표 지

(뒷면) (측면) (앞면)

(뒷면)	(측면)	(앞면)
	남극 빅토리아랜드 지역 자원 분포에 대한 기초 조사 연구	↑ 7cm ↓ **남극 빅토리아랜드 지역 자원 분포에 대한 기초 조사 연구** (20 포인트 중고딕체) Preliminary study of mineral resources exploration in Northern Victoria Land, Antarctica (16 포인트 명조체)
주 의 (편집 순서8) (16 포인트 고딕체) ↑ 7cm ↓		
	서울대학교 산학협력단 ↑ 5cm ↓	서울대학교 산학협력단 (20 포인트 중고딕체) ↓ 7cm ↑

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극 빅토리아랜드 지역 지각진화 및 행성형성과정 연구” 과제의 위탁연구 “남극 빅토리아랜드 지역 자원 분포에 대한 기초 조사 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2019. 07.

(본과제) 총괄연구책임자 : 이 종 익

위탁연구기관명 : 서울대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 이 인 성

위탁참여연구원 : 김 영 민

“ : 문 인 경

“ : 최 지 수

“ : 이 원 형

“ : 김 태 우

“ : 최 유 리

보고서 초록

<table>
<tr><td>위탁연구과제명</td><td colspan="5">남극 빅토리아랜드 지역 자원 분포에 대한 기초 조사 연구</td></tr>
<tr><td>위탁연구책임자</td><td>이인성</td><td>해당단계
참여연구원수</td><td>3</td><td>해당단계
연구비</td><td>60,000,000원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속부서명</td><td colspan="2">서울대학교 산학협력단</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 :　　상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)</td><td>보고서
면수</td><td>70</td></tr>
<tr><td colspan="6">
1. 문헌조사를 통하여 과거 남극대륙의 광물 자원 연구 결과를 확인하였다.
2. 이를 바탕으로 선정된 장보고 과학기지를 포함한 북빅토리아랜드 지역의 지질 답사를 통해 암석 및 광석 시료를 확보하여 광물학 및 암석학적 특징을 파악하고, 주원소 및 미량원소를 포함한 지구화학 분석을 통하여 특정 원소의 부화 또는 결핍 여부를 확인하였다.
3. 초염기성/염기성 암체가 나타나는 나이아가라 아이스폴 지역(구리, 크롬, 니켈, 몰리브덴, 은, 텅스텐), 거정질 화강암이 산출되는 라이켄 힐즈 및 아웃백 누나탁 지역(우라늄, 리튬, 탄탈넘, 주석), 장보고 과학기지 주변의 변성암(베릴륨, 안티모니), 다니엘스 및 모로주미 산맥 지역의 화강암(비소, 안티모니)에서 지각함량에 비해 높은 농도를 보이는 원소들이 측정되었다.
4. 이러한 함량은 광상을 형성하기에는 매우 부족하며, 남극 대륙의 지리 및 기후, 경제 및 기술, 환경 및 과학적 관점에서 살펴보았을 때 큰 경제적 가치를 갖지 못한다고 여겨진다.
5. 야외조사 및 실험을 통하여 파악된 남극 빅토리아랜드 지역의 자원분포에 대한 연구 결과를 요약하여 <남극대륙의 광물핸드북-북빅토리아랜드편>을 출판하였으며, 과거 남극대륙의 광물자원 탐사부터 지질학적 정보 및 기초적인 광물자원에 대한 정보를 제공하였다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">남극, 빅토리아랜드, 광물, 자원, 탐사</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Antarctica, Victoria Land, Mineral, Resource, Exploration</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

(국문) 남극 빅토리아랜드 지역 자원 분포에 대한 기초 조사 연구
(영문) Preliminary study of mineral resources exploration in Northern Victoria Land, Antarctica

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

지난 2014년 2월에 빅토리아랜드에 준공된 우리나라의 2번째 남극 과학기지인 장보고 과학기지는 무한한 자원의 보고로 알려진 남극 대륙에 대한 본격적인 연구가 시작될 수 있는 환경을 만들어 주었다. 장보고 과학기지를 토대로 다양한 광물 자원이 매장되어 있을 것으로 추정되는 빅토리아랜드 지역의 지질학, 광물학, 암석학 및 지구화학적 연구를 통해 광물 자원이 배태되어 있을 가능성을 조사한다. 이를 바탕으로 남극 대륙의 지질학적 특징에 맞는 광물 자원의 기초 탐사 시스템에 대해 고찰하고, 광물 핸드북을 발간한다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

문헌조사를 통해 과거의 남극대륙의 광물 자원 연구 결과 및 동향을 파악한다. 장보고 과학기지를 포함한 북빅토리아랜드 지역의 지질 답사를 통해 암석 및 강석 시료를 확보하여 광물학 및 암석학적 특징을 파악한다. 시료의 주원소 및 미량원소 조성을 포함한 지구화학 분석을 실시하여 특정 원소의 부화 또는 결핍 여부를 확인한다. 이러한 연구를 통해 광상의 존재 여부를 지시해 줄 수 있는 광물학, 암석학 및 지구화학적 특징을 파악하여 광물 자원의 배태 여부를 확인한다.

Ⅳ. 연구개발결과

야외조사, 암석학 및 광물학적 관찰 결과와 지구화학적 분석 결과를 종합하여 상대적으로 잠재성이 높다고 평가는 님극 빅토리아랜드 지역의 자원분포에 대한 정보를 조사하였다. 초염기성/염기성 암체가 나타나는 나이아가라 아이스폴 지역은 구리, 크롬, 니켈, 몰리브덴, 은, 텅스텐 등이 지각 평균 함량보다 높은 농도를 보였다. 라이켄 힐즈 및 아웃백 누타낙 지역의 거정질 화강암은 우라늄, 리튬, 탄탈넘, 주석이 지각 평균보다 높은 함량을 보였다. 장보고 과학기지 주변에 산출되는 변성암은 베릴륨과 안티모니가, 다니엘스 및 모로주미 산맥 지역의 화강암은 비소와 안티모니가 지각함량에 비해 높은 값들을 보였다. 그러나 이러한 함량은 광상을 형성하기에는 부족한 함량이며, 남극대륙의 지리 및 기후, 경제 및 기술, 환경 및 과학적 관점에서 살펴보면 큰 경제적 가치를 갖지 못한다고 생각된다.
야외조사 및 실험을 통하여 파악된 남극 빅토리아랜드 지역의 자원분포에 대한 연구 결과를 요약하여 <남극대륙의 광물 핸드북-북빅토리아랜드편>을 출판하였으며, 과거 남극대륙의 광물자원 탐사부터 지질학적 정보와 기초적인 광물 자원에 대한 정보를 제공하였다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

연구 및 분석 결과를 바탕으로 남극 대륙에 매장되어 있는 광물 자원의 탐사 및 연구에 활용이 가능한 기초 데이터를 제공해 줄 수 있을 것이다. 또한 빅토리아랜드 및 동남극 지역을 대상으로 광물 자원 기초 탐사 시스템을 구축하는 후속 연구에 활용될 수 있다. 광물 자원의 매장 여부가 확인된다면, 광물 자원의 기원과 형성에 관련된 추가 기초 연구뿐만 아니라 타 대륙에서 발견되는 광상과의 비교를 통하여 과거 남극 대륙의 위치 및 이동에 대한 연구에 활용될 수 있는 지질학적 자료들을 제공해 줄 수 있다.

S U M M A R Y
(영 문 요 약 문)

I. Title

Preliminary study of mineral resources exploration in Northern Victoria Land, Antarctica

II. Purpose and Necessity of R&D

Jang Bogo station, the second Antarctic Research station of Korea, was built in northern Victoria Land, Antarctica on February 2014. The Jang Bogo station enables to study various field of geology on Antarctica which has a great potential of mineral resources. This research investigates the mineral resource potential of Antarctica by geological, mineralogical, petrological and geochemical observation and analyses. On the basis of these results, exploration system of mineral resources in Antarctica is discussed and the handbook of mineral in Antarctica is publisehd.

III. Contents and Extent of R&D

Previous studies and researches on mineral resources of Antarctica are reviewed, leading to select the locations necessary for geological survey. Samples are collected by a field investigation and observed to identify the mineralogical and petrological characteristics. Geochemical analyses including major, minor and trace elements measurement are conducted to identify the enrichment or deficiency of specific

element. These mineralogical, petrological and geochemical results help to find out the indicator of potential mineral resources in Antarctica.

Ⅳ. R&D Results

The information about potentiality of mineral resources in Antarctica is investigated by combining the field observation, mineralogical and petrological characteristics, and geochecmial analyses results. Ultramafic/mafic complex in Niagara Icefalls region shows higher contents of Cu, Cr, Ni, Mo, Ag and W relative to average concentration of continental crust. Pegmatite in Lichen Hills and Outback Nunataks (U, Li, Ta, Sn), metamorphic rocks near Jang Bogo station (Be, Sb), and granitoid in Morozumi Range and Daniels Range (Bi, Sb) show relatively higher concentration compared to average continental crust. However, these contents are still below the level of forming mineral deposits. Economical values of these sites are also very low considering the climatic and geographic, the economic and technological, and environmental and scientific difficulties in Antarctica.

The research results on the potentiality of mineral resources in Antarctica are summarized to publish the <Handbook of minerals in northern Victoria Land, Antarctica>. This handbook contains the basic information about mineral resource potential on northern Victoria Land including geological, mineralogical, petrological and geochemical research results.

Ⅴ. Application Plans of R&D Results

This research may offer the basic data which can be applied to the study of mineral resource exploration in Antarctic region. In addition,

the results can be used in future research on building exploration system of mineral resources in Antarctica including northern Victoria Land. If the occurrence of mineral resources is identified, this study can be basis of study on origin and formation processes of mineral deposits in Antarctica. Also, by comparing to mineral deposits in other Continents, this research is further developed to the future study on the location of Antarctica in the past and its movement of current position.

목 차

제 1 장 서론 - 9

제 2 장 국내외 기술개발 현황 - 12

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 - 15

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 - - - - - - - - - - - - - - - - - - 53

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 - 55

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 - - - - - - - - - - - - - - 56

제 7 장 참고문헌 - 57

본 문

1장. 서론

남극대륙은 고생대 말기에서 중생대 초기 사이에 지금의 남아메리카, 아프리카, 호주, 인도대륙과 함께 곤드와나대륙을 구성한 것으로 알려져 있다. 곤드와나대륙을 재구성한 거의 모든 연구에서 남극대륙은 다른 대륙들을 이어주는 허브에 위치한 것으로 표시된다. 남극대륙과 곤드와나를 구성하였던 다른 대륙들 사이의 지질학적 연관관계는 광물 자원의 종류와 분포에서 잘 나타난다. 하나의 예로 남극종단산맥의 비콘누층군 내의 석탄층은 남아프리카의 Karroo 석탄층과 많은 부분에서 특징들이 일치하고 있다. 현재까지 알려진 광물 분포에 따르면 남극대륙에서는 크게 다음과 같은 세 광상구(metallogenic province)가 존재한다(그림 1).

(ⅰ) The East Antarctic Iron Metallogenic Province

(ⅱ) The Transantarctic Metallogenic Province

(ⅲ) The Andean Metallogenic Province

이 지역 중 장보고 과학기지가 위치한 북빅토리아랜드는 (ⅱ) The Transantarctic Metallogenic Province 에 인접하고 있다.

특히 Pensacola 산맥에서 발견되는 광범위한 층상 고철질 Defek 관입암(extensive layered mafic Dufek intrusion)의 노출되어 있는 상부층은 남아프리카의 Bushveld Complex의 상부층과 매우 유사한 지구화학적 특징을 보인다. Bushveld Complex는 크롬(Cr), 니켈(Ni), 구리(Cu), 코발트(Co) 및 플레티넘 그룹 원소(platinum group element)이 매장되어 있는 세계 최대 규모의 니켈-구리 정마그마 광상을 포함하고 있다. 이는 장보고 과학기지 주변을 비롯한 북빅토리아랜드와 남극종단산맥 주변에 많은 양의 금속 광물들을 함유한 암석과 지층들이 존재하고 있을 가능성이 매우 크다는 것을 의미한다.

1988년에 채택된 '남극광물자원활동규제조약'과 남극 지역의 환경보호를 위하여 과학적 조사 이외의 광물자원 활동을 50년간 금지하기 위하여 1991년에 채택된 '환경보호에 관한 남극조약의정서'에 근거하여 앞으로도 30여년 이상 남극에서의 광물자원 개발활동은 국제적으로 엄격하게 금지되어 있다. 그러나 이러한 조약이 다른 나라들이 남극의 광물 자원에 대한 관심을 거둔 것을 의미하는 것은 아니며, 앞서 언급한 이탈리아 연구진의 금 광상 발견과 같이 과학적 차원에서는 점점 장려되고

있는 추세를 보이고 있다. 이는 30여 년 앞으로 다가온 남극 조약에 따른 규제 이후의 시기를 대비한 것이라 생각해 볼 수 있다.

이러한 관점에 보면 이번 연구는 다음과 같은 두 가지 측면에서 큰 중요성을 갖는다고 할 수 있다.

첫 째, 장보고 기지가 위치한 테라노바 만을 포함한 빅토리아랜드에서 산출되는 암석들의 광물학, 암석학 및 지구화학적 분석을 통하여 이들 지역에 광물 자원이 배태되어 있을 가능성을 연구하여, 앞으로 빅토리아랜드와 동남극 지역에서 진행될 광물 자원 탐사의 기초적인 연구 결과를 제시한다.

둘 째, 남극 대륙의 지질학적 특징에 따른 알맞은 광물 자원의 기초적 탐사 방법을 제시하여 광물 자원의 효율적인 탐사 방법을 제시한다.

따라서 이번 연구를 통해 장보고 과학기지가 위치하고 있는 빅토리아랜드 지역에 광물자원이 매장되어 있을 잠재성이 높다는 점을 고려하여, 문헌 조사, 기초 야외조사, 암석학 및 광물학적 관찰 및 지구화학적 분석을 통하여 광물자원의 존재 여부를 파악하고 이를 정리하여 광물자원 핸드북을 발간하고자 하였다. 더 나아가 남극대륙의 광물자원을 탐사하고 개발하는데 있어 발생할 수 있는 어려움을 살펴보고 이를 바탕으로 광물자원 탐사 시스템에 대해 고찰하고자 하였다. 이번 연구의 최종 목표는 다음과 같다.

첫 째, 장보고 과학기지가 위치하고 있는 테라노바 만을 포함한 빅토리아랜드를 야외 답사 및 조사하여, 이 지역에서 산출되는 암석을 조사한다.

둘 째, 확보된 암석 시료를 광물학, 암석학 및 지구화학적으로 분석하여 광물 자원이 배태되어 있을 가능성을 살펴본다.

셋 째, 테라노바 만, 빅토리아랜드 및 동남극 지역에 배태되어 있을 광물 자원을 탐사하는데 기반이 될 탐사 시스템을 구축한다.

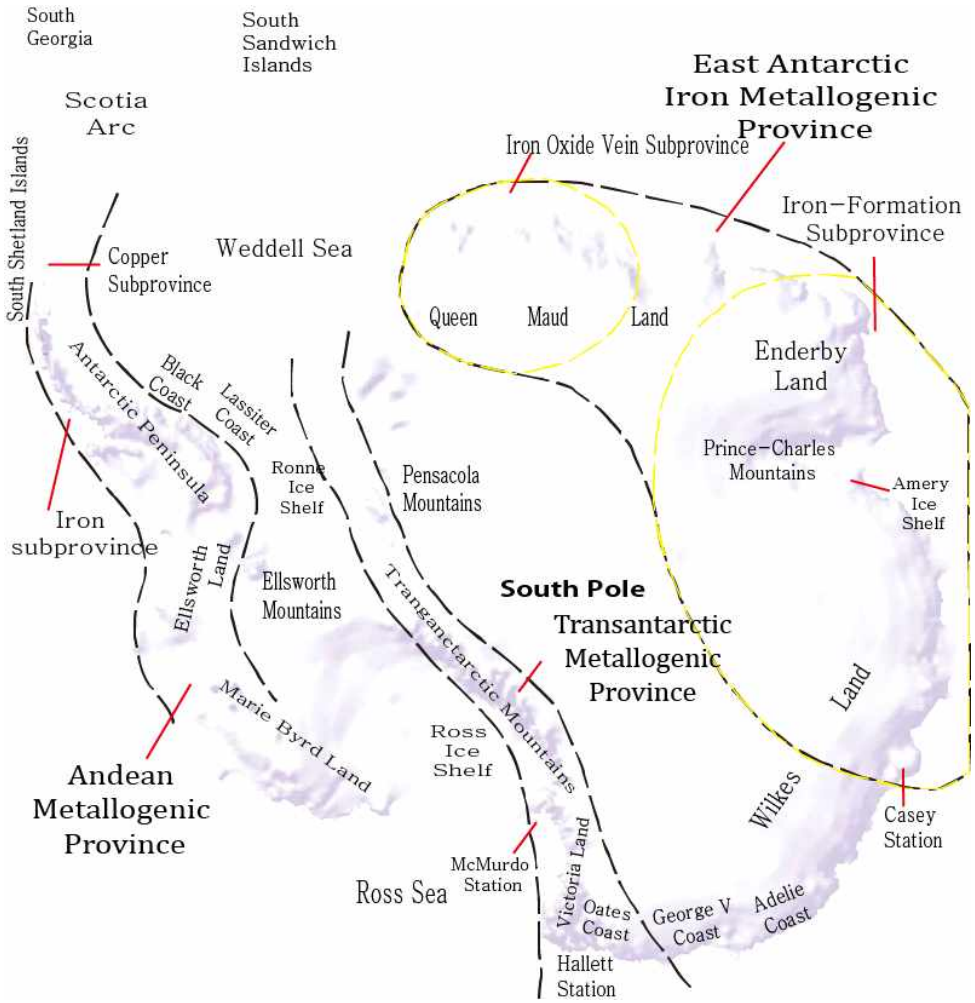


그림 1. 남극의 금속 광화대(점선 경계)를 보여주는 지도(Modified from Rowley et al., 1982).

2장. 국내외 기술개발 현황

1절. 남극대륙의 자원탐사 연구 동향

앞서 언급한 곤드와나대륙의 형성 및 다른 대륙들과의 관계로 남극대륙에는 많은 양의 광물 자원이 매장되어 있을 것으로 예상되어 왔다. 따라서 1900년대 중반 이후 미국, 호주, 뉴질랜드 등이 주축이 되어 남극 광물 자원에 대한 기초 조사가 많이 이뤄졌다. 1950년대 후반부터 시작된 연구들은 1960년대 들어 본격적으로 이루어 졌는데, 광물 자원에 대한 탐사를 주목적으로 한 연구보다는 남극대륙의 지질학적 특징을 조사하는 과정에서 광물 자원의 배태 가능성을 부가적으로 살펴보는 방식으로 주로 진행되었다. 1970년대부터 서남극 지역을 중심으로 한 남극 반도에서 나타나는 동 광화작용(Rowley et al., 1975; Rowley et al., 1977)과 몰리브덴, 동 및 철을 포함하는 다금속 광상(Hawkes and Littlefair, 1981; Rowley and Pride, 1982) 등과 같이 금속 광물로 이루어진 광화작용의 증거들을 발견한 연구들이 발표되었다. 이러한 연구들은 서남극 지역에서 광물 자원이 분포할 잠재적 가능성에 대한 연구들로 이어졌다(Vennum and Nishi, 1981).

기술의 발전으로 인해 1980년대 들어서 서남극 해안 지역에서 남극대륙 내륙으로 연구 지역의 확장이 일어났으며, 남극종단산맥 지역에 대한 본격적인 조사가 이뤄졌다. 1970년대부터 이미 많은 지질학자들의 관심을 끌었던 펜사콜라 산맥 북부에서 관찰된 층상형 듀퐥 고철질 관입암에 대한 연구가 활발하게 진행되었다(Zumberge, 1979; Behrendt et al., 1980; Ford et al., 1983; Ford, 1990). 최대 50,000 km^2 범위에서 발달하고 있는 듀퐥 관입암은 현재 세계 최대의 백금족 원소가 매장되어 있는 남아프리카의 부쉬벨드 복합체의 규모와 비슷하고, 층서적 특징이 비슷하여 백금족 원소를 포함한 여러 광물 자원의 매장 가능성이 매우 높을 것으로 여겨졌다. 그러나 층서를 포함한 지질학적 유사성에도 불구하고 백금과 팔라듐 등을 포함하는 황화물이나 크롬철광암과 같이 광물 자원의 배태 증거는 발견되지 않았다. 그러나 거대한 관입 규모와 지질학적 특징으로 듀퐥 관입암체는 연구자들에게 관심의 대상이었으며, 특히 백금족 원소가 부화되어 있다는 가정 아래 이들의 탐사 및 개발 가능성과 경제적 가치에 대한 논의도 진행되었다(De wit, 1985; Beike, 1988).

동남극 지역에서는 프린스 찰스 산맥 근처에서 관찰되는 철광층을 포함하여 호상철광층의 존재와 철 광물 자원의 배태 가능성에 대한 연구가 진행되었다(Wright and Williams, 1974). 특히 마운트 루커 지역에서 관찰되는 호상철광상은 넓은 지역에 발

달하고 있으며, 평균 철 함량이 33.5 %로 품위와 매장량을 고려하면 잠재적인 철광상으로 분류될만한 가치가 있다고 평가되었다(holdgate and Tinker, 1979; Ravich et al., 1982; Tingey, 1990).

화강암질 마그마의 분별결정작용에 의해 생성된 페그마타이트 암맥이나 석영맥에서는 높은 농도의 우라늄과 토륨이 농축될 수 있다. 도한 사암과 역암에 포함되어 있는 중광물에 우라늄과 토륨이 높은 농도로 함유되어 있다. 이러한 우라늄과 토륨은 다양한 암석에 포함되어 있을 수 있으며, 원자력 발전의 원료 등과 같이 중요한 산업 용도로 사용된다. 우라늄과 토륨은 자연적인 방사성 붕괴를 통해 감마선을 방출하게 되는데, 이러한 감마선의 측정을 통해 남극대륙에서 우라늄 광상의 존재 가능성에 대한 연구가 진행되어 왔다. 미국 지질조사소가 주축이 되어 1970년대 중반부터 1980년대 말까지 감마선 분광기를 장착한 항공기 혹은 헬기를 이용하여 빅토리아랜드를 포함한 남극종단산맥, 동남극 일대 및 남극반도 지역의 감마선 조사가 이뤄졌다(Zeller et al., 1977; Zeller and Dreschhoff, 1987; Zeller et al., 1990). 조사기간 동안 50 m 간격으로 총 1500 km^2 넓이의 지역에서 방출되는 감마선을 측정하였으며, 이를 통해 우라늄 광상의 존재 가능성에 대한 평가를 진행하였다(Zeller et al, 1990). 특히 암석의 종류에 따른 감마선의 세기는 페그마타이트로 구성된 지역에서 가장 높았으며, 이러한 페그마타이트 암석이 산출되는 북빅토리아랜드의 라이켄 힐즈 지역이 높은 감마선 수치를 보였다.

1980년대 말까지 활발하게 진행되었던 남극대륙의 광물자원 연구는 과학적 목적의 연구를 제외한 광물 자원 탐사 및 개발과 관련된 모든 활동을 금지한 남극조약환경의정서가 채택된 1990년대 들어 급격하게 줄어들어 수와 규모가 매우 제한적인 상태가 되었다.

2절. 빅토리아랜드 지역 연구 동향

장보고 과학기지가 위치하고 있는 테라노바 만과 북빅토리아랜드 주변의 지질은 주로 이탈리아 연구진들에 의해 연구되었다. 이는 이탈리아가 장보고 기지에서 남서쪽으로 약 8km 정도 떨어진 곳에 마리오주켈리 하계기지(Mario Zucchelli, Italy)를 1986년부터 운영해오고 있었기 때문에 이 지역에 대한 많은 연구가 진행될 수 있었다. 북빅토리아랜드는 북서방향의 윌슨(Wilson), 보어스(Bowers) 및 로버트슨(Robertson) 세 개의 지역(terrane) 으로 구성되어 있으며, 이러한 구성은 지금의 호주 남부, 뉴질랜드 등에서도 관찰된다.

장보고 과학기지는 윌슨 지역(Wilson terrane)에 위치하고 있으며, 윌슨 지역의 간략한 지질학적 특징은 다음과 같다. 캠브리아기 저변성에서 고변성 퇴적암으로 구성되어 있으며, 광범위한 조산운동에 의한 변성 작용을 기록하고 있다. 또한 캠브리아기-오르도비스기에 관입한 화강암질 암석이 나타난다. 캠브리아기-오르도비스기의 로스 조산운동(Ross orogeny) 이후에 윌슨 지역은 데본기-석탄기에 calc-alkaline, I-type 의 화강암질 암석의 관입을 받았으며, 이를 Admiralty Igneous Complex 라 부른다.그러나 테라노바 만과 윌슨 지역에 대한 이러한 지질학적 연구는 광물 자원 탐사와 관련된 후속 연구로 진행되지 못하였다. 앞서 설명하였듯이 테라노바 만은 남극종단산맥과 이를 따라 나타나는 Transantarctic Metallogenic Province 에 인접하여 있어 광물자원의 매장 가능성이 매우 높음에도 불구하고 광물자원의 탐사를 위한 기초적인 연구조차 수행된 적이 거의 없는 것으로 확인된다. 일반적으로 지하에 매장되어 있는 광물자원을 탐사하는 방법 중 가장 확실한 방법은 시추코어 탐사이지만 시추코어 탐사는 비용과 시간이 많이 드는 것이 단점이다. 더욱이 남극의 환경에서라면 일반적인 경우보다 시간과 비용이 훨씬 많이 드는 것은 자명한 사실이라 할 수 있다. 그러나 2000년대 들어 분석기기의 급격한 발달에 힘입어 광물학 및 암석학적 분석을 통한 지시자 광물 방법(indicator mineral method)뿐만 아니라 지구화학적 특징을 이용한 원거리 탐사(geochemical features for the remote detection of mineralization) 방법 등을 이용하면 지하에 매장되어 있는 광물자원의 탐사를 보다 적은 시간과 비용을 들여 수행할 수 있게 되었다. 테라노바 만과 그 주변에 대한 지질학적 연구가 활발하게 이뤄졌던 1980년 대 후반부터 1990년 대 후반에는 현재보다 지구화학적 분석 능력이 떨어지고, 분석의 정밀도가 낮았었다. 따라서 테라노바 만 주변의 암석에 대한 정밀한 지구화학적 조사가 이뤄지지 못하였으며, 주변에 매장되어 있을 가능성이 큰 광물자원에 대한 기초적인 탐사 연구 또한 전혀 이뤄지지 못하였다.

3장. 연구개발수행 내용 및 결과

1절. 연구개발의 추진체계

이번 연구개발수행은 크게 세 가지로 구분되어 추진되었다.

첫 째, 문헌 조사 및 남극 야외지질 조사이다. 문헌 조사를 통하여 남극에 배태되어 있는 광상의 기존 연구 결과를 조사하고, 이를 바탕으로 지질 답사를 실시하여 암석 시료를 확보한다(표 1).

둘 째, 암석의 광물학적 분석을 통하여 광물 자원의 존재 여부를 확인한다. 장보고 과학기지 주변 및 북빅토리아랜드 지역의 암석을 광물학적으로 분석하여 광상의 존재 여부를 알려줄 수 있는 지시자광물이 존재하는지를 확인한다.

셋 째, 암석의 지구화학적 분석을 통하여 광물 자원의 존재 가능성을 확인한다. 광물학적 분석을 마친 동일 암석을 지구화학적 분석을 통하여 특정 원소의 부화 혹은 결핍 여부를 알아본다. 이를 통하여 광물 자원이 존재할 가능성을 탐색한다.

다음 페이지에 연구개발 추친 체계를 나타낸 모식도가 나와 있다.

최종 목표
장보고 과학기지가 위치한 남극의 테라노바 만과 주변 지역에 있는 암석 시료들의 광물학 및 지구화학적 분석을 통하여 광물 자원의 존재 여부를 확인하고, 이를 바탕으로 남극 대륙의 광물 자원 탐사에 활용될 수 있는 기초 탐사 시스템을 구축한다.

문헌 조사 및 남극 야외 지질 조사	암석의 광물학적 분석을 통한 광물 자원의 존재 여부 확인	암석의 지구화학적 분석을 통한 광물 자원의 존재 가능성확인
문헌 조사를 통하여 남극의 배태되어 있는 광상의 연구 결과를 조사하고, 지질 답사를 통하여 암석 시료를 확보한다.	장보고 과학기지 주변의 암석의 광물학적 분석을 통하여 광상의 존재 여부를 알려줄 수 있는 지시광물(indicator mineral)이 존재하는 지를 확인한다.	광물학적 분석을 마친 동일 암석을 지구화학적 분석을 통하여 특정 원소의 부화 혹은 결핍여부를 알아보고, 이를 통하여 광물 자원이 존재할 가능성을 탐색한다.
연구 내용 및 방법	**연구 내용 및 방법**	**연구 내용 및 방법**
● 문헌 조사를 통하여 남극에 배태되어 있는 광상과 관련된 연구들을 조사 ● 장보고 기지 주변을 비롯한 빅토리아랜드 지역의 지질 답사 및 암석 시료의 확보 ● 확보된 암석 시료들을 항공 및 선박을 이용하여 국내로 이송	● 암석의 육안 관찰 및 현미경 관찰을 통하여 암석을 구성하는 광물의 종류를 확인 ● 광상의 존재 여부를 지시할 수 있는 지시자 광물(indicator mineral)의 존재 여부를 확인 ● SEM-EDS 와 EPMA 분석을 통하여 결정들의 성분을 파악	● 지구화학적 분석을 위한 시료의 준비(powder 및 hand-picking) ● XRF, ICP-AES, ICP-MS를 이용하여 주원소 및 미량원소를 분석 ● 부화 또는 결핍된 원소가 있는 지 확인하여 광상의 존재 여부를 파악

표 1. 야외답사를 수행한 지역, 위도 및 경도, 암석 유형에 대한 요약.

Location	Latitude (S), Longitude (E)	Rock types
Lichen Hills	73° 19.268′, 162° 16.950′	Granitoids with pegmatitic vein
Niagara Icefalls-1	72° 55.394′, 165° 48.240′	Ultramafic complex of Harzburgite and Dnite Serpentinized mafic rocks Syenitic pegmatite Megacrysticpyroxenite
Niagara Icefalls-2	72° 56.802′, 165° 52.733′	Quartz veins including pyrite and chalcopyrite hosted in low metamorphosed gneiss
Mt. McCarthy	72° 35.933′, 166° 09.983′	Metabasalt with numerous qtz. and Fe-carbonate veins Metamorphosed sandstone with qtz. vein Altered tuff sediment with qtz. vein
Oakley Glacier	73° 43.521′, 166° 05.279′	Granite, syenite,pegmatitic granite
Outback Nunataks	72° 41.294′, 160° 17.618′	Deformedmetasandstone or metapelite with much muscovite Granite with pegmatitic veins
Gondwana St.	74° 38.152′, 164° 13.342′	Granite, Gneiss,Pegmatitic veins in granitoids with green minerals
Daniels Range	71° 49.230′ , 160° 32.291′	Pegmatitic granite, granite with fds. phenocryst
Morozumi Range	71° 27.926′ , 161° 42.708′	Pegmatitic granite

Bog valley	71° 56.775´ , 161° 21.795´	Dolerite,pegmatitic granite with lots of garnet and tourmaline
Reilly Ridge	71° 33.274´ , 163° 18.932´	Quartz and siderite veins within sedimentary rocks

2절. 지질학, 암석학 및 광물학적 특징

남극 빅토리아랜드 지역 자원분포 기초조사를 위해 수행된 연구 지역(그림 2)의 지질학적 특징과 채집된 암석의 주요 암석학 및 광물학적 특징은 다음과 같다.

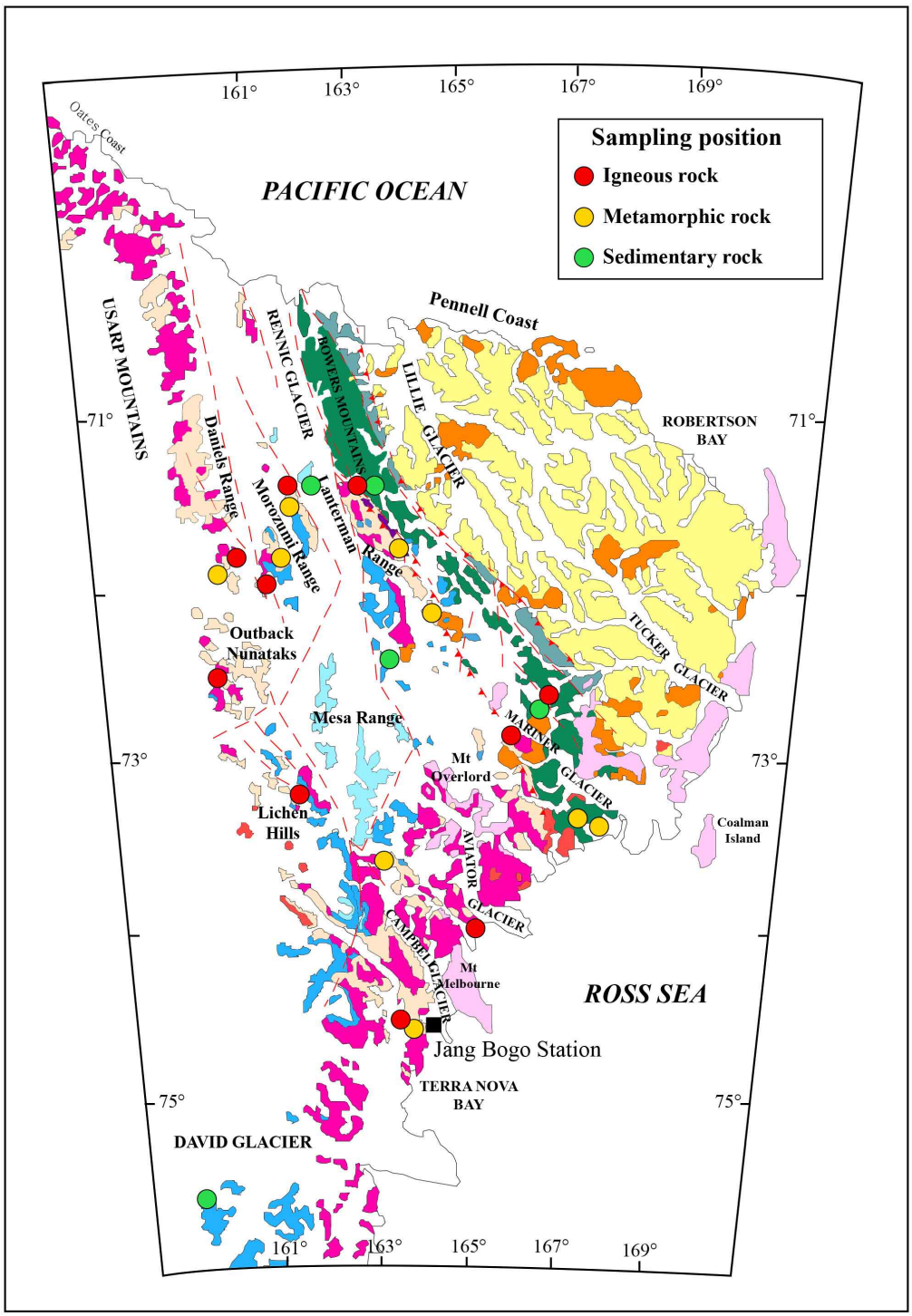
1. 나이아가라 아이스폴 (Niagara Icefall)

나이아가라 아이스폴 지역에서는 하즈버자이트(Harzburgite), 더나이트(Dunite) 등으로 구성된 초염기성 복합체(ultramafic complex)가 산출되며, 사문석화 작용을 받은 사문암(serpentine)과 결정이 매우 큰 휘암(pyroxenite) 등도 발견된다(그림 3). 이외에 이 지역에서 보고되지 않았던 황철석(pyrite)과 황동석(pyrite)이 석영 맥(quartz vein) 내에 발달하고 있는 변성암 암석도 확보하였다. 특히 황동석은 구리의 가장 주요한 광석광물로, 이 지역에 구리가 부화되어 있을 가능성을 제시해 준다. 그림 4에서 보이는 것과 같이 짙은 노란색을 띠는 황동석($CuFeS_2$)이 육안으로 관찰된다. 또한 그림 4에는 구리를 포함하는 탄산염광물인 공작석(malachite, $Cu(OH)_2CO_3$)이 나타나는 것을 알 수 있다. 공작석은 일반적으로 황동석 및 황철석(pyrite, FeS_2)이 지표에서 산화반응을 받아 만들어지는 광물로 알려져 있다. Niagara Icefalls 지역에서 황동석과 공작석이 모두 발견된다는 것은 구리를 포함하고 있는 광물이 존재하고, 이들이 지표 근처에서 산화반응을 거쳐 공작석 등과 같은 2차 구리 광물이 생성되었을 가능성을 지시한다.

2. 라이켄 힐즈(Lichen Hills) 및 아웃백 누나탁(Outback Nunataks)

라이켄 힐즈 지역에서는 거정질 화강암(pegmatite) 맥(vein)이 발달한 화강암질류 암석이 산출된다(그림 3). 1990년대 초반에 발표된 연구 결과에서 우라늄과 토륨의 방사능 수치가 높게 나온 것이 확인되었다. 따라서 거정질 화강암에 농집될 수 있는 우라늄, 리튬과 희토류원소의 부화를 살펴보고자 거정질화강암 맥이 발달한 암석들이 관찰된다. 아웃벡 누나탁 지역에서는 게 두 종류의 암석이 관찰되었다. 먼저 백운모(muscovite)가 많은 메타펠라이트(metapelite) 등의 변성퇴적암과 거정질 화강암(pegmatite) 맥(vein)이 발달한 화강암질 암석이다. 라이켄 힐즈에서와 마찬가지로 거정질 화강암 맥 내에 우라늄, 리튬 및 희토류 원소를 분석하여 이들 원소의 부화여부를 관찰할 수 있는 암석으로 여겨진다.

이들 지역에서 나타나는 거정질 화강암인 페그마타이트는 미량원소 성분에 따라


Sampling position
Igneous rock
Metamorphic rock
Sedimentary rock
PACIFIC OCEAN
ROSS SEA
Oates Coast
Pennell Coast
USARP MOUNTAINS
RENNIC GLACIER
ROWERS MOUNTAINS
LILLIE GLACIER
ROBERTSON BAY
Daniels Range
Lanterman Range
Morozumi Range
Outback Nunataks
Mesa Range
TUCKER GLACIER
MARINER GLACIER
Mt Overlord
Lichen Hills
Coalman Island
AVIATOR GLACIER
CAMPBELL GLACIER
Mt Melbourne
Jang Bogo Station
TERRA NOVA BAY
DAVID GLACIER
161°
163°
165°
167°
169°
71°
73°
75°

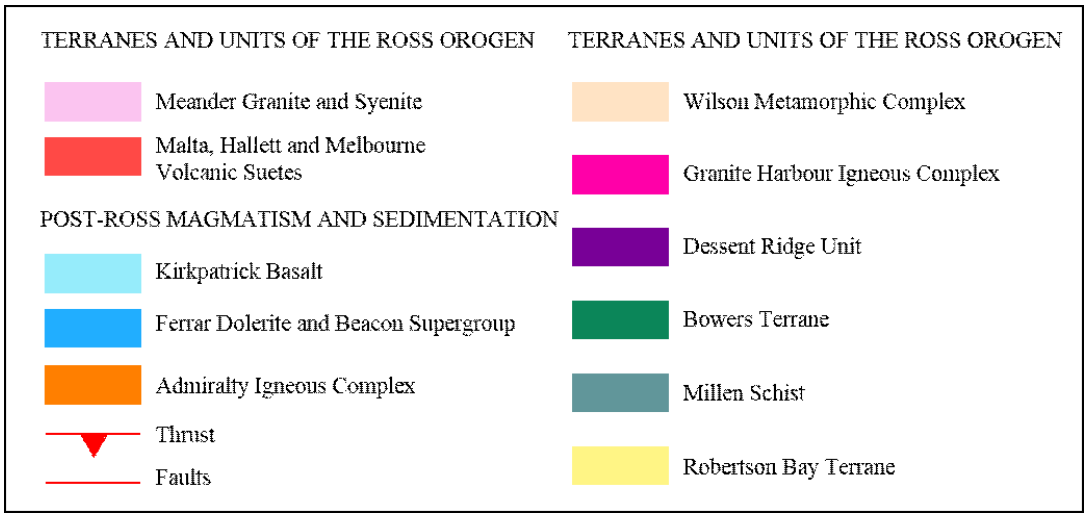


그림 2. 남극 빅토리아랜드 지역 자원분포 기초조사를 위해 수행된 연구지역과 채집된 암석의 종류.

그림 3. 남극 빅토리아랜드 지역 자원분포 기초조사를 채집된 주요 암석들의 노두 사진. (a) & (b) 나이아가라 아이스폴 지역에서 나타나는 초염기성 복합체 암석의 노두 사진, (c) 라이켄 힐즈 지역에서 나타나는 초거정질 화강암의 노두 사진, (d) 맥카시 산에서 나타나는 변성퇴적암.

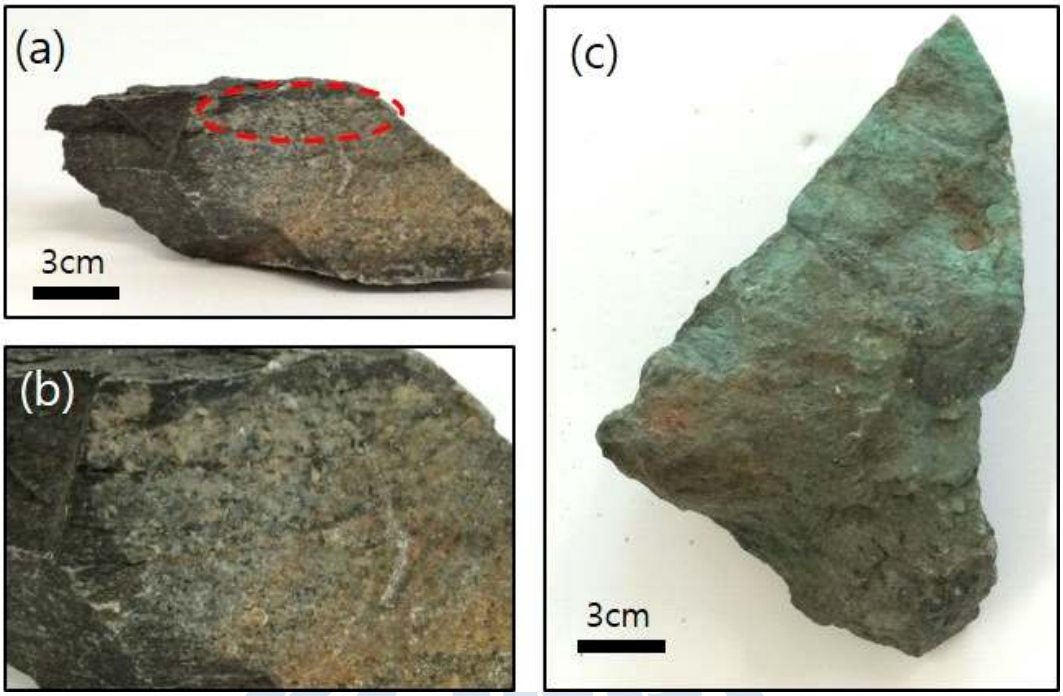


그림 4. (a) 나이아가라 아이스폴에서 채집된 황동석을 포함하고 있는 변성퇴적암, (b) (a)의 타원(점선) 안을 확대한 모습. 짙은 노란색을 띄는 작은 광물들이 대표적인 구리 광석광물인 황동석이다. (c) 나이아가라 아이스폴에서 채집된 공작석(녹색부분)이 표면에 발달한 암석.

리튬(Li), 세슘(Cs), 탄탈륨(Ta)이 부화된 LCT family와 니오븀(Nb), 이티륨(Y), 불소(F)가 부화된 NYF family로 나뉜다. LCT 유형의 거정질 화강암이 대부분 퇴적암 기원을 갖는 S형 화강암(S-type granite)을 기원으로 하는데 반해 NYF 유형의 경우 A형 화강암을 기원으로 한다고 알려져 있다. 라이켄힐즈와 아웃벡누나탁 지역에서 채집한 거정질 화강암을 포함한 화강암질 암석들의 미량원소 성분은 이 암석들이 리튬, 세슘 및 탄탈륨이 부화된 LCT 유형의 거정질 화강암에 가깝다다는 것을 보여준다. 이 암석들의 주원소 성분(Al_2O_3, Na_2O, CaO, K_2O) 함량은 $Al_2O_3/(Na_2O+CaO+K_2O)$ 몰비가 1 이상인 과알루미나질 화강암(peraluminous granite)임을 지시하는데, 이러한 과알루미나질은 S형 화강암의 특징이다. 또한 연구지역의 암석들은 백운모(muscovite), 석류석(garnet), 전기석(tourmaline), 흑운모(biotite) 등으로 구성된 광물조합을 보여주며, 이러한 광물 조합은 S형 화강암에서 대표적으로 나타나는 조합 중에 하나이다. S형 화강암은 퇴적 기원의 변성 편암과 알루미나질 편마암의 부분재용융작용(anatexis)으로 인해 생성되며, 변성 전의 퇴적암들은 주로 점토를 다량으로 함유하고 있는 이질암(pelite)으로 구성되어 있다고 여겨진다. 이러한 S형 화강암의 경우 판의 섭입이나 충돌과 같이 지구조적 활동과 연관되어 있다고 생각되나, 대부분의 경우 거정질 화강암은 광범위한 변형작용의 흔적이 남아있지 않다. 이를 근거로 LCT 유형의 거정질 화강암은 지화학적 특징은 지구조적 활동보다는 운모가 풍부한 변성암에서 유래한다고 여겨진다. 이는 라이켄힐즈와 아웃벡누나탁 지역의 거정질 화강암의 LCT 유형에 해당되는 특징적인 미량원소 성분이 연구 지역 암석 내에서 관찰되는 운모류 성분에서 기인하였다는 추측을 가능하게 한다. 남극 북빅토리아랜드 지역 전반에 걸쳐 관입해 있는 Granite Harbour Intrusive Complex에 해당되는 지역(Lichen Hills, Outback Nunataks, Morozumi Range, Daniels Range, Boggs Valley)에서 채집된 화강암질 암석에는 거정질의 전기석(tourmaline)이 많이 포함되어 있다(그림 5). 전기석은 붕규산염 광물(boron silicate mineral)로써 $XY_3Z_8Si_6B_3O_{27}(OH,O,F)_4$ 에 해당하는 복잡한 화학조성을 갖고 있다. X, Y, Z 자리에 어떠한 원소가 들어가느냐에 따라 전기석의 성분은 매우 다양하게 바뀌며, X 자리에는 Na, Ca, K, Mg가 Y 자리에는 Mg, Fe, Mn, Cr, Li이 Z 자리에는 주로 Al이 들어간다. 따라서 각각의 자리에 들어간 원소에 따라 전기석의 성분이 달라진다. 또한 전기석이 급격한 속도로 생성되어 자라날 경우에는 전기석의 중심부와 가장자리 부분의 성분 변화가 생기게 되며, 이를 통해 전기석이 생성된 마그마나 모암의 성분 변화를 추적해 볼 수 있다.

현미경과 BSE 이미지로 관찰한 아웃벡 누나탁 지역의 화강암질 암석 내 전기석은 누대구조(zoning)가 뚜렷하게 관찰되며, 이는 전기석이 생성된 모암의 성분변화가 있었음을 지시하고 있다. EPMA를 통한 전기석 중심부 및 가장자리 부분의 주원소

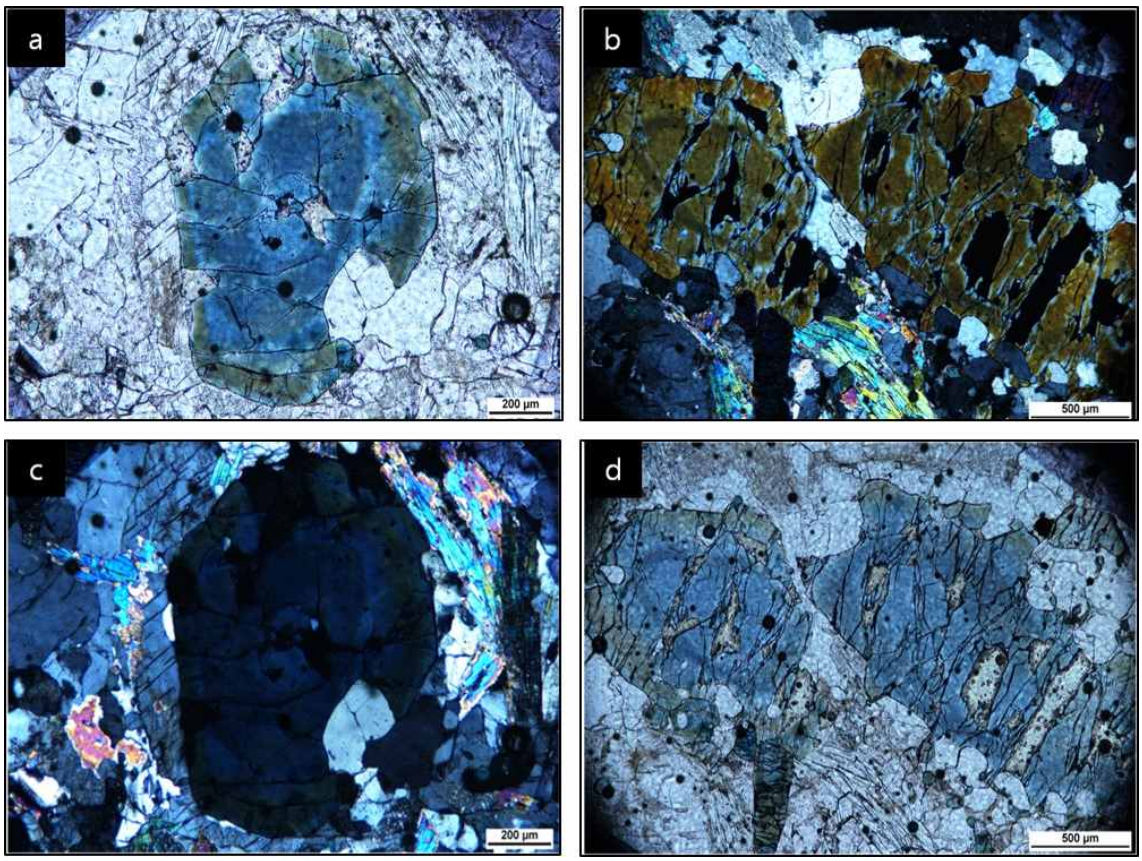


그림 5. 아웃벡 누나탁 지역에서 나타나는 거정질 화강암 내에 포함된 전기석의 편광현미경 사진. 누대구조가 뚜렷하게 관찰된다.

성분 측정 결과, 대부분의 전기석에서 중심부도 가장자리 부분에서 Fe/(Fe+Mg)의 비가 낮아졌으며, Si, Al, Na, Ca는 유의미하지 않은 미세한 함량 변화를 보였다. 이러한 성분 변화를 일으킨 원인이 전기석을 만든 모암의 성분 변화에서 기인한 것인지 물리화학적 조건의 변화에서 기인한 것인지는 보다 심층적인 후속 연구를 통해 밝힐 수 있을 것으로 기대된다.

3. 맥카시 산(Mt. McCarthy)

맥카시 산 근처에서는 석영 맥(quartz vein)과 철-탄산염 맥(Fe-carbonate vein)이 메타바사이트(metabasite), 변성받은 사암 및 응회암(tuff) 등의 변성퇴적암에 발달하고 있다(그림 3). 맥 내에 금, 철, 구리 등을 함유하고 있는 광물이 존재하는 지 확인하는 지 조사하였다. 이 지역은 이탈리아 연구진에 의해 석영 맥 내에서 발달한 금이 보고된 지역과 지질학적으로 연결되는 지층으로 금을 비롯한 주요 금속 광물이 배태되어 있을 가능성이 높다고 여겨진다. 또한 철-탄산염 맥이 대량으로 발달하는 것은 철을 공급해 줄 수 있는 호상철광상(BIF) 등과 같은 철 함유량이 매우 높은 지층 혹은 암석의 존재를 지시한다.

4. 보그스 밸리 (Boggs Valley)

보그스 밸리의 하부(그림 6)는 low grade 변성퇴적암으로 구성되어 있으며, 주로 quartzite와 변성퇴적물을 포함하는 phyllitic schists로 구성되어 있다 (Rennick Schists). 이러한 관찰 결과는 Tessensohn et al. (1990)과 Schoner and John (2014)의 연구 결과와 일치한다. 대부분의 화강암질 관입암은 주로 몇 m 단위의 거정질 화강암(pegmatite)으로 이뤄져 있으며 많은 양의 전기석을 포함하고 있다. 암석에 포함된 전기석의 양은 계곡의 서측으로 갈수로 증가하는 특징을 보인다. Permian Beacon Supergroup에 속하는 퇴적층과 Rerra dolerite sill 이 이러한 하층부와 관입암들을 덮고 있는 것이 잘 나타난다.

5. 다니엘스 산맥(Daniels Range) 및 모로주미 산맥(Morozumi Range)

다니엘스 산맥의 Daniels Range는 북빅토리아랜드 Wilson terrane에 속해있으며, Granite Harbour Intrusive와 WPC(Wilson Plutonic Complex)가 잘 관찰된다(그림 6). 앞서 설명하였듯이 높은 우라늄 함량을 보이는 암석 또는 광물이 포함되었을 가능

성이 매우 높은 지역이다. Daniels Range는 2km 이상의 커다란 pluton으로 구성되어 있다. 상대적으로 균질한 화강암 조성을 보여주며, 화강섬록암(granodiorite)과 복운모 토날라이트(two mica tonalite)가 산출된다 (Sheraton et al., 1987). 화강암들은 포획암(xenolith)들을 포함하고 있는 경우가 있으며, 거정질의 K-장석을 함유하고 있는 화강암들도 자주 관찰된다. 대부분의 화강암질 암석은 석영, 장석과 소량의 백운모, 흑운모로 구성되어 있으며, 장석 반암들이 잘 발달되어 있다.

모로주미 산맥의 화강암질 복합체(Igneous complex)는 다양한 관입암들로 구성되어 있다(Rocchi et al., 2015)(그림 6). Morozumi phyllite이 이러한 화강암질 복합체를 포함하고 있다. 이 변성퇴적암은 Permian sandstone of the Beacon Supergroup에 의해 부정합으로 덮여있다. Monzogranite으로 여겨지는 Morozumi granite이 관찰되며, 거정질 K-장석을 다량 포함하고 있는 것이 특징이다. 또한 백운모와 전기석을 다량 포함하고 있는 우백질화강암(leucogranite)이 특징적으로 잘 관찰된다. 이 우백질화강암은 Rocchi et al. (2015)에 의해 Morozumi leucogranite으로 분류되었다. 우백질화강암은 작은 규모로 발달하고 있으며, 전기석의 결정 크기 역시 다양하게 나타난다.

6. 라일리 릿지 (Reilly Ridge)

라일리 릿지에는 수 m 두께의 석영 및 탄산염 맥이 Bowers terrane의 Sledgers group (lower greenschist facies metavolcanics)과 Glasgow formation (Middle Cambrian meta-sediment) 내에 잘 발달하고 있는 것이 관찰된다(그림 6). Crispini et al. (2011)은 Sledgers group에서 남극에서 최초로 금맥을 형성하는 광화작용을 보고한 적이 있다. 관찰된 맥은 금을 비롯한 주요 금속 원소들을 포함한 것으로 보이지는 않으며, 이 지역에 맥을 발달시킨 열수 작용은 충분한 광화작용을 일으킬만한 원소들을 함유하지 못했던 것으로 생각된다. 맥 표면에서 관찰되는 매우 소량의 일부 불투명 광물(opaque mineral)들이 가치 있는 금속 원소들을 포함되어 있을 가능성이 있다.

그림 6. 남극 빅토리아랜드 지역 자원분포 기초조사를 통해 채집된 주요 암석 및 노두 사진. (a) Boggs Valley의 하부층을 구성하는 Rennick schist (어두분 부분)와 화성 관입암체(밝은 부분), (b) Boggs Valley에서 산출되는 전기석을 다량 함유한 관입암체, (c) Boggs Valley의 하부(basement), 중부(Takrouna Formation) 및 상부층(Ferrar dolerite sill), (d) Morozumi Range의 항공사진, (e) 흑운모 기저와 거정질 K-장석을 포함하고 있는 Morozumi granite, (f) 백운모와 전기석을 함유하고 있는 Morozumi 우백질 화강암, (g) Daniels Range의 항공사진, (h) Daniels Range에서 산출되는 포획암을 포함하고 있는 화강암질 암석(사진 우측 상부에 어두운 색깔의 암석이 포획암), (i) Daniels Range에서 산출되는 거정질 K-장석을 포함하고 있는 화강암, (j) Reilly Ridge에서 발달하는 석영 맥과 맥 내의 검은 결정, (k) Reilly Ridge에서 발달하는 석영 및 탄산염암 맥.

3절. 지구화학적 특징

남극 빅토리아랜드 지역 야외지질조사를 통해 채집된 암석 시료를 선별한 후, IPC-MS을 이용하여 미량원소 성분을 분석하였다.

1. 지구화학적 분석 결과

가. 주요원소 및 미량원소 해석

본 연구에서는 남극 장보고 과학기지가 위치하고있는 테라노바 만을 포함한 빅토리아랜드 지역에서 채취한 암석시료 (화성암, 변성암, 퇴적암)를 이용하여 지구화학적인 방법으로 남극 대륙지각의 지구조 해석을 주제로 연구하였다. 기존의 자기활동의 연구에 의하면, 남극의 반도는 지난 고생대초기부터 주로 칼크-알카리질(alc-alkaline) 마그마의 지배적인 영향을 받아온 것으로 조사되었다 (Woo et al., 2013). 연구지역 내에서 얻어진 암석들의 경우 조성의 구별이 비교적 쉽게 가능하며, 모든 화성암의 경우 SiO_2가 증가함에 따라, K_2O/SiO_2, Rb/SiO_2, Th/SiO_2 비가 증가하였고 Ce/SiO_2와 La/SiO_2 비의 경우는 보다 적게 증가하는 경향을 보였다. 특히, 뜨거운 용암이 냉각하거나 결정화로 인해서 생성되는 pegmatitic granite는 칼크-알칼리질(calc-alkaline magma) 마그마 기원임을 지시하고 있다(그림 7, 그림 8). 칼크-알칼리 화산으로 형성된 남극의 북빅토리아랜드의 경우 LILE (high large ion lithophile elements; 예로 K, Rb, Th)과 HFSE(high field strength elements; 예로 Zr, Nb, Ti)의 비가 조산대의 영향을 받지 않은 지역보다는 상대적으로 부화되고 있다. 화성기원 melts의 경우 높은 값의 LILE/HFSE 비를 보여주는 것은 침강된 슬래브에서 탈수 과정이 일어나고 공급된 물은 마그마(melt)로부터 적은 양의 광물의 분별작용을 일으키는 역할이라고 생각된다. 산성화된 암석의 경우 LILE/HFSE 비는 증가하게 되는데, 아마도 마그마로부터 계속적으로 미량의 광물이 제거되기 때문일 것이다. 본 연구에서는 부화된 대륙지각의 맨틀에 포함된 LILE의 원소들은 남극의 아래의 해저 대륙 주변부에 유입되면서 LILE가 증가하면서 칼크-알카리질 마그마의 특성을 보이는 것으로 해석된다(그림 9, 그림 10).

나. 황 동위원소 분석 필요성

황은 지각에서 14번째로 많은 원소이며, 다양한 황화물 형태의 광석광물들을 형

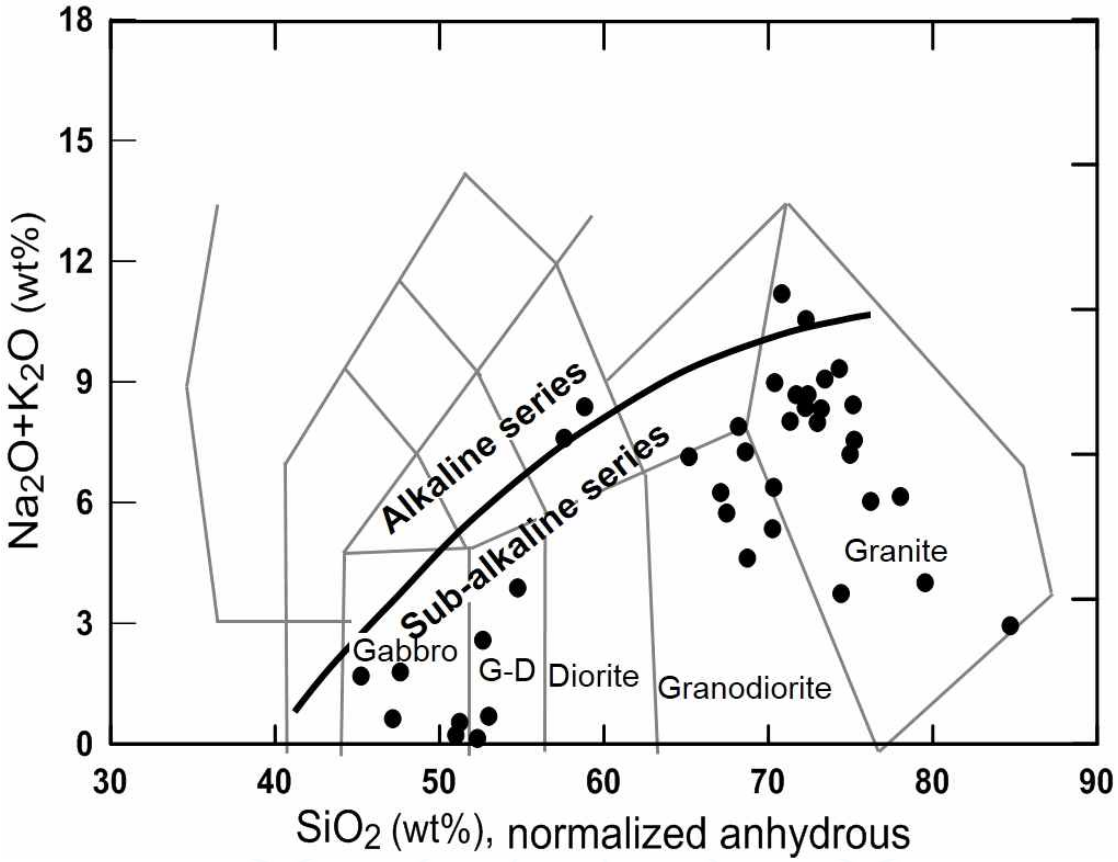


그림 7. 연구지역에서 채집된 화강암류 암석들이 도시된 TAS 다이어그림. 대부분의 시료가 화강섬록암과 화강암 영역에 도시된다.

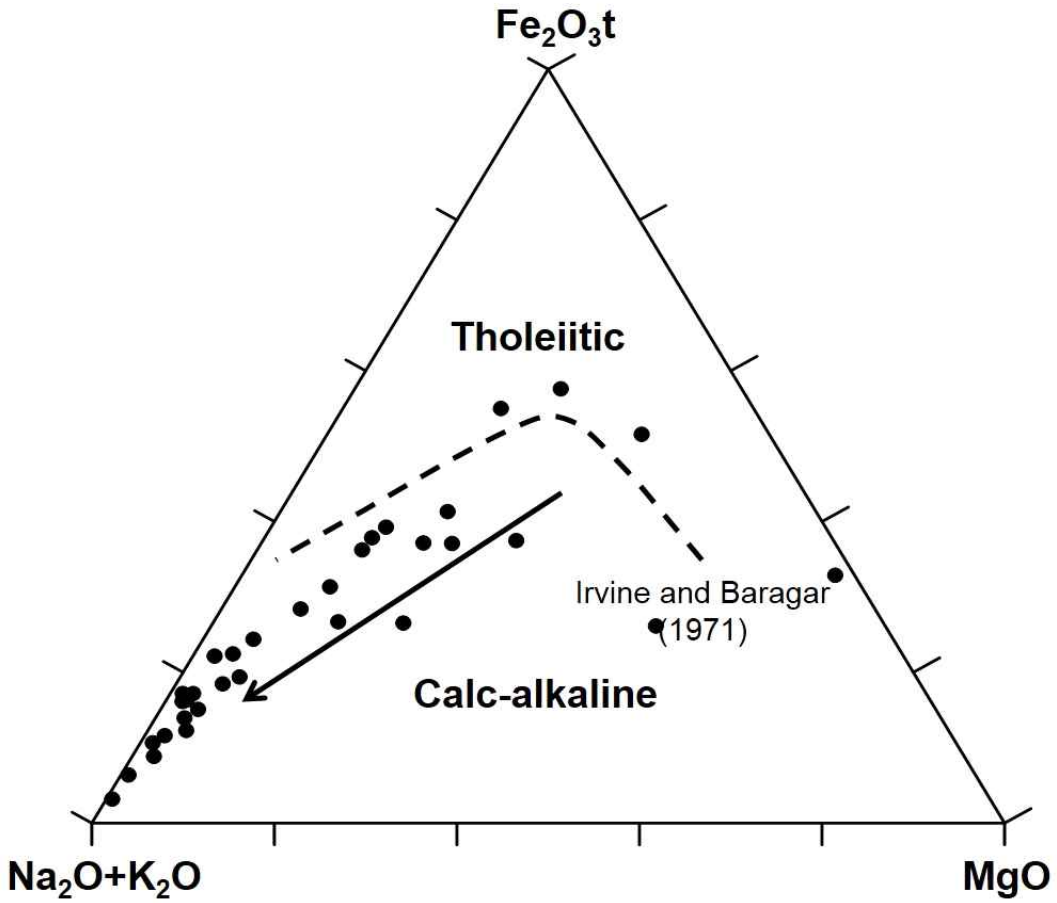


그림 8. 연구지역에서 채집된 화강암류 암석들이 도시된 AFM 다이어그림. 대부분의 시료가 칼크-알칼리 계열 영역에 포함된다.

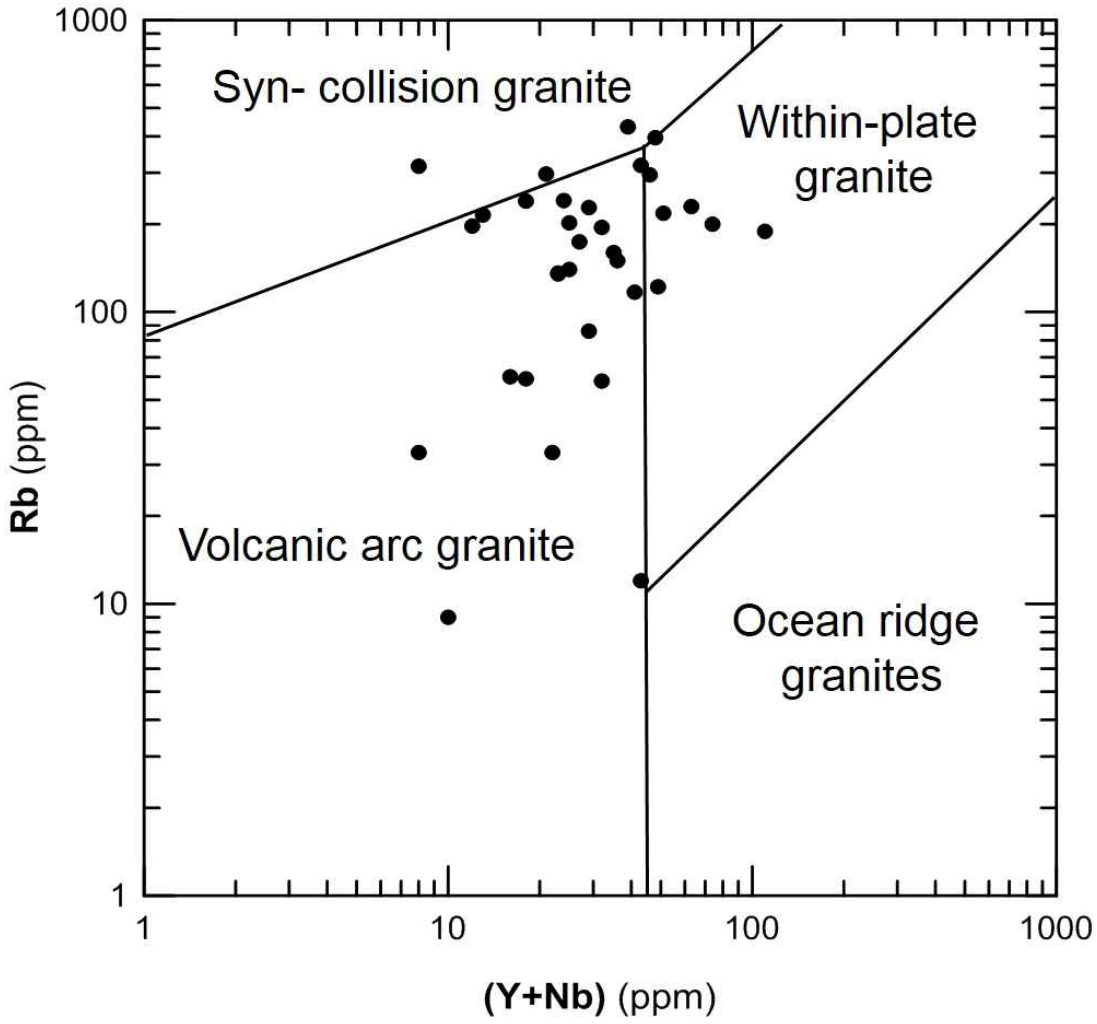


그림 9. 연구지역에서 채집된 화강암류 시료의 미량원소 다이어그램. 대부분의 시료가 화산호 화강암 영역에 도시된다.

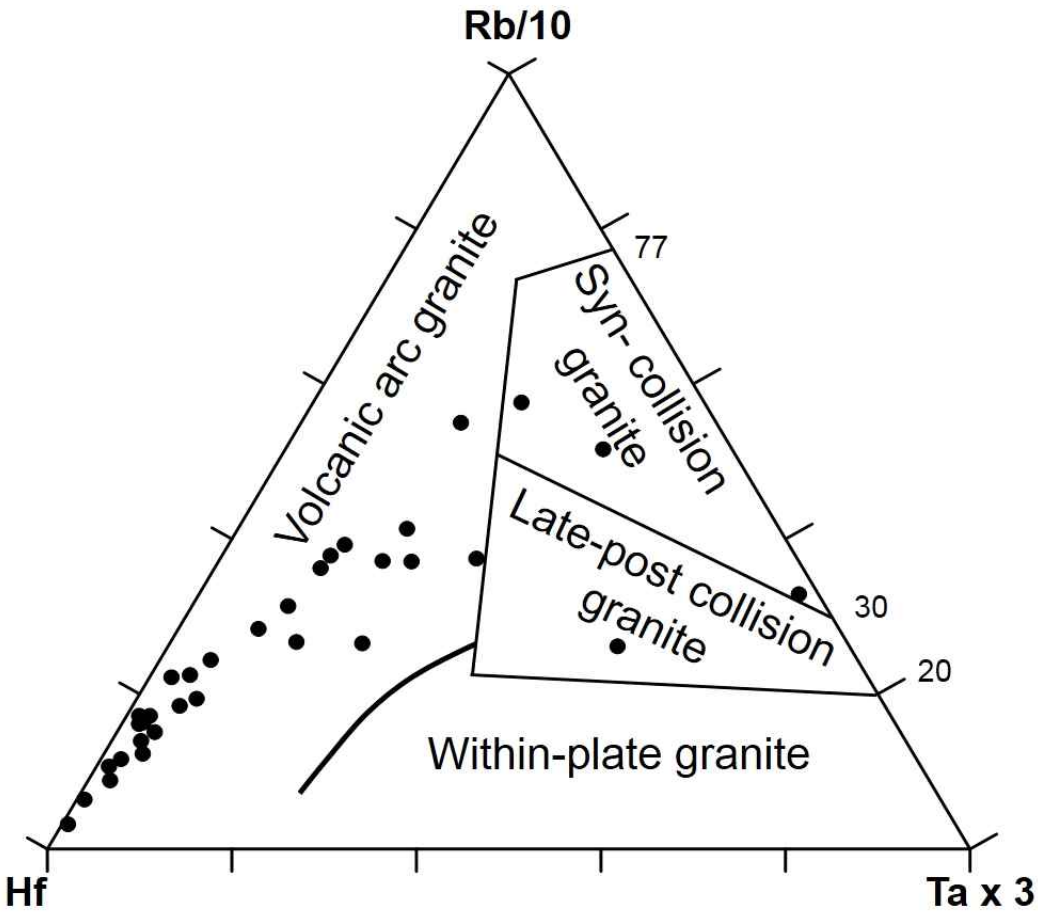


그림 10. 연구지역에서 채집된 화강암류 시료의 미량원소 다이어그램. 대부분의 시료가 화산호 화강암 영역에 도시된다.

성한다. 황의 경우 32S(95.02%), 33S(0.75%), 34S(4.21%), 36S(0.02%)로 총 4개의 안정 동위원소가 존재하며, 다양한 저장소 및 지질학적 과정을 통해 동위원소 값이 변화하는데, 주요한 황의 저장소들은 각각의 특징적인 황 동위원소 값을 갖고 있으며(그림 11), 이들의 기여도에 따라 형성된 황화물의 황 동위원소 값이 많은 영향을 받는다. 또한 산화-환원 반응과 같은 지질학적 반응에 따라 황화물의 황 동위원소 값이 영향을 받게 되는데, 일반적으로 더 무거운 황 동위원소(34S)가 산화 상태의 물질에 더 많이 분별된다. 따라서 황화물의 황 동위원소 조성을 측정하면 황의 기원과 형성과정을 이해할 수 있다.

야외 지질 조사를 통해 채집된 암석의 주원소, 부원소 및 미량원소 분석 결과, 지각 평균값에 비해 부화된 원소가 존재하는 지역은 Niagara Icefalls(Cr, Ni, Cu, Mo, Ag, W), Lichen Hills(Nb, Ta, U, Th), Outback Nunataks(Li, Cs, Ta, Sn), Oakley Glacier(Ta), 장보고 과학기지 주변(Be, Sn)이다. 이 중에서 상대적으로 광상의 존재 가능성이 높은 지역이면서 광상의 유형에 따라 생성되는 광석광물이 황화물로 구성되었을 것으로 추정되는 지역은 Niagara Icefalls 지역이다. 앞서 설명하였듯이 이 지역에서는 주요 구리 광석광물 중에 하나인 황동석이 관찰되었으며, 하즈버가이트와 휘암 등으로 구성된 초염기성/염기성 암체가 크롬, 니켈, 구리, 백금족 원소 등을 함유하고 있는 광상을 만들어낼 가능성이 있는 지역이다. 추가적인 지질조사와 시료 채집의 어려움으로 인해 기존에 확보한 암석에서 황화물의 존재 여부를 관찰 하였으나 지난 연구에서 발견되어 보고된 황동석 이외에 추가적인 황화물은 발견하지 못해 황의 기원을 보다 확실하게 파악할 수 있는 황 동위원소 측정이 이뤄지지 못하였다. 따라서 충분한 금속 원소들이 존재한다고 가정하였을 때 마그마 내에서 황의 포화가 일어날 정도의 충분한 황이 공급되었는지 확인하기 어렵다고 여겨진다.

그러나 일반적인 화성암에서는 잘 생성되지 않는 황동석이 존재하며, 기존에 존재하던 구리 광물의 용해 및 산화-환원 반응에 의해 생성되는 공작석이 함께 관찰되는 것으로 보아 구리와 황의 공급이 일정 부분 이뤄졌던 것으로 여겨진다. 특히 이러한 구리와 황의 공급은 Niagara Icefalls 지역에서 산출되는 초염기성/염기성 암체와 연관되어 있을 것으로 생각되는데, (초)염기성 암석의 생성과 연관된 광상들은 주로 마그마 결정화 과정 및 분별작용에 영향을 받게 된다. 이러한 마그마 광상(magmatic sulfide ore deposit)은 황의 포화 여부에 따라 sulfide-poor system과 sulfide-rich system으로 나눠지는데, 전자는 주로 백금족 원소들을 포함한 광상을 형성하며 후자는 주로 니켈-구리 광상과 연관되어 있다. 다른 지역에서 연구된 광상들인 Noril'sk, Duluth Complex, Sudbury, Voisey's Bay, Stillwater Complex,

Merensky Reef of the Bushveld Complex 등의 황 동위원소 값의 범위는 이러한 광상의 유형에 따라 나뉜다(그림 12). Sulfur-poor system에 해당되는 광산에서는 황 동위원소 값(δ34S)이 맨틀의 값인 0‰ 근처에 모여 있으나, sulfur-rich system에 해당되는 광산은 보다 넓은 범위를 가지며 양의 값으로 치우친다. 이는 마그마에서 기원한 황이 일반적으로 높은 δ34S 값을 갖는 모암의 황과 지각 혼염(crustal contamination)에 의해 야기된다고 여겨진다. 따라서 추가적인 시료가 확보 이후 다량의 황화물의 존재 여부를 확인할 수 있다면, 황 동위원소 분석을 통해 황의 부화 혹은 결핍 여부와 함께 황 동위원소 분석을 통해 존재 가능성이 상대적으로 높은 금속 원소의 종류도 고찰해 볼 수 있다.

2. 나이아가라 아이스폴 (Niagara Icefalls)

이 지역은 하즈버자이트(Harzburgite), 더나이트(Dunite) 등으로 구성된 초염기성 복합체(ultramafic complex)가 산출되며, 사문석화 작용을 받은 사문암도 발견된다. 염기성/초염기성 암체는 chromite deposit, base-metal Ni-Cu sulfide deposits, PGE sulfide deposit 등을 발달시킬 수 있는 모암의 역할을 한다. 나이아가라 아이스폴 지역에서 채집한 시료의 희토류 원소를 분석하여 CI Chondrite, Silicate Earth 및 Continental Crust에 normalizing 한 후 도시하였다(그림 13). 대부분의 시료가 CI chondrite와 Silicate Earth에 normalizing 하였을 때 경희토류가 중희토류에 비해 부화가 많이 된 모습을 보여주며, 특히 시료의 부화정도가 큰 것을 알 수 있다. 그러나 continental crust에 도시하였을 때는 2개의 시료(NI2와 NI6)가 1 근처의 값을 갖고 나머지 5개의 시료는 오히려 결핍된 현상을 발견할 수 있는데, 이는 Niagara Icefall 지역에서 산출되는 염기성/초염기성 암체는 대륙지각을 대표하는 물질이 아니고 맨틀의 성분을 반영하고 있기 때문이라 생각된다. Niagara Icefall 지역에서 산출되는 염기성/초염기성 암체의 지구화학적 특징 중 하나는 크롬(Cr)의 함량이 다른 원소들에 비해 높다는 점이다. 크롬의 함량은 78~2700 ppm 범위를 보이며 특히 NI16과 NI18은 각각 2200과 2700 ppm 값을 보여준다. 두 시료의 높은 크롬 함량은 이 지역에서 chromite을 비롯한 크롬 포함 광물이 생성될 수 있는 가능성이 있다는 점을 지시해 준다고 여겨진다.

3. 라이켄 힐즈(Lichen Hills)

앞서 설명하였듯이 라이켄 힐즈 지역에서 우라늄과 토륨의 방사성 활동 이상치가

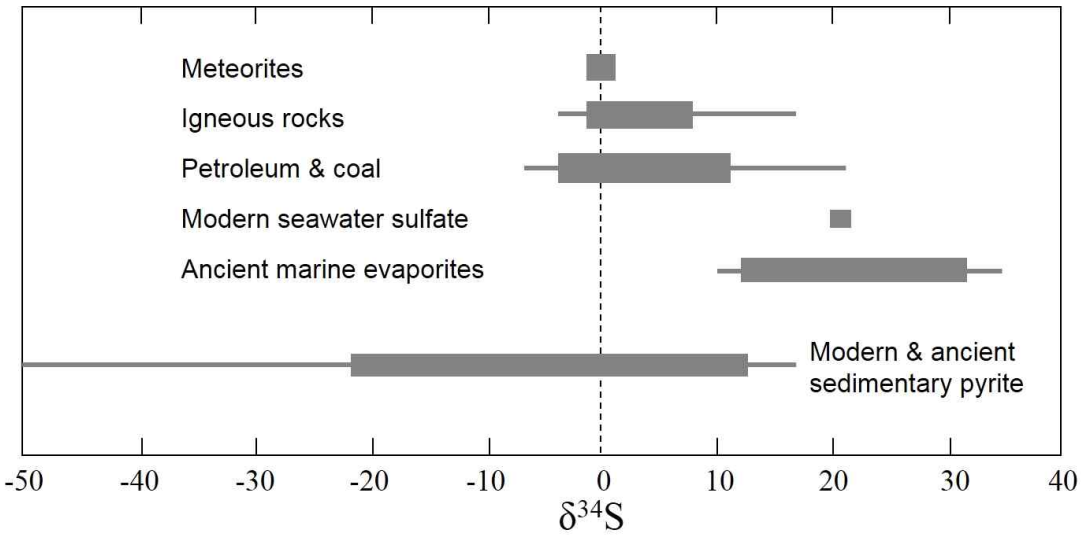


그림 11. 기원 및 저장소에 따른 황 동위원소 조성을 보여주는 다이어그램.

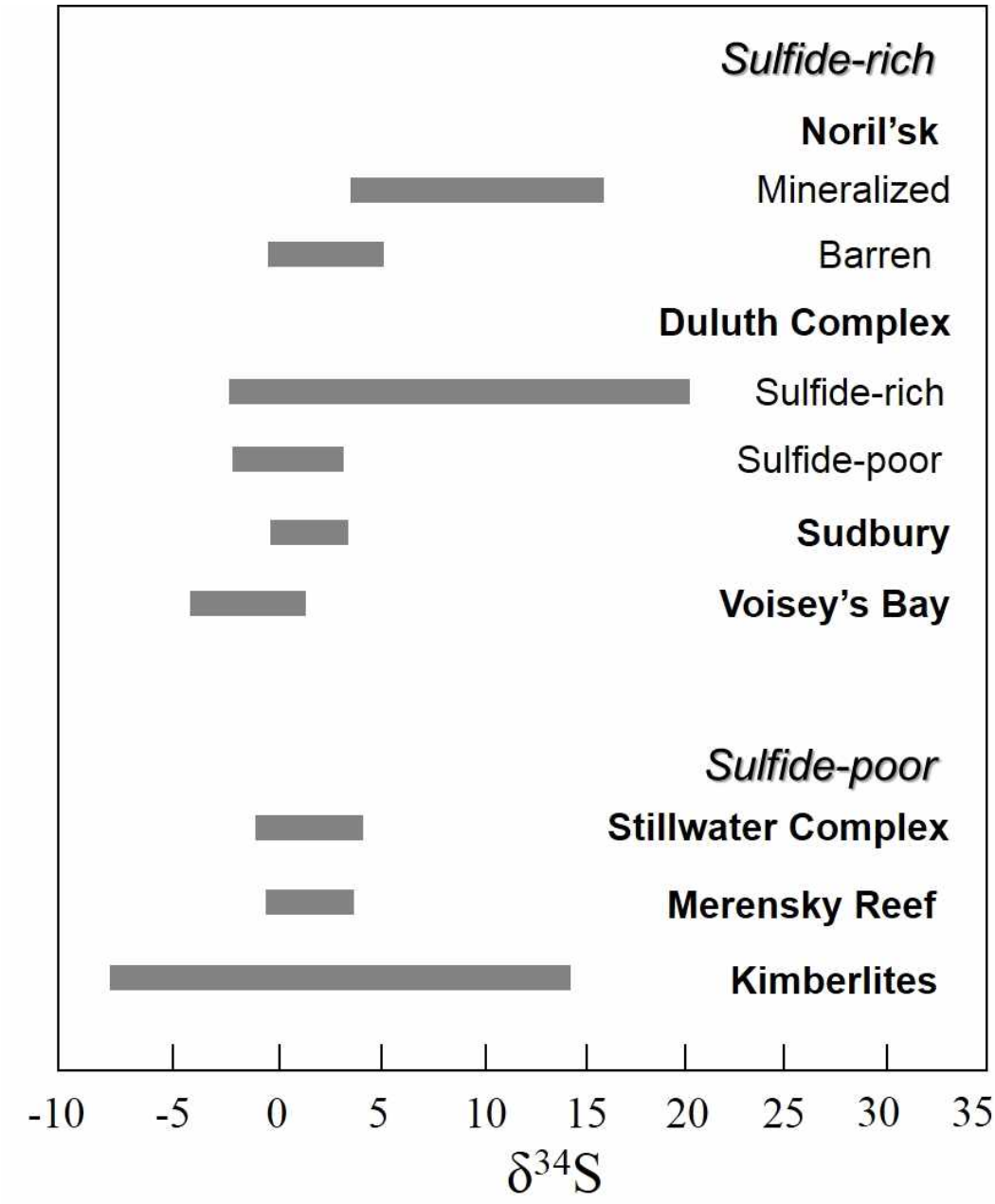


그림 12. 초염기성/염기성 암석을 모암으로 하는 지역에서 생성되는 세계의 주요 금속 광상들의 황 동위원소 조성 변화를 보여주는 다이어그램.

관찰되었다. 이 지역은 다량의 거정질 화강암 노두들이 노출되어 있는 지역으로 우라늄 함량이 높을 것으로 기대되는 지역이다. 암석 시료는 흔히 희토류의 평균함량을 측정한 뒤 대륙지각 평균값을 이용하여 normalizing을 한 후에 도시하여 대륙 지각의 평균에 비해 얼마나 관련 원소들이 부화되었는지 확인하고자 하였다(그림 14). 모든 시료에서 경희토류(LREE)가 중희토류(HREE)에 비해 부화되어 있는 경향을 보인다. 경희토류의 경우 대륙 지각 평균에 비해 부화되어 있는 시료와 결핍되어 있는 시료들이 골고루 나타나며, 부화 (최대 4배) 및 결핍 (0.1배)의 정도가 매우 미미하게 나타난다. 이는 라이켄 힐즈 지역에서 채집된 암석 시료들에 포함된 희토류 원소의 함량이 다른 일반 암석들에 비해 특별한 이상치를 보이는 것은 아니라 생각된다. 이외에 관찰되는 뚜렷한 특징은 Eu의 음 이상 현상(negative anomaly)이다. 다른 희토류 원소들이 +3의 전하를 갖는데 비해, Eu의 경우에는 +2와 +3의 전하를 가질 수 있다. 따라서 Eu 규산염 광물에 많이 포함되어 있으면서 같은 +2의 전하를 갖는 Sr 혹은 Ca을 치환하여 규산염 광물에 들어갈 수 있다. 음 이상 현상이 뚜렷하게 관찰되는 것은 라이켄 힐즈에서 산출되는 암석이 형성한 용융체가 분별결정 작용을 상당히 진행된 용융체임을 지시한다.

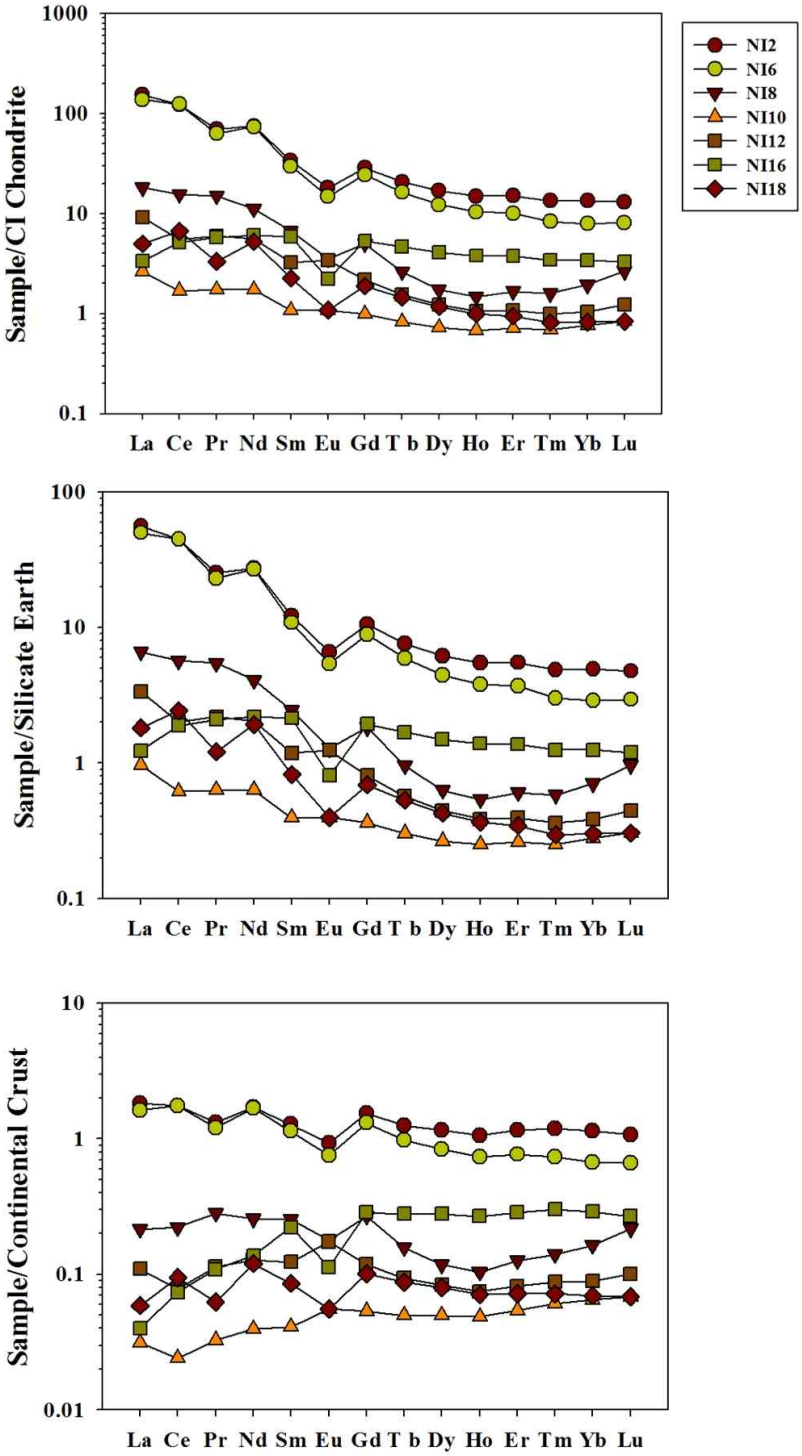


그림 13. 나이아가라 아이스폴 지역에서 채집된 초염기성 복합체의 희토류 분석 결과. normalizing에 사용된 (위) chondrite, (중간) bulk silicate 및 (아래) continental crust 의 값은 Mcdonough and Sun (1995)에서 보고된 값을 사용함.

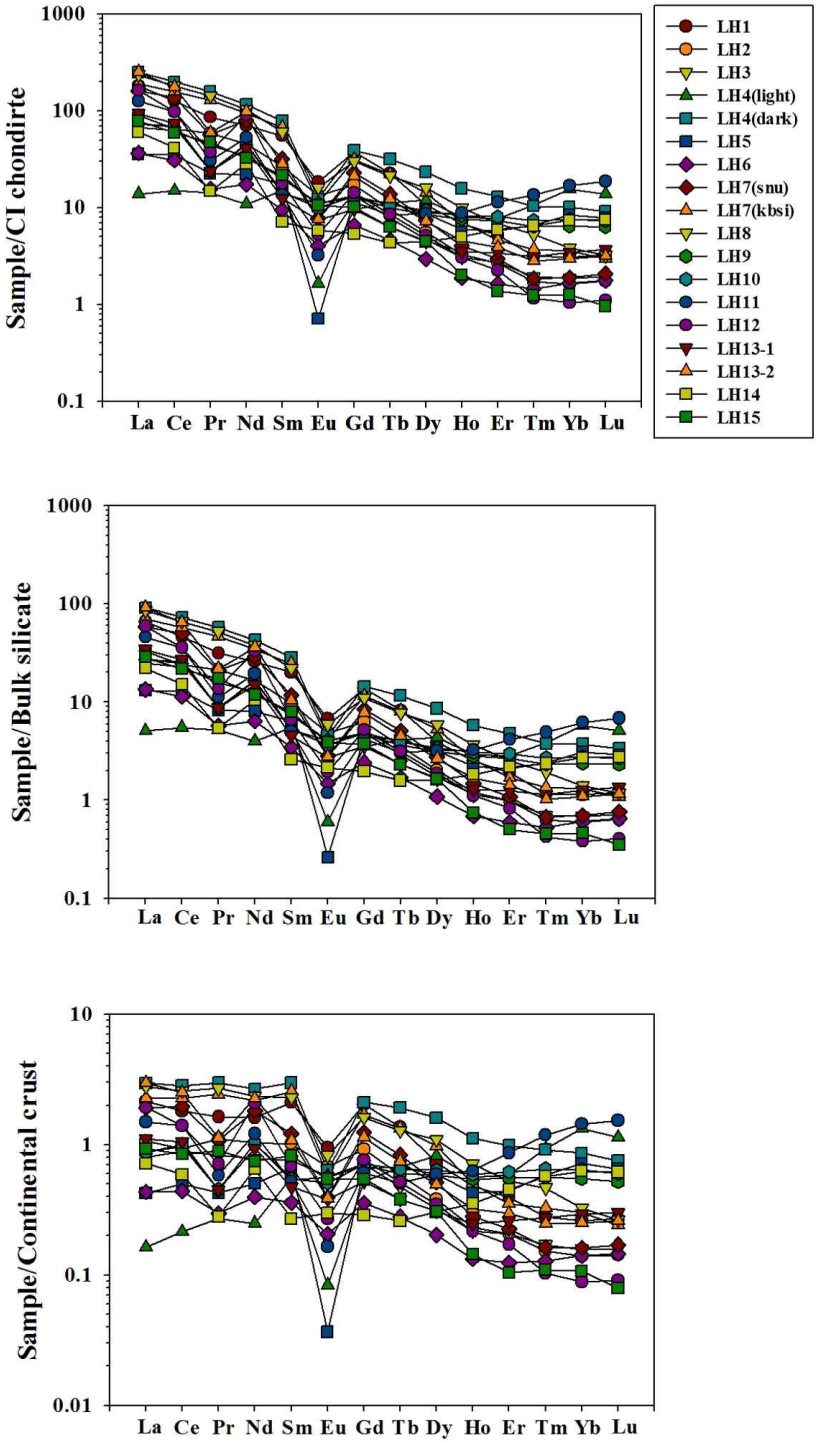


그림 14. 라이켄 힐즈 지역에서 채집된 거정질 화강암의 희토류 분석 결과. normalizing에 사용된 (위) chondrite, (중간) bulk silicate 및 (아래) continental crust의 값은 Mcdonough and Sun (1995)에서 보고된 값을 사용함.

4절. 자원분포 및 유망광화대 정보 조사

야외조사, 암석학 및 광물학적 관찰 결과와 지구화학적 분석 결과를 종합하여 상대적으로 잠재성이 높다고 평가되는 남극 빅토리아랜드 지역의 자원분포와 유망 광화대에 대한 정보를 아래와 같이 조사하였다.

1. 나이아가라 아이스폴 (Niagara Icefalls)

북빅토리아랜드 나이아가라 아이스폴 지역은 앞서 언급하였듯이 하즈버가이트(harzburgite), 휘암(pyroxenite) 등의 초염기성/염기성 암체가 나타나며, 일부 지역에서는 사문석화 작용(serpentinization)을 받은 암석들도 관찰된다. 이러한 초염기성/염기성 암석들은 맨틀 층상형 크롬철석암 광상(mantle stratiform chromite deposit)을 형성할 수 있으며, 맨틀-용융체 상호반응과 분별작용에 의해 형성되는 것으로 알려져 있다. 또한 니켈-구리-백금족 황화물 광상(Ni-Cu-PGE sulfide deposit)이 이러한 초염기성/염기성 암체에서 형성될 수 있으며, 특히 층상의 염기성-초염기성 관입암에서는 PGE을 포함한 귀금속 황화물(precious metal sulfide) 광상이 주로 나타난다. 이 지역에서는 대표적 구리 광석광물인 황동석 결정이 발견되었으며, 구리 황화물 및 황철석의 산화-환원 반응에 의해 생성되는 구리 산화물인 공작석(malachite)도 함께 관찰되었다. Niagara Icefalls 지역에서 산출되는 암석의 지화학 분석 결과 역시 이 지역에 관련 광상의 존재 가능성이 다른 지역보다 높음을 지시하였다.

지구화학적 분석결과를 보면 시료에 따라 평균 지각 함량보다 높은 구리(최대 109배), 크롬(최대21배), 니켈(최대 19배), 몰리브덴(최대 28배), 은(최대 57배), 텅스텐 (최대 14배) 등이 측정되었다(그림 15). 구리의 경우 일반적인 구리 광산에서 주광석으로 산출되는 황동석과 공작석의 존재로 인해 높은 함량이 측정된 것으로 여겨지며, 크롬과 니켈은 초염기성 및 염기성 복합체에서 일반적으로 높은 값을 보인다. 측정된 결과는 다른 대륙에서 개발 중인 광산의 함량에 비해 높은 수준은 아니지만, 남극 대륙의 추후 광물 자원 탐사에 있어 Niagara Icefalls 지역이 광물 자원 존재할 수 있는 높은 잠재성을 보여준다고 여겨진다.

따라서 북빅토리아랜드 지역에서 조사된 다른 지역에 비해 광물 자원의 존재 가능성이 높다고 여겨지며, 추가적인 지질 조사 및 시료 채집이 필요할 것으로 여겨졌다. 다만, 장보고 과학기지에서 200km 이상 떨어진 먼 거리로 인해 접근 및 야외 조사 실시가 매우 제한적인 것이 사실이다. 연구 기간 동안 지속적으로 야외 지

질 조사 및 시료 채집 계획을 세웠으나, 먼 거리, 날씨 및 비용 등의 문제로 인해 그 동안 추가적인 답사가 진행되지 못하였다. 따라서 Niagara Icefalls 지역이나 근처 지역의 지질학적 연구를 수행할 계획이 있는 연구팀과 지질 조사 계획을 공유하여 비용과 시간문제로 인한 답사의 어려움을 줄이기 위한 노력이 필요하다고 생각된다.

2. 라이켄 힐즈(Lichen Hills) 및 아웃벡 누나탁(Outback Nunataks)

라이켄 힐즈 지역은 거정질 화강암(granitic pegmatite)이 발달한 화강암질류 암석이 산출된다. 1990년대 초반에 발표된 연구 결과에서 우라늄과 토륨의 방사능 수치가 높게 나온 것이 확인되었다. 따라서 거정질 화강암에 농집될 수 있는 우라늄, 리튬과 희토류원소의 부화를 살펴보고자 하였다. 시료에 따라 Ta(최대 427배), Nb(최대 40배), Ag(최대 21배), Bi(최대 28배) 등이 부화되어 있는 것을 확인하였다(그림 15). 기존의 연구결과와 다르게 Th(최대 11배)과 U(최대 12배)은 지각 평균 함량보다는 높은 농도를 보였지만, 예상보다는 낮은 함량(약 2배)을 보였다. 또한 REE 분석 결과 역시 경희토류가 중희토류보다 높은 함량을 보이는 일반적인 거정질 화강암의 지구화학적 특징을 보여주나, 절대적인 함량 수치는 광상을 형성할 수 있는 수치에는 못 미치는 일반적인 지각 함량보다 크게 높지 않은 값이 측정되었다.

아웃벡 누나탁지역에서는 백운모가 많은 metapelite 등의 변성퇴적암과 거정질 화강암을 포함한 화강암질 암석을 채집하여 분석하였다. 라이켄 힐즈 지역과 인접하여 있고, 비슷한 암상을 보이는 거정질 화강암이 산출되기 때문에 Li, U, Th 및 희토류원소(REE)의 부화 여부를 알아보았다. 그림 15에서 보이는 바와 같이 Ta(최대 58배), Sn(최대 22배) 및 Li(최대 13배)이 지각 평균 함량보다 부화되어 있으나, 라이켄 힐즈 지역의 암석과 마찬가지로 광상의 존재할 수 있는 부화도에는 미치지 못한다.

위의 두 지역과 비슷한 암상을 보이는 오클리 글래시어(Oakley Glacier) 지역에서는 화강암, 거정질 화강암 및 섬장암 등의 화강암질 암석을 채집하였다. 그림 15에서와 같이 Ta(최대 22배)부화되어 있으나, 다른 화강암질 암석이 산출되는 Lichen Hills 및 Outback Nunataks 지역보다 부화 정도가 낮은 것을 알 수 있다. 이 외에 다른 특별한 부화 혹은 결핍의 이상치를 보이는 원소는 관찰되지 않았다.

3. 장보고 과학기지 주변

장보고과학기지 주변에 광물 자원을 포함한 광상이 형성되었을 가능성을 알아

보기 위해 장보고 과학기지와 근처 곤드와나 기지 주변에서 산출되는 변성암(mafic schist, garnet-cordierite-biotite-sillimanite migmatite, amphibolite, pelitic granulite)과 화성암(Li-(Be)rich muscovite-bearing leucogranite)의 주원소, 부원소 및 미량원소를 분석하였다. 분석 결과 지각 평균 함량에 비해 약 10배 이상 부화되어 있는 원소는 베릴륨(Be)과 안티모니(Sb)임이 확인되었다(그림 15). 높은 베릴륨 함량의 경우 우백질 화강암 내에 포함되어 있는 Li-(Be)이 부화되어 있는 백운모의 영향이거나, 베릴륨을 많이 포함할 수 있는 전기석의 영향을 받았을 것으로 생각된다. 북빅토리아랜드의 다른 지역(Lichen Hills, Outback Nunataks,Oakley Glacier, Morozumi Range, Lanterman Range 등)에서 채집된 비슷한 시기에 형성된 변성암과 화성암에서는 더 많은 전기석 결정이 존재함에도 베릴륨의 부화 현상이 관찰되지 않는다. 따라서 장보고 과학기지 근처에서 채집된 암석에서 관찰되는 베릴륨의 부화 현상은 Li-(Be)이 부화되어 있는 백운모의 영향일 것으로 생각된다. 베릴륨의 경우 지각 평균 함량보다 약 20배 가까이 되는 부화 정도를 보이고 있으나, 매우 국한된 지역에서만 관찰되는 점을 보면 베릴륨과 연관된 광상의 형성 가능성은 매우 낮을 것으로 여겨진다.

또한, Li이 풍부한 백운모의 존재에도 불구하고 Li 자체의 함량은 지각 평균에 비해 크게 높지 않은 것으로 측정되었다. 이는 Li을 다량으로 함유하고 있는 백운모가 관찰되기는 하지만, 그 양이 전체 암석에서 차지하는 비중이 크지 않아 전암의 Li 함량에 영향을 미치지 못하는 것으로 생각된다. 일반적으로 화성암에서 Li은 주로 휘석 계열인 스포듀민(spodumene, $LiAl(SiO_3)_2$), 페타라이트(petalite, $LiAlSi_4O_{10}$), 홍운모 또는 레피도라이트(lepidolite, $KLiAl_2Si_3O_{10}(OH,F)$) 등의 광물이 주요한 Li 광석광물을 이루고 있는데, 연구지역에서 채집된 암석의 경우 이러한 Li 광석광물이 관찰되지는 않았다. 따라서 Li 역시 광체가 형성되었을 가능성은 매우 낮다고 여겨진다.

4. 다니엘스 산맥 및 모로주미 산맥

다니엘스 산맥의 경우 라이켄 힐즈을 비롯한 다른 화강암질 관입암체가 발달하는 지역과 마찬가지로 U 및 Th의 함량이 높은 가능성이 존재하는 지역이다. 상대적으로 균질한 화강암 조성을 보여주며, 화강섬록암(granodiorite)과 복운모 토날라이트(two mica tonalite)가 산출된다(Sheraton et al., 1987). 화강암들은 포획암(xenolith)들을 포함하고 있는 경우가 있으며, 거정질의 K-장석을 함유하고 있는 화강암들도 자주 관찰된다. 대부분의 화강암질 암석은 석영, 장석과 소량의 백운모,

흑운모로 구성되어 있으며, 장석 반암들이 잘 발달된다. 지구화학적 분석 결과 Bi (최대 101배) 및 Sb(최대 10배) 이외에는 큰 특징들을 보이지 않으며(그림 15), U, Th 등의 함량 역시 지각 평균 함량에 비해 특별히 높은 값을 보이지는 않는다.

5. 변성암 및 퇴적암 시료

변성암의 경우 Salamander Range에서 산출되는 gabbro와 pillow peak에서 산출되는 변성암이 약간의 Cr (각각 12배, 18배) 부화 현상을 보이나 광상의 존재를 지시할만한 이상치는 아니라 여겨진다. 주로 Eureka Spurs, Osey Range 등에서 채집된 퇴적암 시료 역시 특별한 이상치를 보이지는 않으며, 일부 시료에서 Sb(최대 56배) 부화 현상이 관찰되나, 특별한 이상치를 갖는 시료는 매우 적다.

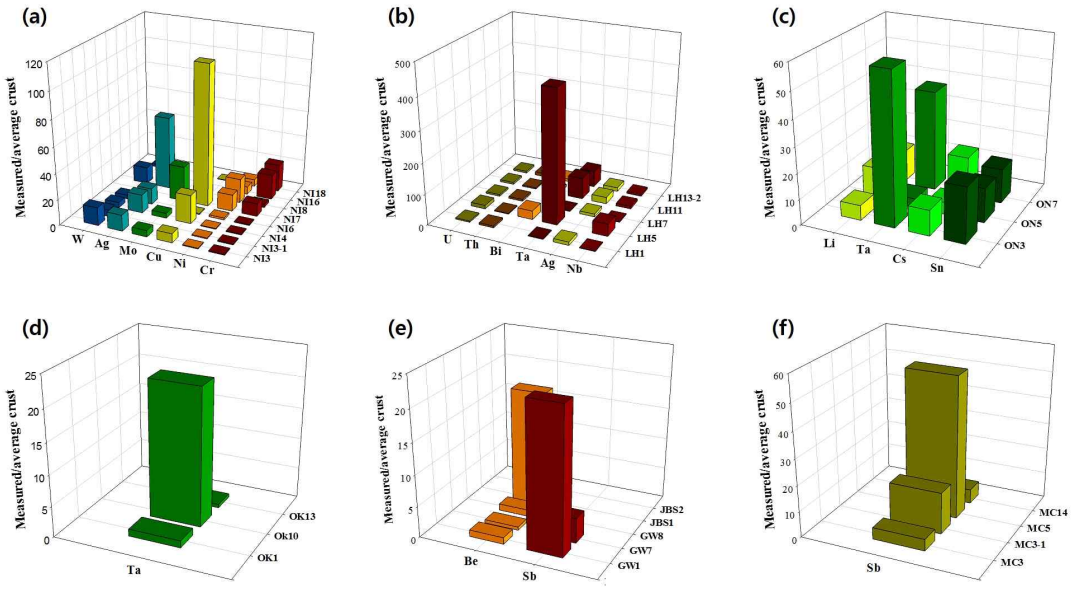


그림 15. 남극 빅토리아랜드 지역에서 채집된 암석 중 지각 평균 함량에 비해 높은 값을 보이는 원소 및 비(분석값/지각 평균 함량). (a) Niagara Icefalls(NI), (b) Lichen Hills(LH), (c) Outback Nunataks(ON), (d) Oakley Glacier(OK), (e) Jangbogo Station(JBS and GW), (f) Daniels Range(DR) and Morozumi Range(MZ).

5절. 남극 광물자원 탐사의 어려움

남극대륙에서 광물자원을 탐사하는 것은 다른 대륙과 다르게 많은 어려움이 존재하며, 이러한 어려움들을 고려한 탐사시스템이 필요하다. 남극대륙의 광물자원 탐사는 지리 및 기후적 관점, 경제 및 기술적 관점, 환경 및 과학적 관점 등을 고려하여야 한다.

1. 지리 및 기후적 관점

남극대륙은 전체 면적의 1% 정도만이 지표로 들어나 있으며, 나머지 99%는 눈 또는 얼음으로 덮여 있다. 또한 암석이 지표로 들어난 지역은 바람이 강하거나 고도가 높은 지역이며, 지질조사를 포함한 광물자원 조사의 어려움을 가중시킨다. 기후적으로 지구상에서 가장 추운 대륙인 남극대륙은 낮은 온도, 많은 강설량과 빙하지역 및 긴 극야 기간 등으로 인해 탐사 및 개발에 필요한 인력 및 장비의 활동이 매우 제한적으로 이뤄질 수밖에 없다.

2. 경제 및 기술적 관점

광물자원 탐사 및 개발은 개발 대상 광종의 품위와 규모, 생산비용 및 국제 시세 등의 경제적 요인에 큰 영향을 받게 된다. 특히 남극대륙의 경우 지리 및 기후적 관점에서 보았을 때 대부분의 지질학적 활동이 헬리콥터 또는 항공기를 기반으로 이뤄진다. 이는 장기 탐사 작업 수행을 위해 대규모의 인력과 시추용 장비 등의 물품을 현장으로 이동시켜 설치시키고, 효율적으로 가동 시키는 데 큰 어려움을 야기한다. 이러한 문제는 생산비용을 대폭 증가시켜 광물자원 개발의 경제성을 매우 낮게 만든다.

대부분의 광물자원 탐사 및 개발 과정에는 많은 양의 용수가 필요하다. 시추, 광석 세척, 부유선광 등의 작업에서 특히 대용량의 용수가 사용되며, 대부분 눈과 얼음으로 덮여있어 액체상태의 물을 구하기 힘든 남극대륙에서는 용수 공급 문제가 발생하게 된다. 또한 혹한의 환경에서 안정적인 장비의 운용 문제도 극복해야 할 주요 난관 중 하나이다.

3. 환경 및 과학적 관점

현재 남극조약환경의정서를 통해 남극대륙에서 과학적 목적을 제외한 광물자원의

탐사와 개발을 제한하고 있는 가장 큰 이유는 환경 보호 때문이다. 광물자원의 탐사와 개발은 필연적으로 많은 환경 파괴와 오염을 불러올 수밖에 없다. 개발과정에서 사용되는 윤활유 및 산 용매제 등의 화학약품과 각종 중금속을 함유한 광석과 폐석은 주변 환경을 매우 악화시킬 수 있다. 특히 중금속을 포함한 광석과 폐석이 빙하 위에 놓여 있다가 빙하의 이동과 함께 남극대륙 근해로 흘러들게 되면 해양오염까지도 유발할 수 있다. 이를 막기 위해 대규모의 폐석과 공정부산물을 내륙에서 해안가로 운반하여 다른 대륙으로 옮기는 것은 경제적 관점에서 많은 비용을 소모하여 적절하지 않으며, 운반 및 보관과정에서 유해한 물질들이 바람에 의해 남극대륙 전역으로 광범위하게 퍼질 가능성도 있다.

앞서 설명하였듯이 남극조약환경의정서의 발효 이후 남극대륙의 광물자원 연구는 급격하게 줄어들었다. 또한 1980년 말까지 진행되었던 연구에서도 경제성을 갖춘 광상의 존재가 확인되지 않아 연구규모의 축소가 이뤄졌었다. 그러나 여러 지질학적 자료들은 남극대륙이 과거 다른 대륙들과 함께 초대륙을 구성하였음을 지시한다. 이러한 다른 대륙에서 많은 수의 광상이 발견되어 개발 중에 있고, 듀퐥 관입암체나 호상철광상과 같이 다른 지역의 광상과 유사한 지질학적 특성을 보이는 지역이 존재하는 것으로 보아 과학적 관점에서 지속적인 접근이 필요하다고 생각된다.

6절. 광물자원 탐사시스템 고찰

위에서 설명하였듯이, 남극대륙에서 광물자원을 탐사하는 것은 많은 제약이 따르며, 경제적인 관점에서 보아도 큰 효용성이 없는 것이 사실이다. 그러나 과학적 목적의 광물자원 탐사 연구를 지속적으로 수행하여 미래의 자원 고갈 상황에 대비하는 것이 필수적이라고 여겨진다. 따라서 남극대륙에서 광물자원 탐사를 위해 다음과 같은 사항을 적극적으로 고려하는 것이 필요하다.

먼저 광물자원의 탐사가 지질학적 조사를 바탕으로 이뤄지는 만큼 다른 지질학 분야와의 협업을 적극적으로 펼쳐나가야 한다. 특히 제한적인 활동 기간과 비용 문제을 고려하면 광물자원 탐사의 단독 연구보다는 퇴적학, 화성암석학, 운석 등의 다른 분야와 야외지질조사 지역과 기간을 협의하여 함께 진행하여야 한다. 또한 광물자원 탐사를 위한 충분한 기간의 야외 지질조사가 이뤄지기 힘들므로, 남극대륙과 곤드와나 초대륙을 형성하였던 지역들에 대한 지질 정보와 광물자원에 대한 지질학적 연구들을 적극적으로 활용할 필요가 있다. 한 예로 이탈리아 연구진은 북빅토리아랜드 지역의 고생대 지층에서 남극대륙에서는 최초로 금 광화작용의 직접적인 증거를 발견하여 조산형 금 광상의 존재 가능성을 제시하였다. 이러한 연구는 금 광상을 찾기 위한 연구에서 비롯된 것이 아니라 다른 구조지질학 및 퇴적학적 연구를 수행하던 중에 우연치 않게 발견한 것이다. 이들은 이러한 발견을 호주 남동부 지역의 많은 금 및 동 광상이 발달하고 있는 것과 연관시켜 이 지역에 추가적인 금 광화작용이 존재하고 있을 가능성을 제시하였다.

다음으로 효율적인 탐사를 위한 대상 광종의 집중화이다. 다양한 광물자원의 탐사 및 개발은 그 광범위한 유형과 산출 형태로 인해 효율적인 연구 수행을 어렵게 한다. 따라서 다음과 같은 두 가지의 집중이 필요하다고 생각된다. 첫 째, 전략광물에 대한 집중이다. 전략광물은 해외의 수입 의존도가 크고 공급이 중단될 경우 국제 경제 및 산업에 미치는 영향이 큰 광종을 의미한다. 우리나라의 경우 유연탄, 우라늄, 철, 동, 아연 및 니켈을 6대 전략광물로 지정하고 있으며, 리튬과 희토류를 신전략광물로 관리하고 있다. 둘 째, 금, 은, 백금족 원소와 같은 고부가가치 광종에 대한 집중이다. 앞서 언급한대로 남극대륙에서 광물자원의 탐사 및 개발을 경제적으로 보았을 때 가치가 없다고 여겨진다. 그러나 상대적으로 적은 양으로 큰 가치를 갖는 이러한 고부가가치 광종은 다른 광종에 비해 높은 경제성을 가진다고 볼 수 있다.

7절. 광물핸드북 발간

앞서 설명한대로 야외조사 및 실험을 통하여 남극 빅토리아랜드의 지질학, 광물학, 암석학 및 지구화학적 특징을 파악하였다. 이를 토대로 남극 빅토리아랜드 지역의 자원분포와 유망 광화대에 대한 정보를 요약하여 <남극대륙의 광물 핸드북-북빅토리아랜드편>을 발간하였다(ISBN:979-11-953967-1-9 93460)(그림 16). 광물자원 핸드북의 내용은 자세한 지질학적 연구 내용을 서술하기 보다는 사진 및 그래프 등의 시각적 자료를 최대한 활용하고 텍스트를 이용한 설명을 최대한 쉽게 서술하여 학부생 수준의 전공자부터 일반 대중이 보기에 큰 어려움이 없게끔 작성하기 위해 노력하였다.

광물자원 핸드북은 'Part 1'에서 서론 및 과거 남극대륙의 광물자원 탐사에 대한 역사를 간략하게 소개하여 독자의 흥미를 유발하고자 하였으며, 북빅토리아랜드 지질도을 이용하여 해당 지역의 기초적인 지질학적 정보들을 제공하고자 하였다(그림 17). 이후 'Part 2'와 'Part 3'에서 연구결과들을 활용하여 남극대륙 빅토리아랜드 지역의 광물자원에 대한 기초적인 정보들을 지역 및 부화 원소에 따라 아래와 같이 구분하여 설명하였다.

1. 암석에 따른 분류

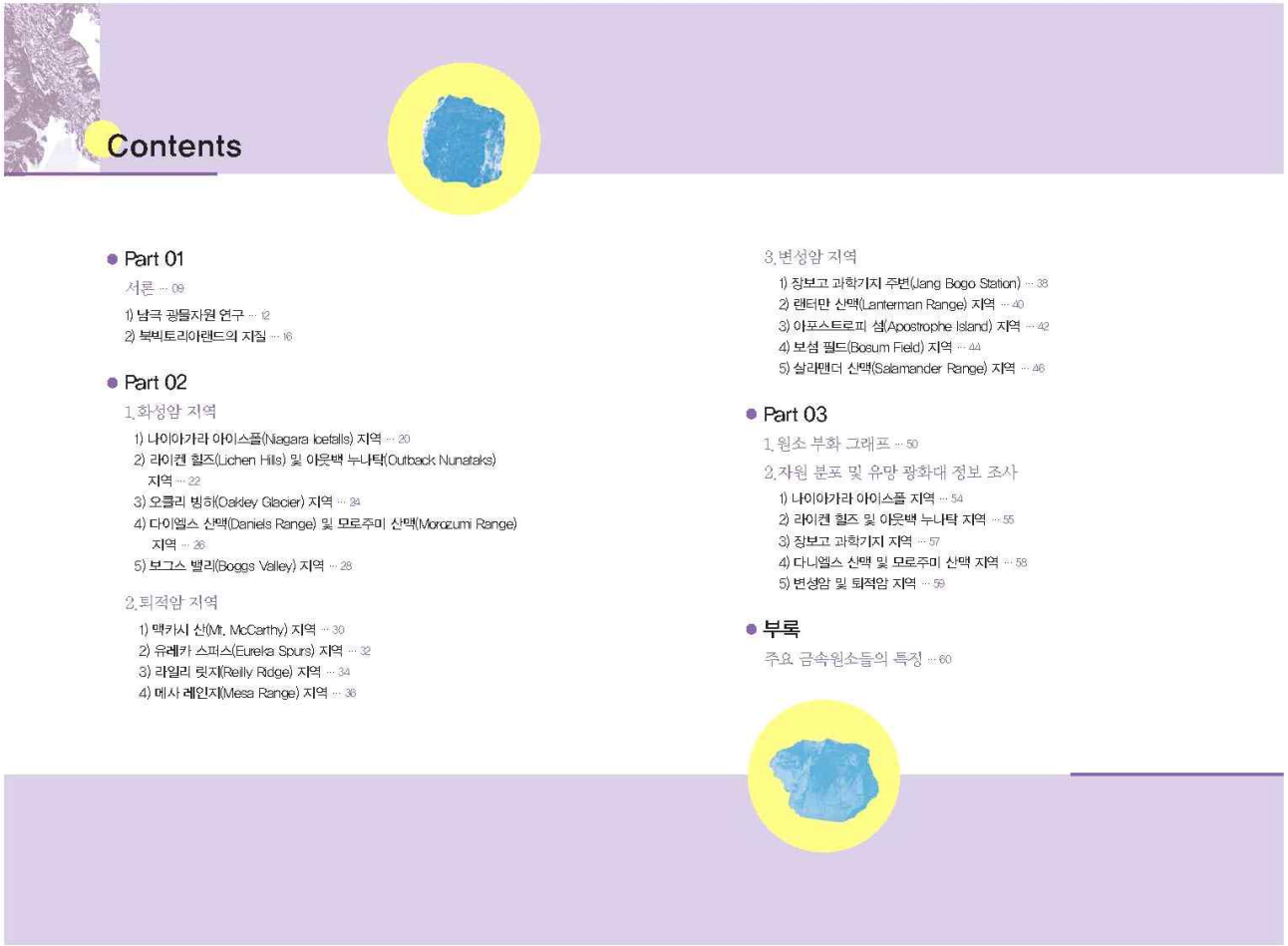
앞서 조사된 연구내용을 기준으로 화성암, 퇴적암 및 변성암으로 분류를 진행하여 'Part 2'을 구성하였다(그림 17). 나이아가라 아이스폴, 라이켄 힐즈 및 아웃벡 누나탁 지역, 장보고 과학기지 주변 등의 지역의 현장 조사 및 암석 사진과 함께 간략한 지질학적 특징과 부화 원소들을 제시하였다. 지질도와 지도를 함께 제시하여 해당 지역의 대략적인 위치와 지질학적 특징을 한 눈에 파악하기 쉽게 하였다. 특히 'Part 3'에서는 지구화학적 자료를 활용하여 대륙 지각에 비해 부화도가 큰 원소를 그래프로 제시하여, 가시성을 높이고자 하였다.

2. 광석광물에 대한 정보

각각의 지역에서 부화된 원소 또는 특징적인 광석광물에 대한 정보를 부록으로 작성하여 이해를 돕고자 하였다(그림 17). 원소의 한글 및 영문 표기를 병용하였으며, 지구화학적 특성을 간략하게 설명하여 해당 원소들의 특징 및 주요 용도를 파악할 수 있게 하였다. 또한 해당 원소들을 함유하고 있는 대표적인 광석광물의 종류 및 화학식

을 제시하고, 이들이 나타나는 주요 광상의 유형과 현재 가행 중인 대표적인 광산명도 함께 표기하였다.

그림 16. 발간된 ‘남극대륙의 광물핸드북-북빅토리아랜드편’의 표지.



Contents

● Part 01

서론 … 09

1) 남극 광물자원 연구 … 12

2) 북빅토리아랜드의 지질 … 16

● Part 02

1. 화성암 지역

1) 나이아가라 아이스폴(Niagara Icefalls) 지역 … 20

2) 라이켄 힐즈(Lichen Hills) 및 아웃백 누나탁(Outback Nunataks) 지역 … 22

3) 오클리 빙하(Oakley Glacier) 지역 … 24

4) 다이엘스 산맥(Daniels Range) 및 모로주미 산맥(Morozumi Range) 지역 … 26

5) 보그스 밸리(Boggs Valley) 지역 … 28

2. 퇴적암 지역

1) 맥카시 산(Mt. McCarthy) 지역 … 30

2) 유레카 스퍼스(Eureka Spurs) 지역 … 32

3) 라일리 릿지(Reilly Ridge) 지역 … 34

4) 메사 레인지(Mesa Range) 지역 … 36

3. 변성암 지역

1) 장보고 과학기지 주변(Jang Bogo Station) … 38

2) 랜터만 산맥(Lanterman Range) 지역 … 40

3) 아포스트로피 섬(Apostrophe Island) 지역 … 42

4) 보셤 필드(Bosum Field) 지역 … 44

5) 살라맨더 산맥(Salamander Range) 지역 … 46

● Part 03

1. 원소 부화 그래프 … 50

2. 자원 분포 및 유망 광화대 정보 조사

1) 나이아가라 아이스폴 지역 … 54

2) 라이켄 힐즈 및 아웃백 누나탁 지역 … 55

3) 장보고 과학기지 지역 … 57

4) 다니엘스 산맥 및 모로주미 산맥 지역 … 58

5) 변성암 및 퇴적암 지역 … 59

● 부록

주요 금속원소들의 특징 … 60

그림 17. 발간된 '남극대륙의 광물핸드북-북빅토리아랜드편'의 목차.

4장. 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1절. 연구개발목표 달성

1장에서 언급하였듯이, 본 연구의 목표는 장보고 과학기지가 위치하고 있는 빅토리아랜드 지역에 광물자원이 매장되어 있을 잠재성이 높다는 점을 고려하여, 문헌 조사, 기초 야외조사, 암석학 및 광물학적 관찰 및 지구화학적 분석을 통하여 광물자원의 존재 여부를 파악하고 이를 정리하여 광물자원 핸드북을 발간하고자 하였다. 더 나아가 남극대륙의 광물자원을 탐사하고 개발하는데 있어 발생할 수 있는 어려움을 살펴보고 이를 바탕으로 광물자원 탐사 시스템에 대해 고찰하는 것이다.

앞서 2장과 3장에서 설명된 대로, 문헌조사를 토대로 조사 지역을 선별하고, 직접 야외조사를 실시하여 연구에 필요한 시료들을 채집하였다. 또한 직접 방문하지 못한 지역들은 다른 연구팀들과 협력을 통해 암석 시료들을 확보할 수 있었다. 확보된 암석들은 광물학 및 암석학적 특징을 관찰하고(3장 2절), 지구화학적 분석을 수행하였다(3장 3절). 이러한 연구결과를 바탕으로 남극 빅토리아랜드 지역의 광물 자원 분포에 대한 고찰을 시행하였고(3장 4절), 남극 광물 자원 탐사에 동반되는 어려움을 살펴보았다(3장 5절). 이를 토대로 남극 광물 자원 탐사시스템에 대한 논의를 진행하였으며(3장 6절), 최종적으로 남극대륙의 광물 핸드북을 발간하였다(3장 7절).

따라서 가장 주요한 연구개발목표 중 하나인 남극 빅토리아랜드 지역의 자원분포와 유망 광화대에 대한 정보를 요약하여 <남극대륙의 광물 핸드북-북빅토리아랜드편>(ISBN:979-11-953967-1-9 93460)을 발간하였다. 또한 연구결과를 토대로 'Chemical Geology'와 지질학회지에 각각 한 편의 논문을 출판하였다. 또한 본 연구를 통해 2명의 박사(김영민, 문인경)와 3명의 석사(최지수, 김태우, 이원형)을 배출하였다.

2절. 연구개발을 통한 기대성과 및 파급 효과

본 연구개발을 통해 얻을 수 있는 기대성과 및 파급 효과는 다음과 같다.

첫 째, 2014년 2월에 준공된 장보고 과학기지를 거점으로 한 남극 대륙의 광물 자원 탐사 및 연구에 밑바탕이 될 수 있을 것이라 기대된다.

둘 째, 테라노바 만 ⇒ 빅토리아랜드 ⇒ 동남극으로 점차 연구지역을 확장해 가면서 남극대륙의 지질과 광물 자원 탐사에 대한 연구를 발전시킬 수 있다.

셋 째, 국제사회에서 무한한 자원의 보고인 남극 대륙의 광물 자원 탐사 및 과학적 연구를 선도할 수 있는 역할을 할 수 있을 것이라 기대된다.

넷 째, 연구수행을 통하여 극지의 지질과 자원에 관련된 연구를 수행할 수 있는 전문 연구 인력을 양성할 수 있을 것으로 기대된다.

5장. 연구개발결과의 활용계획

본 연구를 통해 얻은 연구개발결과의 활용계획은 다음과 같다.

첫 째, 연구 및 분석 결과를 바탕으로 남극 대륙에 매장되어 있는 광물 자원 탐사 및 연구에 활용이 기대된다.

둘 째, 연구 결과를 토대로 빅토리아랜드 및 동남극 지역을 대상으로 광물 자원 기초 탐사 시스템을 구축하는 후속연구를 기대할 수 있다.

셋 째, 광물 자원의 매장 여부가 확인된다면, 광물 자원의 기원과 형성에 관련된 추가 연구 및 타 대륙에서 발견되는 광상과의 비교를 통하여 과거 남극 대륙의 위치 및 이동에 대한 연구에 활용 가능한 지질학적 데이터들을 제공할 수 있다.

6장. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

앞서 언급하였듯이, 1980년대 말까지 활발하게 진행되었던 남극대륙의 광물자원 연구는 과학적 목적의 연구를 제외한 광물 자원 탐사 및 개발과 관련된 모든 활동을 금지한 남극조약환경의정서가 채택된 1990년대 들어 급격하게 줄어들어 수와 규모가 매우 제한적인 상태가 되었다. 따라서 본 연구와 관련되어 해외에서 수행 중인 공개 연구는 거의 없는 것으로 파악되었다. 다만, 미국, 독일, 이탈리아 및 프랑스가 주도하여 빅토리아랜드 지역의 지질학적 특징에 대한 연구는 점차 더 활발하게 진행되고 있는 것으로 여겨진다.

7장. 참고문헌

Behrendt, J.C., Drewry, D.J., Jankowski, E., Grim, M.S., 1980. Aeromagnetic and radio echo ice-sounding measurements show much greater area of the Dufek intrusion, Antarctica. Science, 209(4460): 1014-1017.

Beike, D., 1988. An engineering economic evaluation of mining in Antarctica: A case study of platinum. Wiley Online Library.

Crispini, L., Federico, L., Capponi, G., Talarico, F., 2011. The Dorn gold deposit in northern Victoria Land, Antarctica: Structure, hydrothermal alteration, and implications for the Gondwana Pacific margin. Gondwana Research, 19(1): 128-140.

De Wit, M.J., 1985. Minerals and mining in Antarctica: science and technology, economics and politics. Oxford University Press, USA.

Ford, A., Mays, R., Haffty, J., Fabbi, B., 1983. Reconnaissance of minor metal abundances and possible resources of the Dufek intrusion, Pensacola Mountains. Antarctic earth science. Australian Academy of Science, Canberra, ACT: 433-436.

Ford, A.B., 1990. The Dufek intrusion of Antarctica. Mineral resources potential of Antarctica: 15-32.

Hawkes, D.D., Littlefair, M.J., 1981. An occurrence of molybdenum, copper, and iron mineralization in the Argentine Islands, West Antarctica. Economic Geology, 76(4): 898-904.

Holdgate, M.W., Tinker, J., 1979. Oil and Other Minerals in the Antarctic: The Environmental Implications of Possible Mineral Exploration Or Exploitation in Antarctica. Scientific Committee on Antarctic Research.

Ravich, M., Fedorov, L., Tarutin, O., 1982. Precambrian iron deposits of the Prince Charles Mountains. Antarctic geoscience. University of Wisconsin Press, Madison, WI: 853-858.

Rowley, P., Pride, D., 1982. Metallic mineral resources of the Antarctic Peninsula. Antarctic Geosciences: 859-870.

Rowley, P., Williams, P., Schmidt, D., Reynolds, R., Ford, A., Clark, A., Farrar, E., McBride, S., 1975. Copper mineralization along the Lassiter Coast of the Antarctic Peninsula. Economic Geology, 70(5): 982-987.

Rowley, P.D., Schmidt, D.L., Williams, P.L., 1977. Geology of an Upper Cretaceous Copper Deposit in the Andean Province, Lassiter Coast, Antarctic Peninsula. 2330-7102, US Govt. Print. Off.

Tingey, R., 1990. Banded iron formations in East Antarctica. Wiley Online Library.

Vennum, W., Nishi, J., 1981. New antarctic mineral occurrences. Antar. Jour. US, 15(5): 14-15.

Woo, J., Park, T.-Y., Lee, J.I., Lee, M.J., Kim, T.H., Kim, Y.H., Choe, M.Y., 2013. Geological history and stratigraphy of northern Victoria Land. Journal of the Geological Society of Korea, 49(1): 165-179.

Wright, N.A., Williams, P.L., 1974. Mineral resources of Antarctica. US Geological Survey Reston, VA.

Zeller, E., Dreschhoff, G., Crisler, K., Tessensohn, F., 1977. Resource and radioactivity survey in southern Victoria Land. Antarct. JUS;(United States), 12(4).

Zeller, E., Dreschhoff, G., Crisler, K., Tessensohn, F., 1982. Resource and radioactivity survey in Antarctica by airborne gamma-ray spectrometry. Antarctic earth science. University of Wisconsin Press, Madison, WI: 877-883.

Zeller, E.J., Dreschhoff, G.A., 1987. Radioactive Minerals and the Pre?Beacon Erosion Surface, Antarctica. Gondwana Six: Stratigraphy, Sedimentology, and Paleontology: 63-72.

Zeller, E.J., Dreschhoff, G.A., Thoste, V., 1990. Uranium resource evaluation in Antarctica. Mineral resources potential of Antarctica: 95-116.

Zumberge, J.H., 1979. Mineral Resources and Geopolitics in Antarctica: The physical obstacles to exploitation of mineral resources in Antarctica are currently prohibitive, but complex political issues will be raised if such exploitation becomes profitable. American Scientist, 67(1): 68-77.

부록

부록 표 1. 본 연구에서 분석된 암석 시료의 주원소 함량.

Analyte Symbol	SiO2	Al2O3	Fe2O3(T)	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	LOI	Total
Unit Symbol	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
LH1	71.69	14.55	2.27	0.03	0.76	1.30	2.55	6.13	0.294	0.13	0.63	100.3
LH5	74.97	14.14	1.52	0.24	0.12	0.59	3.17	4.03	0.045	0.11	1.13	100.1
LH7	72.40	14.23	1.62	0.02	0.44	0.94	2.63	6.05	0.26	0.13	1.01	99.74
LH11	74.42	9.92	7.43	0.20	2.34	1.20	1.5	2.24	0.618	0.03	0.83	100.7
LH13-2	71.32	14.01	2.79	0.04	0.63	1.39	2.64	5.38	0.362	0.09	0.56	99.21
ON5	78.03	13.79	1.21	0.03	0.14	0.62	4.65	1.5	0.087	0.04	0.73	100.8
ON3	76.22	14.04	1.77	0.16	0.19	0.69	4.00	2.03	0.071	< 0.01	0.72	99.89
ON7	72.98	13.91	1.71	0.03	0.25	0.97	3.26	4.73	0.158	0.20	0.82	99.02
OK1	72.25	14.44	1.23	0.03	0.42	1.47	3.00	5.36	0.162	0.07	0.76	99.19
Ok10	70.25	14.82	4.02	0.07	1.25	3.25	3.46	1.89	0.453	0.10	0.75	100.3
OK13	89.99	5.87	0.81	0.03	0.34	1.21	1.15	0.81	0.094	0.01	0.33	100.7
MC3	45.22	11.15	7.88	0.15	4.51	19.51	1.65	0.04	0.616	0.06	8.03	98.81
MC5	51.22	14.86	5.56	0.09	2.52	20.37	0.49	0.05	0.419	0.05	4.32	99.96
MC14	68.72	12.01	4.98	0.06	3.69	1.90	2.47	2.15	0.533	0.15	3.13	99.79
GW1	70.32	15.17	2.88	0.05	0.88	3.37	3.84	2.54	0.326	0.13	0.46	99.96
GW7	75.22	13.45	1.27	0.02	0.29	1.38	2.39	5.16	0.109	0.06	0.67	100
GW8	84.71	8.20	0.90	0.02	0.17	1.71	1.49	1.45	0.044	0.23	0.66	99.58
NI3	67.46	13.89	5.07	0.04	2.86	3.29	2.58	3.16	0.695	0.19	1.07	100.3
NI3-1	57.58	18.50	7.78	0.06	3.45	0.47	0.39	7.21	0.913	0.15	2.33	98.84
NI4	67.10	13.71	5.15	0.04	2.46	2.91	2.53	3.72	0.688	0.17	1.59	100.1

NI6	68.18	13.43	3.98	0.04	3.13	1.84	1.96	5.93	0.719	0.19	1.07	100.5
NI7	52.99	2.75	9.86	0.27	18.58	11.31	0.42	0.27	0.048	0.02	2.11	98.63
NI8	37.33	18.46	9.51	0.12	17.72	0.78	0.11	9.03	2.234	0.29	3.04	98.62
NI16	52.30	3.46	7.88	0.30	24.07	7.27	0.11	0.03	0.066	< 0.01	4.09	99.58
NI18	50.99	3.63	7.93	0.17	24.61	7.68	0.15	0.07	0.052	< 0.01	4.61	99.9
CR1	75.15	13.44	1.02	0.06	0.13	0.85	3.74	4.69	0.078	0.01	0.31	99.47
PP2	47.15	6.46	9.79	0.18	19.36	10.29	0.51	0.12	0.071	< 0.01	5.71	99.63
BR14	79.53	9.38	3.27	0.05	1.05	1.3	2.61	1.4	0.442	0.09	1.02	100.1
BR12	93.77	1.43	0.94	0.10	0.20	1.44	0.21	0.19	0.03	0.06	1.24	99.61
BM1	65.17	16.03	4.95	0.06	1.57	2.61	3.07	4.07	0.8	0.25	1.52	100.1
BM2	73.21	14.58	1.67	0.05	0.23	0.91	4.57	3.76	0.183	0.19	0.42	99.78
DR1	70.38	15.49	2.17	0.03	0.60	1.63	2.75	6.23	0.309	0.22	0.61	100.4
DR2	70.81	15.89	0.77	0.02	0.10	1.19	3.33	7.86	0.035	0.22	0.36	100.6
MZ1	73.43	14.04	1.22	0.02	0.23	1.01	2.74	6.33	0.084	0.12	0.61	99.83
MZ2	52.63	15.19	9.52	0.156	6.36	11.29	1.66	0.92	0.597	0.09	0.65	99.06
BV1	54.75	13.81	11.28	0.156	4.42	8.32	2.33	1.55	0.889	0.15	0.99	98.66
BV2	72.28	14.99	0.35	0.03	0.07	0.38	3.18	7.37	0.016	0.22	0.53	99.41
BV3	58.82	22.72	4.51	0.07	1.50	0.91	4.09	4.29	0.294	0.28	1.17	98.64
BV4	74.31	14.32	0.93	0.01	0.25	0.51	2.26	7.07	0.041	0.12	0.39	100.2
ER1	68.6	14.75	3.25	0.05	1.66	3.07	3.31	3.95	0.397	0.21	0.68	99.93
BV5	79.09	9.74	3.45	0.06	1.31	1.57	2.25	1.56	0.43	0.14	0.55	100.2
CAMP	75.84	11.0	3.08	0.03	1.23	0.95	3.06	3.5	0.534	0.05	0.71	99.99
DESSENT	47.17	21.46	10.73	0.11	5.91	4.66	3.98	2.17	0.506	0.1	1.78	98.58
JBS1	77.16	11.59	2.87	0.08	2.09	0.58	1.13	3.1	0.012	0.04	1.41	100.1
JBS2	65.45	14.99	6.98	0.20	3.29	1.97	2.01	2.57	0.698	0.07	1.13	99.35
MZ3	57.74	18.66	7.9	0.07	3.27	0.48	0.41	6.87	0.854	0.2	2.34	98.77

DR3	60.63	17.64	7.28	0.07	3.19	0.63	1.32	5.44	0.766	0.16	1.99	99.12
LR1	44.47	15.98	14.07	0.23	8.05	10.32	2.01	0.25	1.627	0.1	2.13	99.23
Sed1	71.78	12.78	4.26	0.03	1.99	0.44	2.57	2.18	0.522	0.17	2.2	98.92
Sed2	77.23	9.41	0.65	0.01	0.11	2.19	1.83	2.23	0.162	0.01	5.25	99.09
Sed3	51.24	14.98	9.74	0.17	6.47	10.27	2.37	0.47	0.626	0.09	4.56	101
Sed4	69.52	12.52	1.72	0.05	0.32	4.29	2.86	3.26	0.179	0.04	4.39	99.13
Sed5	84.48	3.66	2.47	0.01	0.38	2.46	0.5	0.59	0.051	0.66	4.41	99.68
Sed6	4.58	0.96	0.41	0.03	0.44	51.84	0.21	0.19	0.037	0.03	41.02	99.76
Sed7	46.12	15.5	15.40	0.27	6.44	11.01	2.9	0.09	2.99	0.44	-0.65	100.5
Sed8	46.37	17.11	10.12	0.16	10.96	12.19	1.91	0.05	0.737	0.01	0.09	99.71
Sed9	50.92	17.90	8.26	0.14	7.24	12.41	1.52	0.53	0.438	0.06	1.01	100.4
Sed10	3.08	0.58	0.44	0.10	0.69	52.26	0.1	0.13	0.042	0.05	41.98	99.47
Sed11	82.18	3.54	1.54	0.03	0.38	5.45	0.4	0.82	0.311	0.08	4.74	99.48
Sed12	52.40	4.68	8.55	0.15	17.86	12.21	0.52	0.32	0.321	0.03	1.61	98.67
Sed13	62.75	16.34	5.86	0.08	2.21	1.7	1.93	4.25	0.716	0.17	3.22	99.22
MC3-1	47.61	11.59	8.10	0.16	4.67	18.64	1.74	0.05	0.654	0.05	6.98	100.2

부록 표 2. 본 연구에서 분석된 암석 시료의 미량원소 함량 (단위: ppm).

Element	Sc	Be	V	Ba	Sr	Y	Zr	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Rb	Nb	Mo	Ag	In	Sn	Sb	Cs
LH1	4	1	26	424	117	10	172	50	4	< 20	< 10	40	15	1	< 5	240	8	< 2	0.6	< 0.2	2	< 0.5	6.8
LH5	3	5	< 5	31	15	16	38	160	< 1	< 20	< 10	30	20	3	< 5	307	322	4	< 0.5	< 0.2	11	0.9	3.5
LH7	3	3	17	340	78	10	153	40	2	< 20	< 10	50	17	1	< 5	297	11	< 2	0.5	< 0.2	2	< 0.5	2.5
LH11	27	2	92	51	47	41	355	290	11	30	20	100	15	2	< 5	189	69	5	1.2	< 0.2	4	< 0.5	12.9
LH13-2	5	2	20	349	141	24	218	170	4	< 20	< 10	40	15	1	< 5	200	50	3	0.7	< 0.2	4	< 0.5	5.2
ON5	2	9	< 5	18	10	5	9	90	< 1	< 20	10	40	28	2	< 5	174	22	< 2	< 0.5	< 0.2	23	< 0.5	9.6
ON3	2	10	< 5	18	14	9	15	200	< 1	< 20	< 10	50	24	2	< 5	230	54	3	< 0.5	< 0.2	37	< 0.5	20.1
ON7	1	10	6	147	51	10	98	200	1	< 20	< 10	50	18	1	< 5	396	38	4	< 0.5	< 0.2	23	< 0.5	31.3
OK1	4	3	9	511	119	46	124	< 20	2	< 20	< 10	< 30	12	1	< 5	218	5	< 2	< 0.5	< 0.2	3	< 0.5	5
Ok10	8	3	55	108	163	17	174	180	7	< 20	< 10	40	20	2	< 5	122	32	4	< 0.5	< 0.2	6	< 0.5	10.2
OK13	2	1	13	94	66	6	34	< 20	32	< 20	10	< 30	5	< 1	< 5	33	2	< 2	< 0.5	< 0.2	1	< 0.5	1.5
MC3	30	< 1	200	9	42	16	41	190	27	70	80	70	13	2	< 5	< 2	4	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	0.9	0.7
MC5	19	< 1	171	9	20	9	27	80	14	40	40	70	21	2	< 5	< 2	< 1	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	10.9	< 0.5
MC14	13	2	80	512	194	22	246	280	16	90	30	60	12	1	< 5	86	7	< 2	0.7	< 0.2	3	1.1	3.4
GW1	4	2	32	325	389	10	117	< 20	4	< 20	< 10	40	16	1	< 5	60	6	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	4.6	< 0.5
GW7	3	1	9	386	168	16	73	< 20	1	< 20	< 10	< 30	14	1	< 5	140	9	< 2	< 0.5	< 0.2	3	0.8	2.7
GW8	1	2	12	343	114	11	19	150	2	< 20	10	< 30	6	1	< 5	59	7	2	< 0.5	< 0.2	< 1	< 0.5	0.7

NI3	13	3	81	530	223	26	250	90	13	30	190	< 30	15	1	< 5	150	10	4	0.7	< 0.2	2	< 0.5	9.9
NI3-1	19	3	123	1231	72	26	178	90	18	40	< 10	110	22	2	< 5	318	17	< 2	< 0.5	< 0.2	7	< 0.5	13.7
NI4	12	3	85	690	211	25	238	70	14	30	600	< 30	15	1	< 5	160	10	3	0.8	< 0.2	2	0.9	10.3
NI6	12	3	76	1014	156	22	271	70	11	90	20	< 30	15	1	< 5	195	10	< 2	0.7	< 0.2	2	1.2	10.5
NI7	2	< 1	19	7	9	42	10	1340	37	760	2950	100	5	3	< 5	12	1	22	< 0.5	0.3	3	< 0.5	1.4
NI8	30	1	258	771	26	9	816	310	68	1110	< 10	250	19	1	27	431	30	< 2	3.2	< 0.2	3	2.2	46.9
NI16	32	< 1	74	< 2	5	9	23	2630	57	350	< 10	50	3	1	< 5	< 2	< 1	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	0.8	1.3
NI18	49	< 1	110	5	9	2	9	2880	52	320	10	< 30	3	1	< 5	2	< 1	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	1	1.2
CR1	2	3	< 5	295	110	19	65	< 20	< 1	< 20	< 10	30	14	1	< 5	228	10	< 2	< 0.5	< 0.2	3	0.7	3.4
PP2	30	< 1	134	11	48	2	6	2370	68	540	30	60	4	2	< 5	3	< 1	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	3.8	< 0.5
BR14	7	3	42	486	207	16	389	60	6	< 20	< 10	< 30	9	1	< 5	136	7	< 2	1.2	< 0.2	3	< 0.5	203
BR12	1	< 1	8	23	131	9	16	30	3	< 20	< 10	< 30	1	< 1	< 5	9	1	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	1.3	7
BM1	9	2	54	825	627	30	285	< 20	8	< 20	30	40	16	< 1	< 5	117	11	< 2	0.9	< 0.2	2	< 0.5	0.9
BM2	4	2	11	136	38	13	84	< 20	2	< 20	< 10	40	14	2	< 5	135	10	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	1	0.9
DR1	4	3	25	984	190	15	134	< 20	3	< 20	< 10	< 30	14	1	< 5	241	9	< 2	< 0.5	< 0.2	3	< 0.5	3.2
DR2	1	4	< 5	576	136	44	38	< 20	< 1	< 20	< 10	< 30	12	1	< 5	295	2	< 2	< 0.5	< 0.2	7	2	18.9
MZ1	2	7	7	754	167	8	44	< 20	1	< 20	< 10	< 30	11	1	< 5	215	5	< 2	< 0.5	< 0.2	3	< 0.5	4.9
MZ2	40	< 1	236	191	127	18	90	120	39	80	90	70	12	1	< 5	33	4	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	0.5	0.6
BV1	38	1	243	334	125	25	147	70	38	60	100	90	14	1	< 5	58	7	< 2	< 0.5	< 0.2	1	0.7	2.4
BV2	2	3	< 5	374	91	4	58	<	< 1	<	<	<	12	2	< 5	316	4	< 2	<	<	12	<	18.8

								20		20	10	30							0.5	0.2		0.5	
BV3	6	8	44	334	73	9	104	40	7	< 20	< 10	190	35	3	< 5	197	3	< 2	< 0.5	< 0.2	16	< 0.5	6.7
BV4	2	< 1	10	966	216	9	31	< 20	1	< 20	< 10	< 30	9	1	< 5	202	< 1	< 2	< 0.5	< 0.2	6	< 0.5	6.6
ER1	8	3	61	729	282	14	152	40	8	30	20	40	12	1	< 5	202	11	< 2	< 0.5	< 0.2	3	1	10.2
BV5	6	2	42	289	161	27	328	40	6	< 20	< 10	< 30	11	1	< 5	78	8	< 2	1	< 0.2	2	1.2	5.7
CAMP	8	2	55	540	151	22	289	60	9	20	20	40	11	1	< 5	120	8	< 2	0.8	< 0.2	6	< 0.5	7.7
DESSENT	40	1	231	1626	163	10	87	80	31	40	170	80	16	1	< 5	45	2	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	< 0.5	4.7
JBS1	< 1	35	< 5	338	81	7	101	< 20	3	< 20	< 10	40	13	< 1	< 5	98	< 1	< 2	< 0.5	< 0.2	1	< 0.5	5.9
JBS2	17	2	105	165	113	33	148	80	17	50	< 10	90	23	2	< 5	154	16	< 2	< 0.5	< 0.2	3	< 0.5	7.5
MZ3	18	3	120	1189	66	28	175	100	17	40	< 10	100	25	2	< 5	299	17	< 2	< 0.5	< 0.2	6	< 0.5	13
DR3	17	3	112	891	102	28	133	100	18	50	20	110	20	2	< 5	231	15	< 2	< 0.5	< 0.2	6	< 0.5	11.7
LR1	51	< 1	275	17	37	28	97	180	49	50	530	110	10	1	< 5	8	6	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	< 0.5	< 0.5
Sed1	10	2	67	356	81	22	142	100	9	40	20	60	12	1	11	107	8	< 2	< 0.5	< 0.2	3	< 0.5	4.1
Sed2	2	< 1	9	527	85	6	81	< 20	< 1	< 20	< 10	< 30	5	< 1	< 5	64	2	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	0.5	0.5
Sed3	41	< 1	236	129	150	19	79	120	40	80	90	70	11	1	< 5	22	4	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	0.5	3
Sed4	4	3	12	734	106	27	143	< 20	2	< 20	10	< 30	11	< 1	< 5	138	11	< 2	< 0.5	< 0.2	3	0.6	11.5
Sed5	2	< 1	25	134	52	4	11	< 20	12	20	10	< 30	3	< 1	< 5	75	< 1	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	< 0.5	0.9
Sed6	< 1	< 1	9	35	297	4	22	< 20	< 1	< 20	10	< 30	< 1	< 1	< 5	8	< 1	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	< 0.5	< 0.5
Sed7	43	3	276	11	156	34	231	110	58	130	20	110	10	2	< 5	4	19	< 2	0.9	< 0.2	3	1.2	< 0.5
Sed8	41	< 1	205	11	227	12	19	310	55	200	100	150	10	< 1	< 5	< 2	< 1	< 2	<	<	< 1	11.2	<

																		0.5	0.2			0.5
Sed9	34	< 1	193	124	120	12	52	200	35	90	60	50	12	1	< 5	20	3	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	< 0.5	0.5
Sed10	1	< 1	6	42	1093	11	11	< 20	< 1	< 20	20	< 30	< 1	< 1	< 5	5	< 1	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	< 0.5	< 0.5
Sed11	3	< 1	20	119	67	16	170	50	2	< 20	10	40	3	< 1	< 5	31	5	< 2	0.6	< 0.2	1	8.7	1.1
Sed12	38	< 1	182	45	55	11	35	1660	50	310	90	70	6	1	< 5	9	1	< 2	< 0.5	< 0.2	1	4.3	< 0.5
Sed13	12	4	83	538	159	27	167	60	13	30	30	90	18	1	6	252	15	< 2	0.5	< 0.2	7	< 0.5	21.3
MC3-1	31	< 1	209	6	45	17	40	170	28	70	70	70	16	2	< 5	< 2	< 1	< 2	< 0.5	< 0.2	< 1	3.2	0.7

부록 표 2. *(Continued)*

Element	Cs	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U
LH1	6.8	50.7	103	11.7	40.8	8.6	0.93	5.9	0.8	3.2	0.4	0.8	0.09	0.6	0.09	4.5	1.3	1	1	53	< 0.4	33.4	5.2
LH5	3.5	9.6	24.1	3.19	11.8	4.6	0.1	3.3	0.7	3.2	0.5	1.3	0.25	2.2	0.36	2	299	10	1.1	22	5.1	13	15.1
LH7	2.5	45.2	97.1	11.3	40.7	9.6	0.67	6.8	0.9	3.5	0.4	0.9	0.1	0.6	0.09	4	0.9	2	1.4	48	< 0.4	34.4	7.1
LH11	12.9	36.8	73.6	8.23	28.6	5.8	0.41	4.7	0.9	6.6	1.7	6.3	1.16	8.9	1.54	8.3	48.6	2	1	13	1.6	21.1	8
LH13-2	5.2	77.8	158	18	63.9	13	0.94	9.4	1.3	6.2	1	2.6	0.35	2.2	0.34	5.4	37.2	2	1	48	1.5	60.2	7.8
ON5	9.6	2.8	5.1	0.48	1.7	0.3	< 0.05	0.3	< 0.1	0.4	< 0.1	0.2	< 0.05	0.2	< 0.01	< 0.2	2.5	4	0.6	16	0.7	1.3	10.3
ON3	20.1	4	8.5	0.94	3	0.8	0.06	0.7	0.1	1	0.3	1.1	0.25	2.2	0.37	0.3	40.8	4	0.8	16	1.2	4.1	3.6
ON7	31.3	33.2	67.1	7.62	26.2	5.5	0.43	3.8	0.5	2.3	0.4	1	0.15	0.9	0.13	2.7	27.4	2	2.1	39	1.1	26.5	11.6
OK1	5	51	101	11.4	38.9	7.9	0.88	7.6	1.4	8.4	1.7	5.3	0.79	5.1	0.78	3.2	0.8	1	1.1	47	< 0.4	38.4	6.2
Ok10	10.2	21.5	41.7	4.76	16.1	3.3	0.97	3.1	0.5	3	0.5	1.3	0.17	1	0.16	4	15.5	3	0.5	18	0.6	6.6	2.4
OK13	1.5	11.7	22.2	2.46	8.5	1.6	0.46	1.3	0.2	1.1	0.2	0.6	0.08	0.5	0.08	0.9	0.4	< 1	0.1	8	< 0.4	4.7	1.2
MC3	0.7	1.7	4.3	0.73	4.2	1.5	0.66	2.2	0.5	3	0.7	2	0.3	2	0.33	0.9	2.5	< 1	< 0.1	< 5	< 0.4	0.2	0.2
MC5	< 0.5	0.9	2.7	0.47	2.5	1	0.42	1.5	0.3	1.9	0.4	1.3	0.19	1.3	0.21	0.7	< 0.1	< 1	< 0.1	34	< 0.4	0.1	< 0.1
MC14	3.4	38.8	74.4	8.71	30.9	5.9	1.1	4.9	0.8	4.6	0.9	2.6	0.38	2.4	0.4	5.8	0.8	2	0.3	20	< 0.4	14.7	2.9
GW1	< 0.5	11.3	23.3	2.97	12	2.7	0.71	2.3	0.4	2	0.4	1.2	0.16	1.1	0.18	2.8	0.4	< 1	0.1	15	< 0.4	3.5	0.6
GW7	2.7	20.7	38.7	4.17	14.4	3	0.64	2.6	0.5	3	0.6	1.9	0.28	1.9	0.31	2.2	1.1	1	0.4	26	< 0.4	9.7	1.9
GW8	0.7	3.8	8	1.04	4.4	1.4	0.73	1.8	0.4	2.3	0.4	1.2	0.17	1	0.15	0.3	6.4	< 1	0.2	9	< 0.4	0.4	0.8
NI3	9.9	33.8	66.1	7.85	29.3	6.1	1.31	5.4	0.9	5.4	1.1	3.2	0.46	3	0.49	5.7	0.8	14	0.5	< 5	<	12.7	3

NI3-1	13.7	49.9	98.3	11.3	40.4	7.7	1.08	6.1	1	5.5	1.1	3.4	0.48	3.2	0.48	4.5	1.5	5	1.4	13	< 0.4	22.8	2.7
NI4	10.3	45.8	87.6	10.2	37.6	7.1	1.38	5.8	0.9	5.3	1	2.9	0.4	2.6	0.45	5.4	0.9	4	0.6	5	< 0.4	16.4	3.1
NI6	10.5	44.2	85	9.86	36.8	6.8	1.03	5.6	0.8	4.9	0.9	2.5	0.34	2.2	0.34	6.3	0.9	3	0.7	7	< 0.4	15.9	1.8
NI7	1.4	9.9	33.1	5.42	25.2	7.8	0.63	7.6	1.5	9.4	1.8	5.5	0.81	5.4	0.8	0.3	< 0.1	< 1	< 0.1	< 5	0.8	3.8	4.1
NI8	46.9	126	226	23.3	78.5	9.9	0.79	5.5	0.5	2.5	0.4	1.2	0.16	1.2	0.2	20.7	2.3	13	2.6	8	< 0.4	48.9	9.3
NI16	1.3	1.8	6.2	1.13	5.7	1.7	0.23	1.8	0.3	2	0.4	1.1	0.16	1.1	0.16	0.6	< 0.1	< 1	0.1	< 5	< 0.4	1.1	0.2
NI18	1.2	1.4	4.3	0.67	2.8	0.7	0.12	0.7	0.1	0.6	0.1	0.3	< 0.05	0.3	0.05	0.3	< 0.1	2	< 0.1	< 5	< 0.4	0.6	0.1
CR1	3.4	7.9	14.7	1.77	6.8	2.1	0.16	2.4	0.5	3.3	0.7	2.2	0.34	2.5	0.39	2.3	1.5	< 1	0.9	46	< 0.4	13.4	4.8
PP2	< 0.5	1	2	0.25	1	0.2	0.05	0.3	< 0.1	0.4	< 0.1	0.3	0.05	0.4	0.07	< 0.2	< 0.1	1	< 0.1	< 5	< 0.4	0.7	0.1
BR14	203	33.4	99	6.69	23.2	4	0.8	3.2	0.5	3.1	0.6	2	0.29	2	0.31	8.4	0.7	1	0.6	14	< 0.4	19.7	1.5
BR12	7	6.2	9.2	1.32	5	1	0.25	1.3	0.3	1.8	0.4	1.1	0.17	1.3	0.22	0.4	< 0.1	3	< 0.1	< 5	0.7	0.9	0.2
BM1	0.9	49.4	94.8	11.4	43.6	8.6	1.7	7.6	1.2	6.7	1.3	3.5	0.48	3	0.42	5.9	1	2	0.4	6	< 0.4	8.8	1.3
BM2	0.9	7.7	15	1.81	7.2	1.9	0.29	2.3	0.5	2.8	0.5	1.3	0.18	1.1	0.16	2.1	1.2	< 1	0.5	21	< 0.4	1.5	0.7
DR1	3.2	36.3	75.2	8.69	31.5	6.4	1.05	5	0.8	3.6	0.6	1.5	0.21	1.3	0.18	3.2	0.9	< 1	0.9	33	< 0.4	18.3	1.9
DR2	18.9	11.7	25.2	3.13	11.9	4	0.82	4.9	1.1	7.3	1.7	5.1	0.79	5.3	0.81	1.1	0.4	< 1	1.3	57	< 0.4	11.2	3.7
MZ1	4.9	16.1	30.1	3.25	11	2.2	0.81	1.9	0.3	1.7	0.3	0.9	0.13	0.9	0.14	1.1	1.3	1	1	44	18.2	6.5	2.2
MZ2	0.6	11	22.8	2.82	11.3	2.6	0.78	3	0.6	3.6	0.7	2.2	0.32	2.2	0.35	2.2	0.3	< 1	0.2	< 5	< 0.4	3.2	0.9
BV1	2.4	19.9	41.1	4.92	20	4.5	1.13	5	0.8	5.3	1.1	3.3	0.48	3.3	0.51	3.5	0.5	< 1	0.2	13	< 0.4	5.9	1.5
BV2	18.8	2.3	4.4	0.5	1.8	0.5	0.29	0.5	< 0.1	0.6	0.1	0.4	0.07	0.6	0.1	3	1.4	4	1.3	44	0.7	1.4	2.3

BV3	6.7	20.8	40.5	4.45	15.5	2.9	0.48	2.1	0.3	1.7	0.3	0.8	0.12	0.8	0.12	2.7	1.1	< 1	0.7	19	< 0.4	4.9	1.5
BV4	6.6	5.7	10.3	1.19	4.2	0.9	1.28	1	0.2	1.5	0.3	0.9	0.14	1	0.15	0.8	< 0.1	1	0.8	48	1	2.3	1.6
ER1	10.2	43.5	80.1	8.87	30.9	5.1	1.15	3.6	0.5	2.9	0.5	1.5	0.22	1.5	0.23	3.5	1.2	5	1.1	31	< 0.4	29.9	6.1
BV5	5.7	41.1	80	8.92	31.9	5.9	1.13	4.9	0.8	4.5	0.9	2.6	0.37	2.5	0.37	7.8	0.8	4	0.2	23	< 0.4	14.8	2.7
CAMP	7.7	38.9	74.8	8.21	29.8	5.6	1.08	4.8	0.8	4.5	0.9	2.6	0.38	2.3	0.35	6.3	1	3	0.5	42	< 0.4	13.7	1.9
DESSENT	4.7	3.4	7.4	0.98	4.1	1.3	0.46	1.8	0.3	2.1	0.4	1.4	0.2	1.4	0.22	2	0.2	< 1	0.1	< 5	< 0.4	1	0.4
JBS1	5.9	21.5	40.5	4.47	15.6	2.8	0.51	2.1	0.3	1.5	0.2	0.6	0.08	0.4	0.07	2.3	< 0.1	< 1	0.3	10	< 0.4	8.6	1.6
JBS2	7.5	49	103	10.9	39.4	7.4	1.36	6.3	1	5.8	1.2	3.8	0.59	4.2	0.68	3.8	1.5	< 1	0.5	12	< 0.4	19.9	3
MZ3	13	49.5	99.5	11	38.5	7.5	1.06	6.1	0.9	5.1	1.1	3.1	0.45	2.9	0.43	4.4	1.4	4	1.2	12	< 0.4	19.7	2.4
DR3	11.7	57	111	12.6	47.1	8.8	1.51	7.3	1.1	6.1	1.1	3.2	0.47	3	0.44	3.5	1.2	4	1.1	33	< 0.4	19.6	3.5
LR1	< 0.5	4.2	10	1.47	6.9	2.1	0.83	3.6	0.9	5.7	1.3	3.7	0.54	3.6	0.57	2.4	0.4	2	< 0.1	< 5	< 0.4	0.5	0.2
Sed1	4.1	36	72	8.24	29.5	5.8	1.04	4.8	0.8	4.5	0.9	2.4	0.33	2.2	0.33	2.8	0.9	1	0.6	6	< 0.4	13.5	2.7
Sed2	0.5	15.3	31.7	3.13	11	1.8	0.6	1.3	0.2	1.1	0.2	0.6	0.09	0.6	0.1	1.4	0.2	< 1	0.5	15	< 0.4	4.5	0.6
Sed3	3	11.1	23.3	2.86	11.2	2.8	0.78	3.3	0.6	3.5	0.7	2.2	0.32	2.2	0.35	1.6	0.3	< 1	0.1	< 5	< 0.4	2.9	0.8
Sed4	11.5	40.3	78.8	8.44	27.7	5.4	0.71	5	0.8	5.1	1	2.9	0.43	2.9	0.44	3.4	1.1	< 1	0.7	24	0.4	18.4	3.8
Sed5	0.9	2.9	4	0.57	2.1	0.4	0.1	0.6	< 0.1	0.6	0.1	0.4	0.05	0.3	0.05	< 0.2	< 0.1	< 1	0.2	< 5	< 0.4	0.5	0.8
Sed6	< 0.5	3.6	6.9	0.75	2.7	0.5	0.11	0.5	< 0.1	0.5	0.1	0.3	< 0.05	0.3	0.05	< 0.2	0.1	< 1	< 0.1	< 5	< 0.4	1.1	0.6
Sed7	< 0.5	13.1	31	3.74	15.2	3.5	0.94	3.7	0.8	6.1	1.4	4.1	0.57	3.6	0.54	4.8	1.1	3	< 0.1	14	0.9	2.9	0.8
Sed8	< 0.5	0.7	2.6	0.5	3	1.2	0.6	2	0.4	2.7	0.5	1.6	0.22	1.5	0.23	< 0.2	< 0.1	< 1	< 0.1	44	< 0.4	< 0.1	< 0.1

Sed9	0.5	7.6	16.3	2.01	7.8	1.9	0.63	2.2	0.4	2.5	0.5	1.6	0.24	1.6	0.24	1	0.2	< 1	< 0.1	< 5	< 0.4	1.9	0.5
Sed10	< 0.5	6.6	15.8	1.48	5.8	1.3	0.33	1.5	0.3	1.6	0.3	1	0.14	1	0.15	< 0.2	< 0.1	< 1	< 0.1	32	< 0.4	1.3	0.2
Sed11	1.1	21.9	40.7	5	18.1	3.4	0.63	3.3	0.5	3.3	0.6	1.8	0.27	1.8	0.3	3.6	0.6	1	< 0.1	17	< 0.4	7.9	1.6
Sed12	< 0.5	5.3	13.6	1.9	8.6	2.3	0.48	2.5	0.4	2.6	0.5	1.4	0.19	1.2	0.19	0.6	0.1	< 1	< 0.1	6	< 0.4	2.1	0.4
Sed13	21.3	50.9	104	11.7	41.9	8.1	1.26	6.7	1	5.9	1.1	3.1	0.44	2.9	0.44	3.9	1.6	3	1	25	0.8	22.8	3.7
MC3-1	0.7	1.5	4.6	0.8	4.4	1.5	0.64	2.5	0.5	3.1	0.7	2	0.31	2.2	0.34	1	< 0.1	< 1	< 0.1	< 5	< 0.4	0.2	0.2

뒷 면

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.