

<Short Note>

남극 북빅토리아랜드의 광물 자원 존재 및 탐사 가능성 평가

김영민¹ · 이인성^{1,*} · 이종익² · 우주선² · 김태우¹

¹서울대학교 지구환경과학부
²한국해양과학기술원 부설 극지연구소

요 약

남극대륙은 과거 아프리카, 호주, 남아메리카 대륙 및 인도 대륙 등과 곤드와나 대륙을 구성하고 있었으며, 이들 대륙과 마찬가지로 많은 광물 자원이 매장되어 있을 것으로 예상된다. 현재 남극조약환경의정서의 발효로 인해 과학적 목적을 제외한 광물 자원 탐사 및 개발과 관련된 모든 활동이 금지되어 있다. 의정서 발효 이전에는 남극대륙의 광물 자원에 대한 꾸준한 연구가 있었으며, 특히 1970년대 중반부터 1980년대 말까지 미국을 중심으로 남극대륙의 우라늄 광상의 존재 및 개발 가능성에 대한 탐사가 진행되었다. 남극대륙의 광물 자원 탐사는 여러 지리 및 기후적, 기술적, 경제적 및 환경적 어려움들을 동반한다. 그러나 미래의 자원 고갈 상황에 대비하여 과학적 관점에서부터 남극대륙의 광물 자원 탐사에 접근하는 것이 반드시 필요하다고 여겨진다. 장보고 과학기지를 기점으로 하여 북빅토리아랜드 지역의 야외 지질 조사 및 이를 통해 채집된 암석의 분석 결과를 종합하여 광물 자원이 매장되어 있을 가능성이 높은 지역을 선정하고, 유망 지역에 대해 집중적인 조사를 수행할 필요가 있다.

주요어: 남극대륙, 북빅토리아랜드, 광물 자원, 자원 탐사, 광물 자원 가능성 평가

Yeongmin Kim, Insung Lee, Jong Ik Lee, Jusun Woo and Taewoo Kim, 2017, Mineral resources potential and evaluation of its exploration in Northern Victoria Land, Antarctica. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 4, p. 555-565

ABSTRACT: Antarctica was a part of Gondwana Supercontinent with Australia, Africa, South America and India and has a great potential on mineral resources. Evaluation and exploration of mineral resources in Antarctica is difficult due to its severe climate and widespread snow/ice-covered area. The Protocol of Environmental Protection to the Antarctic Treaty also prohibits any activities related to the resources exploration and development without scientific purposes. Before the effectuation of the Protocol, there had been researches and activities for mineral resource evaluation of Antarctica. Especially, exploration and evaluation of uranium deposits in Antarctica had been carried out mainly by U.S. Antarctic Research Program. There are geographic, climatic, technical, economic and environmental difficulties for mineral resources exploration in Antarctica. For resource depletion circumstances in the future, it is necessary to approach the mineral exploration in Antarctica from scientific viewpoint. With the completion of Jang Bogo station in Antarctica, the area with high mineral resources potential in Northern Victoria Land will be narrowed by the field survey and geochemical analysis and focused investigation will be carried out.

Key words: Antarctica, Northern Victoria Land, mineral resources, resource exploration, evaluation of mineral resources potential

(Yeongmin Kim, Insung Lee and Taewoo Kim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea; Jong Ik Lee and Jusun Woo, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-2-880-6730, E-mail: insung@snu.ac.kr

1. 서론

대한민국 극지연구소의 두 번째 남극기지인 장보고 과학기지가 2014년 2월에 남극 북빅토리아랜드(Northern Victoria Land) 테라노바만(Terra Nova Bay) 해안가에 건설되었다(그림 1). 장보고 과학기지의 완공 이후 기지를 기반으로 하여 북빅토리아랜드를 포함한 남극대륙의 더욱 활발한 지질학적 연구를 수행할 수 있는 기반이 마련되었다. 특히 북빅토리아랜드 지역은 남극대륙에서 암석이 노출된 지역이 가장 넓고, 장보고 과학기지에서 북쪽으로 약 30 km 정도 떨어진 멜버른산(Mt. Melbourne)이 위치하고 있어 남극대륙의 과거와 현재의 지질학적 활동을 연구하기에 매우 좋은 조건을 갖추고 있다.

남극대륙은 고생대 말기에서 중생대 초기 사이에 지금의 남아메리카, 아프리카, 호주 및 인도 대륙과 함께 곤드와나 대륙을 구성한 것으로 알려져 있다(Boger, 2011). 남극대륙과 이들 대륙 간의 지질학적 연관성은 광물 자원의 종류와 분포에서도 잘 나타난다. 예를 들어, 남극종단산맥(Transantarctic Mountains)

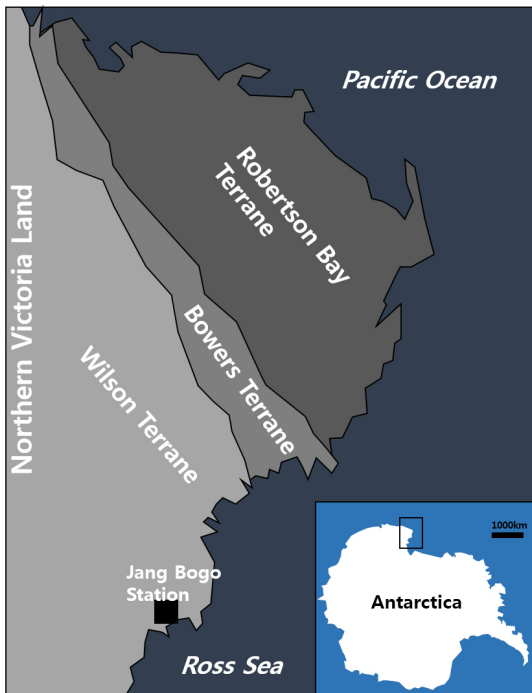


Fig. 1. Tectonic terranes of Northern Victoria Land (modified from Capponi *et al.*, 1999) and location of Jangbogo station in Terra Nova Bay.

에서 발달한 비콘누층군(Beacon Supergroup) 내의 석탄층은 남아프리카의 카루(Karoo) 석탄층과 많은 부분에서 지질학적 특징이 일치하며(Coates *et al.*, 1990), 펜사콜라 산맥(Pensacola Mountains)에서 발견되는 광범위한 듀펙 층상 고철질 관입암(Dufek layered mafic intrusion)의 상부층은 세계 최대의 크롬, 니켈, 동, 코발트 및 백금족 원소가 매장되어 있는 남아프리카의 부쉬벨드 복합체(Bushveld complex)의 상부층과 층서적으로 매우 유사하다(De Wit and Kruger, 1990; Ford, 1990). 장보고 과학기지가 위치하고 있는 북빅토리아랜드 지역은 곤드와나 대륙 형성 당시 현재 많은 양의 동과 금이 생산되고 있는 지금의 호주 남동부 지역과 인접하고 있었다. 따라서 북빅토리아랜드를 포함한 남극종단산맥 지역에 광물 자원이 매장되어 있을 가능성이 매우 높다고 여겨지고 있다.

남극대륙의 광물 자원 탐사 활동은 1990년대에 급격한 변화를 맞이하게 된다. 1991년에 채택된 남극조약환경의정서(Protocol of Environmental Protection to the Antarctic Treaty)에 의해 의정서 발효 이후 50년 동안 과학적 목적을 제외한 남극대륙에서의 자원 탐사 및 개발 활동이 금지되었다. 이러한 이유로 1990년대 초반까지 활발하게 진행되었던 남극대륙의 광물 자원 탐사 활동은 급격하게 축소되었다. 따라서 과학적 연구 활동을 제외한 남극대륙의 광물 자원 탐사 및 개발 활동은 공식적으로 거의 이루어지지 않고 있다. 그러나 2011년 이탈리아 연구팀이 북빅토리아랜드 바위스 테레인(Bowers Terrane) 내의 변성퇴적암 층에서 남극대륙의 고생대 층에서 최초로 발견된 금 광화작용을 보고하였으며, 이를 조산 활동과 관련된 금 광상(orogenic gold deposit) 유형으로 분류하였다(Crispini *et al.*, 2011). 이는 지질학적 연구 활동을 수행하는 도중에 발견된 남극대륙의 광물 자원 탐사의 대표적인 예이며, 미래의 자원 고갈에 대비하여 남극대륙의 지질학적 연구가 지속적으로 수행될 필요성이 있음을 보여주고 있다.

본 연구에서는 이러한 필요성에 따라 장보고 과학기지가 위치한 북빅토리아랜드 지역을 중심으로 한 남극대륙의 광물 자원 존재 및 탐사 가능성에 대해 평가하고자 한다. 1990년대 이전에 많이 수행되었던 이전의 연구 사례들을 바탕으로 북빅토리아랜드 지역의 조사 결과를 소개하고자 한다. 또한 남극

대륙에서 광물 자원 탐사에 대해 고찰하고 미래 우리 나라의 남극대륙 광물 자원 탐사 방향에 대해 논의할 것이다.

2. 남극의 광물 자원 및 관련 연구

2.1 과거 남극의 광물 자원 연구

남극의 광물 자원에 대한 연구는 1950년대 후반에 본격적으로 발표되기 시작하였으며, 1960년대에 들어 더 많은 연구가 이뤄졌다(Mueller, 1964; McLeod, 1965; Potter, 1969). 이러한 연구들은 남극대륙의 지질을 조사하는 과정에서 광물 자원을 배태하고 있을 가능성이 있는 지역들을 개괄적으로 살피는 방식으로 진행되었다. 1970년대부터 서남극(West Antarctica) 지역을 중심으로 남극 반도(Antarctic Peninsula)에서 나타나는 동 광화작용(Rowley *et al.*, 1975, 1977)과 몰리브덴, 동 및 철을 포함하는 다금속 광상(Hawkes and Littlefair, 1981; Rowley and Pride, 1982)에 대한 연구들이 발표되었다. 또한 서남극 엘스워스 산맥(Ellsworth Mountains)에서 관찰되는 반암 유형의 동 광상(Rowley *et al.*, 1988)을 포함하여 이 지역에서 광물 자원이 분포할 잠재성에 대한 연구(Vennum and Nishi, 1981; Webers *et al.*, 1992)들이 진행되었다.

1980년대부터는 남극 반도 및 서남극 지역 해안으로부터 더 내륙으로 진출하여 남극중단산맥 지역에 대한 조사가 이뤄졌다(Ford, 1983; Ford *et al.*, 1983). 특히 펜사콜라 산맥 북부 지역에서 관찰되는 듀팩층상 고철질 관입암은 1970년대부터 많은 지질학자들의 관심을 끌었으며(Wright and Williams, 1974; Zumberge, 1979), 1980년대 들어 연구가 더욱 활발하게 진행되었다(Ford, 1983; Ford *et al.*, 1983). 듀팩 관입암은 50,000 km² 이상에 걸쳐 분포하고 있으며(Behrendt *et al.*, 1980), 이는 세계 최대의 백금족 원소가 매장되어 있는 남아프리카의 부쉬벨드 복합체의 규모(66,000 km²)와 필적하는 것으로 여겨졌다(Ford, 1983). 듀팩 관입암에는 부쉬벨드 복합체와 마찬가지로 휘석암으로 이루어진 층이 관찰되지만 광석광물인 크롬철광암(chromitite)을 비롯하여 백금과 팔라듐을 함유한 황화물 등이 발견되지는 않았다(Ford, 1990). 특히 부쉬벨드 복합체에서 다량의 백금족 원소를 함유한 메렌스키 리프(Merensky Reef)와 유사한 층이 듀팩 관입암에서는 발견되지 않았다

(Ford, 1990). 그럼에도 불구하고 듀팩 관입암은 그 거대한 규모로 인해 지속적으로 많은 관심을 받았으며, 1980년대 후반에는 백금족 원소가 존재한다는 가정 아래 탐사 및 개발에 대한 경제성 평가도 진행되었다(De Wit, 1985; Beike, 1988).

프린스 찰스 산맥(Prince Charles Mountains) 남부에 위치한 마운트 루커(Mount Ruker)에서 관찰되는 철광층을 포함하여 동남극 지역에 발달한 호상철광층(Banded Iron Formation) 또한 많은 연구자들의 관심을 받았다(Wright and Williams, 1974). 특히 넓은 지역에서 노두가 발달한 마운트 루커의 호상철광층 시료(n=27)의 평균 철 함량은 33.5%로 보고되었다(Ravich *et al.*, 1982; Tingey, 1990). 품위와 매장량을 고려하였을 때, 마운트 루커 지역에서 발달한 호상철광층은 잠재적으로 철광상으로 분류될만한 충분한 가능성을 갖고 있다고 여겨졌다(Holdgate and Tinker, 1979). 그러나 남극의 기후적, 지리적 특성을 고려하면 실제로 개발될만한 경제적인 가치는 지니지 못한 것으로 판단되었다(Tingey, 1990).

칼륨, 우라늄 및 토륨을 포함하고 있는 퇴적암들은 이들의 방사성 붕괴로 인해 감마선을 방출하게 되는데, 특히 우라늄과 토륨은 사암과 역암에 포함되어 있는 중광물에 많이 함유되어 있다(Faure and Mensing, 2005). 또한 우라늄과 토륨은 화강암질 마그마의 분별결정작용이 일어날 때 페그마타이트 암맥이나 석영맥으로 결정화되는 작은 규모의 잔류 마그마 내에 높은 농도로 농축이 된다. Le Roux and Toens (1987)은 고생대 후기에 곤드와나 대륙에 형성된 우라늄광상 중에 전자를 사암형 광상(sandstone-hosted type deposit), 후자를 맥상형 광상(vein-hosted type deposit)으로 나누었다. 우라늄과 토륨은 다양한 암석에 포함되어 넓은 지역에 분포하고, 원자력 발전의 원료 등 다양한 산업 분야에 활용되기 때문에 미국 지질조사소가 주축이 되어 1976년부터 1980년대 후반까지 남극의 우라늄 광상의 존재와 개발 가능성에 대한 탐사와 평가가 지속적으로 이뤄졌다(Zeller *et al.*, 1977, 1986, 1990; Dreschhoff *et al.*, 1980; Zeller and Dreschhoff, 1987). GAX 512 NaI (TI) 검출기, GR-800A 감마선 검출기(gamma ray detector)와 GAR-6 기록계로 구성된 감마선 분광기(gamma ray spectrometer)를 헬리콥터(UH-1/N)에 장착하여 빅토리아랜드를 포함한 남극중단산맥, 마리버드랜드

Table 1. General and simplified stratigraphy of the Northern Victoria Land (modified from Woo *et al.*, 2013).

Age	Tectonic Setting	Major Stratigraphic Units	Representative Lithology
Cenozoic	Continued rifting	McMurdo Volcanics Sirius Group	Volcanics Glacial Deposits
Devonian- Mesozoic	Breakup of Gondwana Tectonic quiescence	Ferrar Supergroup Beacon Supergroup	Dolerite, basalts, and volcanoclastics Fluvial sandstone
Cambrian- Ordovician	Ross Orogeny	Bowers Group Robertson Bay Group	Shallow- and deep-marine siliciclastics Shallow-marine carbonates and volcanics
Precambrian- early Cambrian	-	Wilson Group	Metasedimentary rocks

(Marie Byrd Land), 엘스위스산맥과 남극 반도 지역의 감마선 조사가 이뤄졌다. 총 조사기간 동안 50 m 간격으로 약 30,000 km의 비행거리를 통해 1,500 km² 넓이에 해당하는 지역의 감마선을 측정하였으며, 이를 바탕으로 약 218,000 km² 넓이의 지역에 우라늄 광상의 매장 가능성을 평가하였다(Zeller *et al.*, 1990). 그러나 넓은 지역과 다양한 암석 종류에 대해 조사 및 평가 작업이 진행된 것에 비해 유망한 감마선 측정 결과를 보이는 지역은 일부 지역으로 국한된다.

Zeller *et al.* (1982)은 항공에서 측정한 남극종단 산맥 지역의 감마선 계수율(gamma ray counting rates)을 얼음에 대한 비로 나타내었다. 얼음의 감마선 계수율을 1이라 하였을 때, 페그마타이트가 4.1로 가장 높은 평균값을 보였으며, 데본기에 쌓인 비콘누층군(Devonian Beacon Supergroup)이 1.8로 가장 낮은 평균값을 보였다. 페그마타이트를 포함한 반암맥, 안구상편마암, 이리자르 화강암(Irizar granite) 등이 높은 값을 보이는 반면에, 변성퇴적암과 대리암은 낮은 평균값을 보였다.

2.2 남극광물자원활동규제조약(CRAMRA)

남극대륙에서 광물 자원의 탐사와 개발을 규제하는 협정은 1982년 뉴질랜드 웰링턴에서 열린 4차 남극조약 협의당사국회의(ATCM: Antarctic Treaty Consultative Meeting)에서 시작되었다. 약 7년간의 논의가 지속된 끝에 1988년 남극조약협의당사국회의에서 남극광물 자원활동규제조약(CRAMRA: Convention on the Regulation of Antarctic Mineral Resource Activities)이 작성되었다. 남극광물자원활동규제조약은 67개의 조항으로 이뤄졌으며, 특히 남극대륙의 환경보호를 위해 광물 자원의 개발과 관련된 활동을 제한하는 것에 초점이 맞춰져 있다. 그러나 미국과 소련을 포함

하여 남극의 영유권 선언(Claimant)을 한 국가에만 예외적으로 관련 활동을 허락하였고, 남극조약을 체결한 협의국 내부에서도 비판이 제기되어 발효되지는 못하였다. 이를 대신하여 1991년에 채택된 남극조약 환경의정서(Protocol of Environmental Protection to the Antarctic Treaty) 7조에 의해 의정서 발효(1998년) 후 50년간 과학적 연구를 제외한 광물 자원의 탐사 및 개발과 관련된 모든 활동이 금지되었다. 의정서의 발효로 인해 1980년대 후반까지 활발하게 이뤄졌던 남극의 광물 자원 탐사와 관련된 연구는 그 수와 규모가 매우 제한적인 상태가 되었다.

3. 북빅토리아랜드의 지질

북빅토리아랜드는 선캠브리아기 변성암을 기반으로 하여 변성암과 화강암질 암석으로 구성된 윌슨 터레인(Wilson Terrane), 쇠설성 퇴적암으로 구성된 바워스 터레인(Bowers Terrane)과 심해저 저탁암으로 구성된 로버트스 베이 터레인(Robertson Bay Terrane)으로 구성되어 있다(그림 1; 표 1). 전기고생대 시기에 일어난 로스조산운동(Ross Orogeny)의 영향을 받은 이 세 개의 부가(accretionary) 터레인의 기반암 위에 지구구조적으로 조용한 시기였던 데본기에서 삼첩기 사이에 쇠설성 규산염 퇴적체인 비콘누층군이 넓은 범위에 쌓였다(그림 2). 이러한 비콘누층군을 화산쇄설성 퇴적암, 커크패트릭 현무암(Kirkpatrick Basalt) 및 조립현무암 수평관입체(Ferrar Dolerite Sill)로 구성된 페라르층군(Ferrar Group)이 덮고 있다(그림 2). 페라르층군은 곤드와나 대륙이 분리되는 과정과 관련된 화산활동에 의한 것으로 생각된다. 캠브리아기-오르도비스기에 윌슨 터레인 지역을 위주로 화강암 복합체인 그레닛하버 관입체(Granite Harbour

Intrusives)가 관입하였으며, 로버트슨 베이 터레인에서는 데본기-석탄기 시기에 관입한 화강암질 암석인 어드미럴티 관입체(Admiralty Intrusives)가 나타난다(그림 2). 북빅토리아랜드의 지질과 층서는 Woo *et al.* (2013)에 보다 상세하게 설명되어 있다.

4. 남극 북빅토리아랜드의 광물 자원 탐사에 대한 고찰

4.1 지리 및 기후적 관점

남극대륙은 암석이 눈 또는 얼음에 덮이지 않고

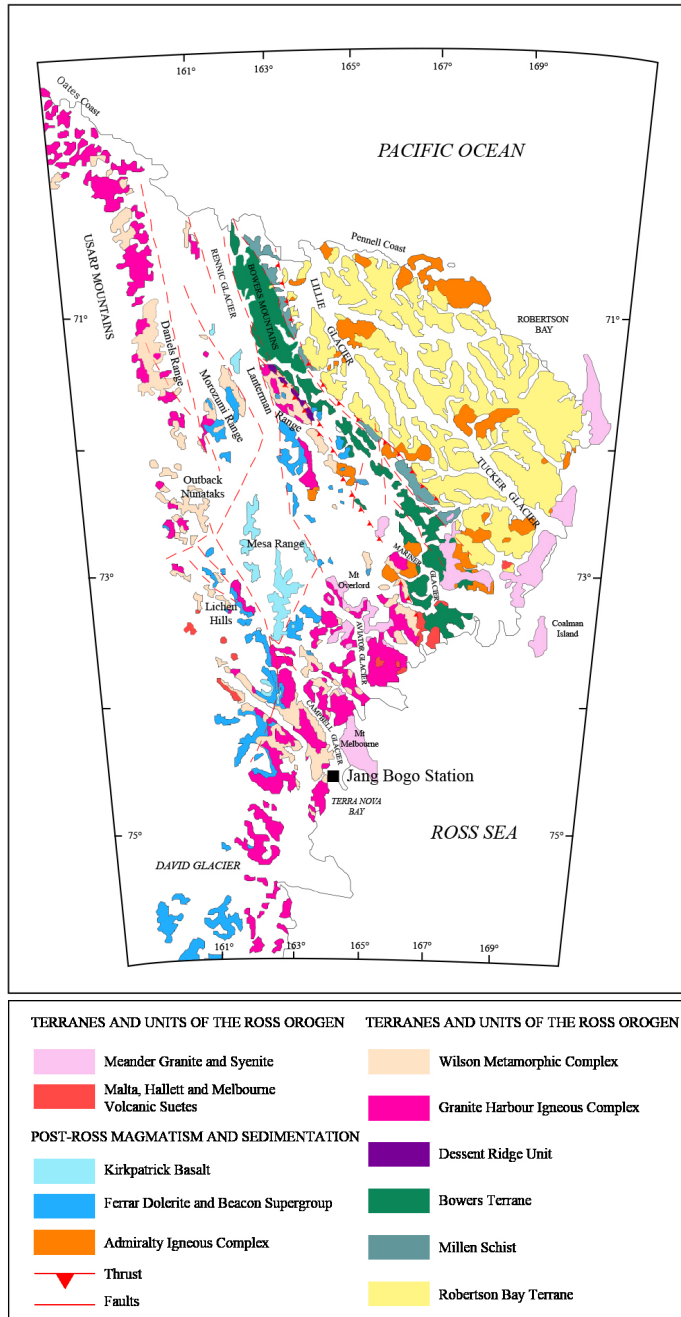


Fig. 2. Geological map of Northern Victoria Land (modified from Woo *et al.*, 2013).

드러나 있는 면적이 전체 면적($14 \times 10^6 \text{ km}^2$)의 약 1%밖에 되지 않는다. 북빅토리아랜드 역시 남극대륙에서 가장 넓게 암석이 노출되어 있지만 다른 대륙과 비교할 때는 그 면적이 매우 적다. 또한 암석이 드러나 있는 부분도 북빅토리아랜드 전반에 넓게 분포되어 있을 뿐만 아니라, 바람에 의해 눈에 덮이지 않아야 하는 특성 상 노도가 드러난 고도가 전반적으로 높다. 이는 남극 탐사를 위한 지질 답사와 시료 채집에 큰 어려움을 야기한다.

이러한 접근의 어려움과 더불어 지구상에서 가장 혹독하고 추운 남극대륙의 기후적 특성은 광물 자원 탐사의 어려움을 가중시킨다. 특히 남극대륙은 내륙과 고지대로 갈수록 평균기온이 더욱 낮아지는 특징을 보이는데, 낮은 온도, 많은 적설량 및 긴 극야(polar night) 기간은 탐사 및 개발에 필요한 장비의 가동과 작업 활동을 가로막는 주요 요소이다.

4.2 기술적 관점

광물 자원 탐사를 포함하여 남극대륙에서 이뤄지는 대부분의 지질학적 활동들은 헬리콥터 또는 항공기의 이용을 기반으로 한다. 국내의 경우 하계탐사시 장보고 과학기지를 중심으로 기상과 항공 여건을 고려하여 지질 답사 활동이 결정되며, 일주일 이상의 장기 탐사를 수행하기 위한 인력과 장비들을 탐사 현장으로 수송하는 작업 역시 항공 운송수단 없이는 불가능하다.

특히 시추용 드릴과 같이 탐사에 필요한 무거운 장비들을 탐사 현장으로 이동시켜 안전하게 설치하는 것은 많은 기술적인 어려움을 불러 일으킨다. 탐사 장비의 이동과 설치뿐만 아니라 이러한 장비들이 남극의 극한 환경에서 버틸 수 있는지를 확인해야 하는 작업도 반드시 필요하다.

대부분의 광물 자원 탐사 및 개발 과정에서 많은 양의 용수가 필요하다는 점도 극복해야 하는 큰 기술적인 어려움이다. 시추, 광석 세척, 부유선광 등과 같은 광물 자원 탐사 및 개발 작업에서 대용량의 용수가 필요하다. 남극뿐만 아니라 그린란드 서부의 블랙 엔젤 연-아연 광산(Black Angel lead-zinc mine)이나 러시아의 스발바드 광산(Svalbard mine)과 같이 북극권에서 개발 중인 광산도 용수 공급 문제를 겪었다(Crockett and Clarkson, 1987). 블랙 엔젤 광산에서는 해수를 이용하는 부유선광 방식을 사용

하였고, 스발바드 광산에서는 공기 자체에 맥동을 발생시켜 광석을 선별하는 건식 공기지그(air jig) 방법을 적용한 석탄의 세정 작업을 진행하여 개발 과정에서 물의 사용을 최소화하였다(Crockett and Clarkson, 1987). 남극의 경우에도 광물 자원이 해안에 매장되어 있는 경우 전자의 방법을 적용할 수 있지만, 내륙에 매장되어 있는 금속 광물 자원을 탐사 및 개발하는데 있어서는 두 방법 모두 적합하지 않다. 기술적인 관점에서는 남극에 풍부한 눈과 얼음을 녹여 용수로 사용하는 것이 가능하지만 에너지 효율과 경제적인 관점에서 보았을 때 적합한 방법은 아니라 생각된다.

광물 자원의 개발 과정에서 발생하는 대량의 광미와 공정부산물의 적절한 처리는 기술적인 관점뿐만 아니라 환경적인 관점에서도 매우 중요하다. 특히 내륙에서 개발이 진행되는 경우 처리를 위해 광미와 공정부산물을 해안가로 옮기는 것은 많은 비용이 예상되어 적절하지 못하다고 여겨진다. 또한 광산 근처의 내륙에 광미와 공정부산물을 그대로 쌓아두는 것은 주변의 생태계에 심각한 악영향을 끼칠 뿐만 아니라 유해한 물질들이 바람을 타고 남극 전역으로 퍼질 위험성도 존재한다.

4.3 경제적 관점

환경에 대한 부정적인 영향을 제외한다면 광물 자원의 탐사와 개발은 경제적인 논리에 가장 많은 영향을 받는다. 개발 대상 광물의 품위와 규모, 시장 가격, 지리적 및 기술적 여건에 따른 생산 비용 등이 이러한 경제성을 결정짓는 요소들이다. 앞서 언급한 지리 및 기술적인 어려움에 따른 막대한 생산비용과 구체적인 광종, 품위 및 규모가 보고된 적이 없는 상황을 고려하면 남극대륙에 매장되어 있을 것으로 기대되는 광물 자원의 개발과 탐사에 대한 경제성은 거의 없는 것이 사실이다. 그러나 추후 기술의 발전, 광물 자원의 고갈에 따른 공급량 감소와 가격 상승을 고려하면 남극대륙의 광물 자원 탐사 및 개발에 대한 경제성 평가는 뒤바뀔 여지가 충분하다고 여겨진다.

4.4 환경적 관점

1991년에 채택된 남극조약환경의정서 7조에 의해 의정서 발효 후 50년 간 과학적 목적을 제외한 남극대륙의 광물 자원 탐사 및 개발이 전면적으로 금

지되었다. 이러한 의정서가 채택된 가장 큰 목적은 남극의 자연환경과 생태계를 보전하는 것에 있다. 탐사를 위한 시추 작업 시 사용되는 윤활유를 포함한 각종 화학약품과 각종 중금속을 함유한 광석과 폐석은 주변 환경과 생태계에 큰 위협이 될 것이다. 특히 중금속을 포함한 폐석이 빙하 위에 쌓여있다가 빙하의 이동과 함께 남극해로 흘러 들어가면 남극해뿐만 아니라 주변 바다의 플랑크톤의 개체 수에 불균형을 초래함과 동시에 바다 생태계에도 연속적으로 악영향을 미칠 수 있다(Crockett and Clarkson, 1987).

4.5 과학적 관점

남극조약환경의정서에 의해 광물 자원 탐사 및 개발과 관련된 모든 활동이 금지되었지만, 과학적 목적으로 진행되는 연구는 예외적으로 허용되고 있다. 그러나 1990년대 초까지 활발하게 발표되던 남극대륙의 광물 자원 연구는 남극조약환경의정서의 발효 이후 그 수와 규모가 상당히 줄어들었다. 이러

한 연구의 축소에는 의정서 발효뿐만 아니라 여러 가지 경제적, 환경적 요인도 복합적으로 작용한 것으로 생각된다. 또한 1980년대 말까지 지속적인 탐사에도 불구하고 경제성을 갖춘 광상이 발견되지 않았던 점도 큰 영향을 미쳤던 것으로 생각된다.

여러 지구화학 및 지구물리 자료들은 남극대륙이 과거 남아메리카, 아프리카, 호주, 뉴질랜드 및 인도와 곤드와나 대륙을 구성하고 있었음을 지시한다 (Boger, 2011). 듀팩 관입암이 남아프리카의 부쉬벨드 지역과 유사한 지질학적 특징을 보이는 것처럼 남극대륙의 지질은 곤드와나 대륙이 형성되었을 때 각 대륙의 위치와 밀접한 연관이 있다. 남극대륙과 함께 곤드와나 대륙을 구성하였던 남아메리카, 아프리카, 인도 및 호주에서는 그 동안 선캠브리아기 호상철광상(호주 해머즐리 지역), 반암동광상(칠레의 안데스 산맥 지역), 퇴적기원 동 광상(잠비아에서 콩고민주공화국에 걸친 중앙아프리카 동 벨트), 정마그마 크롬, 니켈 및 백금족 광상(남아프리카 부쉬벨

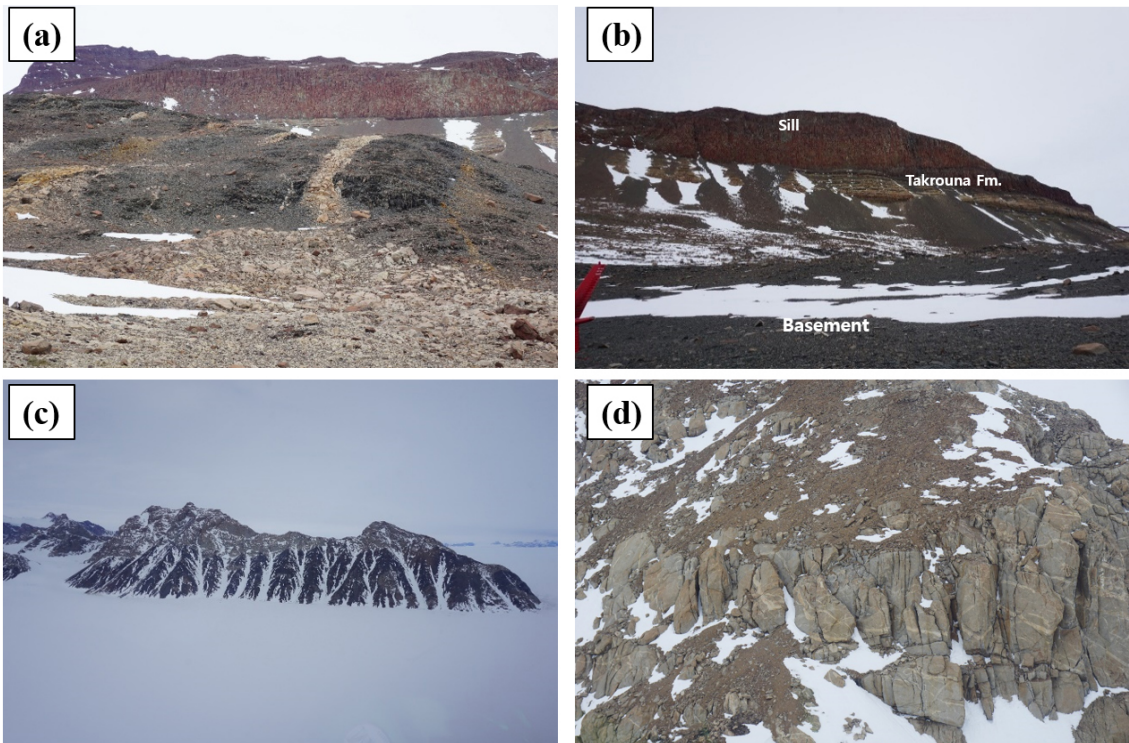


Fig. 3. (a) The basement, Rennick Schist (dark part) of Boggs valley with igneous intrusive rocks (light part) and (b) outcrop of basement (bottom), Takrouna Formation (middle) and Ferrar dolerite sill (top). Basement is composed of Rennick schists and pegmatitic intrusive rocks. (c) Field photograph of Morozumi Range from aerial view. Morozumi phyllite (dark part) and Morozumi granite (light part) are observed. (d) Morozumi granite from aerial view.

드 지역), 다이아몬드를 함유한 킴벌라이트 광상(남 아프리카 및 호주) 등이 발견되어 개발 중에 있다. 남극대륙은 99%가 얼음으로 덮여 있고, 지리 및 기후적 요건으로 인해 광물 자원 탐사를 위한 충분한 야외 조사가 이뤄지기 힘들기 때문에, 남극대륙과 곤드와나 대륙을 형성하였던 지역들에 대한 지질 정보 및 광물 자원에 대한 지질학적 연구들을 남극대륙의 광물 자원 탐사에 적극적으로 활용할 필요성이 있다.

5. 우리나라의 남극대륙 광물 자원 탐사

극지연구소와 함께 본 연구진은 2014년과 2015년에 북빅토리아랜드 일대의 지질 조사와 시료 채집을 진행하였다. 장보고 과학기지 주변의 변성암을 포함하여 라이켄힐즈(Lichen Hills), 아웃백 누나탁(Outback Nunataks), 오클리 글래시어(Oakley Glacier), 보그

스 벨리(Boggs Valley)(그림 3a, 3b), 모로주미 레인지(Morozumi Range)(그림 3c, 3d), 다니엘스 레인지(Daniels Range) 지역의 그레닛허버 관입암체, 유레카 스퍼스(Eureka Spurs)와 메사 레인지(Mesa Range) 및 바워스 터레인 일대의 퇴적암 및 변성퇴적암(그림 4), 나이아가라 아이스폴(Niagara Icefalls) 지역의 초염기성/염기성 복합체(Ultramafic/mafic complex), 렌터만 레인지(Lanterman Range) 지역의 변성암 시료들을 확보하였다.

채집된 시료는 일차적으로 주원소 및 미량원소 분석을 통하여 지구화학적 이상치(geochemical anomaly)의 존재 여부를 파악하였다. 야외 지질 조사를 통해 파악된 암상과 지구화학적 분석 자료를 종합하여 추가적인 조사가 필요한 지역을 설정하게 된다. 과거 연구에서 높은 감마선이 검출되어 우라늄 광상이 존재할 가능성이 높은 지역이라 추정되었던 라이켄

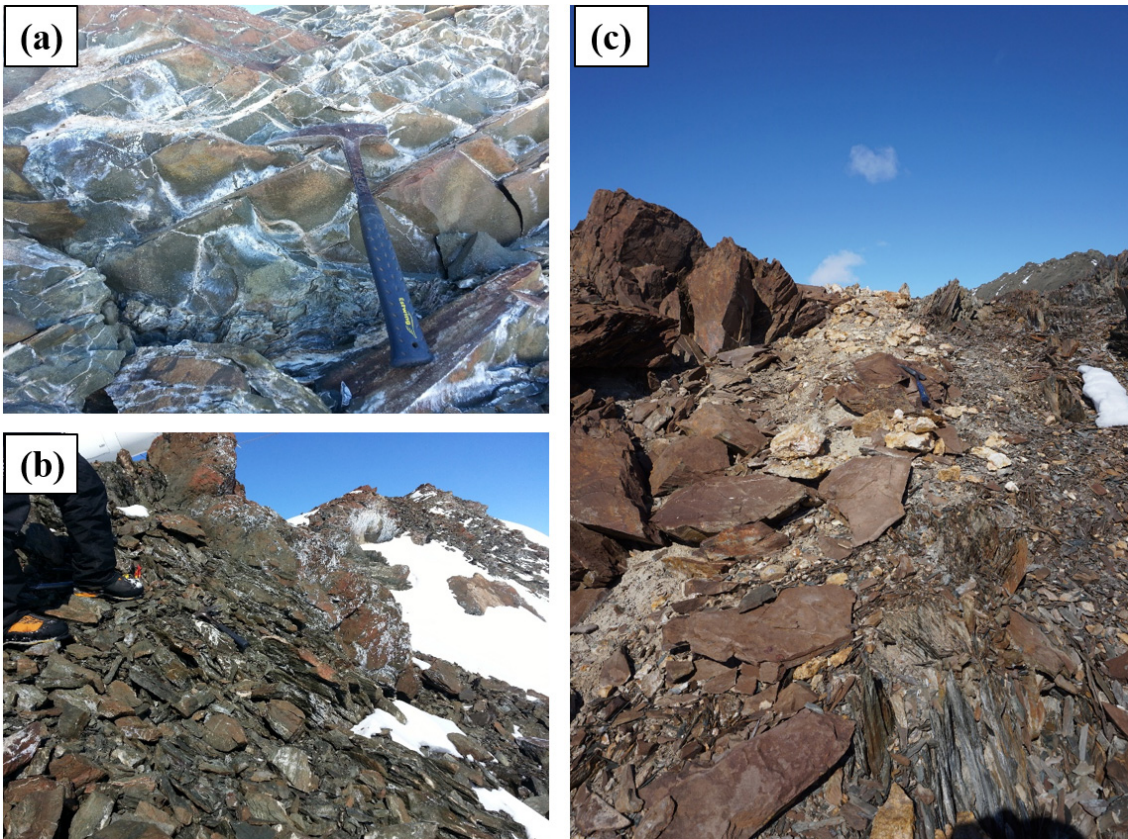


Fig. 4. (a) Metasedimentary rocks with lots of Fe-rich carbonate veins and (b) clastic sandstone-shale sequence including Fe-rich carbonate veins in the Mountain McCarthy area. (c) Fe-rich carbonate veins occurring in Reilly Ridge area.

힐즈와 아웃백 누나탁 지역에서 산출되는 페그마타이트와 화강암질 암석의 우라늄과 토륨 함량이 분석되었다. 라이켄힐즈 지역 암석의 우라늄과 토륨 함량은 각각 1.21~4.84와 2.67~27.64 ppm의 농도를 보이며, 아웃백 누나탁 지역 암석의 경우 각각 1.72~8.48, 0.55~20.87 ppm의 범위를 보인다. 측정된 값을 대륙 지각의 평균값(average continental crust)으로 표준화하면 우라늄은 2.91, 토륨은 2.21이 된다. 이러한 값은 대륙 지각의 평균보다 약간 더 높은 값으로, 페그마타이트와 관련된 우라늄 광상을 형성하기에는 낮은 수치라 생각된다. 반면에 탄탈륨의 경우 시료에 따라 대륙 지각의 평균값보다 최대 427배까지 부화된 값을 보인다.

페그마타이트는 니오븀(Nb), 탄탈륨(Ta), 베릴륨(Be), 리튬(Li), 우라늄(U), 토륨(Th) 및 희토류원소(REE)가 높은 농도로 부화되어 있을 가능성이 있다. 또한 그레이트하버 관입암체가 관입된 지역은 반암동광상을 포함한 마그마-열수 광상이 존재할 가능성이 있다. 또한 나이아가라 아이스폴 지역에서 산출되는 초염기성/염기성 복합체는 동, 니켈, 크롬을 포함한 전이금속과 백금족 원소(PGE)를 배태하는 마그마광상을 만들 수 있는 가능성이 있다. 이 지역의 야외 지질 조사 시 감람석과 휘석의 층상 구조가 아주 일부 노두에서 관찰되었으며, 대표적인 동 광석인 황동석(chalcopyrite)과 공작석(malachite)도 소량 발견되었다. 따라서 나이아가라 아이스폴 지역은 추가적이고 심층적인 야외 조사가 필요하며, 북빅토리아랜드에서 광물 자원이 발견될 가능성이 상대적으로 높다고 여겨진다.

이탈리아 연구진은 북빅토리아랜드 지역의 남극 대륙의 고생대 지층에서 처음으로 발견한 금 광화작용의 증거를 통해 북빅토리아랜드에 조산 운동과 연관된 금광상의 존재 가능성을 제시하였다(Crispini *et al.*, 2011). 북빅토리아랜드의 바워스 터레인은 많은 금 및 동 광상이 발견된 호주 남동부 지역과 지질학적 연관성을 보이며, 이는 북빅토리아랜드 바워스 터레인의 고생대 변성퇴적암과 변성화산암 층에서 광범위하게 발달하는 열수시스템이 이 지역에 발견된 것 이외의 추가적인 금 광상을 배태하고 있을 가능성을 뒷받침한다(Crispini *et al.*, 2011). 본 연구진의 지질 조사를 통해 관찰된 바워스 터레인의 변성퇴적암 및 변성화산암에는 함철 탄산염맥이 발달

하고 있었다(그림 4). 기존 연구에서 확인된 지역을 중심으로 바워스 터레인 지역에서 금 광상을 포함하여 열수시스템에 의한 광상의 형성 가능성을 추가적으로 조사할 필요성이 있다고 여겨진다.

남극대륙에서 효율적인 광물 자원의 탐사를 위해서는 대상 광종을 한정시키는 것이 필요하다. 첫째, 전략광물에 대한 집중이다. 전략광물은 해외의 수입 의존도가 크고, 공급이 중단될 시 국가 경제에 미치는 영향이 큰 광종을 의미한다. 우리나라의 경우 유연탄, 우라늄, 철, 동, 아연, 니켈을 6대전략광물로, 리튬과 희토류를 신전략광물로 지정하여 관리하고 있다. 둘째, 금, 은, 백금족 원소(PGE), 다이아몬드 및 보석류와 같은 고부가가치 광종에 대한 집중이다. 개발 지역에서 선광까지 완료된다는 가정 하에 고부가가치 광종들은 철, 동 등의 광석에 비해 남극대륙에서 다른 대륙으로 수송에 드는 비용이 절감되어 높은 경제성을 가질 수 있을 것이라 예상된다.

본 연구진과 극지연구소는 북빅토리아랜드 지역 야외 지질 조사 결과와 이를 통해 획득한 암석의 분석을 통하여 선정된 유망 지역에 대한 집중적인 조사를 진행할 예정이다. 이를 바탕으로 북빅토리아랜드 지역의 광물 자원 존재 및 탐사 가능성을 평가할 계획이다. 또한 장기적으로 남빅토리아랜드와 남극중단산맥으로 연구 지역을 확장시켜 해당 지역의 지질을 조사하는 동시에 광물 자원의 존재 가능성에 대한 지속적인 연구도 계획하고 있다.

사 사

본 연구는 해양수산부와 극지연구소의 지원을 받아 진행되었다(과제 번호 PM17030). 또한 김영민과 김태우는 서울대학교 BK 21 프로그램의 지원을 받았다. 남극 빅토리아랜드 지역 탐사에 많은 도움을 준 장보고 과학기지 대원들과 설희선 아라온호의 승조원께 감사를 드린다. 또한 본 단보의 발전을 위해 많은 조언과 비판을 해주신 허순도 박사님과 익명의 두 심사위원들께 감사의 말씀을 드린다.

REFERENCES

Behrendt, J.C., Drewry, D.J., Jankowski, E. and 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.
- Boger, S.D., 2011, Antarctica-before and after Gondwana. *Gondwana Research*, 19(2), 335-371.
- Capponi, G., Crispini, L. and Meccheri, M., 1999, Structural history and tectonic evolution of the boundary between the Wilson and Bowers terranes, Lanterman Range, northern Victoria Land, Antarctica. *Tectonophysics*, 312(2), 249-266.
- Coates, D., Stricker, G. and Landis, E., 1990, Coal geology, coal quality, and coal resources in Permian rocks of the Beacon Supergroup, Transantarctic Mountains, Antarctica. *Mineral resources potential of Antarctica*, 133-162.
- Crispini, L., Federico, L., Capponi, G. and 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.
- Crockett, R. and Clarkson, P., 1987, The exploitation of Antarctic minerals. *Environment international*, 13(1), 121-132.
- De Wit, M.J., 1985, *Minerals and mining in Antarctica: science and technology, economics and politics*. Oxford University Press, USA.
- De Wit, M.J. and Kruger, F.J., 1990, The economic potential of the Dufek Complex. *Mineral resources potential of Antarctica*, 33-52.
- Dreschhoff, G., Zeller, E., Thoste, V. and Bulla, K., 1980, Resource and radioactivity survey in the Ellsworth Mountains. *Antarct. JUS (United States)*, 15(5).
- Faure, G. and Mensing, T.M., 2005, *Isotopes: principles and applications*. John Wiley & Sons Inc.
- Ford, A.B., 1983, The Dufek intrusion of Antarctica and a survey of its minor metals and possible resources. *Petroleum and mineral resources of Antarctica*. US Geological Survey, Circular, 909, 51-75.
- Ford, A.B., 1990, The Dufek intrusion of Antarctica. *Mineral resources potential of Antarctica*, 15-32.
- Ford, A., Mays, R., Haffty, J. and Fabbri, 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.
- Hawkes, D.D. and 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. and 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.
- Le Roux, J. and Toens, P., 1987, The Permo-Triassic Uranium Deposits of Gondwanaland. *Gondwana Six: Stratigraphy, Sedimentology, and Paleontology*, 139-146.
- McLeod, I., 1965, Antarctica: Geology and mineral occurrences, Handbook, Australia and New Zealand. Eighth Commonwealth mining and metallurgical congress, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, Victoria, Australia, pp. 165-166.
- Mueller, G., 1964, Some notes on mineralization in Antarctica. *Antarctic geology*. North-Holland, Amsterdam, The Netherlands, 393-394.
- Potter, N., 1969, Natural resource potentials of the Antarctic.
- Ravich, M., Fedorov, L. and Tarutin, O., 1982, Precambrian iron deposits of the Prince Charles Mountains. *Antarctic geoscience*. University of Wisconsin Press, Madison, WI, 853-858.
- Rowley, P. and 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. and McBride, S., 1975, Copper mineralization along the Lassiter Coast of the Antarctic Peninsula. *Economic Geology*, 70(5), 982-987.
- Rowley, P.D., Farrar, E., Carrara, P.E., Vennum, W. and Kellogg, K., 1988, Porphyry-type copper deposits and potassium-argon ages of plutonic rocks of the Orville Coast and eastern Ellsworth Land, Antarctica. *Studies of the Geology and Mineral Resources of the Southern Antarctic Peninsula and Eastern Ellsworth Land, Antarctica*, 35-49.
- Rowley, P.D., Schmidt, D.L. and 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. and Nishi, J., 1981, New antarctic mineral occurrences. *Antar. Jour. US*, 15(5), 14-15.
- Webers, G., Craddock, C. and Spletstoeser, J., 1992, Geology and paleontology of the Ellsworth Mountains. *West Antarctica, Geological Society of America Memoir*, 170, 445.
- Woo, J., Park, T.-Y., Lee, J.I., Lee, M.J., Kim, T.H., Kim, Y.H. and Choe, M.Y., 2013, Geological history and stratigraphy of northern Victoria Land. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49(1), 165-179 (in Korean with English abstract).
- Wright, N.A. and Williams, P.L., 1974, *Mineral resources of Antarctica*. US Geological Survey Reston, VA.

- Zeller, E.J. and Dreschhoff, G.A., 1987, Radioactive Minerals and the Pre-Beacon Erosion Surface, Antarctica. *Gondwana Six: Stratigraphy, Sedimentology, and Paleontology*, 63-72.
- 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. and 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. and Kropp, W.R., 1986, Evaluation of the uranium resource potential of northern Victoria Land. *Geological Investigations in Northern Victoria Land*, 383-391.
- Zeller, E.J., Dreschhoff, G.A. and 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.

Received : June 15, 2017

Revised : July 24, 2017

Accepted : July 24, 2017