

TSPE16050-016-4

남극 중앙해령 인근 해저산 및 남극 내 주요  
화산의 휘발성 원소 지구화학

Volatile element geochemistry in the antarctic MOR  
and seamounts and antarctic volcanoes



인하대학교

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극 열개구조 진화 연구: Adare Trough, 남극 중앙해령 인근의 지구조 및 화산활동 성인규명” 과제의 위탁연구 “남극 중앙해령 인근 해저산 및 남극 내 주요 화산의 휘발성 원소 지구화학” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2017. 1. 31

(본과제) 총괄연구책임자	:	홍 종 국
위탁연구기관명	:	인 하 대 학 교
위탁연구책임자	:	서 정 훈
위탁참여연구원	:	이 준 희
	:	“ 김 찬 수
	:	“ 이 동 하



## 요 약 문

# 남극 중앙해령 인근 해저산 및 남극 내 주요 화산의 휘발성 원소 지구화학

중앙해령 현무암 글라스의 할로겐원소 연구는 중앙해령을 생성하는 마그마 성인 규명과 맨틀재순환에 대한 연구에 중요한 역할을 한다. 기존의 할로겐원소 분석은 INAA를 이용하여 비활성기체와 할로겐원소를 공동으로 분석하는 방법으로 글라스 전체를 이용하였다. 중앙해령 현무암 글라스에는 매우 작은 사장석 결정이 있을 가능성이 있으므로 부분분석이 가능한 분석방법이 필요하다.

정확한 분석을 위해 글라스 결정의 부분분석이 가능한 SIMS 분석을 이용하여 중앙해령 현무암질 글라스의 할로겐 원소 정량화를 시도하였다. 작년 SIMS 분석 시 마운트가 파괴되는 현상이 나타났으며, 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 마운트의 z축 높이를 일정하게 맞추었으며 추가적으로 SIMS 내부의 높은 진공도를 만족하기 위하여 카본링을 이용하여 예폭시의 양을 줄였다.

제작한 마운트를 SEM을 이용하여 BSE image를 획득하였다. 이를 이용하여 SIMS 할로겐원소 분석시 미세한 사장석 결정을 피해서 정량분석을 시도하였다. 이미 할로겐원소 농도를 알고 있는 Mark Kendrick 시료를 이용하여 이전 연구에서 제작한 외부표준물질 KOIH-1을 할로겐원소 정량화를 시도하였다. SIMS 분석 조건은 15 keV, 20 nA이며 150\*150  $\mu\text{m}$  정사각형 빔이다. SIMS분석을 통해 획득한 intensity를 이용하여 각 할로겐원소의 RSF 값을 구하였다. Mark Kendrick 시료의 여러 가지 RSF 값 중 가장 공통적으로 나타난 2PD43 시료의 값을 이용하여 KOIH-1의 할로겐 원소를 정량화 하였다.

똑같은 조건으로 남극 중앙해령 현무암질 글라스 할로겐원소를 KOIH-1의 RSF값을 이용하여 다시 정량화 하였다. SIMS 분석의 RSF 값을 검증하기 위하여 베른대학교와 INAA를 이용한 할로겐원소 공동연구를 진행 중에 있다.

또한 마그마성인을 알 수 있는 멜트포유물 연구를 위하여 균질화 실험을 시도 중에 있다. 감람석 결정만을 PICKING 하여 double polished thick section을 만들었다. TS1400XY를 이용하여 멜트포유물 균질화 실험을 진행 중에 있다.

# S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

## **Volatile element geochemistry in the antarctic MOR and seamounts and antarctic volcanoes**

Halogen elements in basaltic glasses from MOR is important to study magma source and mantle convection. Previous halogens analysis is used to INAA that simultaneously analyzes noble gas and halogens. Basaltic glasses from MOR are possible to include small plagioclase so we need to find method of partial analysis.

SIMS is possible to analyze partial analysis of basaltic glasses and we try to quantization of halogens in basaltic glasses from MOR. Epoxy mount is destroyed by cesium beam from SIMS last year. To solve this problem, we make same height mounts and use carbon ring for the purpose of reducing epoxy volume.

BSE images of mounts are obtained by SEM. Quantitative analysis of halogens by SIMS is attempted by avoiding fine plagioclase. We try to analyze halogens in KOIH-1 to use Mark Kendrick's basaltic glasses. SIMS conditions is 150\*150  $\mu\text{m}$  square Cs+ beam and 15 KeV and 20 nA. RSF of halogens is calculated by using intensity of SIMS. 2PD43 have in common RSF in Mark Kendrick's samples so we try to study quantitative analysis of halogens in KOIH-1 by using RSF of 2PD43.

Halogens in basalt glasses from AAR are analyzed by SIMS by using RSF of KOIH-1 under the same condition. To verify RSF of SIMS, we are using by INAA for quantitative analysis of halogens with Bern university.

We are trying to re-homogenization for melt inclusion which indicate magma source. We are only picked olivine crystal and made double polished thick section. Experiment for Re-homogenization of melt inclusion is in progress using by TS1400XY.

# 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 참고문헌



## 제 1 장 서론

중양해령 현무암 글라스는 해양지각 아래의 마그마가 차가운 바닷물과 만나 급냉하여 광물의 결정을 만들지 못하므로 글라스 형태로 생성된다. 생성된 글라스는 중양해령 아래의 맨틀 기원의 화학적 특성을 가진다. 이를 분석함에 따라 중양해령 마그마 성인 규명과 맨틀재순환에 대하여 연구가 가능하다. 맨틀 재순환을 연구하기 위하여 많은 사람들이 noble gas와 같은 기체 상태의 원소에 대한 연구를 많이 진행하고 있으나 많은 부분이 의문점으로 남고 있다. 이를 보완하기 위하여 noble gas와 같이 연구할 수 있는 할로젠원소 분석에 많은 사람들이 기대를 가지고 있다.

할로젠 원소는 바닷물에 많으므로 이와 관련된 해양지각과 해양퇴적물에 많은 양을 가지고 있다. 그러므로 해양지각 섭입에 따라 만들어진 arc magma에 대해서 할로젠 원소에 대한 분석이 이루어졌다. 그 중 할로젠원소 지구 내부 순환에 대한 연구가 이루어졌다. 특히 F, Cl은 높은 농도를 가지고 있어 이전부터 많은 연구가 진행되었다. 하지만 할로젠 원소 중 무거운 원소인 Br, I은 Cl과 F에 비하여 화성암에서 매우 극미량으로 존재한다 (Pyle and Matter 2009). 하지만 최근 연구에서는 Br 경우는 높은 압력 상황에서는 NaOH와 NaBr 중에서 NaBr이 더욱 안정적이므로 맨틀재순환이 가능하다는 점을 밝혔다 (Cochain 2015). 하지만 할로젠원소는 -1가 족

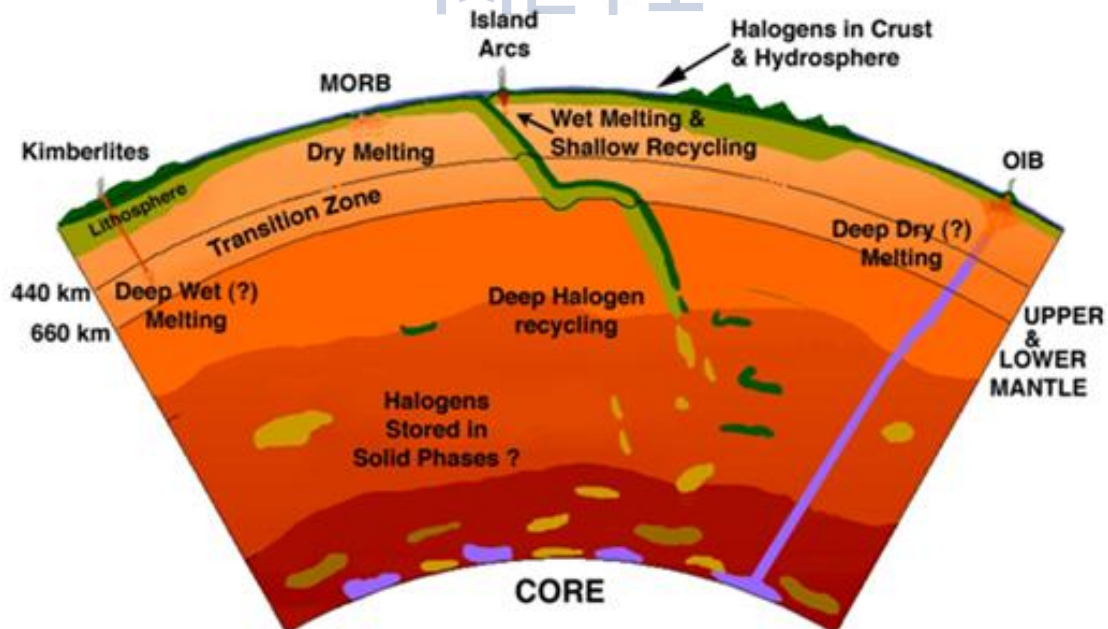


그림 1. 해양판의 해양판의 섭입과 맨틀 플룸의 상승에 따른 맨틀의 순환도. (S. Kohn, unpublished image)

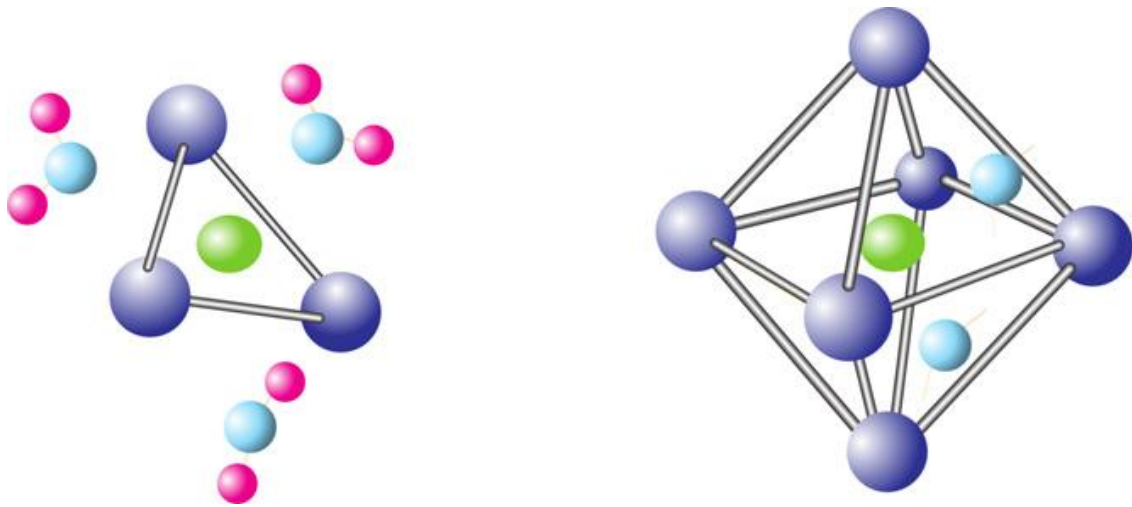


그림 2. 고압의 규산염 마그마 안에서 Br 원소 분화 모식도. EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure) 실험에서 나타난 실험 결과로써 낮은 압력의  $Br[Na_x(H_2O)_y]$  복합물은 (기존의 물질) 이  $\geq 2$  GPa 조건에서 Br 원소 근처에 산소 이온 1-2개와 Na 이온이 모이는 것으로 나타낸 것으로 고압상황에서 Na-Br 원소결합이 Na-H보다 안전하다는 것을 나타낸다. 각 원소의 색깔은 다음과 같다: Br (녹색), Na (보라색), O (하늘색) and H (분홍색) (Cochain 2015).

으로 매우 큰 반응성을 가지고 있고 대부분의 현무암에서는 극미량으로 존재함으로 분석하기가 매우 어렵다.

많은 연구자들이 할로젠 원소의 극미량을 측정하였으며, noble gas와 같이 분석이 가능한 INAA (Instrumental Neutron Activation Analysis) 를 이용하여 정량분석을 실시하였다. 하지만 이 방법은 채취한 현무암질 글라스를 파쇄하여 파우더를 제작하여 분석하는 방법이다. 이는 비교적 균질하다고 생각하는 글라스에도 매우 작은 사장석 반정이 있을 수 있으므로 균질성에 대한 오류가 있을 수가 있다. 그러므로 부분분석이 가능하면서 극미량을 측정할 수 있는 SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) 분석 방법을 이용하는 것이 타당하다고 생각한다.

우리는 2011년 중앙해령 탐사에서 채취한 현무암질 글라스를 이용하여 SIMS 분석에 알맞은 mount를 제작을 시도하였으며, 작년 연구에서 외부표준물질로 제작한 KOIH-1을 같은 마운트에 심었다. 그리고 다른 마운트에는 이미 알려진 할로젠 원소 함량이 있는 다양한 지역의 현무암질 글라스 (Mid Ocean Ridge Basalt, Oceanic Island Basalt, Back Arc Basin Basalt) 를 호주타스마니아 대학의 Mark Kendrick 교수에게 구하여 KOIH-1에 대한 할로젠 원소 정량분석을 시도하였다. 이는 KOIH-1에 대한 할로젠 원소의 정확한 농도를 구하면, 추후 연구에서는 제작한 KOIH-1만을 이용한 분석이 가능하기 때문에 다른 지역의 글라스들을 쉽게 분석이



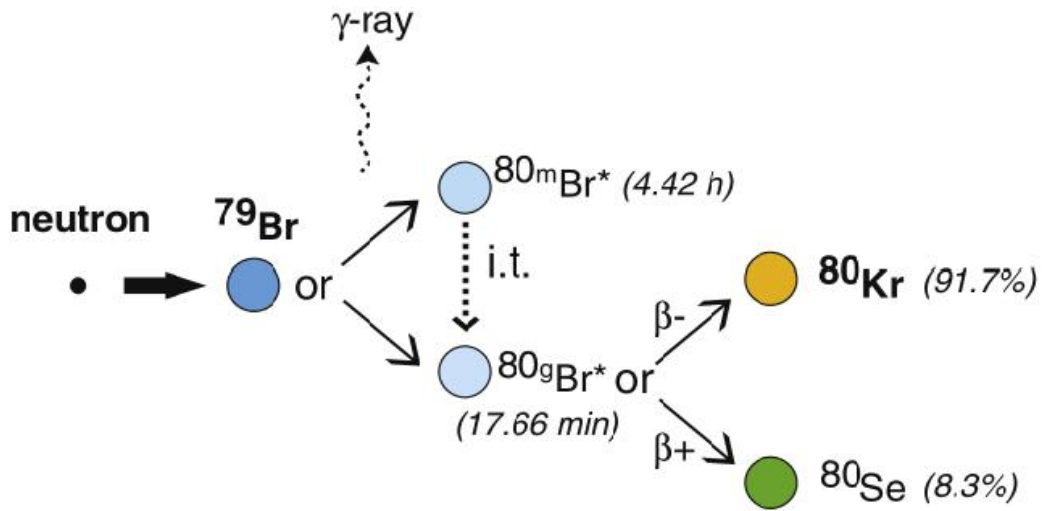


그림 3. 중성자 조사를 이용한  $^{79}\text{Br}$  붕괴 모식도.  $^{79}\text{Br}$ 은 동시에  $^{80m}\text{Br}^*$  or  $^{80g}\text{Br}^*$ 로 활성화가 된다 ( $m = \text{metastable state}$  and  $g = \text{ground state}$ ).  $^{80m}\text{Br}$ 은 이성핵 전이로 통해  $^{80g}\text{Br}$ 로 붕괴한다. 이 때  $^{80g}\text{Br}$ 은  $^{80}\text{Se}$  (8.3%) or  $^{80}\text{Kr}$  (91.7%)로 붕괴 된다. 이 원리를 이용해 INAA 실험방법에서 Kr과 Br을 동시에 분석이 가능하다 (Lorraine 2016).

가능하다. 정확한 KOIH-1의 할로젠원소 농도를 알기 위해서 베른대학교와 공동연구로 INAA를 이용한 할로젠원소에 대한 정량분석도 진행하였다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

국내에서 화성암의 할로겐 원소 연구는 미약하지만 국외에서는 많은 연구자들이 관심을 가지고 분석에 있다. 최근 해외 연구자들은 중앙해령 현무암질 글라스에 할로겐 원소 농도에 있어서 가장 큰 변수인 할로겐원소 농도가 높은 해수에 의한 변질에 대한 연구도 진행 중에 있으며, INAA와 SIMS를 같이 병행하여 정량 분석을 하고 있다. 그리고 반응성이 높은 할로겐 원소가 유체와 마그마 사이에서 유동에 대한 연구 또는 특정광물에 할로겐원소가 농집하는 이유에 대한 연구 등이 이루어지고 있다.

화성암의 무거운 할로겐 원소인 Br, I 분석은 국내외적으로 매우 미비하다. SIMS를 이용한 할로겐원소 분석은 F, Cl만 분석이 되었으며, Br, I의 경우는 분석한 경우가 전무하다. 그 이유는 화성암에서 Br, I의 함량은 매우 미량으로 존재하기 때문이다. 국외에서는 불활성 기체 분석 방법인 INAA를 이용하여 할로겐 원소 정량분석을 하고 있다. 위 분석 방법을 이용하여 맨틀재순환에 대해 연구가 가능한 불활성기체연구와 할로겐원소 연구를 공동으로 이루어지고 있으므로 매우 유용한 방법이다. 하지만 위 방법은 1개의 샘플 모두를 사용하여 분석하는 방법으로 현무암질 글라스 경우에는 미세한 결정 부분까지도 포함하는 것으로 이에 대한 오류도 생각을 해봐야 한다. 그러므로 SIMS를 이용하여 우리가 원하는 균질한 현무암질 글라스 부분만을 선택하여 분석할 수 있으므로 분석의 정확성에 있어서 더 좋은 분석방법으로 생각한다.

작년에는 SIMS 분석 도중에 있어서 마운트가 파괴되는 현상이 있었다. 이번년도 분석은 그때의 잘못된 점인 마운트 평형상태를 더욱 보완하였다. 기존의 연구와 같이 부산 기초과학지원연구원에 설치된 IMS-6F는 Cs<sup>+</sup> 빔을 이용하였다. 분석원소는 F, Cl, Br, I, Si이다. Mg 원소를 내부표준물질로 이용하고 싶었으나 Cs<sup>+</sup> 빔의 특성에 의해 Si를 내부표준물질로 정하였다. 각 할로겐원소에 대한 RSF (Relative Sensitivity Factor) 를 Mark Kendrick의 시료를 이용하여 구하였고 RSF를 이용하여 각 할로겐원소에 대한 농도를 구하였다. 이를 2011년 남극중앙해령 탐사에서 채취한 현무암질 글라스를 같이 분석하여 농도를 구하였다. 다만, 이 과정에서 많은 RSF가 나타나 이를 정확한 값을 알기 위하여, 베른대학교와 공동연구를 통해 INAA를 이용하여 할로겐 원소에 대한 정량분석을 진행 중에 있다.

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 3-1 SIMS 분석을 위한 마운트 제작

2015년 SIMS 분석에서 마운트가 파괴되는 현상이 나타났었다. 이를 수정하기 위하여 마운트에 카본링을 이용하여, 진공도에 방해되는 에폭시 양을 줄였다. 그래서 높은 진공도를 요구하는 SIMS 분석에 알맞게 제작하였다. 그리고 z축 높이를 맞추기 위하여 에폭시 마운트의 뒷면을 사포 (~6400 $\mu\text{m}$ ) 를 이용하여 연마해서 최대한 높이오차를 10 $\mu\text{m}$  내외로 맞추었다. 다만 Mark Kendrick에게 받은 시료는 한정적이므로 이전 연구에서 제작한 마운트에서 추출하여 다시 제작하였다.

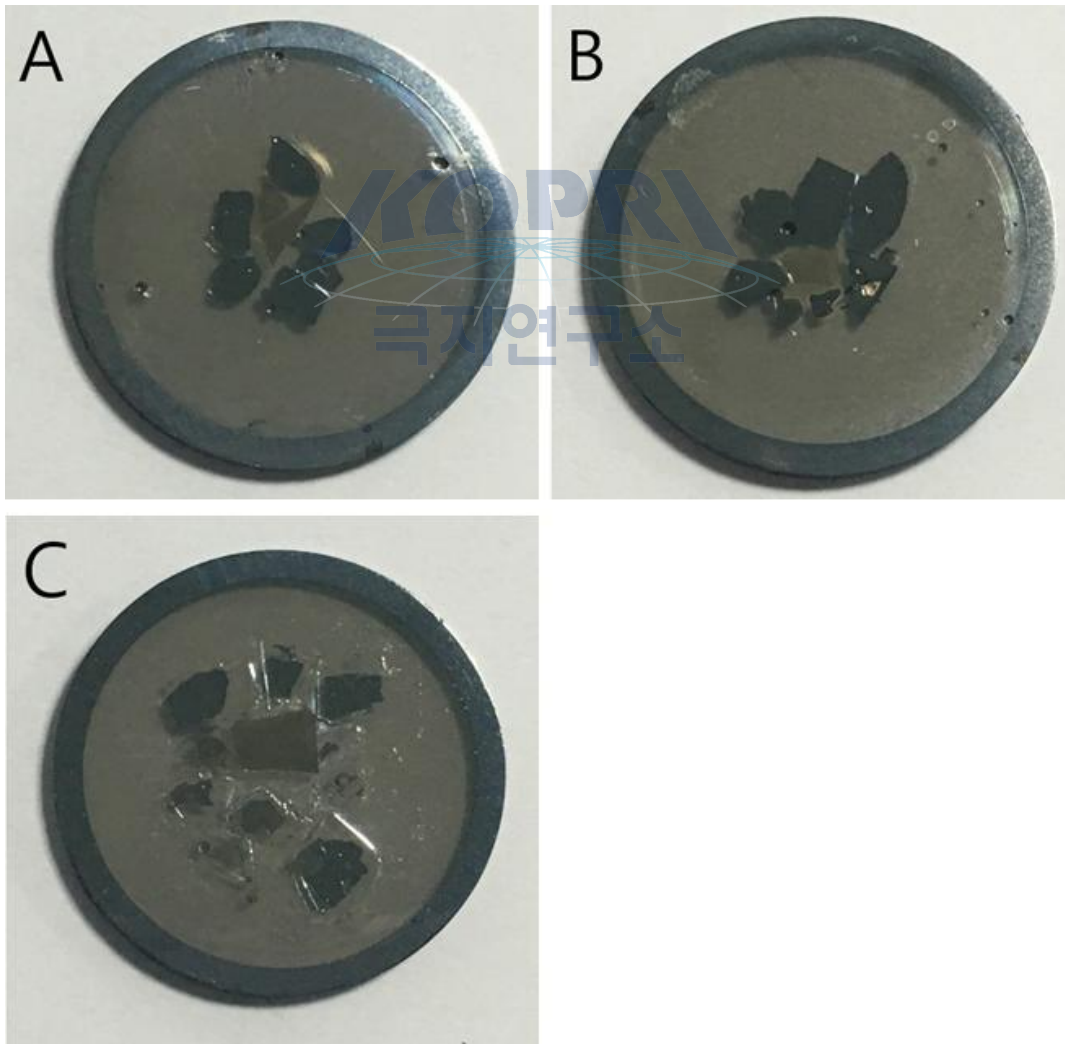


그림 4. 제작한 마운트 사진. A, B는 2011년 남극중앙해령 탐사 시 채취한 샘플을 이용한 마운트, C는 Mark Kendrick의 시료를 이용하여 제작한 마운트.

### 3-2 SIMS를 이용한 할로겐원소 분석

그림 4와 같이 마운트를 제작한 후 polishing 작업을 거쳤다. 그리고 극지연구소에서 탄소코팅기기를 이용하여 탄소코팅 후에 SEM (Scanning Electron Microscopy) 을 이용하여 각 마운트의 BSE (Backscattered Electron) image를 얻었다. BSE image를 관찰한 결과 대부분은 균질한 글라스였지만 몇몇은 매우 작은 사장석 반점이 있는 것을 확인하였다.



그림 5. EPMA 및 SEM 분석을 위해 탄소코팅을 하기 위해서 사용하는 탄소코팅기. 우리가 제작한 마운트는 전도성이 없으므로 EPMA 또는 SEM의 전자빔에 의해 charge 현상이 나타나므로 이를 방지하기 위하여 탄소코팅을 반드시 해야 한다.

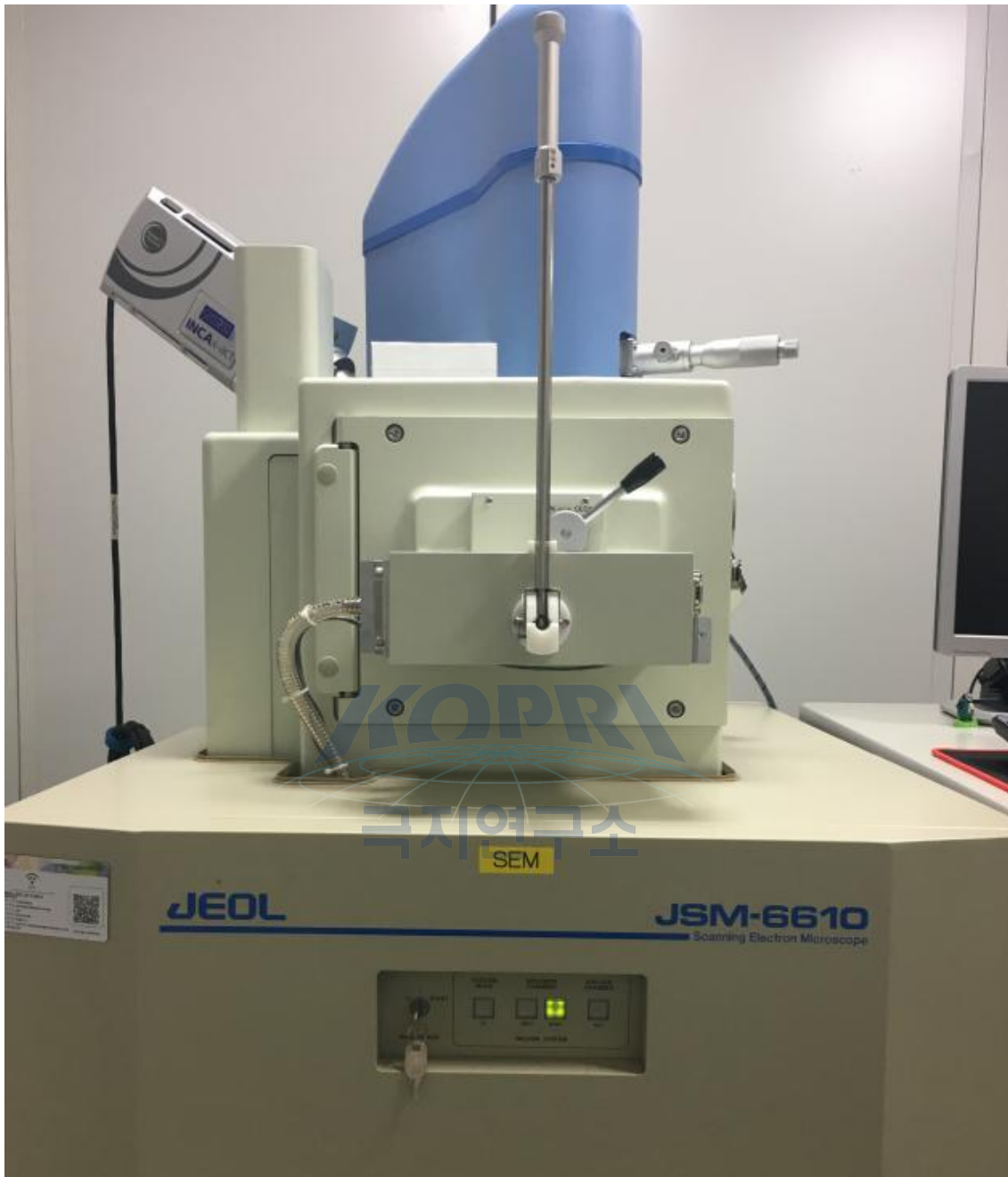


그림 6. 각 마운트의 BSE image를 얻기 위해 사용한 극지연구소가 보유한 JEOL-JSM6610 주사전자현미경(SEM)을 사용함.

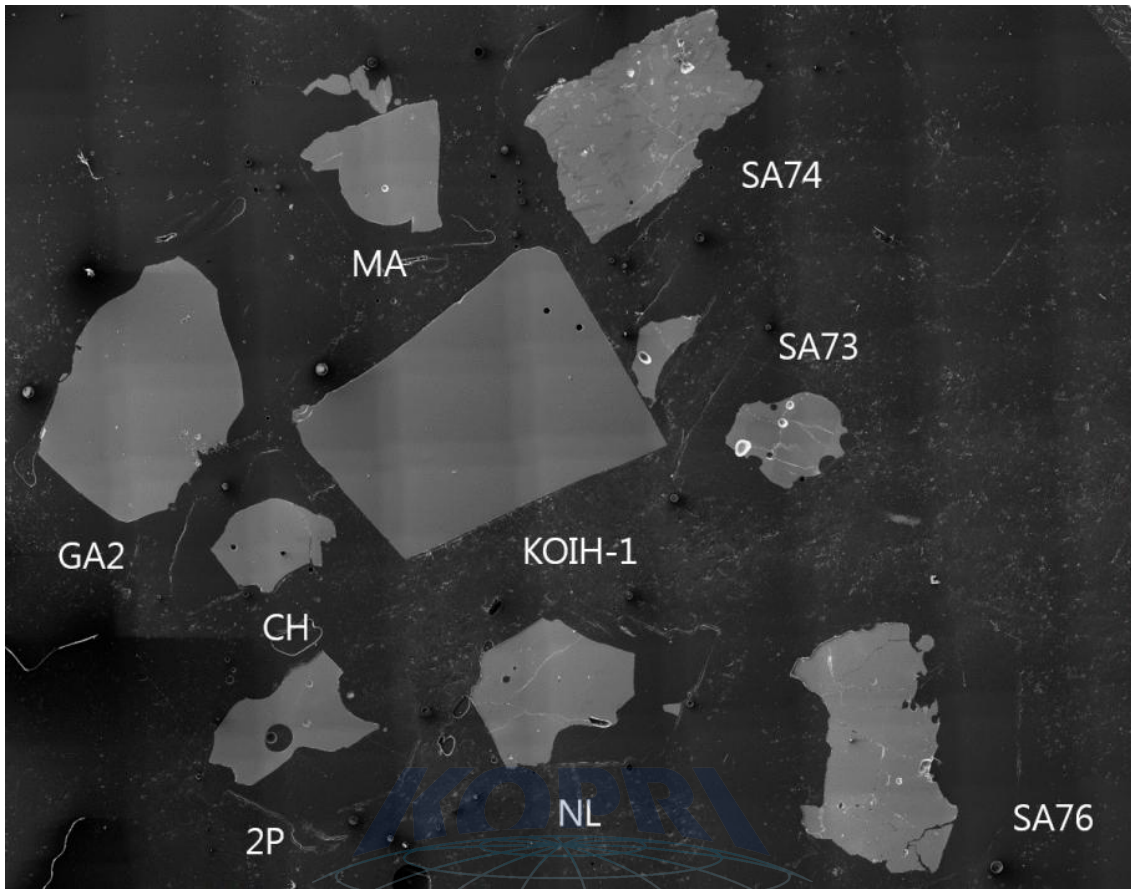


그림 7. Mark Kendrick 시료의 BSE image 사진. 대부분의 결정은 균질해 보이나 SA74 시료는 매우 작은 사장석 결정이 있는 것을 확인되었다. 이를 피해서 SIMS 할로겐 원소 정량분석을 시도하였다.

SIMS 분석 시에 이 결정 부분들을 피해서 정량분석을 시도하였다. SIMS 분석 시 I을 제외한 원소는 intensity로는 어느 정도 있는 것을 확인 할 수 있었으며, I은 net intensity가 매우 낮게 나타나서 그 농도의 값은 수 ppb로 예상된다. SIMS 분석 조건은 15 keV, 20 nA이며 150\*150  $\mu\text{m}$ 으로 작년에 실시하였던 조건과 동일하게 맞추었다. 이번에는 z축을 맞추는 전처리과정을 통해서 마운트가 파괴되는 현상은 나타나지 않았다. 따라서 모든 마운트를 정량분석을 할 수 있었다.



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

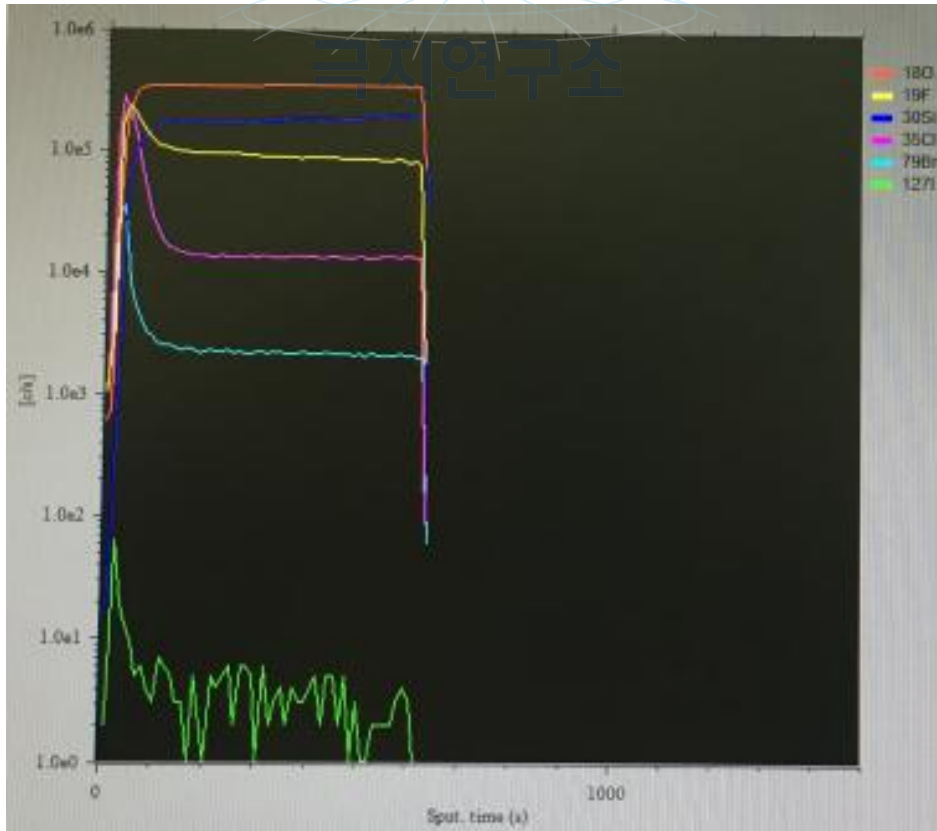


그림 9. SIMS 분석 시에 나타나는 각 원소의 intensity.



그림 10. 극지연구소가 보유한 FE-EPMA (JEOL JXA-8530F). 위 기기를 이용하여 현무암질 글라스의 주원소를 분석하였다.



표 1. EPMA를 이용하여 얻어진 주원소 분석 결과.

	Na <sub>2</sub> O	MgO	F	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	FeO	MnO	Total			
NL 1	2.50	8.72	0.00	47.78	16.26	0.0000	0.09	12.02	1.42	0.12	9.50	0.17	98.57			
2P 1	2.77	7.76	0.00	50.20	14.48	0.0226	0.68	10.59	1.77	0.27	9.62	0.17	98.33			
CH 1	2.39	8.69	0.00	50.38	14.60	0.0068	0.05	11.14	1.44	0.13	9.84	0.18	98.83			
GA2 1	2.25	1.57	0.00	57.14	10.99	0.3242	0.40	6.52	1.75	0.73	15.17	0.28	97.05			
MA 1	2.57	7.50	0.00	50.78	14.07	0.0186	0.15	11.63	1.43	0.14	10.07	0.18	98.55			
SA74 1	3.50	4.02	0.00	47.77	14.46	0.0758	1.94	8.79	3.65	0.93	12.30	0.22	97.63			
SA76 1	2.55	8.84	0.00	47.65	16.18	0.0080	0.09	12.18	1.40	0.13	9.33	0.16	98.51			
KR12 1	2.34	8.41	0.00	50.52	14.41	0.0096	0.06	12.25	1.19	0.09	9.39	0.16	98.81			
KR110 1	2.34	7.83	0.00	51.21	14.03	0.0044	0.08	11.76	1.24	0.09	9.92	0.19	98.71			
KR15 1	2.25	1.81	0.00	60.33	13.37	0.3888	0.96	5.26	1.40	0.41	10.19	0.22	96.50			
KR13 1	2.97	6.29	0.00	50.35	13.06	0.0260	0.20	10.19	1.95	0.20	12.43	0.21	97.87			
KR115 1	2.65	8.04	0.00	50.77	14.24	0.0272	0.09	12.05	1.26	0.11	9.26	0.19	98.68			
KR116 1	2.78	7.65	0.00	49.89	15.12	0.0362	0.41	11.47	1.47	0.20	8.80	0.16	97.97			
KR113 1	2.50	8.43	0.00	50.19	14.97	0.0092	0.15	11.66	1.33	0.13	9.16	0.17	98.71			
KR112 1	2.74	5.88	0.00	49.44	12.62	0.0258	0.15	9.77	2.72	0.27	13.84	0.23	97.69			
KR111 1	2.62	6.17	0.00	50.47	13.03	0.0328	0.20	9.98	2.10	0.25	12.63	0.22	97.70			
KR114 1	3.17	7.14	0.00	50.40	15.21	0.0432	0.68	10.93	1.50	0.35	8.82	0.16	98.38			
	Na <sub>2</sub> O	MgO	F	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	FeO	MnO	SO <sub>3</sub>	Li <sub>2</sub> O	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Total
KOIH-1	2.1	4.83	1.2	29.45	8.24	0.9	4.24	9.84	0.68	0.13	6.62	0.08	0.36	4.42	20.68	93.08

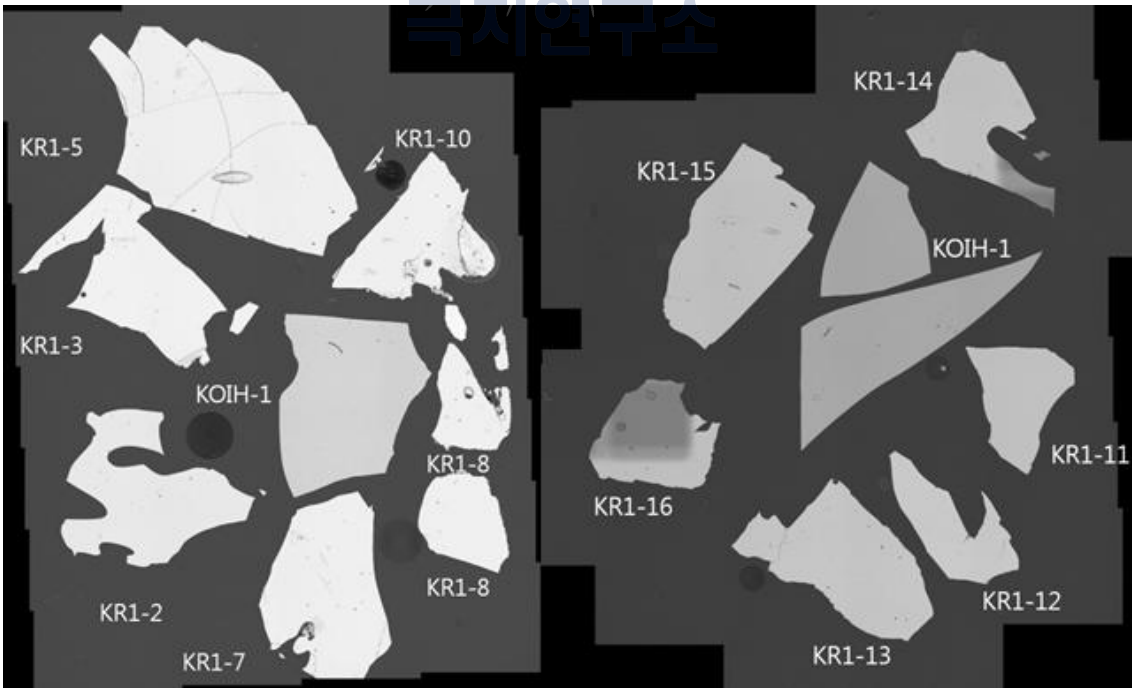


그림 11. 남극 중앙해령 시료의 BSE image.

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

$$\text{Concentration}_{(\text{Halogen})} = \text{RSF} * (\text{Intensity}_{(\text{halogen})} / \text{Intensity}_{(\text{Si})}) * \text{Concentration}_{(\text{Si})}$$

Concentration<sub>(Halogen)</sub> = 할로겐원소 농도

RSF = Relative Sensitivity Factor

Intensity<sub>(halogen)</sub> = 할로겐원소 측정된 Intensity

Intensity<sub>(Si)</sub> = Si원소 (internal standard) 측정된 Intensity

Concentration<sub>(Si)</sub> = Si원소 (internal standard) 농도 (EPMA 사용)

위 식을 이용하여 Mark Kendrick의 시료를 이용하여 각 할로겐원소 (Cl, Br, I)의 RSF를 구하였다. 하지만 동일한 RSF 값을 구하지는 못하였고 각각의 다른 RSF 값을 구하여졌다. 그래서 가장 공통적인 RSF 값을 가진 2PD43 시료의 값을 이용하여 KOIH-1의 할로겐 원소 정량화를 시도하였다. 얻어진 KOIH-1의 할로겐 원소 농도는 다음과 같다.

극지연구소

표 2. KOIH-1 할로겐원소 정량분석 결과.

단위: ppm			
Si	Cl	Br	I
300740	4899.141	3822.166	0.91147

표 3. Mark Kendrick 시료를 이용하여 구한 RSF. 각 시료에 얻어진 RSF 값의 평균값을 이용하였으며, 그 중 가장 공통적으로 나타난 2P (2PD43) 시료의 RSF 값을 이용하였다.

RSF	Cl	Br	I
GA	0.0025	0.500	0.0012
MORB	0.0024	0.472	0.0012
	0.0023	0.431	0.0011
	0.0021	0.404	0.0010
AVG	0.0023	0.452	0.0011
STD	0.0002	0.043	0.0001
ERR	7.9083	9.433	9.9449
RSF	Cl	Br	I
2P	0.0024	0.098	0.0020
MORB	0.0022	0.075	0.0014
	0.0022	0.073	0.0012
	0.0023	0.099	0.0014
AVG	0.0023	0.086	0.0015
STD	0.0001	0.014	0.0004
ERR	5.0021	16.371	24.5416
RSF	Cl	Br	I
MA	0.0008	0.047	0.00019
MORB	0.0008	0.048	0.00023
	0.0008	0.048	0.00022
	0.0008	0.049	0.00028
AVG	0.0008	0.048	0.00023
STD	0.0000	0.001	0.00004
ERR	1.2259	1.874	16.74802

RSF	Cl	Br	I
NL	0.0019	0.038	0.0003
BABB	0.0020	0.041	0.0003
	0.0020	0.042	0.0003
	0.0019	0.041	0.0002
AVG	0.0019	0.041	0.0003
STD	0.0000	0.002	0.0000
ERR	2.2110	5.025	15.4081
RSF	Cl	Br	I
SA74	0.0020	0.084	0.0012
OIB	0.0019	0.075	0.0009
	0.0020	0.087	0.0010
AVG	0.0019	0.082	0.0010
STD	0.0001	0.006	0.0001
ERR	2.8525	7.683	13.2748

### 3-3 남극 중앙해령 현무암질 글라스 할로겐원소 정량분석

2011년 남극 중앙해령 탐사에서 락코어를 이용하여 채취한 현무암질 글라스 12개를 선별하여 할로겐원소 정량분석을 실시하였다. 방법은 위와 동일하게 전처리 과정을 거쳤으며 내부표준물질은 Si, 외부표준물질은 우리가 제작한 KOIH-1을 이용하여 정량분석을 실시하였다. RSF는 위에서 구하여진 KOIH-1의 농도를 이용하여 다시 구하여 각 할로겐원소 정량화를 시도하였다.



그림 12. 남극 중앙해령 탐사 시 사용한 락코어 사진

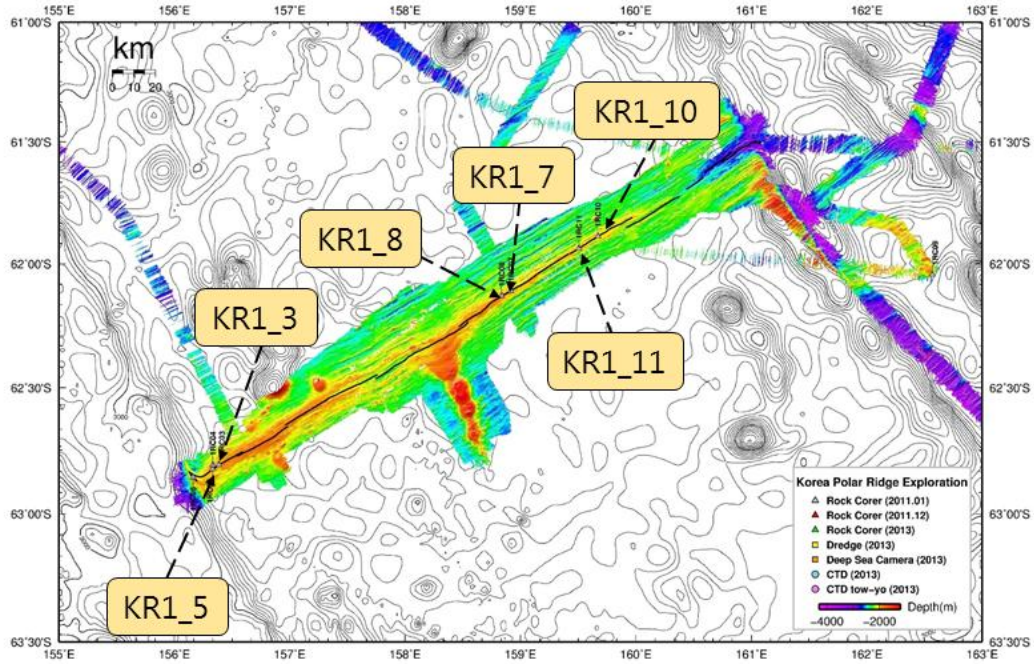


그림 13. 남극 중앙해령 KR1에서 채취한 시료 위치

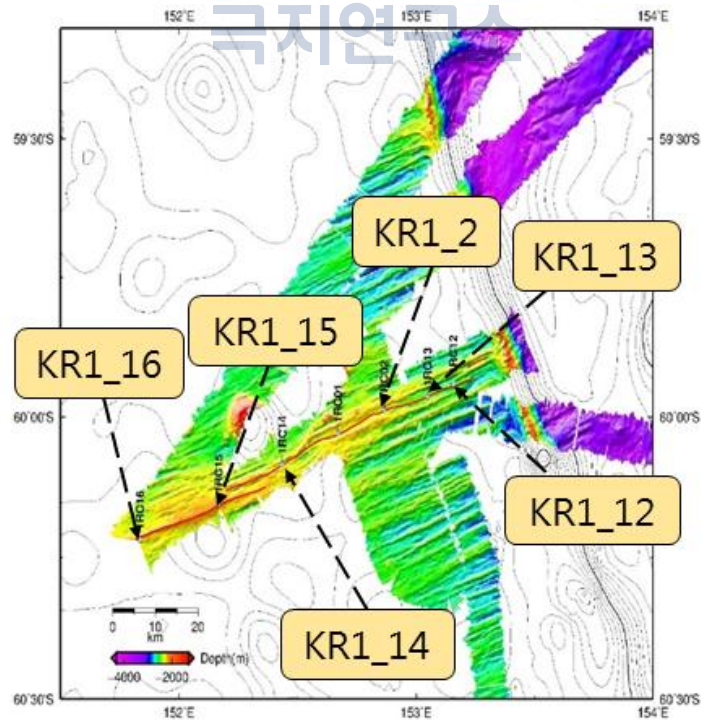


그림 14. 남극 중앙해령 KR2에서 채취한 시료 위치

표 4. 남극 중앙해령 할로겐 원소 농도.

	Cl(ppm)	Br(ppb)	I(ppb)	BR/CL	I/CL
KR1_2	28.48	297.94	9.33	10.46	0.33
KR1_3	146.11	544.20	11.50	3.72	0.08
KR1_5	3152.90	1258.52	11.80	0.40	0.00
KR1_7	158.94	355.43	8.21	2.24	0.05
KR1_8	104.60	335.89	7.36	3.21	0.07
KR1_10	25.54	229.72	6.29	8.99	0.25
KR1_11	143.42	331.74	3.05	2.31	0.02
KR1_12	86.73	387.75	3.39	4.47	0.04
KR1_13	51.36	167.60	2.18	3.26	0.04
KR1_14	185.81	372.57	5.64	2.01	0.03
KR1_15	78.83	187.98	4.04	2.38	0.05
KR1_16	110.80	150.18	1.80	1.36	0.02

할로겐 농도는 기존에 발표된 MORB에서 채취한 글라스와 비교하여 전반적인 농도 범위는 비슷하게 나타났으나, 특이한 농도를 나타내는 곳도 있어서 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

KOPRI  
극지연구소

### 3-4 INAA를 이용한 할로겐 원소 정량분석

SIMS를 분석하여 얻어진 RSF 값은 매우 다양한 값이 나타나 이에 대한 오차가 생길 수 있으므로, 이를 검증하기 위하여 베른대학교와 공동연구를 통해 기존의 연구자들이 이용하고 있는 INAA 장비를 이용하기로 하였다. 이를 위해서 외부표준물질 KOIH-1, KOIH-2를 보내어 분석 중에 있다. 이에 대한 정량분석 값이 나오면 이를 이용하여 RSF를 구할 예정이다. INAA 분석 결과와 SIMS 분석 결과를 비교하여 가장 알맞은 RSF를 구하고 정량화 한다면 우리만의 할로겐 원소 정량분석법을 가질 수 있다.

### 3-5 남극 멜버른산에서 채취한 감람석의 멜트포유물 균질화 실험

2015년 멜버른 산에서 암석들을 채취하였으며, 그 중에서 감람석 결정을 picking 을 하여 광물결정만을 선별하였다. 감람석 광물결정을 크리스탈 본드를 이용하여 단일 결정만을 이용하여 두께는 700 $\mu\text{m}$ 인 double-polished thick section을 제작하였다. 발견된 멜트포유물은 대부분 불투명한 상태로 나타났으므로 재균질 과정이 필요하였다. 재균질화 실험을 하기 위하여 편광현미경에 장착할 수 있는 LINKAM TS1400XY를 이용하였다. 기존에 있던 TS1500은 XY축의 조절이 힘든 타입으로 멜트포유물이 높은 온도에서 오랜 시간동안 가열 시에 녹아 이동성이 생겨 광물을 지속적으로 관찰하는 것이 매우 힘들었다. 따라서 XY축을 조절할 수 있는 TS1400XY를 이용하여 균질화를 시도하였다. 먼저 TS1400XY의 calibration을 통해 정확한 온도로 수정하였다. 균질화 실험을 몇 시간동안 진행되었으며, 몇 온도에서 균질화가 진행되었으며 바로 quenching 작업을 실시하였다.

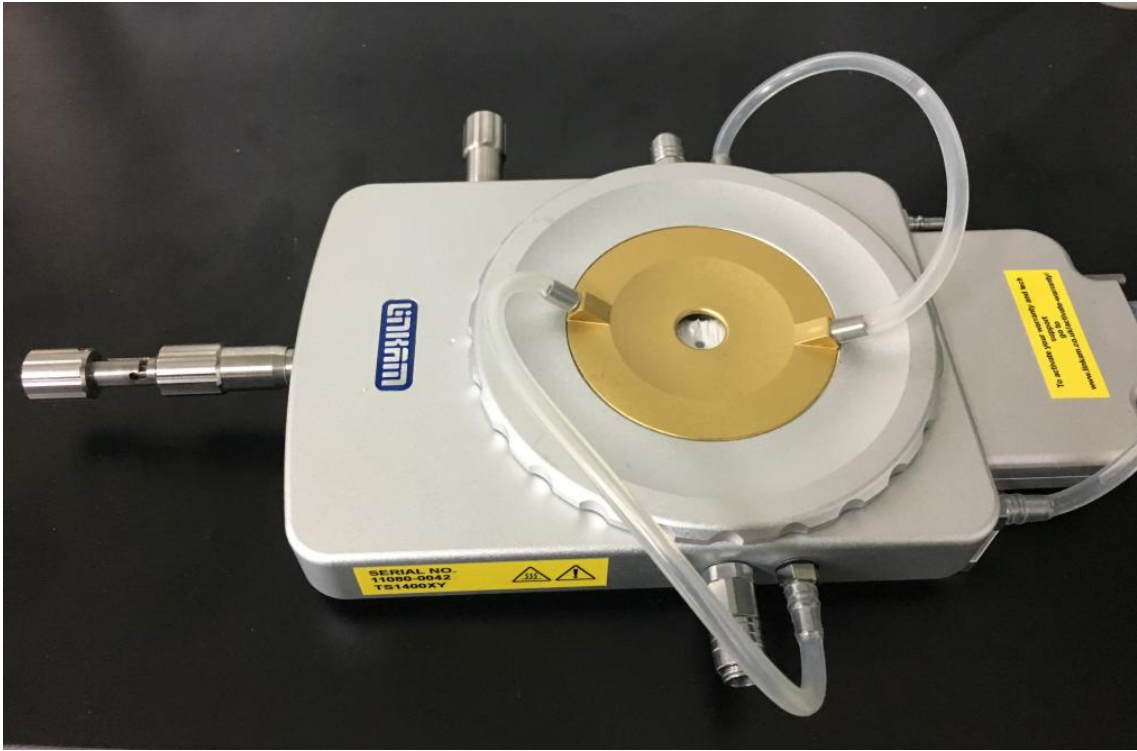


그림 15. TS1400XY

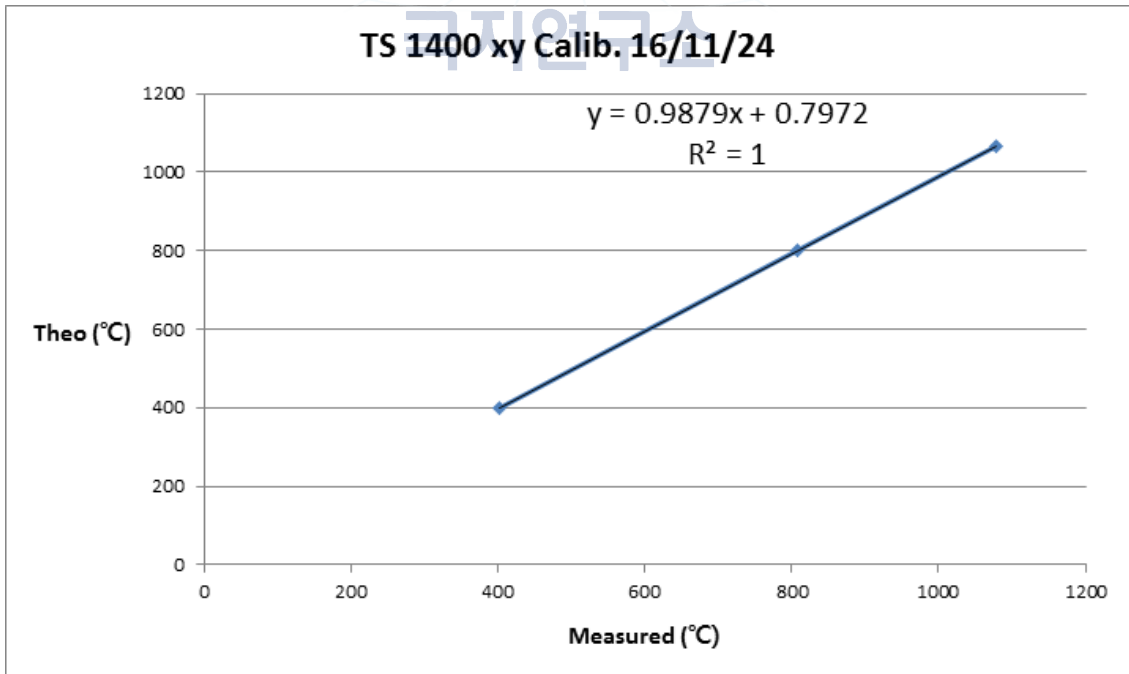


그림 16. TS1400XY calibration curve.



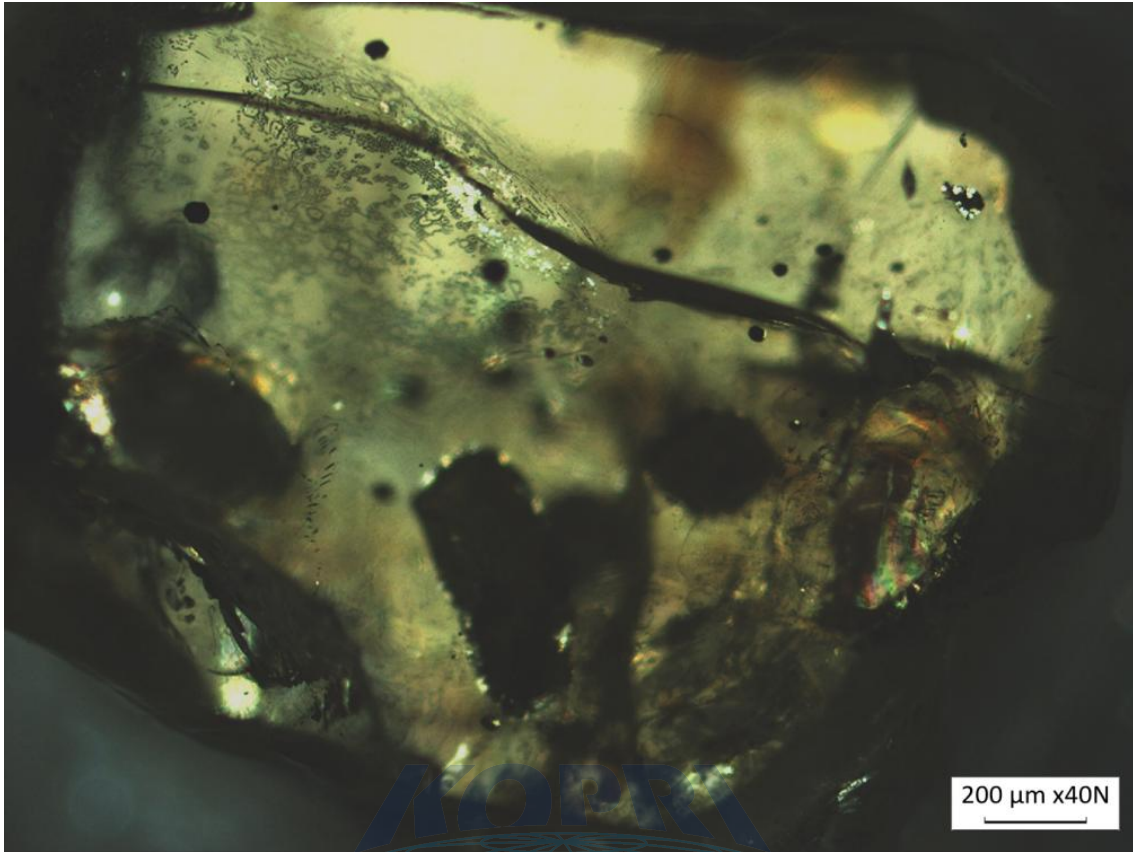


그림 17. 멜버른산에서 채취한 화산암에서 선별한 감람석 결정에 발견된 melt inclusion.

## 제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

작년에 실패한 마운트 제작과정을 일정한 z축 높이를 가지도록 교정하여 남극 중앙해령 현무암질 글라스와 KOIH-1 그리고 Mark Kendrick 마운트를 다시 제작하였다. 이미 검증된 Mark Kendrick 시료를 이용하여 제작한 마운트를 이용하여 우리가 제작한 외부표준물질 KOIH-1의 할로겐 원소 (Cl, Br, I) 의 RSF 값을 구하였다. 이를 이용하여 남극 중앙해령 현무암질 글라스의 할로겐 원소 정량분석을 실시하였다. 내부표준물질로 정한 Si농도는 극지연구소에서 보유하고 있는 FE-EPMA (JEOL JXA-8530F) 을 이용하여 주원소 분석을 실시하여 구해진 값을 이용하였다. Mark Kendrick의 다양한 시료들은 각각의 RSF 값을 나타내어, 그 중에서 공통적인 RSF 값을 가지는 특정한 시료를 기준으로 KOIH-1 할로겐 원소 정량분석을 실시하였다. 이를 이용하여 남극 중앙해령 현무암질 글라스의 할로겐 원소 정량분석을 하였다. 하지만 이는 정확성이 떨어지는 것으로 생각되어 베른대학교와 공동연구로 비활성기체 분석 시 사용하는 INAA를 이용한 할로겐원소 정량분석을 시도 중에 있다.

멜트포유물 실험은 LINKAM TS1400XY을 이용하여 실시하였으며, 온도에 대한 calibration를 실시하였고 남극 멜버른산에서 채취한 감람석 결정에 대한 재균질화를 실시하였다. 멜트포유물에 대한 EPMA 분석은 추후 미국 Tulsa 대학교에서 전처리 및 분석조건을 배운 후에 진행할 예정이다.

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

베른대학교에서 INAA을 이용한 할로겐원소 정량분석을 통하여 SIMS분석과 비교하여 정확한 RSF를 구할 수 있으므로 할로겐원소 정량분석을 정립화가 가능하다. SIMS를 이용한 할로겐 원소 (Cl, Br, I) 분석 방법은 전 세계적으로 아직 정립되지 않은 방법이다. 우리만의 독자적인 할로겐원소 정량 분석 방법이 정립이 된다면 다양한 지역의 현무암질 글라스를 이용한 할로겐원소 정량 분석을 통해 원시마그마 성인 규명 및 맨틀재순환에 대한 연구에 많은 도움이 될 것이다. 그리고 남극 중앙해령 현무암질 글라스 중에는 IN-AXIS 방향의 중앙해령의 글라스와 OFF-AXIS 해저산 글라스가 나누어져 있으므로 이 둘의 비교하는 연구도 매우 흥미롭다. 그리고 2015년 남극 중앙해령과 인접한 남동인도양 중앙해령 탐사인 STORM cruise에서 채취한 글라스와 비교도 흥미로울 것이다. 또는 할로겐원소는 열수광상 연구에서 금속이온을 이동시키는 ligand로서 역할을 하는 원소이므로 특정한 금속광상 탐사에도 많은 도움이 될 것이다.

멜트포유물은 대부분 불균질화 상태로 나타나므로 재균질화를 통해 유리질 물질로 변한다. 균질화된 유리질 물질을 이용하여 여러 지화학적 분석을 실시한다. 그러므로 독자적으로 개발한 할로겐원소 정량분석법을 멜트포유물에 적용이 가능하다. 멜트포유물은 2013년 남극 중앙해령 드렛지를 이용하여 채취한 감람석 반정이 많은 현무암에서 발견하였으며, 균질화 실험을 진행한 적이 있다. 로스해 인근에서 채취한 암석에서도 발견 되었으며, 남극 장보고 기지 주변에 있는 멜버른 화산암에서도 발견하였다. 이에 대해 남극 전반적인 마그마 성인에 대해서 연구가 가능할 것으로 생각된다. 멜트포유물에서 얻을 수 있는 많은 정보 중에 마그마 기체 원소의 유동 등을 연구가 가능하며, 멜트포유물에서 알아낼 수 있는 원시마그마와 현무암질 글라스 원시마그마에 대해 비교 분석도 가능할 것이다.

## 제 6 장 참고 문헌

- Alessandro Fabbrizio, R. S., Kathrin Hametner, Detlef Gunther, Katharina Marquardt (2013). "Experimental partitioning of halogens and other trace elements between olivine, pyroxenes, amphibole and aqueous fluid at 2 GPa and 900 - 1,300 °C." *MineralPetrology*166: 639-653.
- Amy Donovan, V. T., Clive Oppenheimer, and Marie Edmonds (2014). "Reactive halogens (BrO and OClO) detected in the plume of Soufrie`re Hills Volcano during an eruption hiatus." *GeochemistryGeophysicsGeosystems*:3346-3363.
- B. Cochain, C. S., C. de Grouchy, C. Crépisson, H. Bureau, C. Leroy, I. Kantor, T. Irifune (2015). "Bromine speciation in hydrous silicate melts at high pressure." *ChemicalGeology*(404):18-26.
- Balcone-Boissard, B. V., G. Boudon (2010). "Behavior of halogens during the degassing of felsic magmas." *GeochemistryGeophysicsGeosystems*11: 1-22.
- Froukje M. van der Zwan, C. W. D., Nico Augustin, Renat R. Almeev, Rashad A. Bantan, Ali Basaham (2015). "Hydrothermal activity at the ultraslow- to slow-spreading Red Sea Rift traced by chlorine in basalt." *ChemicalGeology*405: 63-81.
- Helene Bureau, E. F., Caroline Raepsaet, Andrea Somogyi, Pascal Munsch, Guilhem Simon, Stefan Kubsky (2010). "Bromine cycle in subduction zones through in situ Br monitoring in diamond anvil cells." *geochemicaetcosmochimicaacta*.
- Lian-Xun Wang, M. A. W. M., Jörg Keller, Gregor Markl (2014). "Halogen variations in alkaline rocks from the Upper Rhine Graben (SW Germany): Insights into F, Cl and Br behavior during magmatic processes." *ChemicalGeology*380: 133-144.
- Lilianne Pagé, K. H., Jan C.M. de Hoog, Aral I. Okay (2016). "Halogen (F, Cl, Br, I) behaviour in subducting slabs: A study of lawsonite blueschists in

western Turkey." *Earth and Planetary Science Letters* 442: 133-142.

Linda Marks, J. K., Thomas Wenzel, Robert B. Trumbull, Ilya Veksler, Michael Wiedenbeck, Gregor Markl (2014). "F, Cl, and S concentrations in olivine-hosted melt inclusions from mafic dikes in NW Namibia and implications for the environmental impact of the Paraná - Etendeka Large Igneous Province." *Earth and Planetary Science Letters* 392: 39-49.

Lorraine Ruzié-Hamilton, P. L. C., Ray Burgess, Bastian Joachim, Christopher J. Ballentine, Grenville Turner (2016). "Determination of halogen abundances in terrestrial and extraterrestrial samples by the analysis of noble gases produced by neutron irradiation." *Chemical Geology* 437: 77-87.

Mark A. Kendrick, M. G. J., Adam J.R. Kent, Erik H. Hauri, Paul J. Wallace, Jon Woodhead (2014). "Contrasting behaviours of CO<sub>2</sub>, S, H<sub>2</sub>O and halogens (F, Cl, Br, and I) in enriched-mantle melts from Pitcairn and Society seamount." *Chemical Geology* 370: 69-81.

Mark A. Kendrick, M. G. J., Erik H. Hauri, David Phillips (2015). "The halogen (F, Cl, Br, I) and H<sub>2</sub>O systematics of Samoan lavas: Assimilated-seawater, EM2 and high-<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He components." *Earth and Planetary Science Letters* 410: 197-209.

Mark A. Kendrick, M. S., Masahiko Honda and David Phillips (2011). "High abundances of noble gas and chlorine delivered to the mantle by serpentinite subduction." *nature geoscience* 4: 807-812.

Pyle, D.M., Mather, T.A., 2009. Halogens in igneous processes and their fluxes to the atmosphere and oceans from volcanic activity: a review. *Chem. Geol.* 263, 110 - 121.

## 주 의

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