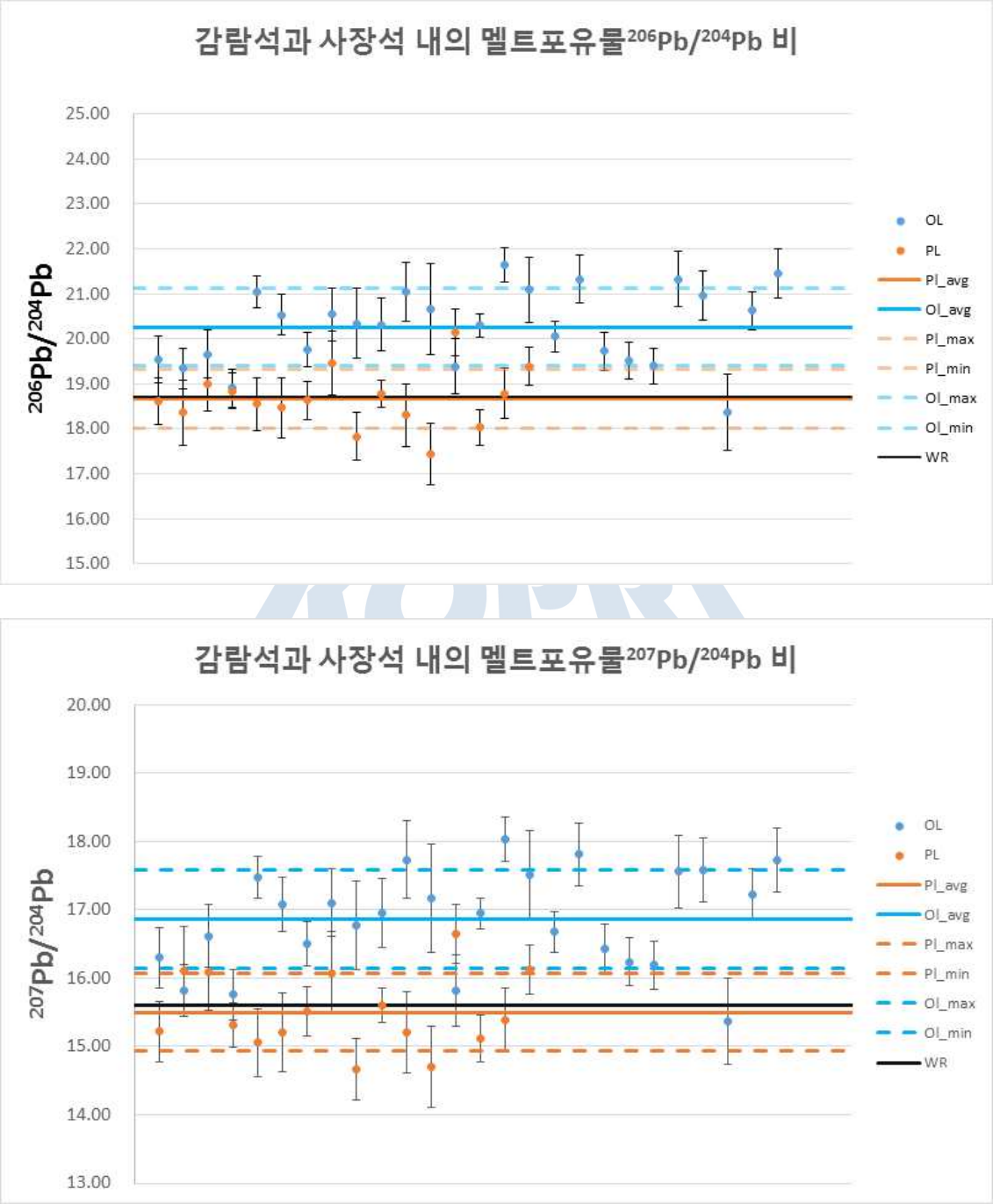

그림 24. 감람석과 사장석내의 멜트 포유물 그리고 전암의 $^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$ 비를 비교한 그림.

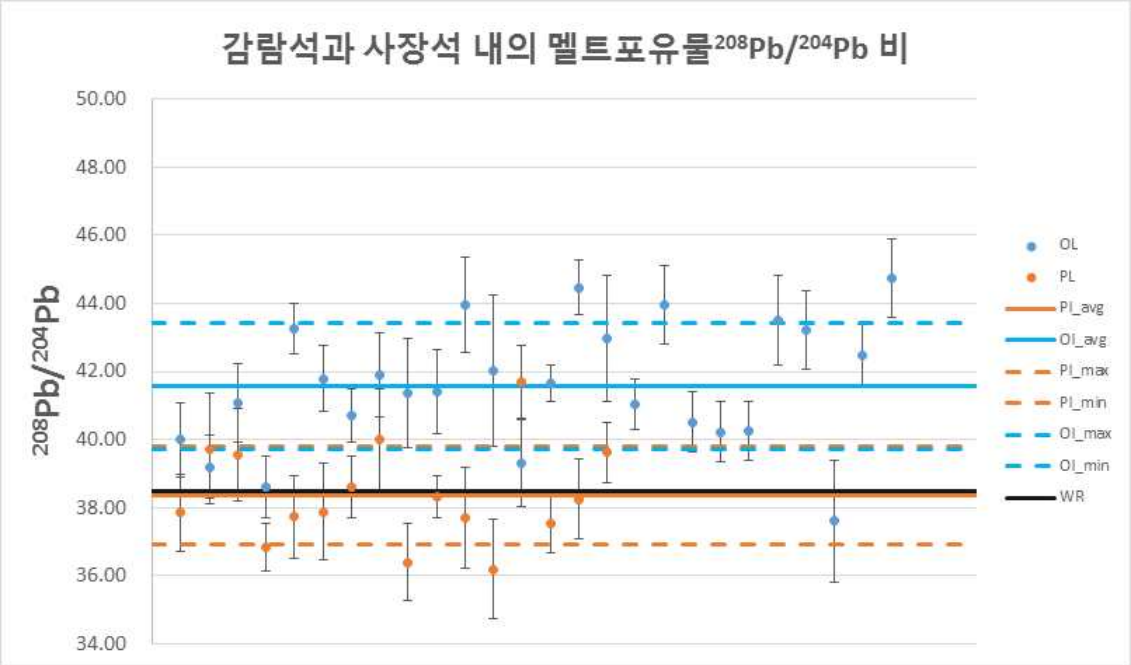

그림 24. (계속)

$^{207}Pb/^{206}Pb$와 $^{208}Pb/^{206}Pb$ 분석 결과를 도시한 결과 MORB(mid-ocean ridge basalt)와 EMII(enriched mantle 2) 사이에 나타나는 것으로 확인된다. 그리고 대부분 MORB에 가까운 것으로 나타나지만, 일부는 EMII에 가까운 조성을 보인다. EMII는 재용융된 해양지각 또는 퇴적물이 마그마에 혼합된 특징을 나타나는데 이와 비슷하게 디셉션섬 근원 마그마 또한 섭입된 해양지각 또는 퇴적물의 영향을 받은 것으로 생각된다. 감람석 내의 멜트 포유물보다 사장석내의 멜트 포유물이 EMII에 많이 근접해 보이므로, 감람석보다 늦은 정출시기를 보이는 사장석 정출시기에 해양지각 또는 퇴적물의 영향이 있었을 것으로 보인다.

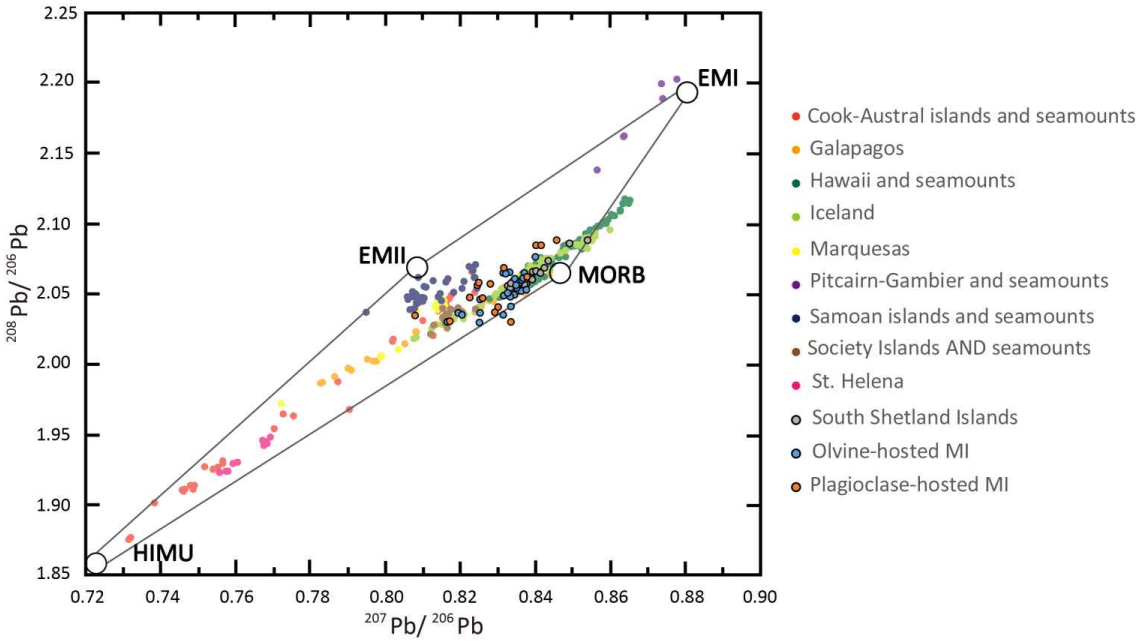

그림 25. $^{207}Pb/^{206}Pb$와 $^{208}Pb/^{206}Pb$ 비교하여 여러 지역의 암석과 남셰틀랜드 암석 그리고 디셉션섬의 감람석-사장석 내의 멜트 포유물을 비교한 그림. 디셉션섬의 감람석-사장석 내의 멜트 포유물은 남셰틀랜드 섬들과 비교하였을 때, 보다 EMII에 많이 도시됨.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

멜트 포유물 균질화는 LINKAM TS1400XY을 이용하여 실시하였으며, 화산암 사장석 내의 멜트 포유물은 균질화에 성공하였다. 대부분 1200 ℃이상 그리고 1-3시간 안에서 균질화가 되었다. 균질화 되는 과정을 관찰할 수 있었으며, 균질화되는 조건을 알 수 있었다. 그러나 감람석 내의 멜트 포유물은 균질화 과정에서 산화되는 현상이 나타나 그 조건을 알 수 없었다. 이를 위해 아르곤 가스를 이용하여 산화-환원 환경을 조절이 가능한 furnace를 통해 감람석 멜트 포유물의 균질화를 실험하여 한 번에 많은 양의 멜트 포유물을 균질화 할 수 있게 되었다.

베른대학교와 공동연구로 기존에 불활성기체 및 할로겐 원소 분석 시 사용하는 INAA를 이용한 할로겐 원소 정량분석을 시도 중에 있다. 우리가 자체적으로 제작한 SIMS를 이용할 시에 사용하는 할로겐 원소 외부표준물질의 정확한 농도 및 RSF 값을 구할 수 있을 것으로 생각되며, 이를 이용하여 SIMS를 이용한 화산암 글라스 할로겐 원소 정량분석이 가능할 것으로 생각된다. 중국지질대학교에서 SF-ICP-MS를 이용한 할로겐 원소 분석방법이 개발되어서 공동연구로 우리가 가진 시료들의 할로겐 원소를 분석을 진행할 예정이다. 이 값과 SIMS의 값을 비교 후에 할로겐 원소의 정확한 정량화를 할 수 있을 것으로 생각한다. 그리고 우리만의 독자적인 방법으로 추후에 화산암 글라스만이 아닌 균질화된 멜트 포유물에도 적용 가능할 것으로 생각한다. 이는 멜트 포유물 및 화산암 글라스에 대한 휘발성 원소 연구에 큰 도움이 될 것이다.

EPMA를 이용한 화산암 글라스에 대한 주원소 및 휘발성 원소에 대해 보다 정확하게 하기 위하여 화산암 글라스에 대한 주원소 및 휘발성 원소에 대해 많은 연구를 진행한 미국 Tulsa 대학교에서 사용하는 화산암 글라스 스탠다드(VE32)를 얻었으며, 이에 대해 주원소 및 휘발성 원소를 분석하였다. 분석 결과는 기존의 자료와 잘 일치하여 극지연구소에서도 EPMA를 이용하여 정확한 주원소 및 휘발성 원소를 측정할 수 있다. 국내외에서도 거의 유일한 부분분석으로, 화산암 할로겐 원소 정량분석에 큰 도움이 될 것이다.

또한, 국내에서는 멜트 포유물 균질화 실험이 거의 없는 상태이므로, 국내에서 많은 멜트 포유물 분석에 큰 도움이 될 것이고, 멜트 포유물에 대한 Pb 동위원소 분석은 국내외에서도 극히 드문 분석 방법이다. 이에 따른 시행착오 등을 거쳐서 멜

트 포유물 분석 방법을 정립하고 있으므로 이는 추후 많은 연구에 도움이 될 것 이다.

KOPRI
극지연구소

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

Inert gas를 이용하여 산화-환원 상태를 유지할 수 있는 furnace를 이용한 균질화 실험을 통해 한 번의 실험으로 다량의 멜트 포유물을 균질화 할 수 있다. 이를 바탕으로 감람석과 사장석 내의 멜트 포유물 화학분석을 통하여 미량원소, 휘발성 원소 그리고 납 동위원소 등의 거동을 비교한다면 마그마 분화과정 상에서의 변화 및 성인을 알아낼 수 있을 것이다. 균질화된 멜트 포유물은 글라스로 화산암 글라스와 물성이 거의 유사하므로, 개발 중인 휘발성 원소 정량분석법에 적용이 가능하여 화산암 글라스와 멜트 포유물 휘발성 원소 거동 등의 연구가 가능하다. 화산암 글라스 휘발성 원소 분석에 있어서 바닷물에 의한 변질과정에 대해 멜트 포유물도 함께 분석함에 따라 바닷물에서 휘발성원소 유입 여부를 확인 할 수 있을 것으로 기대한다.

디셉션 섬은 제 4기에 생성된 배호분지에 생성된 섬으로 이 주변은 동해와 매우 유사한 지질학적 특성을 지닐 것으로 생각된다. 그리고 배호분지 화산암은 지각부분이 확장하여 맨틀 부분이 지표면 근처로 상승하는 중앙해령과 비슷한 특성을 지니고 있다. 다만, 배호분지는 섭입대에서 유입되는 바닷물 또는 해양퇴적물에 많은 할로겐 원소 또는 휘발성 원소 등이 유입될 가능성이 있다. 이에 대한 성인을 알아보기 위한 멜트 포유물 내의 휘발성 원소 농도 분석은 매우 중요한 연구이다. 마그마 내의 포함된 휘발성 원소들은 화산의 폭발성을 좌우한다. 이번에 멜트 포유물 균질화 실험 중인 시료를 채취한 디셉션 섬은 배호분지에서 만들어진 화산으로 제 4기에 칼데라를 형성하고 해수가 들어와 지금과 같은 호수 같은 형태로써 활화산으로 백두산과도 매우 유사하다.

할로겐 원소를 포함한 휘발성 원소들은 마그마 내에서 배출되는 열수 내에서 금속광상을 형성하는 데 매우 중요한 역할을 하는 원소들이다. 우리가 마그마 내의 황과 할로겐 원소의 거동을 연구한다면, 다양한 광물자원의 형성 기작을 밝히는데도 중요한 역할을 하리라 기대된다. 마그마 내의 휘발성 원소를 정량화하는 것은 유사한 광상들의 세부적인 성인차이를 식별하고 탐사과정에 적용할 수 있는 중요한 분석 도구가 될 수 있을 것이다.

베른대학교에서 INAA을 이용한 할로겐 원소 정량분석 방법과 중국지질대학교 SF-ICP-MS를 이용한 정량분석 방법을 SIMS 분석과 비교하여 정확한 RSF 값을

구할 수 있으므로 할로겐 원소 정량분석법의 정립이 가능하다. SIMS를 이용한 할로겐 원소(Cl, Br, I) 분석 방법은 전 세계적으로 아직 정립되지 않은 방법이다. 우리만의 독자적인 할로겐 원소 정량 분석 방법을 정립한다면 다양한 지역의 현무암질 글라스를 이용한 할로겐 원소 정량 분석을 통해 원시마그마 성인 규명 및 맨틀 재순환에 대한 연구에 많은 도움이 될 것이다.

KOPRI
극지연구소

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

할로겐 원소 분석 방법은 해외에서 많이 개발되고 있다. 이전에는 INAA를 이용한 분석방법을 많이 이용하였다면, 최근에는 중국지질대학교에서 SF-ICP-MS를 이용한 분석 방법도 개발되었다. 전처리 과정 중 클린랩에서 NH3HF을 이용하여 열과 압력을 이용한 digestion를 하여 할로겐 원소들을 포집 후 이를 SF-ICP-MS를 이용하여 분석하는 방법이다.

멜트 포유물의 Pb 동위원소 분석 방법은 SHRIMP가 아닌 SIMS-1280 또는 SIMS-1380을 많이 사용하였으며, 20 keV의 primary ion($^{16}O^-$) beam 및 40 nA의 primary ion currents를 분석 조건으로 적용하였다. 대부분 감람석 결정 내의 멜트 포유물을 분석하였고, 몇몇은 이와 함께 할로겐 F, Cl을 분석하여 이와 상관관계를 나타낸 연구도 있다.

KOPRI
극지연구소

제 7 장 참고 문헌

Anderson, A.T., 1974. Evidence for a picritic, volatile-rich magma beneath Mt. Shasta, California. J. Petrol. 15, 243-267.

Barker, P.F., 1982. the cenozoic subduction history of the pacific margin of the antarctic peninsula: ridge crest- trench interactions. J. Geol. Soc. London, 139, 787-802.

Barker, P.F., Dalziel, I.W.D., Storey, B.C., 1991. Tectonic development of the Scotia arc region. In: TINGEY, R.J. (ed.), Antarctic Geology. Oxford University Press, 215-248.

Bow C. S., Geist D. J., 1992. Geology and petrology of Floreana Island, Galapagos Archipelago, Ecuador (with additional personal communications). J. Volcanol. Geotherm. Res. 52, 83-105.

Breddam K., 2002. Kistufell: Primitive melt from iceland mantle plume. J. Petrol. 43, 345-373.

Chaffey D. J., Cliff R. A., Wilson M., 1989. Characterization of the St. Helena magma source. Spec. Publ. Geol. Soc. London 42, 257-276.

Chauvel C., McDonough W. F., Guille G., Maury R. C., Duncan R. A., 1997. Contrasting old and young volcanism in Rurutu Island, Austral Chain. Chem. Geol. 139, 125-143.

Cheng Q. C., Macdougall J. D., Lugmair G. W., 1993. Geochemical studies of Tahiti, Teahitia and Mehetia, Society Island Chain. J. Volcanol. Geotherm. Res. 55, 155-184.

Clocchiatti, R., 1975. Glassy inclusions in crystals of quartz; optical, thermo-optical and chemical studies, and geological applications. Soc. Geol. Fr., Mem., New Series 54 (122), pp. 96.

KOPRI 극지연구소

Danyushevsky, L. V., Gee, M. A. M., Nisbet, E. G., Cheadle, M. J., 2002a. Olivine-hosted melt inclusions in Belingwe komatiites: implications for cooling history, parental magma composition and its H_2O content. Goldschmidt Conference Abstracts 2002. Geochimica et Cosmochimica Acta 66(S1), A168.

Danyushevsky, L. V., McNeill, A. W., Sobolev, A. V., 2002b. Experimental and petrological studies of melt inclusions in phenocrysts from mantle-derived magmas: an overview of techniques, advantages and complications. Chemical Geology 183, 5-24.

Danyushevsky, ,L. V.,Sokolov,S., Falloon,T.J., 2002c. Melt inclusions in olivine phenocrysts: using diffusive re-equilibration to determine the cooling history of a crystal, with implications for the origin of olivine-phyric volcanic rocks. Journal of Petrology 43, 1651-1671.

Danyushevsky, L. V., Perfit, M. R., Eggins, S. M., Falloon, T. J., 2003. Crustal origin for coupled 'ultra-depleted' and 'plagioclase' signatures in MORB olivine-hosted melt inclusions: evidence from the Siqueiros Transform Fault, East Pacific Rise. Contributions to Mineralogy and Petrology 144, 619 - 637.

Duncan R. A. and Green D. H., 1987. The genesis of refractory melts in the formation of oceanic crust. Contrib. Miner. Petrol. 96, 326-342.

Eisele J., Sharma M., Galer S. J. G., Blichert-Toft J., Devey C. W., Hofmann A. W., 2002. The role of sediment recycling in EM-1 inferred from Os, Pb, Hf, Nd, Sr isotope and trace element systematics of the Pitcairn hotspot. Earth Planet. Sci. Lett. 196, 197-212.

Fitton J. G., Saunders A. D., Kempton P. D., Hardarson B. S., 2003. Does depleted mantle form an intrinsic part of the Iceland plume?. Geochemistry Geophysics Geosystems 4.

Graham D. W., Humphris S. E., Jenkins W. J., Kurz M. D., 1992. Helium isotope geochemistry of some volcanic rocks from Saint Helena. Earth Planet. Sci. Lett. 110, 121-131.

KOPRI 극지연구소

Halter, W., Pettke, T. & Heinrich, C.A., 2004. Laser - ablation ICP - MS analysis of silicate and sulfide melt inclusions in an andesitic complex I: analytical approach and data evaluation. Contrib. Min. Petrol. 147 (4), 385 - 396.

Hart S. R., Coetzee M. S., Workman R. K., Blusztajn J., Johnson K. T. M., Sinton J. M., Steinberger B., Hawkins J. W. JR., 2004. Genesis of the western Samoa seamount province: age, geochemical fingerprint and tectonics, Earth Planet. Sci. Lett. 227, 37-56.

Hemond C., Devey C. W., Chauvel C., 1994. Source compositions and melting processes in the Society and Austral plumes (south pacific ocean); element and isotope (Sr, Nd, Pb, Th) geochemistry. Chem. Geol. 115, 7-45.

Keller, R.A., Fisk, M.R., Smellie, J.L., Strelin, J.A., Lawver, L.A., 2002. Geochemistry of back arc basin volcanism in Bransfield Strait, Antarctica: subducted contributions and along-axis variations. Journal of Geophysical Research 107, B8.

Langmuir C. H., Klein E. M., Plank T., 1992. Mantle flow and melt generation at mid-ocean ridges. Geophys. Monogr. Ser. 71, 183 - 280.

Lassiter J. C., Blichert-TOFT J., Hauri e. H., Barsczus H. G., 2004. Isotope and trace element variations in lavas from Raivavae and Rapa, Cook-Austral Islands: Constraints on the nature of HIMU- and EM-mantle and the origin of mid-plate volcanism in French Polynesia, Chem. Geol. 202, 115-138.

Le Bas, Michael J., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. Journal of Petrology 27 (3), 745-750.

Machado, A., Lima, E.F., Chemale, J.F., Morata, D., Oteiza, O., Almeida, D.P.M., Figueiredo, A.M.G., Alexandre, F.M. & Urrutia, J.L. 2005. Geochemistry constraints of Mesozoic-Cenozoic calc - alkaline magmatism in the South Shetland Arc, Antarctica. Journal of South American Earth Sciences, 18, 407-425.

McBirney A. R., Thompson P. M. E., Kempton P. D., White R. V., Kerr A. C., Tarney J., Saunders A. D., Fitton J. G., 2003. Hf-Nd isotope constraints on

KOPRI 극지연구소

the origin of the cretaceous caribbean plateau and its relationship to the Galapagos plume. Earth Planet. Sci. Lett. 217, 59-75.

Mukhopadhyay S., Lassiter J. C., Farley K. A., Bogue S. W., 2003. Geochemistry of Kauai shield-stage lavas: Implications for the chemical evolution of the Hawaiian plume Geochemistry Geophysics Geosystems 4.

Norman M. D., Garcia M. O., 1999. Primitive magmas and source characteristics of the Hawaiian plume: Petrology and geochemistry of shield picrites. Earth Planet. Sci. Lett. 168, 27-44.

O'Hara M. J., 1968. Are ocean floor basalt primary magma?. Nature 220, 683 - 686.

Roedder, E., 1979. Origin and significance of magmatic inclusions. Bull. Mineral. 102, 487 - 510.

Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. Rev. Mineral. 14, pp. 620.

Rubin K. H., Sinton J. M., Maclennan J. and Hellebrand E., 2009. Magmatic filtering of mantle compositions at mid-ocean-ridge volcanoes. Nat. Geosci. 2, 321 - 328.

Shorttle O., 2015, Geochemical variability in MORB controlled byconcurrent mixing and crystallisation. Earth Planet. Sci. Lett. 424, 1 - 14.

Sobolev, V.S., Kostyuk, V.P. (Eds.), 1975. Magmatic Crystallization Based on a Study of Melt Inclusions. Nauka, Novosibirsk, pp. 184.

Sobolev, A.V., 1983. Origin of Siberian Meimechites in relation to the general problem of ultramafic magma. PhD Thesis, Vernadsky Institute of Geochemistry, Moscow, USSR, pp. 300 (in Russian).

Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Geol. Soc. Lond., Spec. Publ. 42, 313 - 345.

KOPRI 극지연구소

Woodhead J. D., Devey C. W., 1993. Geochemistry of the Pitcairn seamounts: I. Source character and temporal trends Earth Planet. Sci. Lett. 116, 81-99.

Workman R. K., Hart S. R., Jackson M. G., Regelous M., Farley K. A., Blusztajn J., Kurz M. D., STAUDIGEL H., 2004. Recycled metasomatized lithosphere as the origin of the Enriched Mantle II (EM2) end-member: Evidence from the Samoan volcanic chain. Geochemistry Geophysics Geosystems 5.

KOPRI
극지연구소

주 의

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

KOPRI 극지연구소