

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “지구내부물질, 기반암, 화산을 통한 남극종단산맥의 형성과 진화 연구” 과제의 위탁연구 “빅토리아랜드 고·중생대 화성활동과 대륙지각 형성과정” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자	:	이 미 정
위탁연구기관명	:	서울대학교 산학협력단
위탁연구책임자	:	박 정 우
위탁참여연구원	:	오스틴 아리아스 박 규 승 김 지 혁 오 창 환

보고서 초록

위탁연구과제명	빅토리아랜드 고·중생대 화성활동과 대륙지각 형성과정				
위탁연구책임자	박정우	해당단계 참여연구원수	5	해당단계 연구비	60,000,000 원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 산학협력단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	
<ol style="list-style-type: none"> 1. 2014년 12월, 2017년 11월 및 2018년 11월에 채취된 북빅토리아랜드 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체의 시료에 대해 암석학적 분류 및 성분 분석을 실시하였다. 2. 전암 주원소 및 미량원소 및 주구성 광물의 성분상의 특성을 토대로, 나이아가라아이스폴 복합체의 기원 멜트 조성이 보니나이트질임을 확인하였다. 특히, 침정성의 성분을 근거로 이 암석이 섭입대 환경(supra-subduction zone)에서 기원하였음을 파악하였다. 이는 로스 조산 운동의 화산호 환경과 일치한다. 3. 단사회석의 미량원소 성분을 토대로 다양한 암석에서 단사회석을 형성한 멜트의 희토류 원소 성분을 복원하였으며, 이를 통해 다양한 성분 범위의 보니나이트질 멜트가 나이아가라아이스폴 복합체 형성에 기여했음을 파악하였다. 4. 나이아가라아이스폴 복합체를 설명하기 위해서는 기원이 다른 서로 다른 두 보니나이트질 멜트가 요구됨을 규명하였다. 하나는 고-칼슘(high-Ca), 나머지 하나는 저-칼슘(low-Ca) 보니나이트질 멜트에 해당한다. 5. 두 멜트 모두 옛 부분 용융을 통해 결핍된 맨틀이었으나, 고-칼슘 보니나이트질 멜트는 보다 덜 결핍된 맨틀로부터 기원하였으며, 풍부한 칼슘 함량을 바탕으로 웰라이트(wehrlite) 암석을 형성하였다. 반면, 더나이트, 사방회석암 및 반러암노라이트를 형성한 저-칼슘 보니나이트질 멜트는 더 결핍된 하즈버가이트질 맨틀로부터 유래하였다. 후자는 많은 분별 결정 작용을 거쳐 규산염이 풍부한 멜트가 되고, 이것이 웰라이트와 반응하면서 웰라이트 주변에서 발견되는 감람암-사방회석암과 거정질 반러암노라이트를 형성했을 것이라 해석하였다. 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	남극, 빅토리아랜드, 로스 조산 운동, 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체, 암석학, 지구화학			
	영 어	Antarctica, Northern Victoria Land, Ross Orogeny, Niagara Icefalls ultramafic-mafic complex, petrology, geochemistry			

요 약 문

I. 제 목

남극 북빅토리아랜드 나이아가라아이스폴(Niagara Icefalls) 초고철질-고철질 복합체의 암석학적 성인

II. 연구개발의 목적 및 필요성

섭입대는 비록 판구조론의 핵심을 차지하는 지구조 환경 중 하나임에도 불구하고 섭입대 형성 과정 및 형성 초기의 화성활동에 대한 정보를 제공하는 지질학적 증거가 부족하다. 보니나이트(boninite)질 화성활동은 주로 섭입대 형성 초기 단계에 발생하기 때문에 고지구조 환경을 유추하는데 중요한 정보를 제공한다. 과거의 연구결과에서 보니나이트는 섭입대 내지는 배호분지 확장 시작 시기를 규제하고, 당시 맨틀의 특성을 파악하는데 활용되었다.

보니나이트는 화산암의 지구화학적 조성을 기반으로 정의된 암석이며 MgO 함량이 8 wt%일 때, 일반적인 섭입대 화산암에 비하여 낮은 TiO_2 (<0.5 wt.%)과 높은 SiO_2 (>52 wt. %) 함량을 갖는 것이 특징이다. 현재까지 보니나이트에 대한 대부분의 연구는 화산암에 집중되어 있으며, 하부 지각 환경에서 어떠한 집적암(cumulate)을 만드는지는 비교적 잘 알려져 있지 않다. 많은 고기(古期) 섭입대 연구에 심성암이 함께한다는 것을 고려할 때, 보니나이트질 심성암을 찾아내는 것은 암석학적으로 중요하다.

북빅토리아랜드는 고생대 초 섭입대-충돌대 환경을 겪은 지역으로 간주되는데, 각 지구조 환경의 시작 시기와 특성은 아직 많은 연구가 필요한 실정이다. 본 연구는 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체가 보니나이트질 멜트로부터 기원함을 확인하고, 이것의 암석학적, 지구화학적 분석을 보고하는 것을 목적으로 삼는다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 나이아가라아이스폴 복합체에서 채취한 암석 시료에 대하여 암석 기재 및 전암 및 주구성 광물의 주원소 및 미량원소 성분 분석을 실시하였다. 획득된 자료를 기반으로 암체가 형성된 온도 및 산소 분압 조건을 계산하였으며, 암석을 형성한 멜트의 성분 및 기원 맨틀의 특성을 파악하고, 나이아가라아이스폴 복합체를 형성한 메커니즘을 보고한다.

IV. 연구개발결과

나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체는 더나이트, 웰라이트 감람석-사방휘석암, 사방휘석암, 반려암노라이트, 거정질-반려암노라이트로 구성된다. 이들의 전암 및 광물 성분상의 특성, 예컨대 티타늄에 대한 결핍($\text{TiO}_2=0.01-0.07$ wt.%)은 이들 암석이 모두 보니나이트질 멜트에 의해 형성되었음을 지시한다. 특히, 희토류(rare earth elements) 및 고장력 원소(high field strength elements)의 결핍과 유체 호정성의 친석원소(large ion lithophile elements)의 부화는 보니나이트와 일치하는 지구화학적 특성이다. 또한, 높은 마그네슘 함량을 지닌 감람석($\text{Fo}=86-96$) 역시 마찬가지이다.

단사회석 미량원소 성분을 기반으로 한 멜트 성분 복원은 전암 성분과 유사하게 보니나이트질 멜트를 지시하지만, 보다 다양한 성분 범위를 보인다. 이는 암석을 형성한 멜트의 성분이 균질하지 않았으며 단사회석의 형성에 다양한 반응이 관여했음을 시사한다. 특히, 웰라이트와 사방휘석암로부터 각각 복원된 평형 멜트의 성분이 상이하기 때문에 나이아가라아이스폴 복합체는 최소 두 가지의 멜트로부터 기원했을 것으로 생각된다. 첫 번째 멜트는 고칼슘(high-Ca) 보니나이트질 멜트에 해당하며, 웰라이트를 만들었으리라 판단된다. 반면, 더나이트-사방휘석암-반려암노라이트 계열은 저칼슘(Low-Ca) 보니나이트질 멜트로부터 유래하였다고 판단된다. 이에 따라, 전자는 덜 결핍된 러줄라이트질 맨틀로부터, 후자는 더 결핍된 하즈버가이트질 맨틀로부터 유래했으리라 해석된다. 더나이트를 형성하면서 형성된 감람석과 소모된 사방휘석은 감람석 내 니켈 함량을 희석시키고, 멜트 내 크로뮴, 마그네슘 함량을 증가시켜 사방휘석암의 안정화를 야기하였다. 한편, 더나이트-사방휘석암-반려암노라이트를 형성하면서 분화된 규산염이 보다 풍부해진 멜트가 웰라이트와 반응하면서 사방휘석을 안정화시키고, 이 때문에 감람석-사방휘석암을 형성하였다. 이는 감람석-사방휘석암에서 발견되는 광물 조직 및 폭넓은 미량원소 성분 변화와 잘 일치한다.

V. 연구개발결과의 활용계획

이 연구 결과는 섭입대 형성 초기에 보니나이트질 멜트가 형성되고 하부지각에서 심성암이 형성되는 메커니즘을 이해하는 데 기여할 것이다. 또한, 북빅토리아랜드의 로스(Ross) 조산 운동과정에서 형성된 과거의 섭입대 환경을 유추하여 남극 대륙의 진화과정을 이해하는데 기여할 것이다. 본 연구는 같은 암석으로부터 추출된 저어콘을 대상으로 실시할 U-Pb 정밀 연대 측정과 연계되어 로스 조산 운동에서 나이아가라아이스폴 복합체의 역할을 보다 정확하게 규제할 예정이다.

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Petrogenesis of Niagara Icefalls ultramafic-mafic complex, Northern Victoria Land, Antarctica

II. Purpose and Necessity of R&D

Boninites are important indicators of tectonic setting. Being generally limited to suprasubduction zone settings, boninites are thought to represent the beginning of important tectonic events such as subduction and back-arc spreading. Furthermore, the intrusive counterparts to boninites are not well understood. Therefore, data regarding such rocks from the Niagara Icefalls ultramafic-mafic complex is rather valuable.

This study intends on documenting the results of geochemical analysis of the rocks from the Niagara Icefalls ultramafic-mafic complex. Confirming the boninitic character of these rocks can then aid in the understanding of the Ross Orogeny, and provide information on the intrusive counter-parts to boninites.

III. Contents and Extent of R&D

The study includes results from petrological examination of the lithologies present in the Niagara Icefalls ultramafic-mafic complex. As well as, whole rock and mineral geochemical data (major and trace elements) of the rocks and associated minerals. Furthermore, this study includes temperature and oxygen fugacity information derived from mineral compositions. All which will provide confirmation and insight to the parental melt and possible formation processes of the Niagara Icefalls ultramafic-mafic rocks.

IV. R&D Results

The lithologies present within the Niagara Icefalls ultramafic-mafic complex are determined petrographically to be dunite, wehrlite, olivine orthopyroxenite, orthopyroxenite, gabbronorite, and pegmatitic gabbronorite. These rocks are likely to have been produced via a boninite-type melt, on the basis of their geochemistry. Whole rock contents are all depleted in TiO₂ wt.% (0.01–0.07%), and also, gabbronorite MgO wt.% is within the range for boninites (8.00–15.0%). Furthermore, whole rock trace element contents are similar to those of boninites, having depleted HREE and HFSE, but being enriched in LREE and fluid mobile elements. The mineral geochemistry reflects these characteristics as well. Firstly, olivine and spinel are highly refractory with Fo#s of 0.86–0.96 and Cr#s of 0.41–0.83, respectively. Clinopyroxene REE, also provided valuable information on the parental melt characteristics. Melt compositions in equilibrium with clinopyroxenes reflect similar characteristics as the whole rock. However, it appears that wehrlite was derived from a separate parental melt, due to a higher enrichment in REE than that of clinopyroxenes in orthopyroxenite, despite a higher Mg# in the wehrlite. Thus, two similar, but distinct melts gave rise to the Niagara Icefalls ultramafic-mafic rocks. The first lineage is composed of wehrlite, which was likely produced by a high-Ca boninite type melt produced from a less depleted mantle source. Whereas, the dunite-orthopyroxenite-gabbronorite lineage was produced by a low-Ca boninite type melt produced by a more depleted mantle source. Furthermore, the melt that produced the dunite of the dunite-orthopyroxene-gabbronorite lineage, likely interacted with the mantle during ascent, which led to assimilation of surrounding orthopyroxene and increasing the melt Mg, Cr, while decreasing Ni content of the melt. This is supported by low NiO wt.% (~0.10–0.30%) of olivine in dunite, despite high Fo#. Also, olivine orthopyroxenite in association with wehrlite is a result of reaction of said wehrlite and a high silica melt. Evidence of this is presented texturally, with embayments in olivine and other replacement textures present. In addition, REE from orthopyroxenes in olivine orthopyroxenite are highly varied, whereas coexisting minerals are more conservative in compositions.

V. Application Plans of R&D Results

This result will provide valuable information and data on boninite-type melt derived intrusive rocks, as well as aiding in understanding the tectonic processes that occurred during the Ross Orogeny. Lastly, age data will be acquired from these samples in further studies, and this is expected to constrain the intrusion age of the Niagara Icefalls ultramafic-mafic rocks, and to provide information on the process of boninite formation.



목 차

제 1 장 서론	09
제 2 장 국내외 기술개발 현황	
제 1절 국내 기술개발 현황	10
제 2절 국외 기술개발 현황	10
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	
제 1절 야외 조사상의 특성	14
제 2절 지구화학 분석법	14
제 3절 분석 결과	18
제 4절 모(母)마그마의 특성 규명	46
제 5절 두 독립된 분화 계열	47
제 6절 웰라이트-규산염 펠트 간의 반응	50
제 7절 연구 요약	51
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	
제 1절 연구개발목표 달성도	53
제 2절 연구개발을 통한 기대성과	53
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	55
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	56
제 7 장 참고문헌	57
부록: 분석표	64

제 1 장 서론

나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체(Niagara Icefalls ultramafic-mafic complex)는 남극 북빅토리아랜드에 관입해 있다. 이전의 연구에 따르면, 이 복합체는 북빅토리아랜드의 여러 지괴가 들러붙던 로스 조산 운동과 관련되어 있는데, 약 514 Ma에 보니나이트질 멜트로부터 유래한 집적암이라 해석되었다(Tribuzio et al., 2008). 비록 상당 부분이 빙하에 덮여 있지만, 바워스(Bowers)와 윌슨(Wilson) 지괴의 경계부에 놓여 있으며, 일반적으로 윌슨 지괴에 관입해 있다고 받아들여지고 있다(그림 1).

보니나이트질 마그마는 화산호 환경에서 발견되는 독특한 마그마이다. 일반적인 마그마보다 훨씬 결핍된 함량을 보이는 희토류 원소를 포함한 미량원소가 가장 중요한 특징으로 알려져 있으며, 이와 반대로 유체에 다량 포함되는 원소들이 부화되어 있다. 이는 부분 용융을 일찍이 겪어 비호정성 원소가 결핍된 맨틀이 유체의 유입에 따라 다시 용융된 산물이라 받아들여진다. 이러한 메커니즘이 발생하는 곳은 화산호 환경이 막 시작된 곳으로 생각되는데, 이곳에서 중앙 해령에 의해 결핍된 맨틀이 새롭게 섭입되는 슬랩으로부터 유체를 공급받아 마그마를 형성하는 것으로 보고 있다(Crawford et al., 1989).

로스 조산 운동은 고생대 초에 북빅토리아랜드 지괴를 구축한 조산 운동으로 알려져 있는데, 빙하에 의해 많은 노두가 삭박되거나 노출되지 않아 여러 지구조 모델이 공존하고 있다(e.g. Meffre et al., 2000; Rocchi et al., 2011). 특히 여러 지괴의 충돌에 선행되는 화산호 환경이 어떻게 발달하였는지, 배치는 어떠한지는 중요한 문제로 간주된다(Rocchi et al., 2011). 따라서 보니나이트질 암석은 로스 조산 운동을 해석하기 위해 중요한 정보를 제공해줄 것이라 기대하고 있다(Palmeri et al., 2012; Tribuzio et al., 2008). 그러나 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체는 접근성이 떨어지고 많은 노두가 드러나지 않아 연구가 미진한 상태로 남아있다.

또한, 초고철질-고철질 집적암은 고전적인 심성암 형성 모델로부터 벗어나 보다 다양한 암석-멜트 반응, 결정죽(crystal mush)의 진화를 포함한 복잡한 형성 모델이 구축되고 있다(e.g. Holness et al., 2017; O'Driscoll and VanTongeren, 2017) 결핍된 성분과 풍부한 유체를 갖는다는 독특한 특성을 지닌 보니나이트 마그마가 어떤 독특한 집적암을 만들 수 있는 지에 대한 연구는 아직 누적되지 않은 상태로 남아있다. 따라서 본 연구는 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체의 다양한 암상, 조직, 지구화학적 분석을 종합하여 보다 구체적인 암석 형성 모델을 구축하는 것을 목적으로 삼았다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1절 국내 기술개발 현황

국내 연구팀이 북빅토리아랜드의 화성암 탐사를 시작할 수 있었던 것은 장보고 기지가 건설된 이후이다. 첫 방문은 2014년 11-12월에 걸친 화산암 탐사의 일환으로 실시되었는데, 이 때 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체의 첫 시료 획득이 실시되었다. 이후 화성암 탐사는 2017년 11월과 2018년 11월 두 차례에 걸쳐 실시되었다. 특히 이 두 차례의 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 탐사를 통해 다양한 암상의 시료를 채취할 수 있었다. 세 차례의 탐사를 통해 총 20여 개의 시료를 획득할 수 있었다. 이렇게 채취된 시료는 본 연구의 기반이 되었다.

제 2절 국외 기술개발 현황

1. 북빅토리아랜드의 기반암과 지구조 환경

북빅토리아랜드는 남극횡단산맥의 북단에 위치한 지역으로, 전기 고생대 시절 곤드와나(Gondwana) 대륙의 연변부에 해당하는 지역이었다(Elliot, 2013). 북빅토리아랜드의 지질 구조는 로스-델라메리안(Ross-Delamerian) 조산 운동의 결과로 구축되었다고 알려져 있는데, 남극에서는 같은 조산 운동을 로스 조산 운동이라 말하는 반면, 같은 구조가 연장되어 기록된 태즈메이니아(Tasmania)에서는 델라메리안 조산 운동이라는 표현을 사용한다(Gibson et al., 2011; Henjes-Kunst and Schüssler, 2003). 이 조산 운동의 기록은 호주 대륙에서 이어져 북빅토리아랜드를 거쳐 남극횡단산맥에 부분적으로 기록되어 있다.

북빅토리아랜드는 전통적으로 북서-남동 방향으로 발달한 일련의 단층과 이를 통해 구분되는 세 지괴로 구성된다고 믿어져 왔다. 이 세 지괴는 남쪽부터 윌슨(Wilson), 바워스(Bowers) 그리고 로버슨베이(Robertson Bay)라고 불린다(그림 1, Federico et al., 2006). 장보고 기지가 지어져 있기도 한 윌슨 지괴는 이질(pelitic) 편암이나 편마암, 혼성암과 같은 기반암으로 이뤄져 있는 반면에, 바워스와 로버슨베이 지괴들은 해양퇴적물이 대부분을 차지하고 있다(Cooper et al., 1983; Palmeri, 1997; Hanjes-Kunst & Schüssler, 2003). 이들은 로스 조산 운동에 의해 기반암에 해당하는 윌슨 지괴에 들러붙었다고 해석된다. 이에 따라, 로스 조산 운동은 북빅토

리아랜드 북동부에 발달한 섭입대 환경과 이로부터 들러붙은 화산호-대륙 충돌 모델이 핵심을 이루고 있다(e.g. Palmeri et al., 2011; Federico et al., 2006; Rocchi et al., 2011). 그러나 로스 조산 운동의 발달사와 이에 따른 지각 구조의 구체적인 모델들은 여전히 정립되지 않은 채로 남아있다(Federico et al., 2009; Meffre et al., 2000; Palmeri et al., 2011; Rocchi et al., 2011). 심지어, 북빅토리아랜드의 구조가 단순한 세 지괴의 접합이 아니라는 주장도 제시되고 있다(Gemelli et al., 2009; Rocchi et al., 2011).

여러 논쟁에도 불구하고, 로스 조산 운동은 화산호 및 충돌대 환경을 거쳐왔다는 점은 이견이 없으며, 이에 따라 캄브리아기-오르도비스기에 걸쳐 관입한 화강섬록암 내지는 화강암류가 보고되어 있다. 이들은 함께 묶여 그래닛 하버 관입암 복합체(Granite Harbour Intrusive Complex, GHIC)라고 불린다. 이들은 윌슨 및 바워스 지괴에서 나타난다(Armienti et al., 1990). 한편, 보다 후기, 즉 데본기에 관입한 어드미럴티 관입암류(Admiralty Intrusives)는 로버슨베이 및 바워스 지괴를 관입한 채로 발견된다(Weaver et al., 1984). 또한, 로스 조산 운동과 연계되어 형성된 것으로 받아들여지는 고철질 관입암류 역시 존재한다. 타이거 반려암 복합체(Tiger Gabbro Complex, Bracciali et al., 2009; Henjes-Kunst et al., 2014), 허스키릿지(Husky Ridge) 사누키토이드(sanukitoid) 관입암류(Tiepolo and Tribuzio, 2008) 그리고 나이아가라아이스폴 복합체(Tribuzio et al., 2008)이 그것이다. 이들 셋은 모두 윌슨-바워스 지괴의 경계면에 인접하여 관입해 있는 것이 특징으로, 저마다 독특한 성분을 보이고 있으나 노출된 노두가 적고 접근성이 떨어져 많은 연구가 진행되지 않은 채로 남아있다. 그러나 고철질 관입암류는 과거 수렴 경계에서 맨틀의 특성을 알려줄 수 있는 드문 기회를 제공하기 때문에 당시 지구조 환경을 복원하는 데 있어 중요한 위치를 차지하고 있다.

2. 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체

나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체는 윌슨 변성 복합체(Wilson Metamorphic Complex, Castelli et al., 2003)에 둘러싸여 있으며, 동쪽 경계는 토날라이트대(Tonalite Belt)와 접해 있다(Musumeci, 1999). 나이아가라아이스폴 복합체는 나이아가라아이스폴 지역 인근에서 발견되어 그러한 이름이 붙었으며, 1990년대에도 초고철질 관입암류가 있음은 알려져 있었지만 그것의 구조나 연대는 알려진 바 없었다(Musumeci, 1999). 나이아가라아이스폴 복합체에 대한 암석학적 접근은 Tribuzio et al. (2008)에 의해 처음으로 수행되었다. 이 연구는 12개의 암석 시료를

기반으로, 약 514 Ma에 로스 조산 운동의 결과로 보니나이트질 멜트가 관입하면서 형성한 집적암(cumulative rock)으로 나이아가라아이스폴 복합체를 규정하였다. 그들은 나이아가라아이스폴 복합체는 감람석-철정석-감람석+사방휘석+철정석-사방휘석-사방휘석+사장석+단사휘석의 순서에 따라 분별 정출된 결과 형성되었다는 마그마 진화사 모델을 제안하였다.



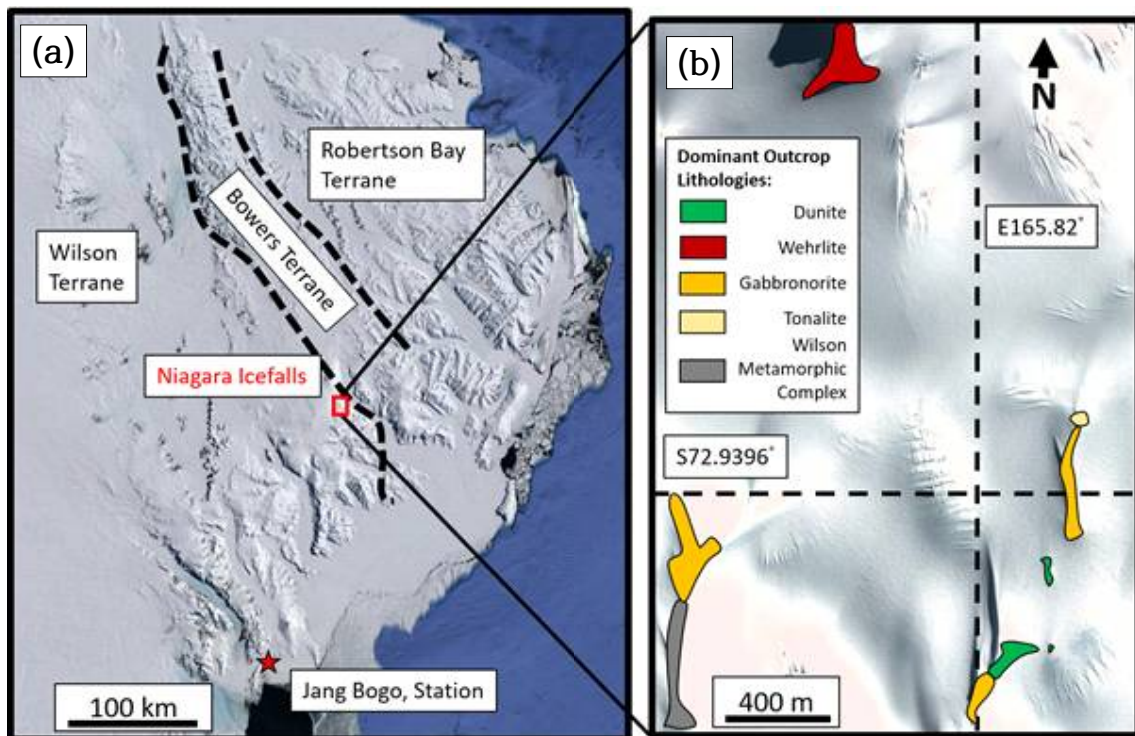


그림 1. (a) 남극 빅토리아랜드의 인공위성 사진(구글 어스)에 세 지괴(로버슨 베이, 바워스 및 윌슨)의 분포 및 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체의 위치를 도시한 것. (b) 나이아가라아이스폴 복합체 주요 암상의 노출 위치를 도시한 것.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절 야외 조사상의 특성

대부분의 노두는 빙하에 의해 삭박되어 소수의 지역만이 노출되어 있으며(그림 1b), 이 때문에 지질 조사상의 어려움이 있다. 가장 북단의 노두는 대부분 웰라이트로 돼 있는데 이들은 대부분 사문석화 작용을 받았다. 이 초고철질암을 관입한 거정질 반려암노라이트가 발견되며(그림 2) 간혹 녹색 각섬석으로 변질받은 채로 노출되어 있다. 보다 남쪽에 위치한 노두에서는 더나이트와 함께 중립질(medium-grained) 사방휘석암과 반려암노라이트가 발견된다.

제 2절 지구화학 분석법

1. 암석 기재 및 이미징

시료의 채취는 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체를 대상으로 수행한 총 3회(2014년, 2017년, 2018년)의 야외 조사를 통하여 이루어졌으며, 이 중 본 지역에 존재하는 암상들을 대표하는 시료들을 선택하여 분석에 이용하였다. 선택된 시료들의 광물 동정 및 암석 분류는 암석현미경을 이용한 박편 관찰을 통해 진행되었다. 이들 중 2개의 감람암, 3개의 감람석 사방휘석암, 2개의 사방휘석암 및 3개의 반려암노라이트의 광물 모달(modal) 함량비를 측정하였다(표 1). 또한, 3개의 웰라이트 및 감람석 사방휘석암 시료에 대한 원소 매핑(elemental mapping)을 수행하였다. 원소 매핑은 서울대학교의 주사전자현미경-에너지분산형 분광분석기(Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectroscopy, SEM-EDS) JEOL JSM-7100F 및 Oxford Instruments 사의 AZtec 소프트웨어를 통해 이루어졌다(그림 3-5). 매핑을 진행한 원소는 Si, Mg, Al, Ca, Cr의 5개 원소이며, 후방산란전자(back-scattered electron, BSE) 이미지는 해상도 1024p 및 포인트 당 처리시간(dwell time) 35 μ s의 조건에서, 원소별 매핑 이미지는 해상도 512p 및 포인트 당 처리시간 100 μ s의 조건에서 얻어졌다.

2. 광물 성분 분석

나이아가라아이스폴 초고질질-고철질 복합체를 대표하는 각 암상에 대하여, 이들을 구성하는 감람석, 침정석, 단사회석, 사방회석, 사장석 및 각섬석의 성분을 분석하였다. 주원소 분석은 극지연구소의 전계방사형 전자현미분석기(Field Emission Electron Probe Microanalyzer, FE-EPMA) JEOL JZA-8530F를 사용하여 수행하였다. 각 광물들은 빔 크기 3 μm , 가속 전압 15 kV, 빔 전류 10 nA 및 X선 방출 각도(takeoff angle) 40°의 조건 하에서 분석되었다. 단사회석과 사방회석의 미량원소는 극지연구소에 설치된 Thermo Fisher Scientific 사의 iCAP Q 유도결합플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, ICP-MS)와 연결된 Electro Scientific Industries (ESI) 사의 NWR-193 레이저 시스템을 이용하여 분석하였다. 분석은 레이저 펄스 반복 속도 5 Hz 및 빔 크기 75 μm 조건 하에서 진행되었다. 배경 신호와 피크 신호는 각각 40초, 50초간 측정하였다. 외부표준물질로 NIST-612를 사용하였으며, 데이터의 정확성을 확인하기 위해 암석표준시료인 BCR-2g를 함께 분석하였다. 단사회석의 분석에는 ^{43}Ca 가, 사방회석의 분석에는 ^{29}Si 가 내부표준물질로 사용되었다.

3. 전암 지화학 분석

전암 분석(표 2-3)을 위한 시료들은 아게이트 볼밀(ball mill)을 통해 분쇄되었다. 전암 주원소 분석에는 사봉산리튬 용제(flux)와 분쇄된 시료를 9.5 g:0.95 g 비율로 조합한 유리 비드(bead)가 분석 물질로서 사용되었다. 주원소 분석은 서울대학교 공동기기원에 설치된 Shimadzu Scientific Instruments 사의 XRF-1700 파장분산형 X선형광분석기(Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer, WD-XRF)를 이용하여 이루어졌다. 전암 미량원소 분석에는 사봉산리튬 용제와 분쇄된 시료를 1.5 g:0.5 g 비율로 조합한 유리 비드를 사용하였다. 미량원소 분석은 극지연구소의 ICP-MS iCAP Q 및 그와 연결된 레이저 시스템 NWR-193을 이용하여 분석하였다. 분석은 레이저 펄스 반복 속도 5 Hz 및 빔 크기 150 μm 조건 하에서 진행되었다. 배경 신호와 피크 신호는 각각 40초, 50초간 측정하였다. NIST-612가 외부표준물질로 사용되었으며, BCR-2g를 나이아가라아이스폴 시료와 함께 분석하였다. 내부표준물질로는 ^{29}Si 가 사용되었다. 전암 주원소 및 미량원소 분석 과정

전반의 이상 여부를 확인하기 위해, 분쇄된 나이아가라아이스폴 시료와 함께 암석 표준시료인 BHVO-2 분말의 비드 제작 및 분석 과정을 수행하였다.



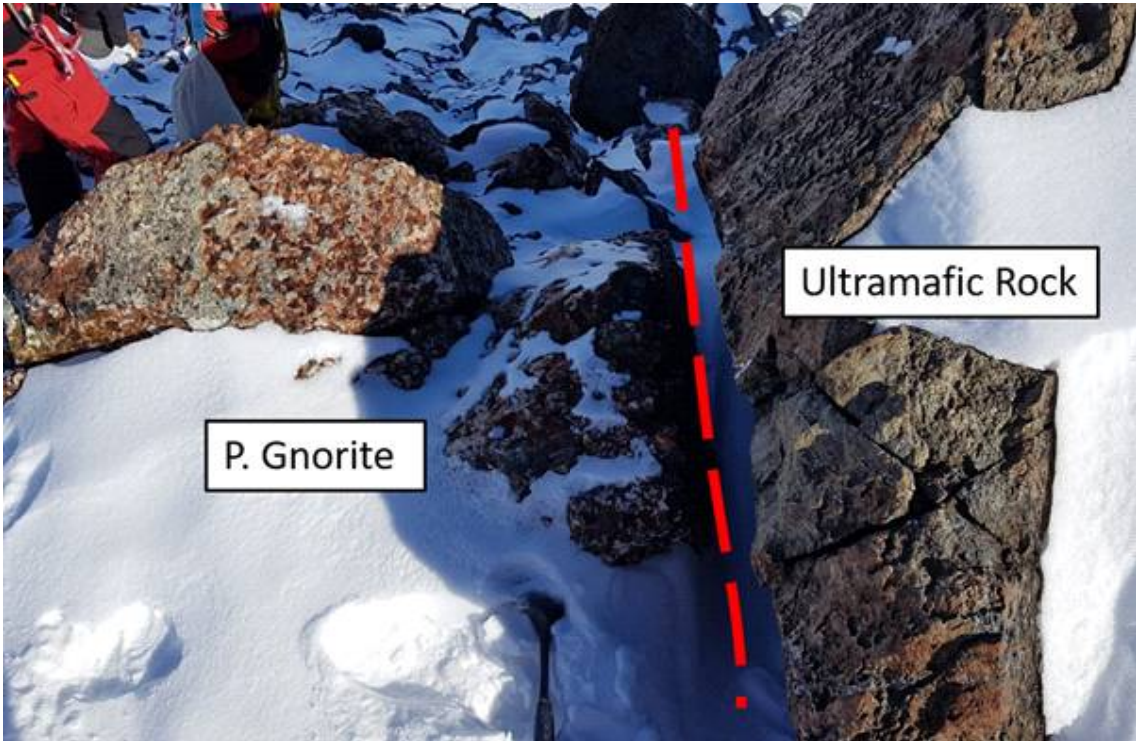


그림 2. 거정질 반러암노라이트와 초고철질 암체 간의 접촉 경계 사진.

제 3절 분석 결과

1. 암석 기재

나리아가라아이스폴의 초고철질-고철질암에는 다양한 암상이 발견된다. 이들은 광물 조합과 조직적 특성에 따라 초고철질암인 감람암, 웰라이트, 사방휘석암 및 감람석 사방휘석암과 고철질암인 반려암노라이트 및 페그마타이트질 반려암노라이트로 분류된다.

가. 더나이트(dunite)

나리아가라아이스폴의 감람암은 초고철질암 중에서도 가장 초기 성분의 암상에 해당한다. 암석을 구성하고 있는 대부분의 광물은 감람석이며, 미량의 크롬철석($\sim 100\text{-}200\ \mu\text{m}$)이 함께 발견된다(그림 6). 감람석은 대부분 사문석으로 변질되어 있으며, 일부 시료의 경우 암석 전체가 변질 작용을 받아 조직 관찰이 어렵다. 이와 달리 크롬철석은 변질에 의한 영향을 거의 받지 않은 자형의 입방체 결정으로 발견된다(그림 6). 일부 크롬철석의 테두리는 철 산화물로 변질되어 있으며, 변질이 가장 심한 감람암 시료에서는 전체가 모두 변질된 크롬철석 결정도 발견된다.

나. 웰라이트(wehrlite)

나리아가라아이스폴에서 발견되는 웰라이트는 중립질이며, 감람석, 단사휘석 및 크롬침정석으로 구성된다. 일부 시료의 경우 사장석 또한 존재한다. 웰라이트 또한 감람암과 같이 열수 유체에 의한 변질을 받았으나, 감람암에 비해 변질도는 더 낮다. 웰라이트에는 단사휘석 객정(chadacryst)을 둘러싸고 있는 1-1.5 mm 크기의 원형 감람석 주정(oikocryst) 및 집적(cumulative) 조직이 관찰된다. 또한, 사문석으로 변화된 감람석 가정(pseudomorph)이 자주 관찰되며, 이들은 메쉬(mesh) 조직을 보인다. 크롬철석암($\sim 100\text{-}200\ \mu\text{m}$)은 대개 자형이며 감람석 혹은 단사휘석 결정에 포획된 채로 관찰된다. 사장석은 결정 전체가 하이드로그로술라(hydrogrossular) 혹은 조사이트(zoisite)로 변질되어 있으며(그림 4), 대부분 단사휘석이 사장석을 둘러싸고 있는 형태로 관찰된다.

다. 감람석 사방휘석암(olivine orthopyroxenite)

감람석 사방휘석암은 야외에서 웰라이트 내에 산재된 1-3 cm 크기의 패치 혹은 하나의 균일한 노두의 형태로 나타난다. 하지만 두 형태에서 관찰되는 조직 혹은 광물 조합에는 차이가 없다. 감람석 사방휘석암에 해당하는 시료들은 사방휘석 함량이 증가함에 따라 감람석, 단사휘석 및 사장석의 함량이 감소하는 등 광물 함량의 연속적인 변화를 보여준다 (표 1, 그림 3-5). 사방휘석은 대개 단사휘석이 사이 사이에 충전된 체(sieve) 구조를 보이거나, 사방휘석 함량이 높은(~76%) 시료의 경우 체 구조를 보이는 사방휘석의 내부는 보통각섬석(hornblende)로 충전되어 있다. 대부분의 감람석은 만입(embayment)구조와 치환(replacement) 구조를 보인다(그림 7). 단사휘석과 감람석은 서로 연관되어 나타나며, 웰라이트와 유사하게 간극누적(intercumulate) 조직을 보인다.

라. 사방휘석암(orthopyroxenite)

나이아가라아이스폴의 사방휘석암은 암석의 대부분을 차지하는 ~1-5 mm 크기의 사방휘석(~97%)과 소량의 단사휘석(~3%)으로 구성된 중립질 암석이다. 이들 사방휘석암은 단사휘석이 사방휘석 결정 사이에 간극누적상으로 존재하는 집적 조직을 가지고 있다. 사방휘석암은 대개 변질도가 낮으나, 일부 시료는 구성 광물이 수할석(brucite)과 사문석으로 심하게 변질되어 있다.

마. 반려암노라이트(gabbro-norite) 및 거정질(pegmatitic) 반려암노라이트

나이아가라아이스폴의 반려암노라이트에는 다양한 조직이 관찰되며, 비록 광물 조합은 대체로 유사하나, 반려암노라이트와 거정질 반려암노라이트는 서로 다른 특성을 보인다. 반려암노라이트를 구성하고 있는 광물은 사방휘석, 단사휘석, 사장석 및 미량의 침정석이며, 분화가 진행됨에 따라 사방휘석의 함량이 감소하고 단사휘석과 사장석의 함량이 증가한다(표 1). 단사휘석은 변질에 의해 대개 각섬석으로 변화되며, 변질의 정도는 시료에 따라 다양하게 나타난다. 집적 조직과 입상(granular) 조직이 특징적으로 관찰된다(그림 6). 사방휘석은 반자형이며, 단사휘석과 사장석이 사방휘석 간의 간극을 충전하며 성장해 있다. 분화가 진행된 시료의 경우 대부분 입상 조직을 보이며 타형의 사방휘석, 반자형의 사장석 및 미분화된 시료에 비해 상대적으로 큰 반자형의 사방휘석이 관찰된다(그림 6).

거정질 반러암노라이트는 사방회석과 단사회석, 사장석으로 이루어져 있다. 입자 크기는 시료에 따라 수 밀리미터에서 수 센티미터 규모로 다양하다. 사장석은 자형의 회석 결정들의 간극을 충전하며 성장해 있으며 대부분 소오쉬라이트화 (saussuritization)되어 있다. 단사회석은 대개 테두리에 녹색의 각섬석을 수반하며, 몇몇 단사회석의 경우 재결정작용(recrystallization)을 받은 다결정질 (polycrystalline) 결정이 관찰된다.



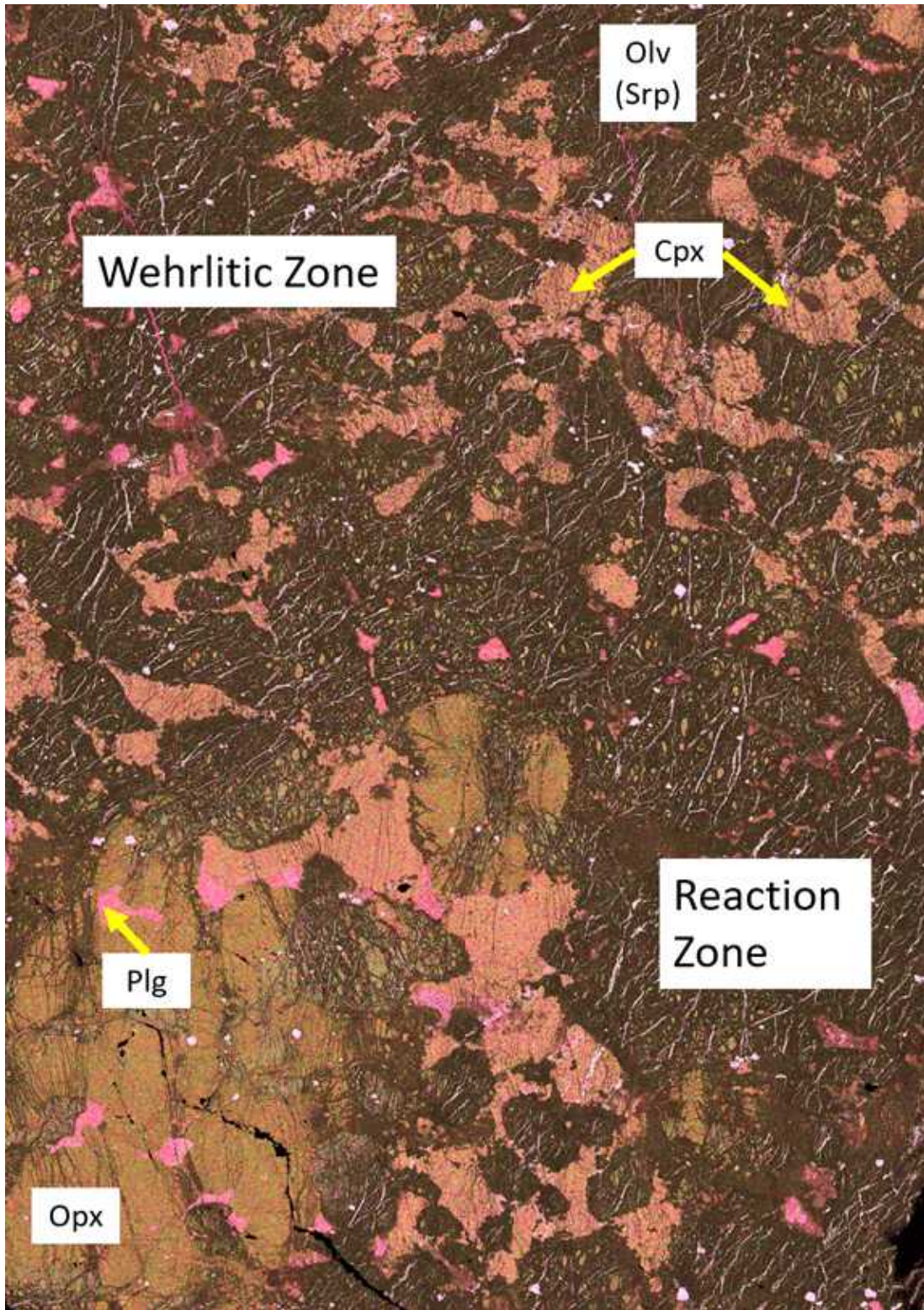


그림 3. 시료 M171109-02(감람석 사방회석암-웰라이트 경계)의 원소 지도 (elemental map, Si, Mg, Al, Ca, Cr). Opx=orthopyroxene, Cpx=clinopyroxene, Plg=plagioclase, Olv=olivine, Srp=serpentine.

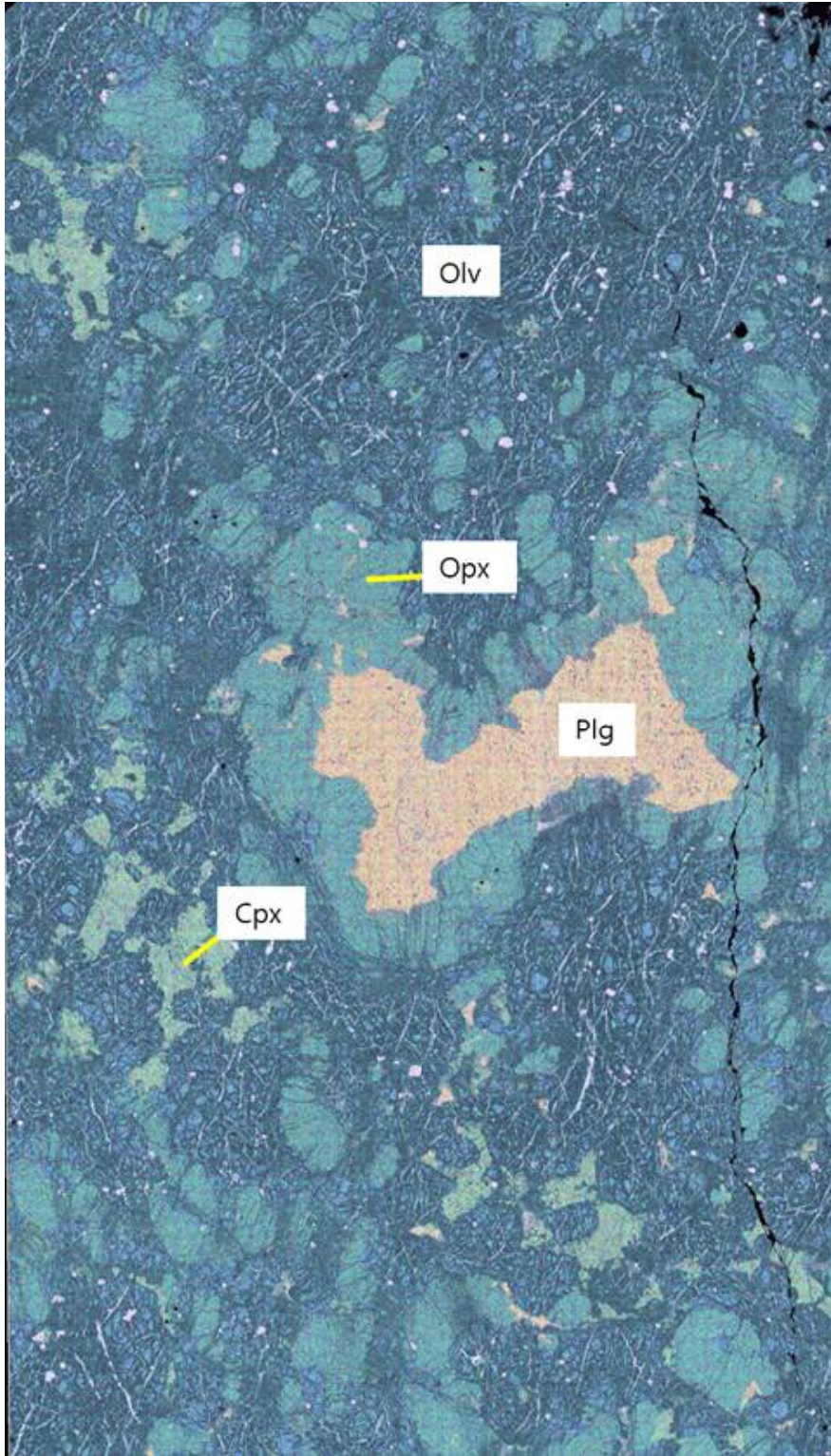


그림 4. 웰라이트-감람석-사방휘석암(시료 DY181109-14)의 원소 함량 지도(Si, Mg, Al, Ca, Cr) 사진. 중심부의 큰 사장석과 이를 둘러싼 사방휘석이 특징적이다.

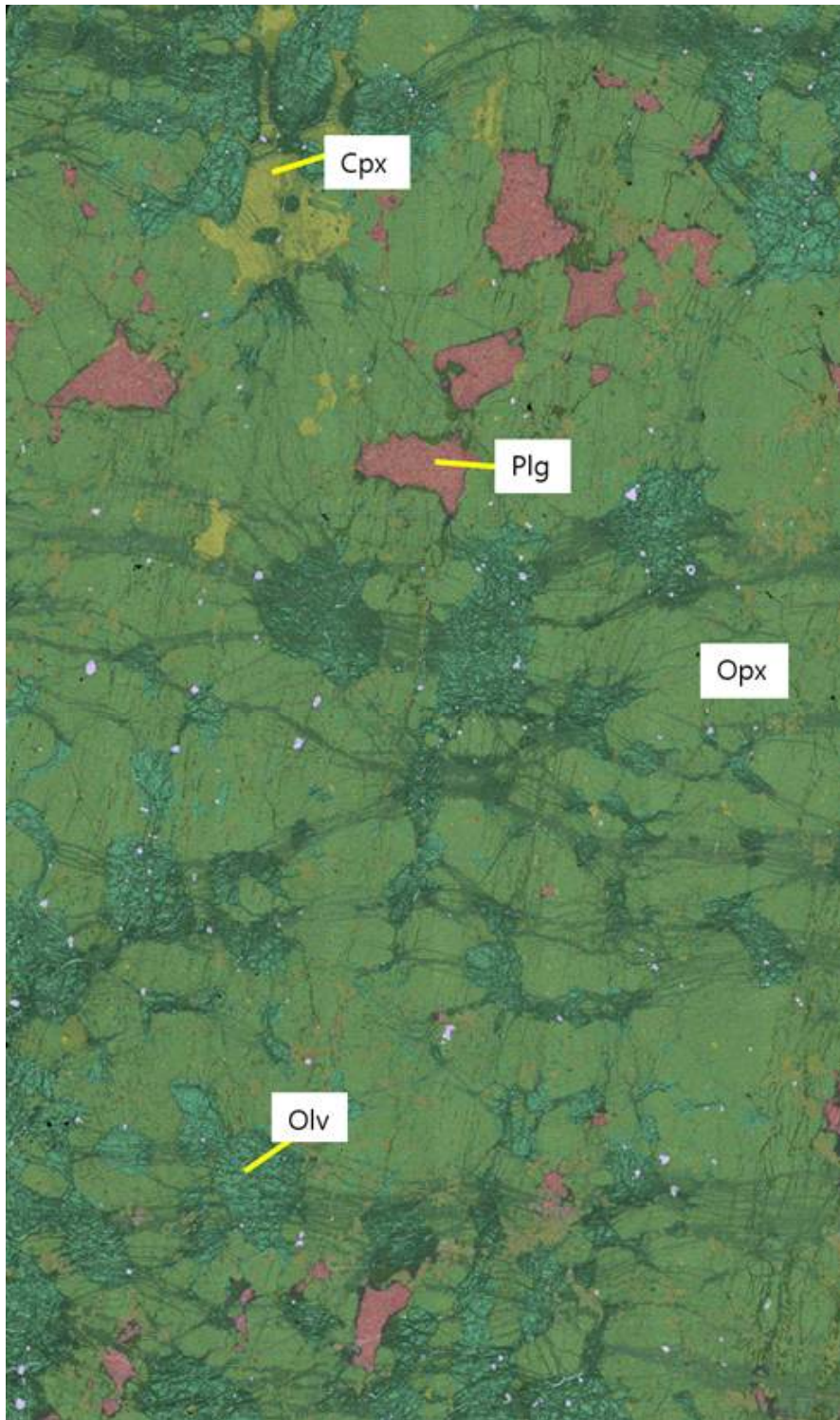


그림 5. 감람석 사방휘석암(시료 J14120101-01(+))의 원소 지도(Si, Mg, Al, Ca, Cr). 이 시료는 대부분의 감람석이 사방휘석으로 치환되고, 초기의 단사휘석과 감람석은 간극 충전 조직으로서만 발견된다.

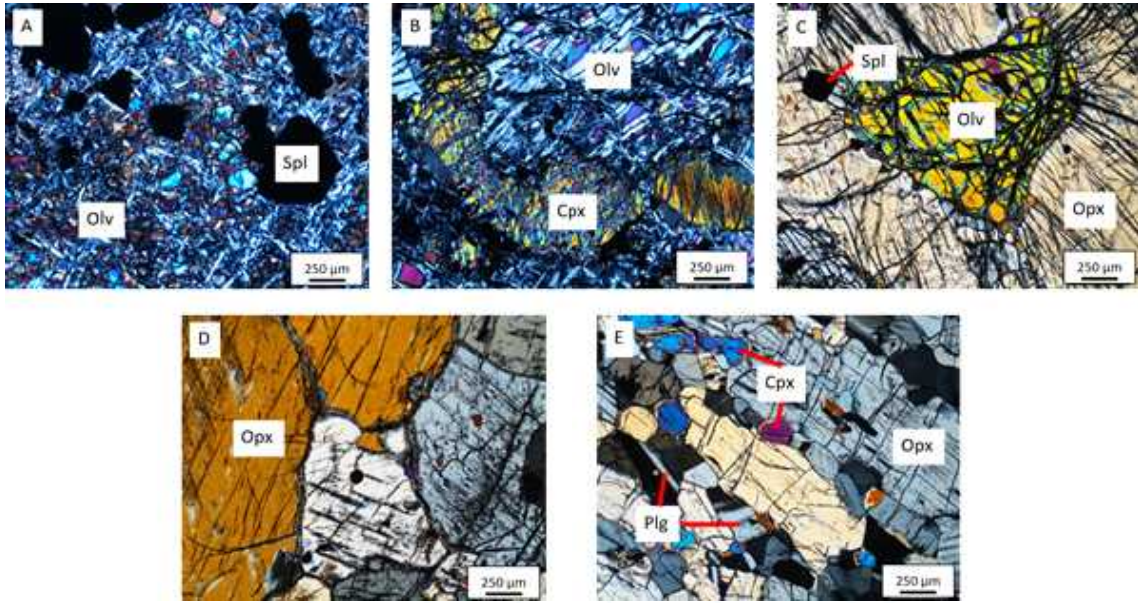


그림 6. 나이아가라아이스폴 복합체의 대표 시료의 편광 현미경 사진. (a) 크롬철석 (chromite)이 포함된 더나이트 시료. 감람석은 대부분 사문석화 된 반면, 크롬철석은 자형 내지는 반자형으로 산출한다. (b) 웰라이트에서는 간극을 충전하는 (intercumulus) 단사회석과 사문석화된 감람석이 발견된다. (c) 감람석 사방회석암에서는 크게 성장한 사방회석과 그 안에서 재용융 흔적을 보이는 감람석이 발견되는데, 감람석 주변에는 종종 얇게 협재한 단사회석이 발견된다. (d) 사방회석암은 절대다수의 사방회석과 간극에서 간혹 발견되는 단사회석으로 구성된다. (e) 반려암노라이트의 경우, 대체로 비슷한 방향으로 성장한 사방회석이 다수를 차지하나 사장석과 단사회석이 간극에서 함께 발견된다.

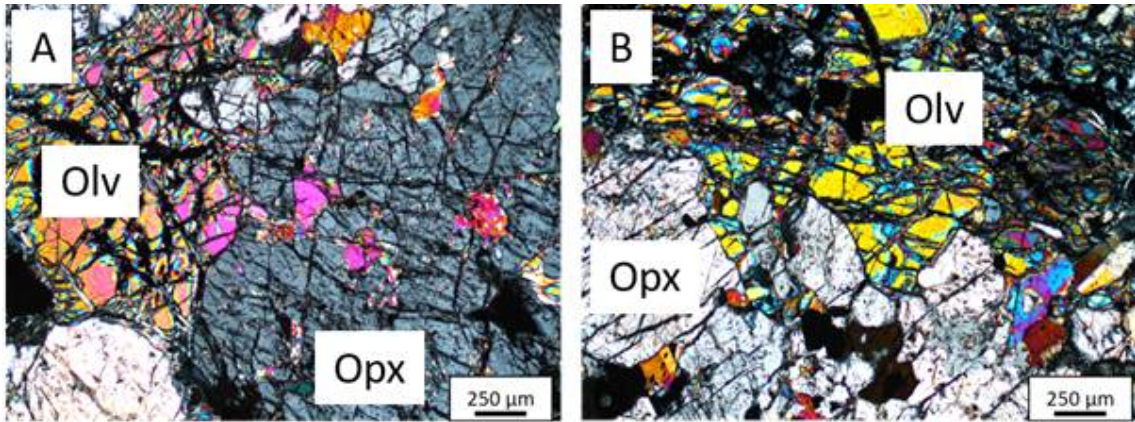


그림 7. 감람석-사방휘석암에서 발견되는 감람석-사방휘석 간의 치환 조직 사진(편광 현미경, 직교니콜).

2. 전암 지구화학적 특성

가. 초고철질암

감람암에서 보여지는 다양한 변질도는 최대 15.38 wt%까지의 높은 전암 LOI(Loss On Ignition)에서도 나타난다(표 2). 규산염 함량(SiO_2)이 가장 낮은 감람암 시료의 변질이 가장 심하게 되어 있는 등, LOI와 SiO_2 함량은 높은 음의 상관관계를 보인다. MgO는 FeO^* (=전체 Fe를 Fe^{2+} 로 가정하여 계산한 산화물 질량 퍼센트)를 제외하면 유일하게 높은 함량(41.42-43.62 wt%)을 가지고 있다(그림 8). 웰라이트와 감람석 사방회석암 또한 높은 LOI 함량(최대 11.11 wt%)을 보인다. MgO 함량은 감람암에 비해 낮은 33.08-34.08 wt%이다. 또한, CaO(2.41-3.52 wt%)와 Al_2O_3 (1.95-3.02 wt%)가 풍부한 점이 특징이다. 사방회석암은 LOI가 낮아 변질이 적었음을 알 수 있다. MgO는 약 30 wt%로 초고철질암 중 가장 낮은 함량을 보인다. CaO 및 Al_2O_3 함량은 약 1.7 wt%로 나타난다. SiO_2 와 FeO^* 를 제외한 다른 원소는 모두 미량으로 존재한다.

웰라이트와 사방회석암은 미량원소가 매우 결핍되어 있으며, 평평한 중(重)희토류(heavy rare earth element, HREE)와 소폭으로 부화된 경(經)희토류(light rare earth element, LREE) 패턴을 보인다(그림 9). 또한 두 암상 모두에서 유체유동성(fluid-mobile) 원소가 부화되어 있다.

나. 고철질암

반려암노라이트의 전암 성분은 넓은 범위를 갖는다(표 2-3). 이는 암석의 분화 정도와 구성 광물의 함량이 다양하기 때문인 것으로 사료된다. 전반적으로 반려암노라이트의 변질 정도는 심하지 않으며, 낮은 LOI를 가지고 있다. MgO 함량은 7.52-17.56 wt%로 다양하며, CaO 및 Al_2O_3 함량과 반비례한다. SiO_2 함량은 비교적 일정하게 유지되며, 48.36-50.93 wt% 범위에서 나타난다. 반려암노라이트의 분화된 특성에도 불구하고, TiO_2 함량은 최대 0.07 wt%로 일정하게 낮은 값을 보인다(그림 8). 한편, 반려암노라이트의 평평한 HREE, 부화된 LREE와 유체유동성 원소 함량 등의 미량원소 특성은 초고철질암과 유사하다. 반려암노라이트는 사장석 집적에 의해 Eu의 양의 이상과 초고철질암에 비해 높은 Sr 함량을 보인다(그림 9). 또한, 부화도가 높은 반려암노라이트의 경우 티타늄의 음의 이상이 관찰된다.

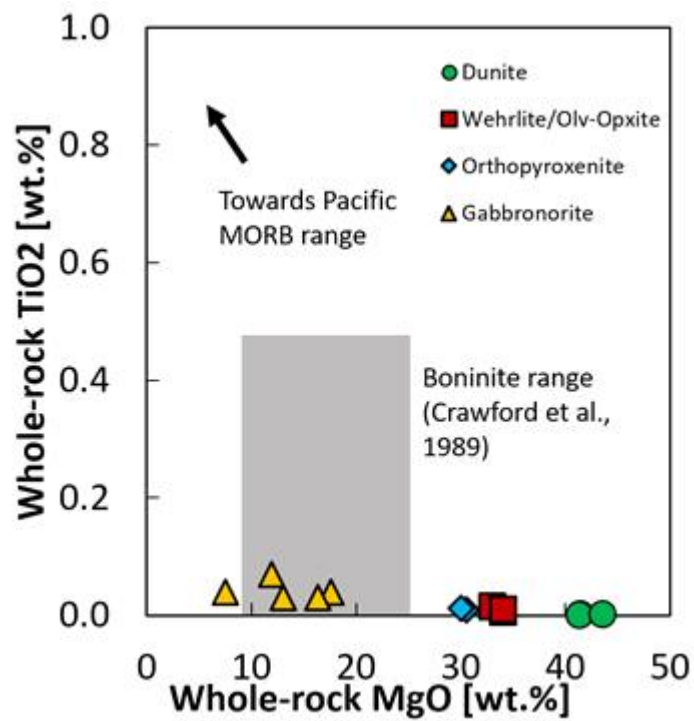


그림 8. 전암 TiO₂ 대 MgO (wt.%) 도표. 회색 영역은 전 세계 보니나이트의 성분 범위(Crawford et al., 1989)에 해당한다.

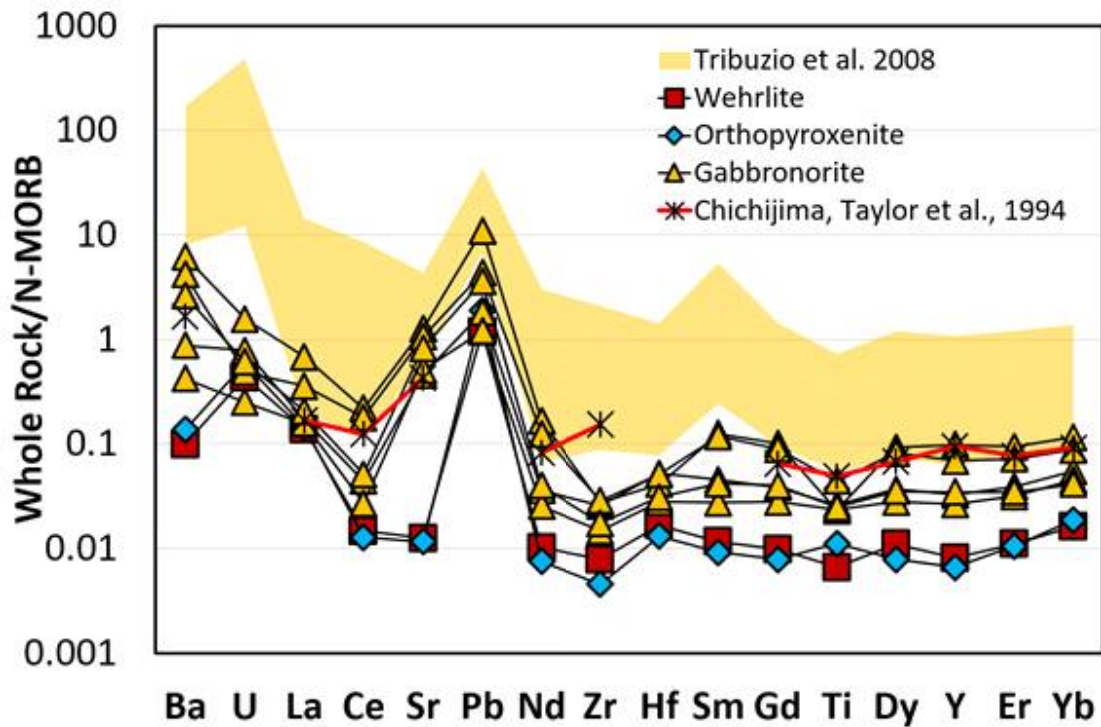


그림 9. 일반적 중앙 해령 현무암(normal mid-ocean ridge basalt, N-MORB; Hofmann, 1988)으로 표준화한 미량원소 거미 도표(spidergram). 비교를 위하여 이전 연구에서 단사회석 성분을 기반으로 멜트 성분을 복원한 자료(Tribuzio et al., 2008) 영역을 함께 도시하였다. 전형적인 보니나이트 암석으로 알려진 치치지마(Chichijima) 보니나이트의 성분 역시 비교를 위해 함께 도시하였다(Taylor et al., 1994).

3. 주구성 광물 성분

가. 감람석

감람석을 함유한 각 암석에 존재하는 감람석은 호정성(compatible) 원소에 대한 친화도가 매우 높다. 감람암 내 감람석의 Fo(감람석의 Mg 몰 수/(Mg 몰 수+전체 Fe 몰 수)*100)는 89-96 사이의 값을 가진다(그림 10). MnO 함량은 0.07-0.20 wt% 범위에서 나타나며, NiO는 최대 0.35 wt%에서 검출 한계 이하에 달하는 넓은 함량 범위에서 나타난다. 웰라이트와 감람석 사방휘석암에 존재하는 감람석은 감람암 내 감람석에 비해 낮은 Fo (86-89)를 가진다(그림 10). 그중에서도 낮은 Fo를 가진 감람석은 대개 사방휘석의 모달비가 높은 감람석 사방휘석암에서 나타난다. 그러나 웰라이트와 감람석 사방휘석암의 감람석에 나타나는 MnO(0.17-0.26 wt%)와 NiO(0.20-0.40 wt%)는 감람암의 감람석보다 높은 함량 범위를 가지고 있다.

나. 침정석

감람석과 마찬가지로 초고철질암의 침정석은 높은 호정성 원소 친화도를 가지고 있어 높은 Cr 함량을 가지고 있다(그림 11). 웰라이트 내 침정석은 크롬침정석에 해당하며 Cr#(=침정석의 Cr 몰 수/(Cr 몰 수+Al 몰 수))가 0.48-0.58 범위에서 나타난다. 감람암에서 발견되는 스피넬은 모두 크롬철석으로 분류되며 Cr#는 0.58-0.83 사이의 값을 가진다. 두 경우 모두 TiO₂가 대개 0.10 wt% 이하로 존재하며 최대 0.15 wt%로, 아주 낮은 값을 보인다. 반려암노라이트 내 침정석은 높은 Cr#(0.80)을 보이는데, 해당 침정석의 Cr₂O₃ 함량(32 wt%)이 초고철질암 내 침정석에 비해 오히려 낮은 값을 보이는 특징을 고려하면 이러한 Cr# 차이는 일반적인 마그마 분화과정에서 의한 것이 아님을 알 수 있다. 이러한 특징은 함께 존재하는 사장석이 침정석 내 Al을 제거한 결과로 보인다. TiO₂ 함량은 2 wt%에 도달할 정도로 초고철질암 내 침정석에 비해 높다.

다. 사장석

반려암노라이트와 거정질 반려암노라이트에는 각각 단 하나의 사장석만이 광물학 회지 변질을 받지 않은 채로 발견되었다. 반려암노라이트 내 사장석의 An%(=사장석의 Ca 몰 수/(Ca 몰 수+Na 몰 수+K 몰 수)*100)는 83-90% 범위에서 나타나며,

거정질 반려암노라이트 내 사장석은 71-89% 범위의 An%를 가지고 있다. 이들은 모두 아회장석(bytownite) 영역에 도시된다.

라. 단사회석

웰라이트와 사방회석암에 존재하는 단사회석은 0.92-0.94 사이의 높은 Mg#(유색 광물의 Mg 몰 수/(Mg 몰 수+전체 Fe 몰 수))를 가지는 것이 특징이다. 사방회석 내 단사회석의 Mg#(0.90)는 그 뒤를 따른다. 반려암노라이트 및 페그마타이트질 반려암노라이트 내 단사회석은 Mg#가 각각 0.78-0.82와 0.76-0.67의 범위에서 나타나, 가장 분화된 조성을 가지고 있다. 웰라이트와 감람석 사방회석암에 존재하는 단사회석은 전반적으로 사방회석암에 비해 더 낮은 Cr₂O₃ 함량을 가지고 있으며(그림 12), 반려암노라이트 내 단사회석의 Cr₂O₃ 함량은 다른 모든 초고철질암보다 낮다. 이에 더해 웰라이트와 감람석 사방회석암의 단사회석은 다른 초고철질암의 단사회석에 비해 높은 SiO₂ 함량을 보인다(그림 13). 단사회석의 미량원소 함량 또한 암상 별로 상이하다(그림 14-17). 웰라이트와 감람석 사방회석암의 단사회석은 유사한 미량원소 특성을 보인다(그림 14-15). 이들의 미량원소는 매우 결핍되어 있으나, LREE 및 유체유동성 원소는 타 원소 대비 부화되어 있는 특성을 보인다. 약한 Eu 음의 이상 또한 관찰되며, 이는 가장 분화된 감람석 사방회석암 시료에서 가장 두드러지게 나타난다. 이러한 특성은 마그마 분화 과정 중 사장석과 단사회석이 정출하였음을 지시한다. 사방회석암 내 단사회석은 웰라이트 및 감람석 사방회석암에서 발견되는 단사회석에 비해 Mg#가 더 낮음에도 불구하고 희토류 원소(REE)는 더욱 결핍되어 있다. 사방회석암 내 단사회석 또한 LREE가 부화된 패턴이 관찰되며, 유체유동성 원소는 웰라이트 및 감람석 사방회석암의 단사회석에 비해 더욱 부화된 특성을 보인다. 반려암노라이트 내 단사회석은 앞서 기술한 초고철질암의 단사회석과 유사한 미량원소 패턴을 가지나, 더 높은 함량을 보인다. 반려암노라이트의 단사회석은 강한 Eu 음의 이상 및 Sr 음의 이상치를 가지며, 이는 사장석의 정출에 의한 것으로 보인다. 미량원소 패턴이 판이한 하나의 시료(M171109-06)를 제외하고, 거정질 반려암노라이트의 단사회석은 REE의 함량에서 반려암노라이트의 단사회석과 약간의 차이를 보이나 미량원소 패턴은 매우 유사하다(그림 16). 반려암노라이트 내 단사회석의 테두리 부분 미량원소 함량은 중심부의 미량원소 함량보다 낮으며, 이는 일반적인 마그마 분화과정상의 성분 변화와 반대되는 특징이다.

마. 사방회석

감람석 사방회석암에는 마그마 분화 가장 초기에 형성된 사방회석 ($Mg\#=0.86-0.90$)이 나타난다. 사방회석암 내 사방회석은 이보다 조금 낮은 범위의 $Mg\#(0.88-0.86)$ 를 보인다. 사방회석의 Cr_2O_3 함량은 사방회석암에서 $0.36-0.55$ wt%로 가장 높은 값을 보이며, 감람석 사방회석암은 $0.12-0.38$ wt% 범위를 보인다. 반려암노라이트 내 사방회석의 Cr_2O_3 함량은 $0.18-0.30$ wt% 사이의 값을 보인다. 사방회석의 Al_2O_3 함량은 Cr_2O_3 함량과 대략적인 상관관계를 보인다(그림 18). 일부 사방회석의 CaO는 최대 4 wt%의 매우 높은 값을 가지는데(그림 18), 이는 전자현미경으로 관찰할 수 없는 규모로 용리된 단사회석이 함께 분석되었기 때문일 것으로 생각된다. 사방회석암 및 반려암노라이트의 사방회석은 같은 시료의 단사회석과 유사한 REE 함량 및 LREE와 유체유동성 원소의 부화, HREE의 결핍을 보인다(그림 19). 감람석 사방회석암 내에 존재하는 사방회석은 미량원소 함량이 넓은 범위에서 나타난다(그림 19-20). 그러나 이 함량 범위는 감람석 사방회석암과 접촉해 있는 거정질 반려암노라이트 시료인 M171109-06의 사방회석 미량원소 함량을 넘지 않는다(그림 20). 또한, M171109-06 시료에 존재하는 사방회석의 미량원소는 해당 시료의 단사회석에서 보이는 미량원소 특성과 유사하게 판이한 미량원소 특성을 보이며, 테두리 부분이 중심부에 비해 미량원소가 결핍되어 있다(그림 17).

극지연구소

4. 회토류 원소 지온계 및 산소 퓨가시티

나이아가라아이스폴 초고철질-고철질암은 심성암이기 때문에, 이를 구성하는 광물은 정출 이후에도 고상선 이하에서의 재평형 과정을 거쳤을 가능성이 높다(Liang et al., 2013; Putirka, 2008). 따라서 광물의 주원소 조성을 기반으로 한 지온계를 적용할 경우 도출된 결과는 해당 광물의 정출 당시 마그마 온도를 명확하게 지시하지 않는다. REE는 주원소에 비해 단사회석 및 사방회석에서의 폐쇄온도(closure temperature)가 더 높기 때문에(Liang et al., 2013) 심성암류의 마그마 온도를 얻어내는 데에 최적의 조건을 갖추고 있다. 이를 고려하여, 본 암석의 결정화 온도를 계산하기 위해 Liang et al. (2013)의 양회석(two-pyroxene) REE 지온계를 도입하였다. 이 양회석 REE 지온계의 검정은 초고철질암 및 고철질암에 대한 실험 데이터(Sun and Liang, 2012; Yao et al., 2012)를 이용하여 이루어졌기 때문에, 분화도가 높은 페그마타이트질 반려암노라이트는 온도 계산에서 제외하였다. 또한, 웰라이트와 감람석 사방회석암에 존재하는 회석 쌍들은 멜트-암석 반응으로 인해 평형 상태를 유지하지 못한 것으로 생각되어, 이들 또한 계산에서 제외하였다.

양회석 REE 지온계의 계산 결과, 나이아가라 아이스폴 사방회석암 내 회석 쌍은 $1120\pm 96^{\circ}\text{C}$ 에서 $1274\pm 48^{\circ}\text{C}$ 사이의 온도 범위를, 반려암노라이트 내 회석 쌍은 $1111\pm 25^{\circ}\text{C}$ 에서 $1250\pm 9^{\circ}\text{C}$ 사이의 온도 범위를 가지는 것으로 계산되었다(그림 21). 회석 쌍에서 대부분의 사방회석은 대응되는 단사회석과 평형을 가정했을 때의 값보다 더 높은 LREE 함량을 보이는데, 이는 LREE의 확산 속도가 단사회석에서보다 사방회석에서 더 빠르기 때문인 것으로 해석된다(Orman et al., 2001). 따라서, 사방회석의 경우 부분적으로 재평형이 일어났을 가능성이 존재한다.

일부 시료에 대한 산소 퓨가시티는 침정석-각섬석 간 Mg-Fe 교환 반응의 폐쇄 온도를 이용한 Ballhaus (1991)의 방법을 활용하여 계산되었다. 산소 퓨가시티의 계산에는 15 kbar의 압력 조건을 가정하였으나, 폐쇄 온도는 압력에 의해 크게 변화하지 않기 때문에(분석 범위 내 최대 15°C) 이는 유효한 가정으로 사료된다. 나이아가라아이스폴의 감람암은 매우 높은 산소 퓨가시티와 폐쇄온도를 가지는 것으로 계산되었다(그림 22). 반면, 웰라이트의 경우 0-2 ΔFMQ 범위로 산소 퓨가시티가 여전히 높으나 감람암에 비해서 더 낮게 계산되었다.



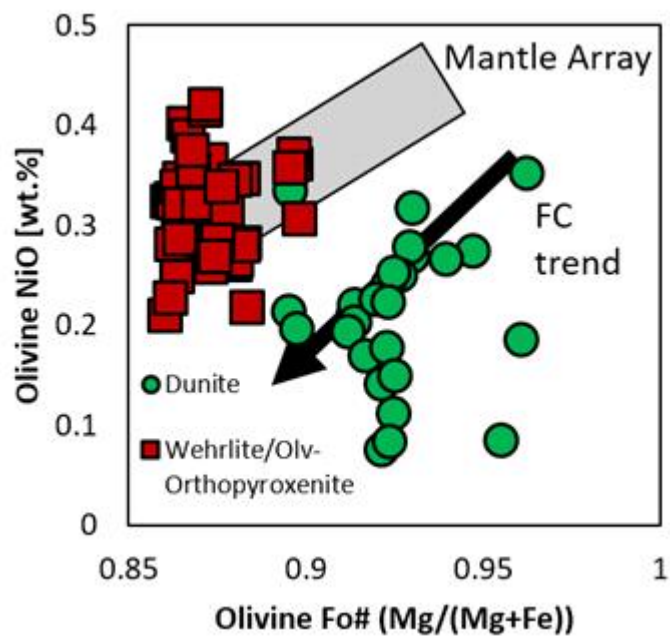


그림 10. 초고철질암에서 발견되는 감람석의 Fo 대 NiO (wt.%) 도표. 맨틀 감람석의 성분 범위(mantle array; Takahashi et al., 1987)를 함께 표시하였다. 검은 화살표는 예상되는 분별 결정(fractional crystallization, FC) 작용에 따른 성분 변화이다.

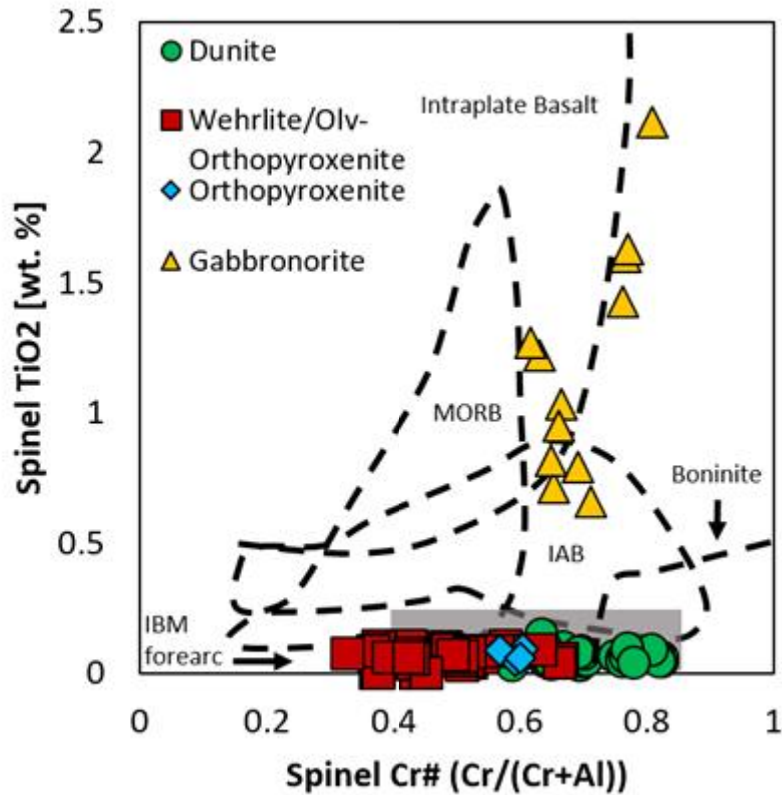


그림 11. 침정석의 크롬비(Cr#) 대 TiO₂ 함량(wt.%) 도표. 각 대표적 지구조 환경의 현무암 내 침정석 성분 영역을 함께 표기하였다(MORB=mid-ocean ridge basalt, 중앙해령현무암, IAB=island arc basalt, 화산호 현무암, intraplated basalt, 판내부 현무암, Arai, 1992). 또한 이주-보닌-마리아나(Izu-Bonin-Mariana, IBM) 전호 (fore-arc) 화산암에서 발견되는 침정석 성분 영역(회색) 역시 함께 도시하였다.

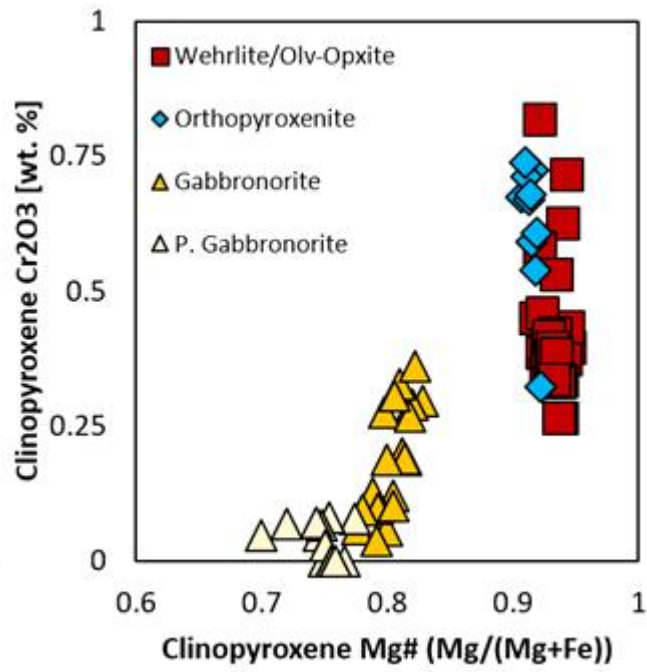


그림 12. 단사휘석의 Mg# 대 Cr₂O₃ 함량(wt.%) 도표.

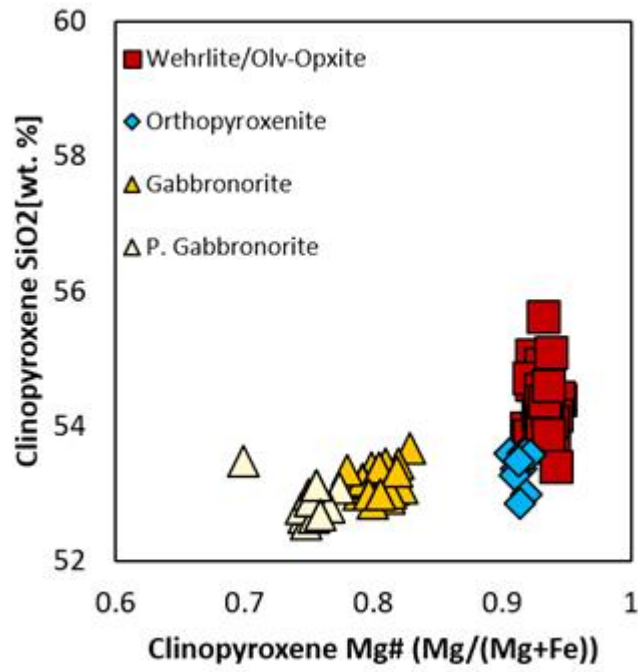


그림 13. 단사휘석의 Mg# 대 규산염 함량(SiO₂ wt.%) 도표.

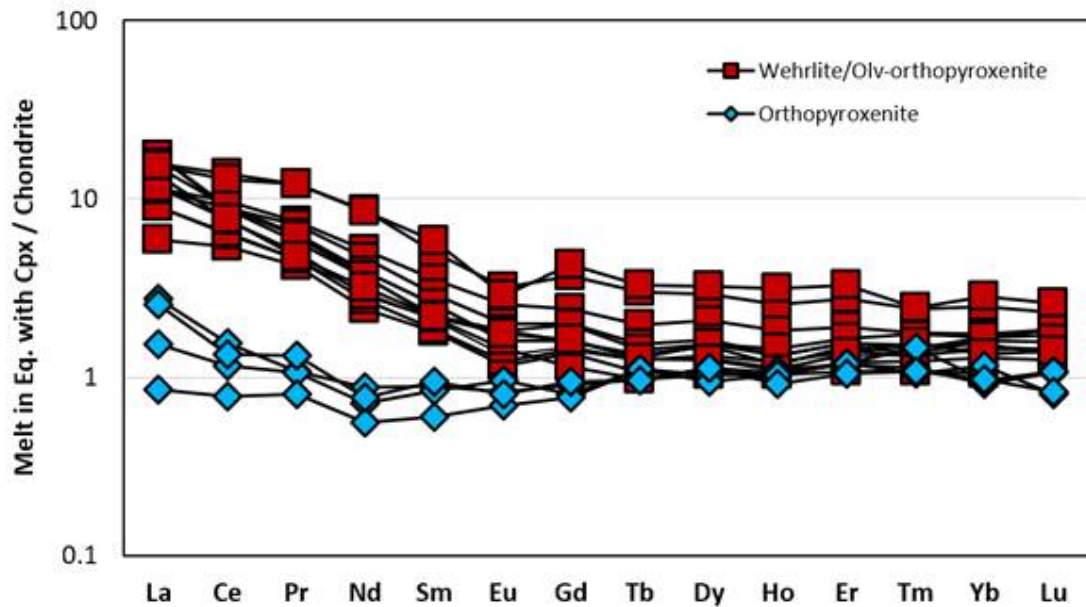


그림 14. 웰라이트 및 감람석-사방휘석암과 사방휘석암에서 산출하는 단사휘석의 미량원소 성분을 이용해 복원한 멜트의 희토류 원소 성분을 콘드라이트(chondrite) 성분(Sun and McDonough, 1995)으로 표준화한 것. 복원을 위해 사용한 분배 계수는 Bedard (2011)을 참고하였다.

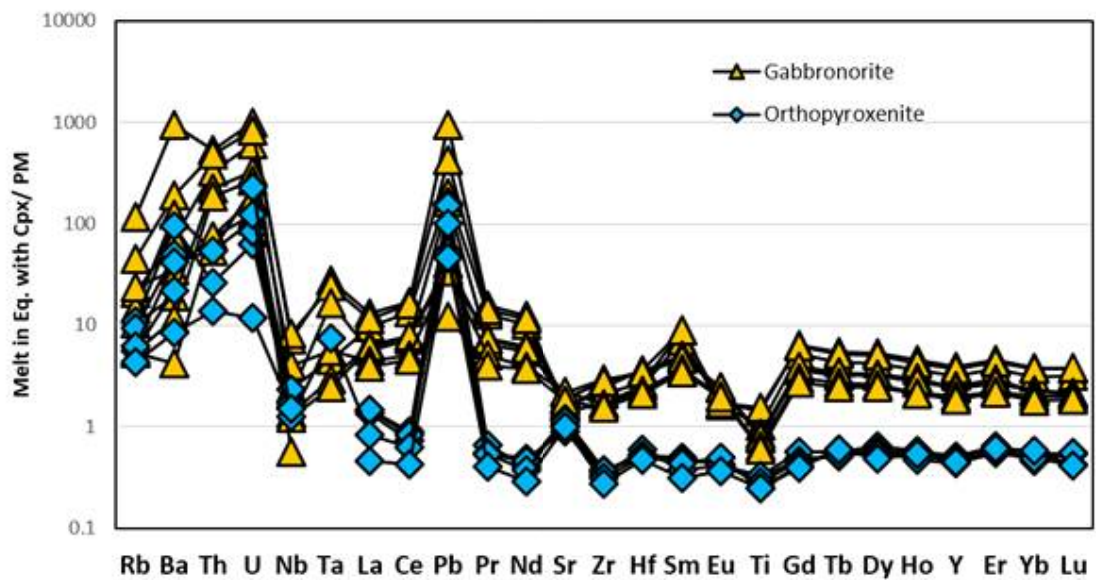
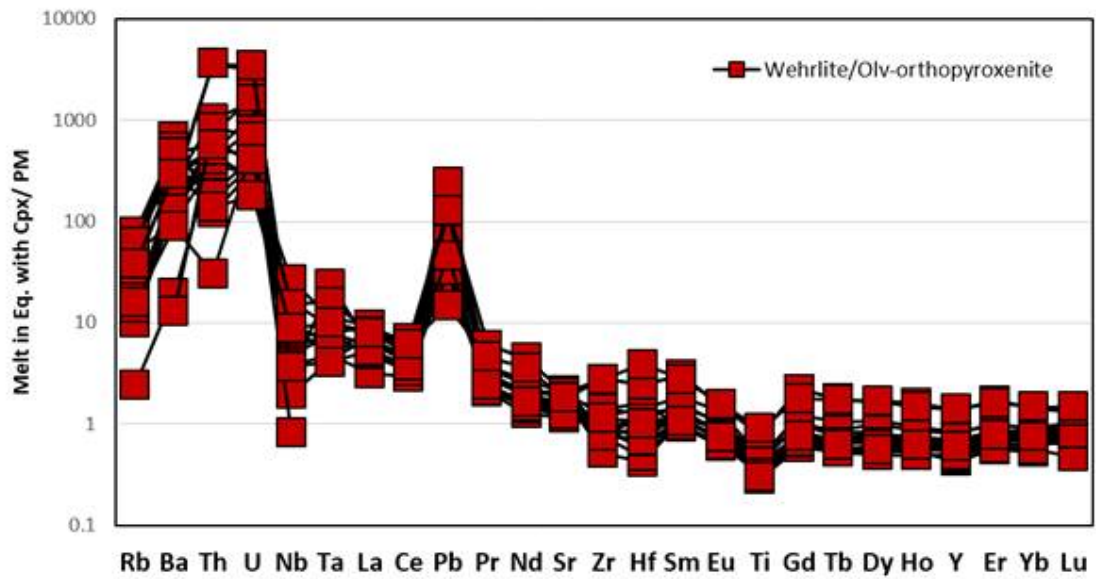


그림 15. (위) 웰라이트 및 감람석-사방휘석암에서 분석된 단사휘석 성분을 기반으로 복원된 멜트 성분을 원시맨틀(primitive mantle) 성분(Sun and McDonough, 1995)으로 표준화한 도표. 마찬가지로, 분배 계수는 Bedard (2011)을 참고하였다. (아래) 사방휘석암과 반려암노라이트 내 단사휘석 성분을 기반으로 복원된 멜트 성분을 원시맨틀 성분으로 표준화한 것.

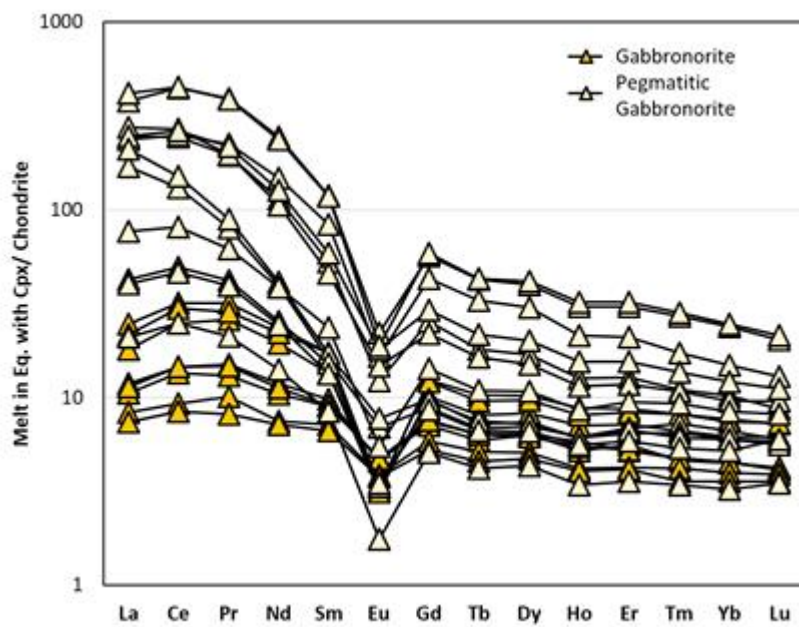


그림 16. 반려암노라이트와 거정질 반려암노라이트 내 단사휘석으로부터 복원된 멜트의 희토류 원소를 콘드라이트 성분으로 표준화한 결과.

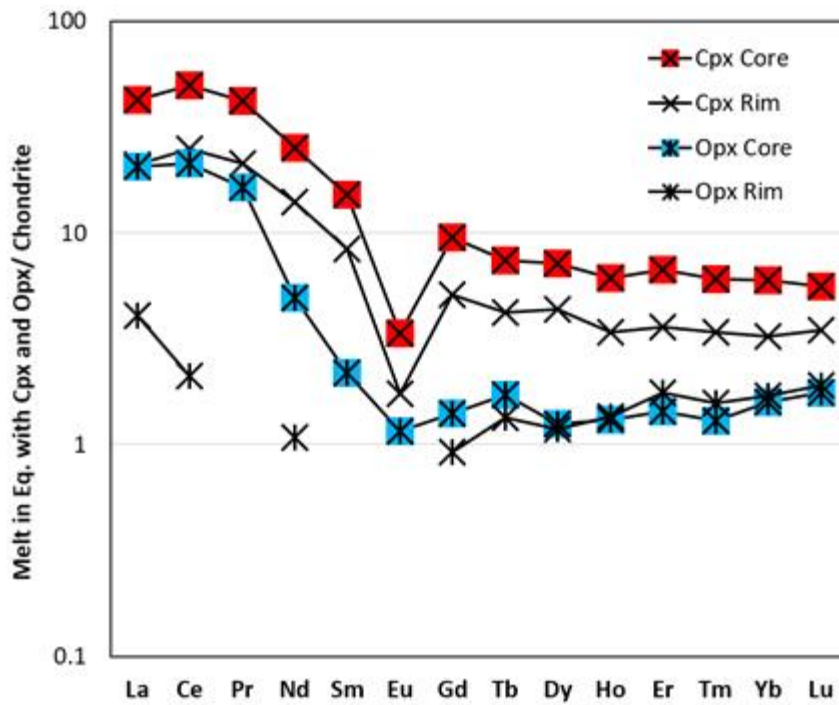


그림 17. 거정질 반러암노라이트 시료 M171109-06 내 두 휘석(단사휘석 및 사방휘석)의 중심(core)과 주변부(rim)의 성분으로부터 각각 복원된 멜트의 희토류 성분.

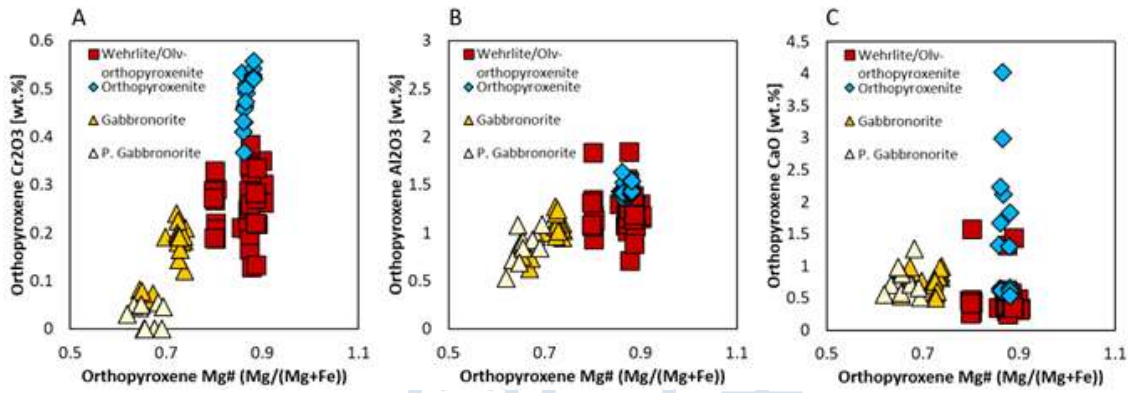


그림 18. 사방휘석의 Mg#에 대한 (a) Cr₂O₃ 함량, (b) Al₂O₃ 함량, (c) CaO 함량의 변화를 도시한 도표.

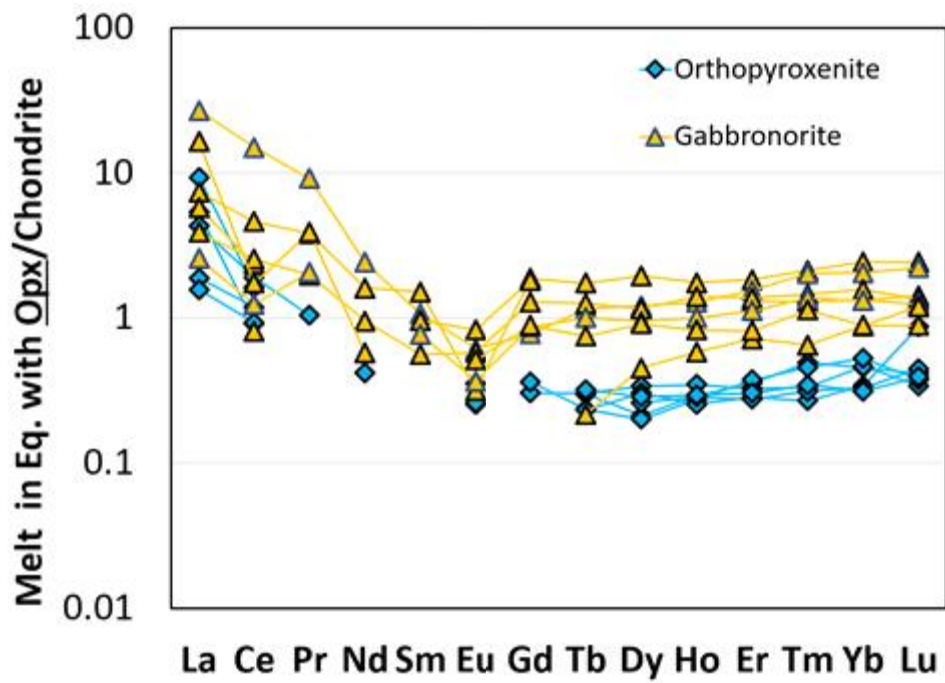


그림 19. 사방휘석암과 반러암노라이트 내 사방휘석 성분으로부터 복원된 멜트 희토류 함량을 콘드라이트 성분으로 표준화한 도표.

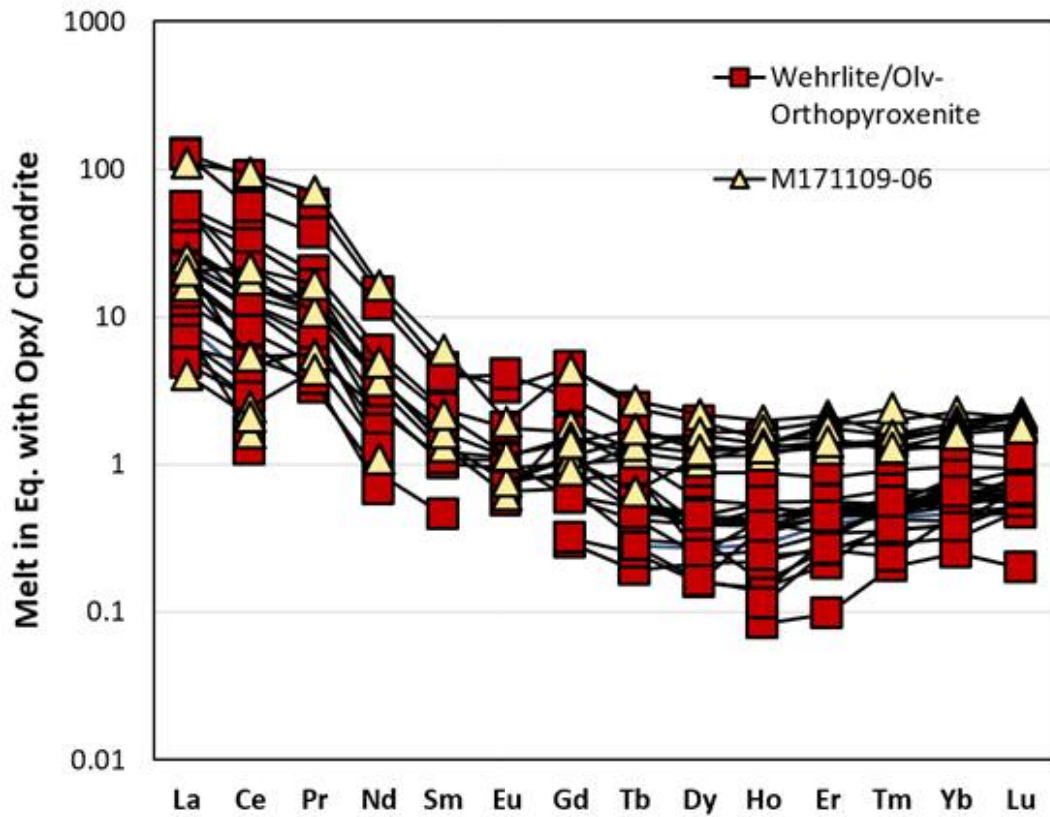


그림 20. 웰라이트 및 감람석 사방휘석암, 그리고 거정질 반려암노라이트(시료 M171109-06) 내의 사방휘석의 희토류 원소 함량을 통해 복원된 멜트 희토류 함량을 콘드라이트 성분으로 표준화한 것.

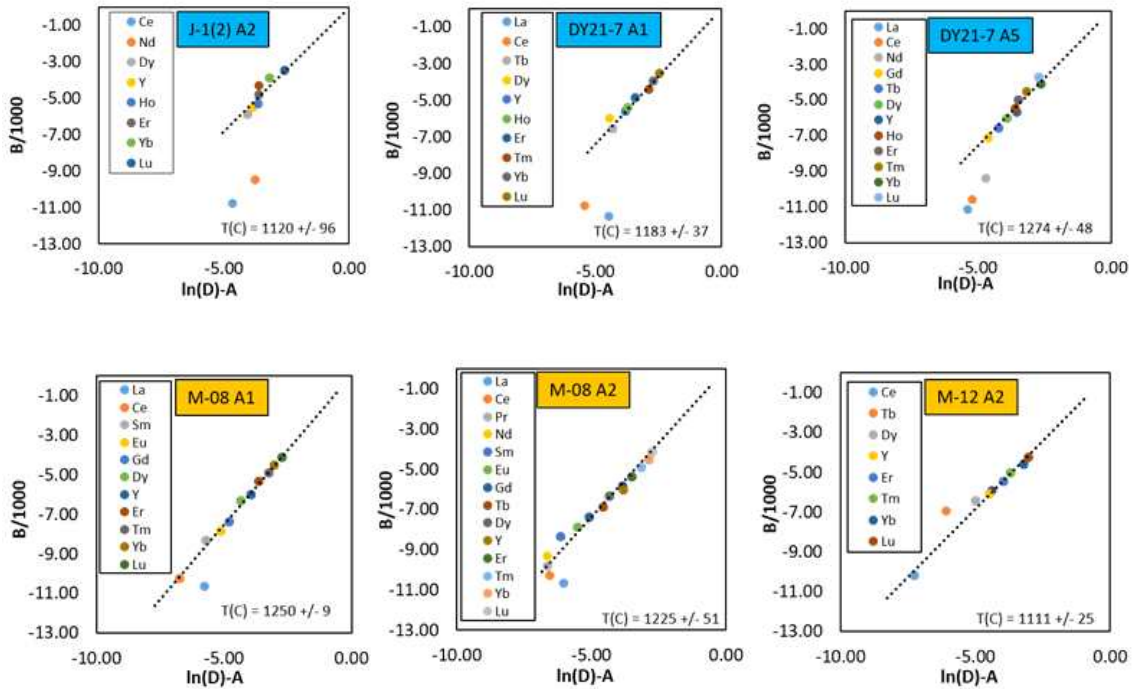


그림 21. 양 휘석의 희토류 원소 평형을 이용한 온도 계산법(Liang et al., 2013)을 따라 획득한 멜트 온도 계산 결과.

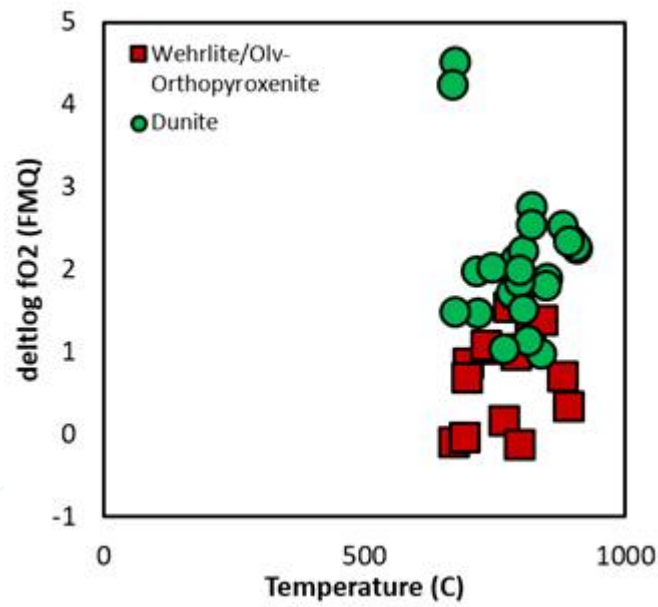


그림 22. 더나이트와 웰라이트-감람석-사방휘석암 내 감람석-침정석 쌍을 이용하여 계산된(Ballhaus, 1991) 산소 플가시티와 온도 추정 값을 도시한 것.

제 4절 모(母)마그마의 특성 규명

기존의 연구(Tribuzio et al., 2008)는 나이아가라아이스폴 고철질-초고철질 복합체가 보니나이트질 멜트로부터 분별 결정 작용을 통해 형성되었음을 제시하였다. 보니나이트질 멜트로부터 형성된 심성암은 (1) 감람석과 사방휘석으로 구성된 집적암(노라이트)을 형성하고(Varne and Brown, 1978; Tamura and Arai, 2006; Smithies, 2002) (2) 높은 마그네슘 함량에 비해 결핍된 미량원소 함량을 보이며, (3) 높은 마그네슘 함량을 지닌 감람석이 산출될 것으로 기대된다.

먼저, 나이아가라아이스폴 복합체는 더나이트-사방휘석암-반려암노라이트로 주로 구성되기에, 암상에서 이 조건을 만족시킨다. 웰라이트 역시 보니나이트질 마그마로부터 형성될 수 있음이 알려져 있는데, 이는 칼슘이 풍부한 보니나이트질 마그마의 산물일 수 있음이 알려져 있다(Marchesi et al., 2009; Garrido et al., 2017).

전암 주성분 역시 보니나이트질 집적암과 유사한 특성을 보인다. 나이아가라아이스폴 초고철질암은 마그네슘 함량이 매우 높다($MgO > 8$ wt.%). 또한 반려암노라이트는 전형적인 보니나이트 집적암과 가장 유사한데, 특히 높은 마그네슘 함량($MgO = 7.7-17.6$ wt.%), 낮은 티타늄 함량($TiO_2 = 0.03-0.07$ wt.%)이 전형적이다. 원시맨틀로 표준화한 전암 미량원소 또한 매우 결핍된 패턴을 보인다. 특히 경희토류를 제외한 나머지 희토류 원소들이 분별되지 않고 결핍되어 있는 패턴은 보니나이트질 집적암의 특징적인 형태이다. 동시에, 유체에 잘 분배되는 것으로 알려진 친석 원소(Pb, Ba, U, Sr)가 부화되어 양의 이상을 보이는 것 역시 보니나이트질 마그마의 특성으로 알려져 있다(Bloomer and Hawkins, 1987; Hickey and Frey, 1982).

광물 성분 역시 일관된 특성을 보여준다. 감람석의 마그네슘 함량은 매우 높는데 ($Fo = 86-96$), 이는 일반적인 화산호 마그마에서 관찰되는 감람석보다 더 높은 값으로 보니나이트질 마그마에서 형성될 수 있다(Bloomer and Hawkins, 1987). 마찬가지로, 침정석 역시 Cr#가 높아(> 0.7) 유사한 특성을 보이는데, 이러한 침정석은 보니나이트질을 포함한 섭입대 환경의 마그마에서 발견된다(그림 11, Arai, 1992). 단사휘석을 통해 복원한 멜트 성분은 비록 암상에 따라 다른 패턴을 보이지만 전암 성분과 마찬가지로 보니나이트질 멜트와 같은 결핍된 특성을 보인다.

Dobson et al. (1977)은 보니나이트의 형성 온도가 $1100-1260^{\circ}C$ 범위에 이른다고 제안하였다. 나이아가라아이스폴 복합체의 두 휘석의 희토류 원소를 활용한 지온계(Liang et al., 2013) 측정 결과는 $1111 \pm 25^{\circ}C$ 에서 $1250 \pm 9^{\circ}C$ 에 이르는 범위로서 잘 일치한다. 또한 감람석-침정석 성분쌍을 활용한 산소 퓨가시티 계산에 따르면, 나이

아가라아이스폴 복합체를 형성한 마그마의 산소 플가시티는 일반적인 마그마보다 높으며($\Delta\log\text{FMQ}>0$) 이는 보니나이트질 마그마가 슬랩으로부터 공급된 유체에 의해 형성되었다는 지질학적 모델과 합치하는 결과이다.

제 5절 두 독립된 분화 계열

기존 연구(Tribuzio et al., 2008)에서 제시된 나이아가라아이스폴 복합체 형성 모델은 단일한 마그마를 가정하였다. 그러나 본 연구에 따르면 나이아가라아이스폴 복합체를 형성하기 위해서는 최소한 두 서로 다른 멜트와 분화 과정이 요구된다. 기존 나이아가라아이스폴 복합체 연구를 포함한 보니나이트질 마그마의 분별 결정은 보통 다음과 같은 정출 순서를 따른다(Tribuzio et al., 2008).

감람석±침정석 - 감람석+청정석 - 사방휘석±사장석 - 사장석+단사회석

하지만, 위 분별 결정 작용 모델로는 나이아가라아이스폴 복합체에서 발견되는 웰라이트(감람석+단사회석)의 형성을 설명할 수 없다. 따라서 웰라이트를 형성시키기 위해서는 또 다른 지질학적 과정이 요구된다. 즉, 나이아가라아이스폴 복합체를 형성한 마그마 진화 계열은 웰라이트 계열과 더나이트-사방휘석암-반려암노라이트 계열로 양분된다.

웰라이트는 나이아가라아이스폴 복합체의 가장 북부 노두에서만 산출하며, 감람석-사방휘석암과 거정질 반려암노라이트와 함께 발견된다. 웰라이트의 높은 칼슘 함량은 고칼슘 보니나이트질 멜트로부터 형성된 암석임을 암시한다. 고칼슘 보니나이트질 멜트는 다른 칼슘이 부족한 보니나이트질 멜트에 비해 기원 맨틀암이 덜 결핍되었기 때문에 형성된다고 알려져 있다(Crawford et al., 1989). 따라서 고칼슘 보니나이트질 멜트에는 덜 결핍된 맨틀암으로부터 유래한 더 많은 미량원소가 있으리라 기대되는데, 웰라이트 내 단사회석에서 측정되는, 상대적으로 풍부한 미량원소 함량은 이와 잘 일치한다. 또한, 사방휘석암의 Mg#는 웰라이트의 것보다 낮는데, 만약 이 두 암석이 같은 마그마로부터 유래한 것이라면, 사방휘석암 내 단사회석의 미량원소 함량은 웰라이트로부터 측정된 결과보다 높아야 한다. 그러나 실제로는 반대의 경향성이 나타나므로, 웰라이트가 사방휘석암과 독립적인 마그마로부터 유래했음을 다시 한 번 증명해준다. 동시에, 웰라이트의 기원 맨틀암의 미량원소가 더 부화되었음도 보여준다. 이는 사방휘석암의 조성 광물에서 Cr 함량이 웰라이트의 것보다 더 높다는 관찰과도 일치한다.

더나이트 역시 웰라이트와의 차이를 보인다. 마그마 내 니켈 함량은 감람석에 분배되면서 빠르게 감소하므로, 분화된 마그마로부터 유래한 감람석의 니켈 함량은 더 낮은 것이 일반적이다. 그런데 더나이트의 감람석은 웰라이트 감람석에 비해 더 높은 Mg#를 보이지만, 웰라이트 감람석의 니켈 함량이 반대로 더 높다. 따라서 둘은 순차적인 분별 결정에 의한 형성으로는 설명할 수 없다. 그러므로, 더나이트 역시 웰라이트와는 서로 다른 마그마로부터 유래한 암석이다.

위 관찰 결과를 종합할 때, 웰라이트는 결핍이 더 심대하게 일어나지 않았던 맨틀의 부분 용융으로부터 유래한 고칼슘 보이나이트질 마그마에서 비롯되었으며, 반대로 더나이트-사방휘석암-반려암노라이트의 암상들은 더 결핍된 맨틀에서 유래한 저-칼슘 보이나이트질 마그마가 기원 마그마였음을 제안할 수 있다. 두 마그마 기원 맨틀은 모두 슬랩으로부터 공급된 유체의 도움을 받아 부분 용융을 겪을 수 있었을 것이다. 다만, 더나이트-사방휘석암-반려암노라이트의 성분 변화를 고려할 때 더나이트는 단순한 집적암이 아니라 주변 하즈버가이트질 맨틀암과의 반응 산물이 것으로 추측된다. 이는 더나이트의 감람석 내 니켈 함량(NiO=0.1-0.3 wt.%)이 집적암으로서의 감람석 니켈 함량(NiO=0.25-0.38 wt.%; Leblanc et al., 1984)에 비해 상당히 낮기 때문이다. 하즈버가이트 내 사방휘석과 멜트와의 반응은 멜트 내의 MgO, SiO₂, Cr₂O₃의 함량을 높여주는데(Kelemen, 1992), 이 반응의 산물로 누적되는 다량의 감람석에 의해 각각의 감람석 내 니켈 함량의 희석되어 함량이 감소하게 된다(Kubo, 2002). 이러한 반응을 통해 규산염 함량이 높아진 결과, 더나이트 이후 사방휘석이 안정해지면서 사방휘석암이 형성될 수 있는 조건을 마련해주었을 것이다. 한편, 멜트 내 포함된 상당량의 물은 사장석의 정출을 억제하기 때문에, 사방휘석암이 형성된 뒤에서야 사장석이 정출하면서 반려암노라이트를 형성할 수 있었을 것이다.

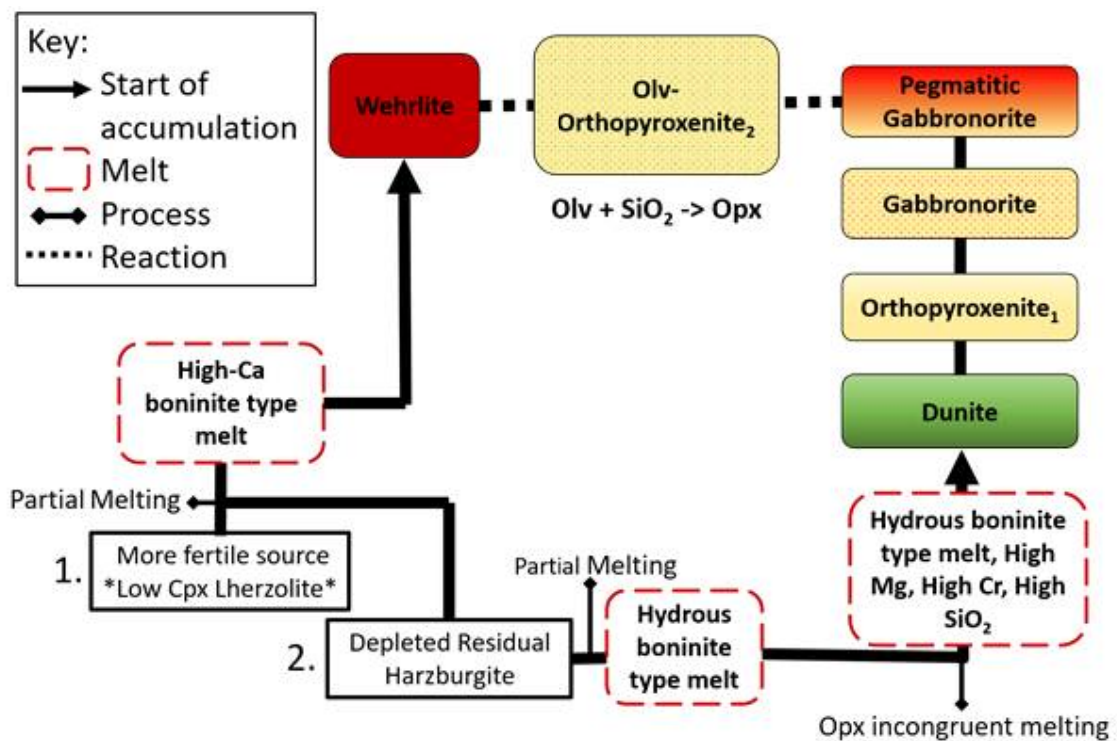
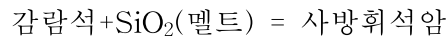


그림 23. 본 연구를 통해 구축된 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체의 각 암상 간의 성인적 관계를 정리한 도표. 보다 구체적인 설명은 본문을 참고하라.

제 6절 웰라이트-규산염 멜트 간의 반응

웰라이트와 함께 산출되는 감람석-사방휘석암은 더나이트-사방휘석암-반려암노라이트 계열과는 서로 다른 기원을 갖는다. 감람석-사방휘석암은 웰라이트와 더 진화한, 규산염이 풍부한 멜트와의 반응으로 형성되었다고 판단된다. 이 멜트-암석 반응은 다음과 같다(Kelemen et al., 1998).



감람석-사방휘석암이 웰라이트의 멜트-암석 반응으로부터 형성되었음을 지지하는 근거는 광물 성분과 조직에 있다.

웰라이트와 감람석-사방휘석암에서 발견되는 감람석은 Fo%가 줄어들에 따라 니켈 함량이 증가하는 경향성을 보이는데, 이는 분별 결정 작용과는 반대의 결과이다. 감람석이 사방휘석으로 치환되는 과정에서 니켈은 사방휘석에 잘 분배되지 않으므로, 잔류 감람석에 농집되게 된다(Kelemen, 1998). 이러한 반응에 따른 조직과 성분은 M171109-02 시료에서 가장 확연하게 관찰되는데, 이 암석은 감람석-사방휘석암과 웰라이트가 공존하는 시료이다. 여기서 웰라이트 내 감람석은 Fo%가 높고 니켈 함량이 낮은 반면, 사방휘석암 내 감람석은 Fo%가 낮고 니켈 함량이 높다.

휘석의 성분 역시 이 반응과 일맥상통한다. 웰라이트와 감람석 사방휘석암 내 단사휘석은 서로 유사한 미량원소 패턴을 공유하고 있다. 이것은 단사휘석이 반응에 참여하지 않아서, 감람석 사방휘석암 내 단사휘석이 웰라이트로부터 잔류한 결과라 추측할 수 있다. 한편, 감람석-사방휘석암 내 사방휘석의 미량원소 함량은 매우 넓은 범위를 보이는 것이 특징이다. 비록 사방휘석의 주원소 함량은 멜트와의 반응 과정에서 완충되어 반응 정도에 따른 변화를 보기 어렵지만(Coogan, 2014; Lissenberg and MacLeod, 2016; Lissenberg and Dick, 2008; Lissenberg et al., 2019), 미량원소의 넓은 함량 변화는 다양한 정도의 반응이 있었음을 암시한다. 감람석은 미량원소 함량이 매우 낮으므로, 감람석의 재용융은 사방휘석에 낮은 미량원소 함량을 부여하지만, 반대로 규산염이 풍부한 멜트는 높은 미량원소 함량을 부여하게 될 것이다. 따라서 두 작용이 함께 작용하면서 사방휘석의 미량원소는 다양한 정도의 부화를 띠게 되었으리라 추정된다. 뿐만 아니라, 감람석-사방휘석암에서 발견되는 사방휘석은 단순한 집적암으로서의 조직을 띠지 않는다. 여기서의 사방휘석암은 타형으로 주변 감람석 혹은 단사휘석보다 더 큰 크기로 성장해 있으며, 감람석의 경계면에서 매우 불규칙한 모습을 갖는다. 이는 웰라이트의 조직이 집적암

에 가깝다는 점을 고려할 때, 감람석-사방휘석암의 사방휘석이 감람석을 치환하는 반응에 의한 산물임을 지지한다(그림 3과 그림 7, Rampone et al., 2008).

이 모델에 따라, 웰라이트와 감람석 사방휘석암의 형성 과정에 의해 거정질 반려암 노라이트 역시 형성되었을 것이라 추측된다. 즉 감람석 사방휘석암을 형성하였던 규산염이 풍부한 멜트에 의한 산물이라는 것이다. 거정질 반려암노라이트에 해당하는 시료 M171109-06에서 측정된 사방휘석의 희토류 원소 함량이 감람석 사방휘석암에서 보이는 넓은 범위의 사방휘석암 내 사방휘석 희토류 함량의 가장 높은 값에 해당한다. 이는 거정질 반려암노라이트를 만드는 멜트가 감람석 사방휘석암을 형성 하던 반응 멜트에 해당한다는 간접적 증거이다. 이 시료의 커다란 광물 성장은 높은 유체 함량에 의한 것으로 추정되며, 감람석 사방휘석암 내에서 발견되는 사방휘석 거정과 일맥상통한다. 그럼에도 불구하고, 거정질 반려암노라이트와 감람석 사방휘석암과의 성인적 관계는 보다 구체적인 증거가 요구된다.

제 7절 연구 요약

암석 조직 및 지구화학적 증거를 바탕으로, 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체의 성인을 다음과 같이 규명하였다(그림 23). 먼저, 이 복합체의 형성에는 두 가지 멜트가 관여하였을 것이다. 하나는 결핍을 겪은 러졸라이트질 맨틀로부터 부분 용융을 거쳐 형성된 고칼슘 보나이트질 멜트이다. 이 멜트는 보다 덜 결핍된 성질을 갖는 감람석과 침정석을 지닌 웰라이트를 형성하였다. 이 때문에 웰라이트는 다른 암석에 비해 풍부한 미량원소 함량과 단사휘석을 가질 수 있었다. 두 번째 멜트는 더 많은 결핍을 겪은 하즈버가이트질 맨틀로부터 유래하였다. 이 두 번째 멜트는 상승하면서 주변의 맨틀, 특히 사방휘석과 반응을 하였으며, 이에 따라 마그네슘, 크로뮴 및 규산염 함량이 올라가고 감람석 내 니켈 함량을 희석시켰을 것이다. 이로서 초기 더나이트가 형성되고, 이후 사방휘석암과 반려암노라이트가 형성되었을 것이다. 높아진 크로뮴 함량은 사방휘석암에서 크로마이트를 형성시키는 데 기여하였을 것이다. 웰라이트와 함께 산출하는 감람석 사방휘석암과 거정질 반려암노라이트는 규산염 함량이 보다 높은 멜트와 웰라이트 간의 반응을 요구한다. 이때 반응한 규산염이 풍부한 멜트는 더나이트-사방휘석암-반려암노라이트에 걸친 분별 결정을 겪은 분화한 멜트였을 가능성이 있다. 제시된 모델을 보다 구체화하기 위해서는 정확한 연대측정법과 보다 자세한 암석학적, 열역학적 접근을 요구한다. 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체는 로스 조산 운동과 연계되어 많은 관

심을 받고 있는 암석인만큼, 이것의 성인 해석은 과거 로스 조산 운동의 발달사를 이해하는 데 중요한 정보를 제공할 것이라 기대된다.



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1절 연구개발목표 달성도

본 위탁 연구는 나이가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체에서 획득된 다양한 암석 시료의 암석기재적 특성을 기반으로, (1) 암석 및 광물의 암석지구화학적 특성을 규명하고, (2) 암석의 성인을 밝히는 것을 목적으로 삼았다. 또한 이를 학회에 보고하는 것 역시 목표로 제시되어 있다.

본 연구는 다양한 암석 시료에 대한 암석 기재를 성공적으로 수행하여 암석을 구체적으로 분류하였다. 특히 암석을 분류하기 위한 자세한 광물 동정이 수행되었으며, 각각의 암상에 대한 다양한 전암 주원소(16점), 미량원소(16점)를 분석하였다. 동시에 광물 주원소(331점)와 미량원소(49점) 성분을 파악하였는데, 위 사항은 목표했던 달성치를 모두 완료한 수치이다.

한편, 위와 같은 다양한 분석 자료를 기반으로 암석의 성인 규명을 하기 위하여, 두 단계의 연구 계획을 수립한 바 있다. 첫째는 광물을 형성한 멜트의 조성과 지구조 환경을 파악해내는 것이며, 두 번째는 멜트가 고화되는 과정에서 발생한 다양한 암석-멜트 상호 작용의 증거를 수집하는 것이다. 본 연구는 다양한 암상에서 분석된 단사회석과 사방회석의 성분을 기반으로 멜트 성분(37점)과 형성 온도, 산소 퍼가시티 조건을 성공적으로 계산해내었다. 또한, 이들을 근거로 나이가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체의 생성 환경이 화산호 환경의 결빙된 맨틀로부터 유래하였음을 규명하였다. 특히, 멜트의 조성이 양립하기 어려운 두 가지로 구분될 수 있음을 새롭게 밝혀냈다. 또한, 여러 암석 시료 조직(6점)으로부터 멜트-암석 반응 조직과 그에 잘 부합하는 성분 변화를 성공적으로 찾아내었다. 사전 연구에서 같은 암상으로 구분되었던 두 암상(사방회석암과 감람석-사방회석암)이 서로 상이한 기원을 가졌고 멜트-암석 반응이 매우 주요한 기작임을 규명하였다. 위 연구 사항은 2019년 10월 추계지질과학연합학술대회에서 보고되었다.

제 2절 연구개발을 통한 기대성과

로스 조산 운동은 북빅토리아랜드 암석학 연구에서 가장 중요한 화두 중 하나로 간주되어 왔다. 이는 로스 조산 운동이 북빅토리아랜드를 형성한 지각 변동이었을 뿐만 아니라 호주 남동부와 남빅토리아랜드 전역에 걸쳐 같은 조산 운동이 기록되

있고, 궁극적으로 이곳이 과거 콘드와나 대륙의 모양과 환경, 변천사를 복원하는 데 가장 중요한 퍼즐로 남아있기 때문이다(Elliot, 2013; Federico et al., 2009; Meffre et al., 2000). 하지만 상당한 노두가 빙하 아래 덮여 있고, 많은 지역은 쉽게 접근하기 어려워 로스 조산 운동의 자세한 진화사는 아직도 논쟁 중에 있다(Rocchi et al., 2011; Kim et al., 2019). 조산 운동 당시에는 규장질 암석(화강암질 암석)은 상당히 노출되어 있지만(GHIC, Admiralty intrusives; Armienti et al., 1990; Weaver et al., 1984), 맨틀의 성분을 유추하게 해줄 초고철질-고철질 암석의 노출은 매우 제한적이다. 윌슨 지괴는 고생대 초 대륙 화산호 환경의 기반암에 해당하는 부분으로 간주되는데, 바로 이 지괴와 인접하게 산출하는 초고철질-고철질 암석은 현재까지 단 세 군데뿐이다(나이아가라아이스폴, 허스키릿지, 타이거, Tiepolo and Tribuzio, 2008). 그 중 하나가 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체이지만, 이것을 대상으로 보고된 논문은 단 한 편(Tribuzio et al., 2008)에 불과하다. 따라서 본 연구의 결과는 장보고 기지의 위치상의 이점을 적극적으로 활용하여 획득된 나이아가라아이스폴의 다양한 암석 시료를 대상으로 실시한 연구인만큼, 향후 로스 조산 운동에 수반된 고철질 심성암 연구에서 인용될 주요한 기초 자료가 될 것이다.

더욱이, 나이아가라아이스폴은 보니나이트라는 매우 독특한 마그마로부터 유래한 것으로 규명되었다. 보니나이트는 전 세계적으로 관심을 많이 갖는 암석인데, 이는 지질학적 증거가 매우 빈약한 섭입대 시작 환경을 암시하기 때문이다. 심성암은 과거 조산 운동의 뿌리에 해당하는 암석들로서 중요한 정보를 가지지만, 보니나이트의 심성암으로서의 특성은 아직 많은 것이 알려져 있지 않다. 본 연구는 보니나이트가 심성암으로서 어떻게 만들어지고 발견되는지를 상세히 보고함으로써 향후 섭입대 환경 내 보니나이트질 마그마와 이에 따른 집적암 형성 모델의 발전에 기여할 것이다.

본 연구는 현재 석사 학생 오스틴 아리아스의 연구 주제이므로, 석사 학위를 배출하는 데 기여할 것이다. 뿐만 아니라 본 연구 결과는 국제 학술지에 투고할 예정으로, 보다 폭넓은 연구자들에게 주요한 참고 문헌으로서 활용될 것이다. 또한, 본 연구는 2014년부터 3차례에 걸쳐 실시된 여러 야외 조사에서 획득한 다양한 암석 시료를 구체적으로 암석 기재하여 분류하였다. 따라서 향후 연구들은 보다 쉽게 암석 연구에 접근할 수 있으며, 따라서 확보되고 분류된 시료를 기반으로 더 다양한 학술적 성과가 산출될 것이다.

제 5 장 연구개발결과의 활용 계획

본 연구 결과는 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체의 성인에 대한 연구이다. 암석을 분류하고, 각 암상간의 성인적 관계를 파악하였으며, 이들의 기원 맨틀의 특성을 규명하였다. 하지만 주변 기반암과의 잠재적 반응은 충분히 검토되지 못하였다. 이들의 구체적인 연대는 아직 밝혀지지 못한 상황이다. 이전의 연구(Tribuzio et al., 2008)는 광물 성분을 기반으로 지각 혼입의 영향력에 대해 의심한 바 있는데, 이를 지지할 구체적인 자료는 빈약한 상황이다. 따라서 주변 암석(예컨대 토날라이트)의 특성을 함께 파악함으로써 나이아가라아이스폴 복합체가 지각에 정지할 때 잠재적으로 발생했을 지각과의 반응을 규명할 계획이다. 이 때 위 연구 결과의 자료 뿐만 아니라 저어콘 내 하프늄 동위원소비 등 보다 정밀한 자료를 적극적으로 활용할 것이다.

또한, 본 연구는 주로 암석의 형성 과정에 초점을 맞추었으나, 해석된 형성 과정이 정확히 언제 일어난 것인지 검증이 필요하다. 이전 연구는 약 514 Ma의 연대를 보고한 바 있지만(Tribuzio et al., 2008), 본 연구 결과상 보니나이트 멜트의 관입은 최소 두 차례였으므로, 구체적인 연대 자료는 보다 신중한 해석이 필요하다. 따라서 본 연구에 포함된 암석으로부터 저어콘을 획득하여 이들로부터 정밀한 저어콘 우라늄-납 연대측정을 실시할 계획이다. 이는 본 연구에서 해석한 암석 형성이 어느 시점에서 일어났는지를 파악하게 해주리라 기대된다. 또한 이 연대 자료는 로스 조산 운동의 발달사 해석에도 기여하게 될 것이다.

한편 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 복합체는 화산호 환경의 고철질 집적암으로서 하부지각에 해당하는 암석이다. 화산호 하부지각 환경은 현재 암석학계에서 매우 큰 관심을 갖는 영역인데, 시료를 획득하기 어렵고 매우 다양한 지질학적 과정이 일어나고 있기 때문이다. 특히 화산호 환경은 친동성 원소 순환에서 핵심을 이루는 곳으로 알려져 있다. 친동성 원소는 하부 지각에 상당히 많이 저장되어 있으리라 기대되는데 아직 그 정확한 양상은 논쟁 아래 있다(Cox et al., 2019; Jenner, 2017). 그러므로 나이아가라아이스폴 초고철질-고철질 암석에서 친동성 원소의 성분 분석은 이러한 지질학적 논의에 중요한 시사점을 제공해주리라 기대된다. 즉, 본 연구 결과는 향후 나이아가라아이스폴 복합체 내 친동성 원소 함량 분석과 하부지각 친동성 원소 순환 연구에 활용될 것이다.

마지막으로, 본 연구는 후속 연구자 양성의 일환으로, 오스틴 아리아스 학생의 석사 학위 논문에 포함될 예정이다.

제 6 장

연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구에서 활용한 해외과학기술정보는 대부분 논문상에서 보고되어 있는 학술적 자료이다(참고문헌 참고). 본 연구는 2014년과 2017년 나이아가라아이스폴 복합체로의 야외조사를 수행하였던 이종익, 이상봉 박사의 협력 아래 진행되었다.



제 7 장 참고문헌

- Arai, S., (1992). Chemistry of chromian spinel in volcanic rocks as a potential guide to magma chemistry, *Mineralogical Magazine*, 56, 173-184.
- Armienti, P., Ghezzo, C., Innocenti, F., Manetti, P., Rocchi, S. & Tonarini, S. (1990). Isotope geochemistry and petrology of granitoid suites from Granite Harbour intrusives of the Wilson Terrane, North Victoria Land, Antarctica. *European Journal of Mineralogy*, 103-124.
- Bédard, J.H., (2001). Parental magmas of the Nain Plutonic Suite anorthosites and mafic cumulates: a trace element modelling approach, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141, 747.
- Bloomer, S.H., Hawkins, J.W., (1987). Petrology and geochemistry of boninite series volcanic rocks from the Mariana trench, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97, 361.
- Bracciali, L., Di Vincenzo, G., Rocchi, S. & Ghezzo, C. (2009). The Tiger Gabbro from northern Victoria Land, Antarctica: the roots of an island arc within the early Palaeozoic margin of Gondwana. *Journal of the Geological Society* **166**, 711-724
- Castelli, D., Oggiano, G., Talarico, F., Belluso, E., Colombo, F., (2003). Mineral chemistry and petrology of the Wilson Terrane metamorphics from Retreat Hills to Lady Newnes Bay, Northern Victoria Land, Antarctica, *Geologisches Jahrbuch der BGR*, B85, 135-171.
- Coogan, L.A., (2014). Ch. 4.14 The lower oceanic crust, *Treatise on Geochemistry*, Elsevier.
- Cooper, R., Jago, J., Rowell, A. & Braddock, P. (1983). Age and correlation of the Cambrian-Ordovician Bowers Supergroup, northern Victoria Land. *Antarctic earth science. Canberra, Australia, Academy of Science*, 128-131.
- Cox, D., Watt, S. F. L., Jenner, F. E., Hastie, A. R. & Hammond, S. J. (2019). Chalcophile element processing beneath a continental arc stratovolcano. *Earth and Planetary Science Letters* **522**, 1-11.
- Crawford, A.J., Falloon, T.J., Green, D.H., (1989). Classification, petrogenesis and tectonic setting of boninites, *Boninites and related rocks*, 1-49.

- Di Vincenzo, G., Palmeri, R., Talarico, F., Andriessen, P. & Ricci, G. (1997). Petrology and geochronology of eclogites from the Lanterman Range, Antarctica. *Journal of Petrology* **38**, 1391-1417.
- Di Vincenzo, G. & Rocchi, S. (1999). Origin and interaction of mafic and felsic magmas in an evolving late orogenic setting: the Early Paleozoic Terra Nova Intrusive Complex, Antarctica. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **137**, 15-35.
- Dobson, P.F., Blank, J.G., Maruyama, S., Liou, J.G., (2006). Petrology and geochemistry of boninite series volcanic rocks, Chichi-jima, Bonin Islands, Japan, *International Geology Review*, 48, 669-701.
- Dhuime, B., Bosch, D., Bodinier, J.L., Garrido, C.J., Bruguier, O., Hussain, S.S., Dawood, H., (2007). Multistage evolution of the Jijal ultramafic - mafic complex (Kohistan, N Pakistan): Implications for building the roots of island arcs, *Earth and Planetary Science Letters*, 261, 179-200.
- Elliot, D. H. (2013). The geological and tectonic evolution of the Transantarctic Mountains: a review. *Geological Society, London, Special Publications* **381**, 7-35.
- Federico, L., Capponi, G. & Crispini, L. (2006). The Ross orogeny of the transantarctic mountains: a northern Victoria Land perspective. *International Journal of Earth Sciences* **95**, 759-770.
- Federico, L., Crispini, L., Capponi, G. & Bradshaw, J. (2009). The Cambrian Ross Orogeny in northern Victoria Land (Antarctica) and New Zealand: a synthesis. *Gondwana Research* **15**, 188-196.
- Garrido, C.J., Bodinier, J.L., Dhuime, B., Bosch, D., Chanefo, I., Bruguier, O., Hussain, S.S., Dawood, H., Burg, J.P., (2007). Origin of the island arc Moho transition zone via melt-rock reaction and its implications for intracrustal differentiation of island arcs: Evidence from the Jijal complex (Kohistan complex, northern Pakistan), *Geology*, 35, 683-686.
- Gemelli, M., Rocchi, S., Di Vincenzo, G. & Petrelli, M. (2009). Accretion of juvenile crust at the Early Palaeozoic Antarctic margin of Gondwana: geochemical and geochronological evidence from granulite xenoliths. *Terra Nova* **21**, 151-161.

- Gibson G. M. & Ireland T. R. (1996). Extension of the Delamerian (Ross) orogen into western New Zealand: evidence from zircon areas and implications for the crustal growth along the Pacific margin of Gondwana. *Geology* 24, 1087 - 1090.
- Gibson, G. M., Morse, M., Ireland, T. & Nayak, G. (2011). Arc - continent collision and orogenesis in western Tasmanides: insights from reactivated basement structures and formation of an ocean - continent transform boundary off western Tasmania. *Gondwana Research* 19, 608-627.
- Hawkins, J.W., Bloomer, S.H., Evans, C.A., Melchior, J.T., (1984). Evolution of intra-oceanic arc-trench systems, *Tectonophysics*, 102, 175-205.
- Hickey, R.L., Frey, F.A., (1982). Geochemical characteristics of boninite series volcanics: implications for their source, *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 46,2099-2115.
- Henjes-Kunst, F., Koepke, J., Läufer, A., Estrada, S., Phillips, G., Piepjohn, K. & Kosanke, D. (2014). The Ross-Orogenic Tiger Gabbro Complex (Northern Victoria Land, Antarctica): Insights into the Lower Crust of a Cambrian Island Arc. *herausgegeben vom Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar-und Meeresforschung und der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung e. V.* 84, 23-38.
- Henjes-Kunst, F. & Schussler, U. (2003). Metasedimentary units of the Cambro-Ordovician Ross Orogen in northern Victoria Land and Oates Land: Implications for their provenance and geotectonic setting from geochemical and Nd-Sr isotope data. *Terra Antartica* 10, 105-128.
- Hofmann, A.W., (1988). Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust, *Earth and Planetary Science Letters*, 90, 297-314.
- Holness, M. B., Nielsen, T. F. D. & Tegner, C. (2017). The Skaergaard Intrusion of East Greenland: Paradigms, Problems and New Perspectives. *Elements* 13, 391-396.
- Ishii, T., (1992). Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu-Ogasawara-Mariana forearc, Leg 125, *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, Scientific Results, 125, 401-414.

- Jenner, F. E. (2017). Cumulate causes for the low contents of sulfide-loving elements in the continental crust. *Nature Geoscience*.
- Kelemen, P.B., Dick, H.J.B., Quick, J.E., (1992). Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle, *Nature*, 358, 635-641.
- Kelemen, P.B., Hart, S.R., Bernstein, S., (1998). Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction, *Earth and Planetary Science Letters*, 164, 387-406.
- Kim, T., Kim, Y., Cho, M. & Lee, J. I. (2019). P - T evolution and episodic zircon growth in barroisite eclogites of the Lanterman Range, northern Victoria Land, Antarctica. *Journal of Metamorphic Geology* **37**, 509-537.
- Kubo, K., (2002). Dunite Formation Processes in Highly Depleted Peridotite: Case Study of the Iwanaidake Peridotite, Hokkaido, Japan, *Journal of Petrology*, 43, 423-448.
- Leblanc, M., Dupuy, C., Merlet, C., (1984). Nickel content of olivine as discriminatory factor between tectonite and cumulate peridotite in ophiolites., *Sciences Géologiques*, 37, 131-135.
- Liang, Y., Sun, C.G., Yao, L.J., (2013). A REE-in-two-pyroxene thermometer for mafic and ultramafic rocks. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 102, 246-260.
- Lissenberg, C.J., Dick, H.J.B., (2008). Melt - rock reaction in the lower oceanic crust and its implications for the genesis of mid-ocean ridge basalt, *Earth and Planetary Science Letter*, 271, 311-325.
- Lissenberg, C.J., Macleod, C.J., (2016). A Reactive Porous Flow Control on Mid-ocean Ridge Magmatic Evolution, *Journal of Petrology*, 57, 2195-2220.
- Lissenberg, C.J., MacLeod, C.J., Bennett, E.N., (2019). Consequences of a crystal mush-dominated magma plumbing system: a mid-ocean ridge perspective, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 377.
- Marchesi, C., Garrido, C.j., Godard, M., Belley, F., Ferre, E., (2009). Migration and accumulation of ultra-depleted subduction-related melts in the Massif du Sud ophiolite (New Caledonia), *Chemical Geology*, 266, 171-186.
- Meffre, S., Berry, R. & Hall, M. (2000). Cambrian metamorphic complexes in

- Tasmania: tectonic implications. *Australian Journal of Earth Sciences* **47**, 971–985.
- Musumeci, G., (1999). Magmatic belts in accretionary margins, a Key for tectonic evolution: the Tonalite Belt of North Victoria Land (East Antarctica), *Journal of the Geological Society*, 156, 177–189.
- Palmeri, R. (1997). PT paths and migmatite formation: An example from Deep Freeze Range, northern Victoria Land, Antarctica. *Lithos* **42**, 47–66.
- Palmeri, R., Talarico, F. M. & Ricci, C. A. (2011). Ultrahigh-pressure metamorphism at the Lanterman Range (northern Victoria Land, Antarctica). *Geological Journal* **46**, 126–136.
- Palmeri, R., Sandroni, S., Godard, G. & Ricci, C. (2012). Boninite-derived amphibolites from the Lanterman–Mariner suture (northern Victoria Land, Antarctica): New geochemical and petrological data. *Lithos* **140**, 200–223.
- Parlak, O., Hock, V., Delaloye, M., (2002). The supra-subduction zone Pozanti - Karsanti ophiolite, southern Turkey: evidence for high-pressure crystal fractionation of ultramafic cumulates, *Lithos*, 65, 205–224.
- O’Driscoll, B. & VanTongeren, J. A. (2017). Layered Intrusions: From Petrological Paradigms to Precious Metal Repositories. *Elements* **13**, 383–389.
- Rampone, E., Piccardo, G., B., Hofmann, A.W., (2008). Multi-stage melt-rock interaction in the Mt. Maggiore (Corsica, France) ophiolite peridotites: microstructural and geochemical evidence, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 156, 453–475.
- Rocchi, S., Bracciali, L., Di Vincenzo, G., Gemelli, M. & Ghezzo, C. (2011). Arc accretion to the early Paleozoic Antarctic margin of Gondwana in Victoria Land. *Gondwana Research* **19**, 594–607
- Smithies, R.H., (2002). Archean boninite-like rocks in an intra-cratonic setting, *Earth Planetary Science Letters*, 197, 19–34.
- Stern, R.J., Bloomer, S.H., (1992). Subduction zone infancy: Examples from the Eocene Izu-Bonin-Mariana and Jurassic California arcs, *Geological Society of America Bulletin*, 104, 1621–1636.
- Sun, C.G., Liang, Y., (2012). Distribution of REE between clinopyroxene and basaltic melt along a mantle adiabat: Effects of major element composition,

- water, and temperature, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163, 807–823.
- Sun, S., McDonough, W.F., (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, *Geological Society, Special Publications*, 42, 313–345.
- Tamura, A., Arai, S., (2006). Harzburgite–dunite–orthopyroxenite suite as a record of supra–subduction zone setting for the Oman ophiolite mantle, *Lithos*, 90, 43–56.
- Taylor, R.N., Nesbitt, R.W., Vidai, P., Harmon, R.S., Auvray, B., Croudace, I.W., (1994). Mineralogy, chemistry, and genesis of the boninite series volcanics, Chichijima, Bonin Islands, Japan, *Journal of Petrology*, 35, 577–617.
- Tiepolo, M. & Tribuzio, R. (2008). Petrology and U - Pb zircon geochronology of amphibole–rich cumulates with sanukitic affinity from Husky Ridge (Northern Victoria Land, Antarctica): insights into the role of amphibole in the petrogenesis of subduction–related magmas. *Journal of Petrology* 49, 937–970.
- Tribuzio, R., Tiepolo, M., Tiameni, S., (2008). A mafic–ultramafic cumulate sequence derived from boninite–type melts (Niagara Icefalls, northern Victoria Land, Antarctica), *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155, 619–632.
- Van Orman, J.A., Grove, T.L., (2001). Shimizu, N., Rare earth element diffusion in diopside: Influence of temperature, pressure, and ionic radius, and an elastic model for diffusion in silicates, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141, 687 - 703.
- Varne, R., Brown, A.V., (1978). The geology and petrology of the Adamsfield ultramafic complex, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 67, 195–207.
- Weaver, S., Bradshaw, J. & Laird, M. (1984). Geochemistry of Cambrian volcanics of the Bowers Supergroup and implications for the Early Palaeozoic tectonic evolution of northern Victoria Land, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters* 68, 128–140.
- Yao, L.J., Sun, C.G., Liang, Y., (2012). A parameterized model for REE partitioning between low–Ca pyroxene and basaltic melts with applications to

adiabatic mantle melting and pyroxenite-derived melt and peridotite interaction, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 164, 261–280.



부록: 분석표

표 1. 대표 암상의 광물 조합 및 모드비(mod%)

Sample	Lithology	Modal Abundances
DY181121-01	Dunite	Olivine 100% Accessory: Spinel
DY181121-04	Dunite	Olivine 100% Accessory: Spinel
DY181109-14	Wehrlite/Olv-Opxite	Olivine 57% Orthopyroxene 27% Clinopyroxene 6% Plagioclase 10% Accessory: Spinel
J14120101-01	Olv-Opxite	Olivine 14% Orthopyroxene 80% Clinopyroxene 3% Plagioclase 3% Accessory: Spinel
J14120101-01(+)	Olv-Opxite	Olivine 18% Orthopyroxene 76% Clinopyroxene 2% Plagioclase 5% Accessory: Spinel
DY181121-07	Opxite	Orthopyroxene 97% Clinopyroxene 3% Accessory: Spinel
J14120102-1(2)	Opxite	Orthopyroxene 97% Clinopyroxene 3% Accessory: Spinel
M171109-03	Gabbronorite	Orthopyroxene 30% Clinopyroxene 27% Plagioclase 43%
M171109-10	Gabbronorite	Orthopyroxene 57% Clinopyroxene 10% Plagioclase 33% Accessory: Spinel
M171109-12	Gabbronorite	Orthopyroxene 46% Clinopyroxene 14% Plagioclase 40% Accessory: Spinel

표 2. 전암 주원소(wt.%) 성분표

Lithology	Dunite			Wehrlite/Olv-Opxite			Orthopyroxenite		Gabbronorite				
Sample	Dy181121-01	Dy181121-04	Dy181121-06	J14120101-01	M171109-02	M171109-01	Dy181121-07	J14120102-1(2)	M171109-03	M171109-08	M171109-09	M171109-10	M171109-12
SiO ₂	35.04	33.23	38.51	45.37	38.66	40.35	54.97	55.29	48.70	50.93	48.36	49.70	50.79
Al ₂ O ₃	0.31	0.23	0.29	1.95	2.33	3.02	1.71	1.66	13.88	9.90	21.94	14.92	10.95
TiO ₂	0.00	bdl	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.07	0.04	0.04	0.03	0.03
Fe ₂ O ₃ *	11.08	8.00	7.83	9.86	10.19	7.59	9.85	9.74	10.18	12.26	5.77	9.55	12.05
MgO	41.50	41.42	43.62	33.08	34.08	34.05	30.02	30.54	11.96	17.56	7.52	13.01	16.32
CaO	0.09	0.06	0.11	2.41	2.73	3.52	1.78	1.62	11.29	7.29	12.84	10.24	8.56
Na ₂ O	0.19	0.19	0.19	0.22	0.18	0.18	0.19	0.16	0.90	0.54	1.17	0.74	0.55
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.34	0.11	0.55	0.21	0.03
MnO	0.17	0.13	0.11	0.17	0.13	0.15	0.21	0.20	0.16	0.21	0.10	0.16	0.21
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
LOI	10.35	15.38	7.18	6.39	11.04	11.11	0.80	0.77	2.52	1.15	1.70	1.42	0.51

표 3. 전암 미량원소(ppm) 성분표

Lithology Sample	Orthopyroxenite			Wehrlite		
	J14120102-1(2)_1	J14120102-1(2)_2	J14120102-1(2)_3	M171109-01_1	M171109-01_2	M171109-01_3
Sc	30.409	32.329	30.215	20.601	20.407	20.132
Ti	112.014	112.825	98.556	66.526	60.640	66.596
V	54.782	56.398	52.074	36.440	37.074	35.438
Cr	3887.470	3996.831	3589.923	3693.135	3598.911	3582.470
Mn	1646.909	1692.455	1593.419	1202.181	1167.090	1176.731
Co	91.982	95.992	90.483	107.394	106.255	109.459
Ni	537.044	562.765	546.920	1494.701	1503.905	1495.337
Cu	6.559	7.392	7.153	9.282	10.804	9.016
Zn	52.693	54.669	51.976	44.253	43.695	45.886
Ga	1.835	1.664	1.702	1.977	2.012	1.983
Rb	0.302	0.195	0.215	0.098	0.109	0.096
Sr	1.423	1.317	1.229	1.515	1.380	1.375
Y	0.252	0.213	0.249	0.341	0.254	0.282
Zr	0.428	0.482	0.519	0.745	0.836	0.887
Nb	0.032	0.026	0.032	0.057	0.041	0.024
Mo	0.729	0.736	0.322	0.413	0.330	0.269
Cs	0.113	0.144	0.141	0.030	0.032	0.038
Ba	2.111	1.711	1.911	1.373	1.460	1.293
La	0.597	0.562	0.538	0.572	0.517	0.536
Ce	0.154	0.155	0.152	0.179	0.195	0.160
Pr	0.018	0.019	0.018	0.023	0.026	0.022
Nd	0.088	0.086	0.081	0.127	0.114	0.102
Sm	0.038	0.031	0.035	0.051	0.034	0.046
Eu	0.014	0.015	0.013	0.027	0.016	0.021
Gd	0.045	0.035	0.041	0.060	0.047	0.045
Tb	0.010	0.007	0.007	0.013	0.010	0.011
Dy	0.051	0.047	0.053	0.076	0.053	0.081
Ho	0.015	0.014	0.015	0.017	0.017	0.018
Er	0.048	0.046	0.039	0.047	0.044	0.047
Tm	0.011	0.010	0.013	0.010	0.009	0.009
Yb	0.070	0.072	0.077	0.072	0.055	0.064
Lu	0.014	0.015	0.016	0.018	0.011	0.014
Hf	0.042	0.046	0.030	0.061	0.042	0.047
Ta	0.086	0.088	0.078	0.089	0.080	0.078
Pb	0.964	0.993	0.806	0.593	0.618	0.540
Th	0.037	0.023	0.017	0.025	0.023	0.024
U	0.018	0.015	0.093	0.036	0.031	0.026

표 3. (계속)

Gabbroiorite														
M171109-08_1	M171109-08_2	M171109-08_3	M171109-09_1	M171109-09_2	M171109-09_3	M171109-03_1	M171109-03_2	M171109-03_3	M171109-12_1	M171109-12_2	M171109-12_3	M171109-10_1	M171109-10_2	M171109-10_3
38.104	39.574	39.037	33.072	32.678	33.181	49.450	49.475	50.941	42.291	42.029	41.633	37.565	36.907	36.715
273.054	247.976	246.105	227.270	223.645	224.143	436.407	438.885	418.232	234.007	231.105	227.607	242.119	237.335	239.497
123.429	127.643	125.361	98.737	98.299	98.420	287.160	287.992	277.272	116.221	116.931	116.576	112.001	110.623	112.545
1513.670	1610.764	1563.706	194.437	197.446	198.579	539.485	540.304	529.824	1066.590	1046.850	1029.854	798.499	782.295	794.732
1624.949	1655.467	1626.906	761.648	741.624	767.287	1357.465	1361.695	1274.710	1739.388	1734.052	1730.482	1350.964	1325.595	1368.839
72.645	74.945	73.391	35.003	35.538	35.477	62.749	62.775	61.022	69.208	69.605	68.277	56.851	55.603	56.746
257.949	263.878	262.364	114.166	112.694	111.945	239.719	239.802	231.974	271.848	272.815	265.505	223.804	224.341	223.801
4.535	3.612	3.309	3.582	2.976	2.824	3.928	3.919	3.493	3.330	1.889	1.570	2.132	2.270	1.934
68.727	68.326	66.468	30.755	28.186	28.626	40.396	40.287	36.226	69.125	67.711	66.437	53.774	52.689	53.478
7.393	7.323	6.970	15.177	14.996	15.192	10.864	10.863	10.237	7.672	7.497	7.501	10.327	10.102	10.196
4.901	4.428	4.375	18.007	18.019	18.072	13.568	13.579	13.575	0.968	0.931	0.949	7.239	7.283	7.343
52.093	51.988	51.918	144.896	140.715	144.462	120.738	120.792	120.710	58.106	57.034	56.985	94.307	93.412	92.964
1.233	1.170	1.142	3.596	3.494	3.506	2.478	2.480	2.506	0.986	0.931	0.938	1.282	1.247	1.227
2.524	3.033	2.526	2.804	3.081	2.751	2.937	2.942	3.122	1.489	1.774	1.358	1.762	1.845	1.908
0.127	0.089	0.095	0.200	0.124	0.134	0.142	0.142	0.144	0.075	0.051	0.027	0.118	0.104	0.124
1.191	0.197	0.186	0.342	0.164	0.295	0.340	0.341	0.309	0.257	0.318	0.159	0.160	0.215	0.154
0.445	0.408	0.386	0.469	0.447	0.476	2.448	2.445	2.425	0.200	0.188	0.190	0.318	0.330	0.333
12.730	12.573	11.335	86.736	85.354	85.842	58.405	58.185	57.905	5.829	5.996	5.852	36.879	36.153	36.353
0.679	0.679	0.659	2.678	2.618	2.686	1.404	1.403	1.393	0.600	0.645	0.599	0.824	0.817	0.783
0.515	0.577	0.509	2.676	2.582	2.656	2.203	2.199	2.063	0.342	0.326	0.305	0.628	0.613	0.607
0.099	0.068	0.076	0.468	0.449	0.466	0.311	0.311	0.278	0.050	0.054	0.053	0.095	0.092	0.093
0.473	0.394	0.347	1.930	1.839	1.845	1.390	1.387	1.398	0.342	0.238	0.274	0.439	0.445	0.462
0.218	0.150	0.145	0.509	0.474	0.437	0.459	0.458	0.415	0.125	0.085	0.099	0.160	0.158	0.151
0.113	0.097	0.084	0.246	0.257	0.271	0.208	0.208	0.178	0.069	0.067	0.063	0.109	0.104	0.099
0.234	0.178	0.176	0.512	0.524	0.510	0.449	0.448	0.465	0.162	0.124	0.141	0.201	0.203	0.210
0.047	0.038	0.041	0.107	0.092	0.094	0.085	0.085	0.079	0.031	0.033	0.027	0.038	0.035	0.037
0.239	0.252	0.209	0.618	0.559	0.577	0.536	0.535	0.493	0.175	0.172	0.183	0.237	0.213	0.223
0.073	0.058	0.057	0.158	0.125	0.125	0.139	0.139	0.102	0.041	0.045	0.047	0.049	0.048	0.051
0.156	0.172	0.160	0.448	0.366	0.364	0.297	0.296	0.306	0.127	0.133	0.136	0.158	0.133	0.141
0.035	0.029	0.033	0.082	0.070	0.066	0.053	0.053	0.049	0.029	0.025	0.029	0.024	0.025	0.022
0.233	0.197	0.214	0.534	0.389	0.441	0.345	0.344	0.344	0.171	0.204	0.157	0.164	0.169	0.153
0.045	0.044	0.042	0.084	0.114	0.064	0.061	0.061	0.059	0.031	0.032	0.032	0.032	0.029	0.029
0.227	0.121	0.117	0.140	0.111	0.118	0.149	0.149	0.164	0.090	0.080	0.082	0.109	0.081	0.088
0.100	0.081	0.082	0.130	0.090	0.093	0.086	0.085	0.084	0.087	0.083	0.084	0.085	0.080	0.083
0.965	0.846	0.870	5.458	5.225	5.421	2.157	2.150	2.054	0.597	0.546	0.614	1.773	1.767	1.730
0.061	0.039	0.027	0.350	0.310	0.298	0.088	0.087	0.075	0.034	0.039	0.031	0.056	0.050	0.047
0.070	0.044	0.054	0.133	0.095	0.106	0.037	0.037	0.030	0.027	0.017	0.011	0.049	0.037	0.045

표 4. 감람석 주원소(wt.%) 성분표

Lithology Sample	Dunite									
	M171109-18_1	M171109-18_2	M171109-18_3	M171109-18_4	M171109-18_5	DY181121-01_1	DY181121-01_2	DY181121-01_3	DY181121-01_4	DY181121-01_5
SiO2	40.79	41.13	41.05	41.25	41.30	41.01	42.08	40.77	40.80	42.22
TiO2	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
Al2O3	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
Cr2O3	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
FeO	8.42	8.37	8.45	8.62	8.15	7.73	3.90	10.09	10.22	3.73
MnO	0.16	0.16	0.17	0.18	0.18	0.14	0.05	0.17	0.17	0.20
NiO	0.21	0.22	0.20	0.19	0.17	0.07	0.18	0.33	0.21	0.35
MgO	50.09	50.01	50.38	50.29	50.63	51.14	54.14	48.75	49.13	54.23
CaO	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.06	0.06	0.02
Na2O	0.02	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	0.01	0.02	bdl
K2O	bdl	0.01	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
TOTAL	99.70	99.90	100.26	100.54	100.46	100.08	100.38	100.19	100.61	100.76
Mg#	0.91	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92	0.96	0.90	0.90	0.96

DY181121-01_6	DY181121-06_1	DY181121-06_2	DY181121-06_3	DY181121-06_4	DY181121-06_5	DY181121-06_6	DY181121-06_7
40.77	41.88	41.77	41.42	41.43	41.61	41.84	41.85
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl
9.86	6.89	5.23	6.98	6.93	5.95	6.20	4.89
0.18	0.08	0.13	0.14	0.12	0.16	0.16	0.27
0.20	0.27	0.27	0.28	0.32	0.27	bdl	bdl
48.67	51.66	53.06	51.86	52.01	52.32	52.38	53.33
0.06	0.01	bdl	0.01	bdl	0.01	bdl	0.01
bdl	bdl	0.02	bdl	0.02	bdl	bdl	0.03
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
99.73	100.78	100.48	100.72	100.82	100.32	100.57	100.37
0.90	0.93	0.95	0.93	0.93	0.94	0.94	0.95

표 4. (계속)

Dunite										
DY181121-02_1	DY181121-02_2	DY181121-02_3	DY181121-02_4	DY181121-02_5	DY181121-02_6	DY181121-04_1	DY181121-04_2	DY181121-04_3	DY181121-04_4	DY181121-04_5
41.42	41.56	41.49	42.37	41.67	41.21	41.62	41.27	41.74	41.37	41.79
bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
7.18	7.49	7.35	4.43	7.84	7.49	7.50	7.70	7.32	7.46	7.35
0.11	0.12	0.16	0.12	0.16	0.14	0.13	0.12	0.10	0.13	0.15
0.25	0.24	0.25	0.08	0.22	0.22	0.18	0.14	0.11	0.08	0.15
51.25	50.71	50.97	53.29	50.63	50.68	50.66	50.85	50.85	50.87	51.12
0.03	0.03	0.03	bdl	0.03	0.02	0.05	0.04	0.04	0.05	0.03
bdl	0.02	0.02	0.02	bdl	bdl	0.02	0.02	bdl	0.02	0.02
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
100.25	100.16	100.30	100.35	100.55	99.75	100.15	100.13	100.16	99.98	100.61
0.93	0.92	0.93	0.96	0.92	0.92	0.92	0.92	0.93	0.92	0.93

Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite									
M171109-01_1	M171109-01_2	M171109-01_3	M171109-01_4	J14120101-01_1	J14120101-01_2	J14120101-01_3	DY181109-15_1	DY181109-15_2	DY181109-15_3
40.78	40.69	40.76	40.75	39.94	40.42	40.20	40.46	40.83	40.95
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
10.05	9.88	10.13	10.16	12.87	13.05	12.74	11.55	11.51	11.35
0.17	0.19	0.16	0.20	0.19	0.22	0.22	0.17	0.18	0.19
0.36	0.30	0.37	0.36	0.40	0.35	0.39	0.26	0.26	0.34
49.36	49.06	49.48	49.07	46.70	46.87	46.65	47.77	47.75	47.83
0.02	0.02	0.01	0.01	bdl	0.02	0.02	0.01	bdl	0.01
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
100.73	100.13	100.91	100.55	100.11	100.92	100.22	100.22	100.54	100.69
0.90	0.90	0.90	0.90	0.87	0.86	0.87	0.88	0.88	0.88

표 4. (계속)

Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite									
DY181109-15_4	DY181109-15_5	DY181109-14_1	DY181109-14_2	DY181109-14_3	DY181109-14_4	DY181109-14_5	DY181109-14_6	DY181109-14_7	DY181109-14_8
41.16	40.00	40.34	40.35	40.44	40.53	40.66	40.55	40.28	40.00
bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04
11.32	11.26	13.12	12.95	13.18	12.83	13.23	12.80	12.90	12.99
0.20	0.19	0.20	0.27	0.21	0.17	0.22	0.21	0.19	0.25
0.28	0.22	0.32	0.25	0.32	0.29	0.21	0.28	0.32	0.28
48.02	48.06	45.74	46.19	46.48	45.96	45.87	46.34	45.48	45.78
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	0.03	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl
101.00	99.74	99.74	100.05	100.65	99.80	100.24	100.19	99.23	99.37
0.88	0.88	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.87	0.86	0.86

Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite									
DY181109-14_9	DY181109-14_10	DY181109-14_11	DY181109-14_12	J-14120101-1(+)_1	J-14120101-1(+)_2	J-14120101-1(+)_3	J-14120101-1(+)_4	J-14120101-1(+)_5	J-14120101-1(+)_6
40.20	40.19	40.07	40.06	40.70	40.14	40.15	40.40	39.72	39.28
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	bdl
12.94	12.89	12.80	13.10	12.26	12.37	12.22	12.07	12.54	12.41
0.16	0.20	0.22	0.27	0.22	0.14	0.19	0.22	0.25	0.22
0.34	0.28	0.32	0.23	0.41	0.32	0.42	0.36	0.35	0.37
46.23	46.23	46.01	45.97	46.84	46.56	46.77	46.79	46.55	45.84
0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	bdl	0.02	0.02	bdl
bdl	bdl	0.02	0.02	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl
0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl
99.91	99.81	99.45	99.66	100.45	99.54	99.83	99.87	99.43	98.13
0.86	0.86	0.87	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87

표 4. (계속)

Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite						
M171109-02_1	M171109-02_2	M171109-02_3	M171109-02_4	M171109-02_5	M171109-02_6	M171109-02_7
40.32	39.98	39.96	40.38	40.21	40.02	40.18
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
11.65	11.16	11.32	11.86	11.69	12.11	12.00
0.17	0.19	0.20	0.19	0.18	0.23	0.20
0.31	0.28	0.34	0.28	0.34	0.26	0.27
47.06	47.17	46.68	46.73	46.62	47.00	47.05
0.02	bdl	0.02	0.02	0.02	bdl	0.03
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl
99.53	98.78	98.52	99.46	99.06	99.61	99.74
0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.87	0.87

극지연구소

표 5. 침정석 주원소(wt.%) 성분표

Lithology Sample	Dunite									
	M171109-18_1	M171109-18_2	M171109-18_3	M171109-18_4	M171109-18_5	M171109-18_6	DY181121-01_1	DY181121-01_2	DY181121-01_3	DY181121-01_4
SiO2	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl
TiO2	0.10	0.06	0.05	0.10		0.14	0.04	0.03	0.04	0.05
Al2O3	16.51	18.03	17.97	18.33	20.96	18.63	16.72	20.38	17.86	17.51
Cr2O3	49.94	48.42	49.19	48.80	46.21	48.41	49.10	43.58	47.47	46.96
V2O3							bdl	0.15	0.10	bdl
FeO	23.16	21.41	22.34	22.16	22.06	21.00	24.23	25.53	24.92	25.15
MnO	0.42	0.29	0.26	0.32	0.31	0.34	0.36	0.28	0.34	0.32
MgO	8.83	9.75	9.62	9.07	10.05	9.82	9.42	9.82	9.32	9.14
CaO	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
Na2O	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl
K2O	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
TOTAL	98.96	97.96	99.43	98.84	99.62	98.42	99.86	99.80	100.05	99.13
Mg#	0.40	0.45	0.43	0.42	0.45	0.45	0.41	0.41	0.40	0.39
Cr#	0.57	0.64	0.65	0.64	0.60	0.64	0.66	0.59	0.64	0.64

Dunite									
DY181121-01_5	DY181121-01_6	DY181121-06_1	DY181121-06_2	DY181121-06_3	DY181121-06_4	DY181121-06_5	DY181121-06_6	DY181121-06_7	DY181121-02_1
bdl	bdl	0.04	bdl	0.02	0.03	bdl	0.06	bdl	0.03
0.03	0.04	0.04	0.06		0.06	0.06	0.04	0.09	0.03
17.03	17.28	8.50	8.48	8.04	9.13	8.78	8.61	9.49	13.57
47.68	47.62	59.89	59.69	59.98	59.70	59.55	59.11	60.11	53.53
0.22	bdl	bdl	0.12	bdl	bdl	0.12	bdl	bdl	bdl
24.59	25.16	22.28	22.57	24.98	22.46	22.68	23.07	20.75	21.77
0.35	0.33	0.37	0.33	0.45	0.36	0.24	0.36	0.39	0.39
9.33	9.18	8.77	8.00	6.57	8.34	8.58	8.27	9.36	9.90
bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.03	bdl	bdl	0.02	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
99.23	99.62	99.89	99.23	100.06	100.10	100.01	99.54	100.21	99.21
0.40	0.39	0.41	0.39	0.32	0.40	0.40	0.39	0.45	0.48
0.65	0.65	0.83	0.82	0.83	0.81	0.82	0.82	0.81	0.70

표 5. (계속)

Dunite									
DY181121-02_2	DY181121-02_3	DY181121-02_4	DY181121-02_5	DY181121-02_6	DY181121-02_7	DY181121-02_8	DY181121-02_9	DY181121-04_1	DY181121-04_2
0.02	0.03	0.03	bdl	0.03	0.04	bdl	0.17	0.04	bdl
0.05	0.04	0.08	0.07	0.05	0.04	0.07	0.08	0.06	0.05
13.91	13.45	14.07	13.90	14.79	16.62	14.57	14.75	9.42	9.58
53.15	53.99	53.60	53.29	54.97	52.25	54.29	53.13	55.36	56.75
bdl	bdl	0.10	0.15	bdl	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl
22.06	21.11	20.93	21.73	18.78	19.07	20.07	20.56	26.68	24.00
0.32	0.35	0.38	0.36	0.36	0.29	0.35	0.29	0.46	0.42
9.89	10.18	9.74	9.80	10.56	10.63	10.12	9.81	7.12	8.21
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
99.41	99.14	98.92	99.30	99.52	98.95	99.48	98.92	99.15	99.00
0.48	0.50	0.48	0.48	0.51	0.51	0.49	0.48	0.41	0.41
0.69	0.70	0.70	0.69	0.71	0.67	0.70	0.69	0.75	0.76

Dunite			
DY181121-04_3	DY181121-04_4	DY181121-04_5	DY181121-04_6
0.03	0.06	0.03	0.06
0.04	0.06	0.09	0.04
9.55	8.81	9.11	9.30
56.83	57.26	57.53	57.93
bdl	0.15	0.10	bdl
23.79	24.51	23.40	22.63
0.37	0.41	0.43	0.39
8.41	8.24	8.56	8.49
bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl
99.03	99.49	99.26	98.84
0.42	0.42	0.43	0.43
0.76	0.77	0.77	0.78

표 5. (계속)

Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite									
M171109-01_1	M171109-01_2	M171109-01_3	J14120101-1_1	J14120101-1_2	DY181109-15_1	DY181109-15_2	DY181109-15_3	DY181109-15_4	DY181109-15_5
bdl	0.04	0.04	bdl	bdl	0.04	bdl	0.03	0.03	bdl
0.05		0.04	0.10	0.06	0.05	0.05	0.08	0.04	0.03
17.15	25.81	25.20	21.21	23.26	25.71	26.34	21.86	27.43	26.64
51.20	41.37	41.29	43.37	40.83	41.59	40.21	44.71	39.69	41.88
					0.13	0.18	0.17	0.13	0.18
20.45	20.19	21.34	25.91	25.12	22.89	24.01	23.47	23.20	21.55
0.34	0.29	0.34	0.37	0.33	0.30	0.35	0.40	0.30	0.36
10.42	11.41	10.35	8.20	8.80	9.14	8.35	8.61	9.22	10.38
bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	0.02	bdl
bdl	bdl	0.04	0.03	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
99.60	99.11	98.64	99.20	98.40	99.84	99.53	99.34	100.06	101.01
0.48	0.50	0.46	0.36	0.38	0.42	0.38	0.40	0.41	0.46
0.67	0.52	0.52	0.58	0.54	0.52	0.50	0.58	0.49	0.51

Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite									
DY181109-15_6	DY181109-15_7	DY181109-15_8	DY181109-14_1	DY181109-14_2	DY181109-14_3	DY181109-14_4	DY181109-14_5	DY181109-14_6	DY181109-14_7
bdl	bdl	0.04	0.06	0.11	0.10	0.09	0.08	0.10	0.05
0.08	0.04	0.03	0.04	0.08	0.10	0.09	0.05	0.08	0.06
22.90	25.98	26.48	24.26	27.11	26.32	24.62	23.89	24.69	16.93
44.66	41.85	41.11	41.72	38.75	39.42	40.70	41.71	40.36	48.54
0.16	0.14	bdl	0.27	0.09	0.32	0.25	0.13	0.22	0.11
22.19	22.87	22.61	23.53	23.82	23.65	25.17	25.36	24.93	25.02
0.32	0.28	0.36	0.32	0.29	0.25	0.40	0.32	0.40	0.38
9.71	10.01	9.59	9.09	8.65	9.62	8.30	8.40	8.14	8.01
0.01	0.01	0.02	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	0.02	0.03	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
100.04	101.19	100.23	99.30	98.90	99.81	99.64	99.96	98.92	99.10
0.44	0.44	0.43	0.43	0.40	0.44	0.39	0.40	0.39	0.39
0.57	0.52	0.51	0.52	0.48	0.49	0.51	0.52	0.51	0.63

표 5. (계속)

Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite									
DY181109-14_8	DY181109-14_9	DY181109-14_10	DY181109-14_11	DY181109-14_12	DY181109-14_13	J14120101-1(+)_1	J14120101-1(+)_2	J14120101-1(+)_3	J14120101-1(+)_4
0.12	0.08	0.12	0.06	0.09	0.09	0.04	0.10	0.08	0.07
0.09	0.07	0.10	0.06	bdl	0.09	0.06	bdl	bdl	0.10
26.66	26.27	24.47	28.44	25.41	24.41	26.45	27.27	28.43	26.39
39.85	40.00	41.47	38.52	40.16	41.17	39.22	38.93	38.72	39.25
0.26									
22.82	24.56	24.73	22.23	23.96	23.73	25.06	24.20	23.59	25.55
0.38	0.37	0.34	0.29	0.32	0.40	0.30	0.36	0.37	0.34
9.15	8.27	8.15	9.64	8.14	8.55	8.32	8.21	9.34	8.34
0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl
bdl	bdl	0.05	bdl	0.06	bdl	0.07	0.06	bdl	bdl
bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01
99.37	99.63	99.42	99.24	98.13	98.44	99.54	99.17	100.53	100.05
0.43	0.51	0.53	0.48	0.51	0.53	0.50	0.49	0.48	0.50
0.49	0.38	0.37	0.44	0.38	0.39	0.37	0.38	0.41	0.37

Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite								
J14120101-1(+)_5	J14120101-1(+)_6	J14120101-1(+)_7	M171109-02_1	M171109-02_2	M171109-02_3	M171109-02_4	M171109-02_5	M171109-02_6
0.11	0.13	0.08	0.04	0.06	0.08	0.11	0.04	0.10
0.08	0.07	0.10	0.06	0.07	0.03	bdl	0.05	0.06
25.00	26.82	25.88	20.06	19.16	23.59	28.78	26.60	28.14
39.30	40.32	40.04	47.07	48.81	44.42	39.29	40.81	38.85
26.44	23.27	24.13	21.95	21.62	21.56	22.52	22.69	22.81
0.40	0.26	0.34	0.35	0.36	0.33	0.42	0.33	0.31
7.22	9.77	8.73	9.14	9.20	9.99	9.59	9.43	9.27
0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	0.02	bdl	0.02
0.04	0.04	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
98.60	100.69	99.33	98.67	99.29	100.05	100.72	99.98	99.55
0.51	0.50	0.51	0.61	0.63	0.56	0.48	0.51	0.48
0.33	0.43	0.39	0.43	0.43	0.45	0.43	0.43	0.42

표 5. (계속)

Orthopyroxenite				Gabbronorite					
J14120102-1(2)_1	J14120102-1(2)_2	DY181121-07_1	DY181121-07_2	M171109-08_1	M171109-08_2	M171109-08_3	M171109-08_4	M171109-10_1	M171109-10_2
0.09	bdl	0.09	0.06	0.05	0.10	0.12	0.11	0.11	0.09
0.09	0.05	0.11	0.04	0.71	0.79	0.66	0.81	1.22	1.03
19.85	20.32	20.73	19.32	12.61	10.11	10.21	12.69	11.44	11.47
45.26	44.09	41.03	43.66	35.45	33.58	37.43	34.85	29.06	33.94
		0.23	0.20						
25.05	25.31	30.94	29.42	45.81	50.12	45.89	45.71	52.72	46.49
0.26	0.31	0.35	0.48	0.41	0.43	0.44	0.44	0.59	0.34
8.43	8.12	5.98	6.24	1.89	0.93	1.78	2.67	0.57	2.04
bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	0.04	0.02	bdl	0.10	0.03
0.07	0.04	0.02	bdl	0.04	0.05	0.05	0.04	0.08	0.05
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl
99.10	98.24	99.54	99.41	96.97	96.16	96.59	97.31	95.88	95.49
0.37	0.36	0.26	0.27	0.07	0.03	0.06	0.03	0.02	0.07
0.60	0.59	0.57	0.60	0.65	0.69	0.71	0.65	0.63	0.66

Gabbronorite					
M171109-03_1	M171109-03_2	M171109-03_3	M171109-03_4	M171109-12_1	M171109-12_2
0.12	0.16	0.11	0.15	0.11	0.08
1.60	1.42	1.63	2.11	1.27	0.95
7.54	7.82	7.57	5.17	9.81	10.89
37.03	37.28	37.65	32.43	23.59	31.61
46.16	45.79	45.70	48.08	58.23	50.29
0.47	0.50	0.47	0.44	0.38	0.34
0.67	0.70	0.73	0.50	1.24	1.89
0.05	0.04	0.03	0.39	0.04	0.01
0.05	0.04	0.05	bdl	0.07	0.05
bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl
93.70	93.78	93.93	89.29	94.74	96.11
0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.06
0.77	0.76	0.77	0.81	0.62	0.66

표 6. 단사회석 주원소(wt.%) 성분표

Lithology	Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite										
	Sample	M171109-01_1	M171109-01_2	M171109-01_3	M171109-01_4	M171109-01_5	J14120101-01_1	J14120101-01_2	DY181109-14_1	DY181109-14_2	DY181109-14_3
SiO2		54.37	54.41	53.67	54.14	53.38	54.61	53.96	55.00	55.03	55.61
TiO2		bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	0.06	bdl	bdl
Al2O3		1.07	1.06	1.33	0.96	1.46	1.14	1.21	1.21	1.52	0.96
Cr2O3		0.39	0.43	0.62	0.37	0.72	0.38	0.45	0.35	0.46	0.33
FeO		1.87	1.86	1.98	1.94	1.89	2.55	2.69	2.44	2.56	2.24
MnO		0.08	0.14	0.06	0.06	0.07	0.11	0.14	0.09	0.07	0.14
MgO		18.13	17.84	17.52	17.78	17.57	17.49	17.20	17.54	17.48	17.42
CaO		24.74	24.80	24.56	25.05	24.33	24.58	24.45	24.33	24.10	24.42
Na2O		0.07	0.07	0.12	0.09	0.09	0.10	0.13	0.10	0.16	0.10
K2O		bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl
TOTAL		100.72	100.64	99.86	100.40	99.50	101.01	100.21	101.12	101.38	101.23
Mg#		0.95	0.94	0.94	0.94	0.94	0.92	0.92	0.93	0.92	0.93

Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite										
	DY181109-14_4	DY181109-14_5	DY181109-14_6	DY181109-14_7	DY181109-14_8	J14120101-01(+)_1	J14120101-01(+)_2	J14120101-01(+)_3	M171109-02_1	M171109-02_2
	54.91	54.69	53.83	54.03	54.06	54.17	54.43	55.07	54.06	54.22
	0.04	0.05	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.06	bdl
	1.09	1.71	1.57	0.94	1.04	1.18	1.54	0.76	1.01	1.23
	0.35	0.82	0.58	0.33	0.37	0.39	0.37	0.26	0.33	0.53
	2.32	2.61	2.62	2.25	2.31	2.35	2.26	2.05	1.96	2.14
	0.09	0.10	0.09	0.10	0.11	0.13	0.05	0.12	0.15	0.06
	17.60	17.38	17.36	17.22	17.21	17.08	17.97	17.68	17.14	17.35
	24.23	23.59	24.14	24.67	24.42	24.50	23.34	24.85	24.76	24.29
	0.08	0.18	0.15	0.12	0.11	0.10	0.15	0.05	0.05	0.10
	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
	100.71	101.12	100.37	99.66	99.62	99.89	100.12	100.84	99.51	99.93
	0.93	0.92	0.92	0.93	0.93	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94

표 6. (계속)

Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite							
M171109-02_3	M171109-02_4	M171109-02_5	M171109-02_6	M171109-02_7	M171109-02_8	M171109-02_9	M171109-02_10
54.24	54.14	54.53	54.00	54.22	53.85	54.36	54.58
bdl	bdl	0.04	bdl	0.04	0.05	0.04	bdl
1.04	1.14	1.20	1.06	1.13	0.92	1.00	0.71
0.42	0.41	0.38	0.39	0.38	0.33	0.34	0.26
2.20	2.35	2.33	2.29	2.16	2.10	2.23	2.10
0.10	0.11	0.19	0.05	0.14	0.09	0.12	0.08
17.45	17.38	17.61	17.54	17.60	17.62	17.56	17.53
24.64	24.51	24.50	24.45	24.46	24.64	24.50	24.74
0.10	0.12	0.12	0.11	0.13	0.10	0.11	0.07
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
100.20	100.17	100.91	99.89	100.26	99.71	100.26	100.07
0.93	0.93	0.93	0.93	0.94	0.94	0.93	0.94

Orthopyroxenite									
J14120102-1(2)_1	J14120102-1(2)_2	J14120102-1(2)_3	J14120102-1(2)_4	J14120102-1(2)_5	J14120102-1(2)_6	DY181121-07_1	DY181121-07_2	DY181121-07_3	DY181121-07_4
53.59	53.58	53.59	53.37	53.37	53.27	53.56	52.98	53.49	52.84
0.05	0.04	0.04	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	0.06
1.45	1.43	1.32	1.44	1.51	1.66	0.80	1.34	1.67	1.52
0.67	0.73	0.54	0.59	0.71	0.74	0.32	0.61	0.67	0.68
3.16	2.79	2.72	2.85	2.98	3.01	2.60	2.66	2.88	2.91
0.19	0.08	0.11	0.16	0.15	0.11	0.09	0.05	0.07	0.08
17.12	17.16	17.16	17.14	17.12	17.10	17.21	16.99	16.90	17.24
23.92	24.36	24.28	24.27	24.01	23.71	24.51	24.54	24.01	24.07
0.16	0.10	0.13	0.12	0.15	0.12	0.05	0.06	0.18	0.13
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
100.31	100.27	99.90	99.98	100.00	99.73	99.15	99.23	99.93	99.54
0.91	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92	0.91	0.91

표 6. (계속)

Orthopyroxenite	Gabbronorite								
DV181109-06A/B_1	M171109-08_1	M171109-08_2	M171109-08_3	M171109-10_1	M171109-10_2	M171109-10_3	M171109-10_4	M171109-03_1	M171109-03_2
53.25	53.66	53.44	53.45	53.07	53.07	52.92	53.00	53.35	52.98
0.06	0.08	0.11	0.10	0.06	bdl	0.08	0.08	0.07	0.10
0.88	1.54	1.39	1.41	1.35	1.25	1.38	1.29	0.52	0.75
0.06	0.30	0.29	0.33	0.19	0.36	0.20	0.19	0.12	0.13
20.15	5.80	6.12	6.58	6.25	5.97	6.24	6.45	6.63	7.17
0.35	0.16	0.15	0.15	0.25	0.16	0.23	0.21	0.13	0.17
23.41	15.72	15.63	15.73	15.46	15.52	15.15	15.80	15.29	14.97
0.62	23.21	23.10	22.49	22.54	23.25	23.00	22.73	23.81	23.06
bdl	0.23	0.21	0.26	0.18	0.21	0.26	0.19	0.10	0.13
bdl	0.01	bdl	0.01	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl
98.78	100.70	100.44	100.52	99.36	99.80	99.47	99.94	100.02	99.46
0.67	0.83	0.82	0.81	0.82	0.82	0.81	0.81	0.80	0.79

Gabbronorite									
M171109-03_3	M171109-03_4	M171109-03_5	M171109-03_6	M171109-03_7	M171109-12_1	M171109-12_2	M171109-12_3	M171109-12_4	M171109-09_1
53.39	53.21	53.16	53.20	53.38	52.85	52.98	53.33	52.99	53.35
0.14	0.10	0.12	0.18	0.11	bdl	0.08	0.10	0.08	0.05
0.80	0.95	0.94	0.90	0.75	1.52	1.60	1.26	1.61	0.53
0.06	0.10	0.06	0.04	0.10	0.19	0.28	0.27	0.31	0.09
6.90	7.03	7.81	7.14	6.72	6.80	6.88	6.16	6.58	7.21
0.13	0.18	0.24	0.20	0.12	0.12	0.10	0.17	0.12	0.20
15.40	15.02	15.18	15.25	15.51	15.20	15.16	15.54	15.28	14.32
22.97	23.09	22.36	22.92	22.86	22.49	22.72	23.02	22.69	24.05
0.17	0.18	0.17	0.17	0.18	0.25	0.25	0.26	0.28	0.17
bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
99.96	99.85	100.04	100.01	99.74	99.42	100.04	100.12	99.94	99.97
0.80	0.79	0.78	0.79	0.80	0.80	0.80	0.82	0.81	0.78

표 6. (계속)

Pegmatitic Gabbronorite									
J14120101-2_1	J14120101-2_2	J14120101-2_3	J14120101-2_4	J14120101-2_5	J14120101-2_6	J14120101-2_7	J14120101-2_8	J14120101-2_9	M171109-06_1
53.08	52.75	52.64	52.55	52.77	52.63	52.79	52.98	52.90	53.11
0.08	0.07	0.16	0.06	0.12	0.10	0.07	0.14	0.14	bdl
1.36	1.74	0.89	1.44	1.07	0.90	1.28	0.73	0.90	0.28
0.08	0.08	0.05	0.07	0.07	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl
7.60	8.14	8.89	8.75	8.63	8.34	7.86	8.72	8.62	8.03
0.22	0.26	0.23	0.22	0.30	0.24	0.19	0.31	0.24	0.22
14.58	13.94	14.63	14.56	14.07	14.34	14.40	14.67	14.55	13.96
22.93	22.63	22.09	21.89	22.91	22.67	22.80	22.36	22.28	23.75
0.17	0.21	0.20	0.19	0.19	0.16	0.14	0.14	0.19	0.06
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
100.10	99.82	99.78	99.73	100.13	99.39	99.54	100.05	99.83	99.41
0.77	0.75	0.75	0.75	0.74	0.75	0.77	0.75	0.75	0.76

Pegmatitic Gabbronorite			
M171109-06_2	M171109-06_3	M171109-06_4	M171109-06_5
53.11	50.27	52.68	53.48
bdl	0.31	0.13	bdl
0.28	5.78	1.06	0.93
bdl	0.07	bdl	0.05
8.03	10.82	7.95	18.65
0.22	0.14	0.19	0.41
13.96	15.60	14.04	24.33
23.75	11.92	22.83	0.63
0.06	0.72	0.18	bdl
bdl	0.29	bdl	bdl
99.41	95.92	99.06	98.48
0.76	0.72	0.76	0.70

표 7. 단사회석 미량원소(ppm) 성분표

Lithology Sample	Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite									
	M171109-01_1	M171109-01_2	DY181109-14_1	DY181109-14_2	DY181109-14_3	DY181109-14_4	DY181109-14_5	DY181109-14_6	M171109-02_1	M171109-02_2
Sc	59.322	65.465	78.680	68.093	75.607	69.678	80.032	83.245	82.226	66.673
Ti	176.931	147.476	193.414	107.689	206.224	126.295	173.281	169.444	203.043	128.880
Cr	8341.184	8074.892	5251.821	6363.183	3548.162	3419.431	6855.820	7833.576	6718.908	7107.269
Fe	6685.120	6079.769	4649.996	4818.648	5063.615	4216.244	4903.333	5282.530	7907.253	4706.539
Ni	339.337	288.437	252.136	208.760	243.206	242.458	312.983	344.923	311.719	276.586
Cu	0.739	0.486	0.416	0.434	1.768	1.516	0.636	0.919	1.303	3.101
Rb	0.009	0.042	0.038	0.015	0.054	bdl	0.061	bdl	0.228	0.069
Sr	3.158	3.696	4.829	4.849	5.564	4.904	5.705	5.626	4.419	3.659
Y	0.805	1.022	1.062	0.809	1.543	0.844	1.202	1.141	1.297	1.017
Zr	4.154	2.564	2.125	1.491	3.479	1.488	2.264	2.562	3.169	2.197
Nb	0.022	0.027	0.012	0.010	0.043	0.011	0.040	0.032	0.092	0.046
Cs	0.011	0.005	0.012	0.004	0.019	bdl	bdl	bdl	0.187	0.047
Ba	0.092	0.658	1.140	0.324	1.372	0.459	1.131	0.994	2.819	0.627
La	0.116	0.178	0.177	0.206	0.225	0.266	0.345	0.341	0.295	0.226
Ce	0.445	0.514	0.527	0.465	0.792	0.618	0.743	0.720	0.745	0.633
Pr	0.072	0.078	0.079	0.066	0.126	0.085	0.108	0.097	0.105	0.080
Nd	0.321	0.399	0.361	0.307	0.684	0.383	0.518	0.484	0.493	0.423
Sm	0.122	0.141	0.126	0.091	0.236	0.144	0.173	0.149	0.145	0.147
Eu	0.033	0.038	0.035	0.035	0.074	0.041	0.046	0.052	0.052	0.050
Gd	0.154	0.165	0.159	0.112	0.270	0.129	0.179	0.177	0.221	0.182
Tb	0.025	0.029	0.029	0.023	0.046	0.023	0.030	0.031	0.033	0.029
Dy	0.154	0.184	0.192	0.144	0.302	0.150	0.221	0.217	0.222	0.180
Ho	0.037	0.040	0.043	0.032	0.064	0.036	0.047	0.041	0.051	0.038
Er	0.104	0.127	0.135	0.100	0.184	0.117	0.151	0.143	0.159	0.131
Tm	0.016	0.020	0.019	0.017	0.026	0.018	0.021	0.020	0.026	0.023
Yb	0.112	0.151	0.159	0.123	0.188	0.137	0.178	0.170	0.179	0.144
Lu	bdl	0.024	0.023	0.021	0.030	0.021	0.030	0.026	0.028	0.023
Hf	0.161	0.059	0.099	0.062	0.145	0.043	0.072	0.064	0.113	0.049
Ta	0.003	0.004	bdl	0.004	0.004	0.002	bdl	0.004	0.005	0.003
Pb	0.073	bdl	0.069	0.152	0.208	0.445	0.121	0.137	0.261	0.049
Th	0.082	0.114	0.182	0.114	0.084	0.135	0.644	0.642	0.028	0.073
U	0.016	0.022	0.089	0.071	0.066	0.097	0.179	0.202	0.021	0.047

표 7. (계속)

Wehrlite/Olv-orthopyroxenite									
M171109-02_3	M171109-02_4	M171109-02_5	M171109-02_6	M171109-02_7	M171109-02_8	J14120101-01(+)_1	J14120101-01(+)_2	J14120101-01(+)_3	J14120101-01_1
67.354	83.889	66.432	64.541	62.807	67.855	76.927	95.113	92.006	64.691
128.682	215.560	139.936	142.514	125.444	133.308	321.016	351.386	402.047	181.795
6697.220	3632.060	2007.420	7352.472	3620.029	6844.413	8209.448	11631.901	5511.778	7118.517
4206.720	3459.715	2976.897	4036.894	2798.877	3111.943	7781.311	11463.183	6402.111	7366.915
283.956	294.469	207.519	278.971	221.803	248.599	329.673	544.530	321.201	339.651
1.841	15.885	0.547	2.489	27.444	0.605	bdl	0.970	0.722	0.561
0.128	0.149	0.060	0.229	0.302	bdl	0.185	0.235	0.147	0.191
3.938	4.774	3.287	3.119	4.140	3.341	5.123	5.493	4.892	4.476
1.159	1.501	0.998	0.898	0.922	1.137	2.391	2.556	2.621	1.227
3.035	4.141	2.572	2.627	2.223	3.368	7.048	8.114	8.066	2.425
0.057	0.150	0.005	0.022	bdl	0.021	0.085	0.086	0.049	0.018
0.032	bdl	bdl	0.039	bdl	bdl	0.199	0.365	0.066	0.431
1.533	3.206	0.422	1.625	2.580	0.061	1.743	2.231	1.397	0.462
0.258	0.346	0.190	0.186	0.207	0.193	0.310	0.299	0.294	0.220
0.669	0.930	0.518	0.508	bdl	0.572	1.141	1.051	0.940	0.734
0.097	0.129	0.082	0.073	bdl	0.083	0.205	0.206	0.157	0.122
0.487	0.613	0.406	0.383	0.380	0.423	1.158	1.138	0.906	0.619
0.179	0.187	0.134	0.123	bdl	0.138	0.337	0.392	0.357	0.198
0.044	0.058	0.042	0.035	bdl	0.041	0.091	0.083	0.086	0.057
0.179	0.211	0.162	0.144	0.147	0.166	0.412	0.479	0.391	0.224
0.030	0.038	0.028	0.024	0.023	0.027	0.070	0.077	0.075	0.036
0.205	0.278	0.184	0.175	0.139	0.156	0.426	0.466	0.472	0.234
0.046	0.058	0.040	0.035	0.033	0.042	0.091	0.110	0.100	0.047
0.148	0.183	0.113	0.120	0.106	0.143	0.265	0.316	0.299	0.150
0.018	0.027	0.018	0.015	bdl	0.020	0.036	0.036	0.049	0.022
0.174	0.190	0.121	0.132	0.119	0.159	0.266	0.301	0.311	0.163
0.025	0.034	0.025	0.022	0.015	0.026	0.038	0.043	0.047	0.022
0.068	0.129	0.108	0.115	0.070	0.104	0.220	0.248	0.394	0.111
0.003	0.006	bdl	bdl	bdl	0.002	0.007	0.009	0.005	0.013
0.235	0.244	0.061	0.245	0.462	0.086	0.043	0.243	0.028	0.097
0.088	0.022	0.005	0.033	bdl	0.151	0.040	0.102	0.024	0.064
0.028	0.019	0.032	0.026	bdl	0.040	0.011	0.024	0.011	0.017

표 7. (계속)

Orthopyroxenite					Gabbronorite				
D181121-07_1	D181121-07_2	D181121-07_3	J14120102-1(2)_1	J14120102-1(2)_2	M171109-03_1	M171109-03_2	M171109-03_3	M171109-08_1	M171109-08_2
59.144	59.497	60.382	55.165	55.300	129.219	121.814	155.975	108.326	106.993
139.946	146.523	125.317	110.413	110.979	637.212	450.102	684.101	380.675	337.112
3710.367	4319.068	4168.347	4531.848	4078.622	653.912	962.801	460.488	2127.980	1986.327
5576.292	5006.468	4084.494	3241.846	2635.985	14174.310	15966.224	17770.549	12968.146	10800.633
210.214	228.024	213.697	218.209	229.260	242.369	246.249	257.719	203.165	192.904
0.703	0.462	0.526	0.844	0.403	1.927	3.177	0.485	0.550	1.447
0.041	0.021	0.035	0.024	0.016	0.447	0.080	0.171	0.020	0.055
3.262	2.458	2.747	3.054	2.685	4.130	3.723	4.554	5.125	5.795
0.813	0.949	0.919	0.863	0.831	7.282	5.878	6.958	4.659	4.520
1.079	0.986	1.054	0.904	0.790	7.077	4.937	6.119	8.022	8.509
0.009	0.010	0.013	0.007	0.009	0.041	0.014	0.047	0.008	0.012
0.006	0.004	0.011	0.025	bdl	0.049	0.010	0.059	bdl	0.014
0.456	0.105	0.234	0.198	0.040	4.497	0.337	0.913	0.020	0.578
0.051	0.054	0.054	0.030	0.017	0.485	0.354	0.426	0.234	0.207
0.110	0.136	0.128	0.096	0.064	2.604	2.044	2.445	1.188	1.102
0.022	0.019	0.018	0.018	0.014	0.537	0.441	0.484	0.254	0.221
0.103	0.122	0.117	0.096	0.074	3.118	2.578	2.928	1.570	1.390
0.064	0.049	0.060	0.056	0.041	1.158	0.903	1.161	0.658	0.604
0.023	0.023	0.024	0.027	0.020	0.094	0.089	0.096	0.131	0.136
0.107	0.122	0.102	0.090	0.086	1.391	1.128	1.365	0.833	0.795
0.022	0.024	0.023	0.026	0.026	0.240	0.189	0.224	0.148	0.139
0.163	0.182	0.164	0.149	0.136	1.472	1.194	1.405	0.917	0.911
0.032	0.040	0.038	0.039	0.036	0.308	0.248	0.285	0.183	0.205
0.101	0.118	0.113	0.116	0.115	0.838	0.691	0.798	0.540	0.497
0.016	0.017	0.017	0.022	0.015	0.120	0.097	0.120	0.068	0.069
0.104	0.116	0.099	0.102	0.123	0.811	0.655	0.784	0.474	0.483
0.014	0.017	0.018	0.018	0.013	0.119	0.101	0.121	0.070	0.067
0.053	0.061	0.054	0.052	0.048	0.364	0.254	0.280	0.356	0.344
bdl	bdl	bdl	0.004	bdl	0.015	0.002	0.013	0.002	0.009
0.302	0.098	0.283	0.188	0.088	1.794	0.377	0.808	0.066	0.308
0.005	bdl	bdl	0.010	0.002	0.096	0.058	0.086	0.013	0.010
0.004	0.005	0.007	0.013	0.001	0.058	0.036	0.049	0.007	0.006

표 7. (계속)

Pegmatitic gabbronorite									
M171109-08_3	M171109-12_1	M171109-12_2	J-14120101-2_1	J-14120101-2_2	J-14120101-2_3	J-14120101-2_4	J-14120101-2_5	J-14120101-2_6	J-14120101-2_7
103.531	111.141	106.324	115.474	132.728	144.312	149.648	113.874	145.541	134.341
347.094	283.817	262.134	541.022	622.096	712.674	974.016	419.944	572.660	679.294
1879.300	1620.517	1426.212	502.680	396.288	300.702	299.787	491.457	189.841	315.244
10167.707	10231.733	9431.480	16673.427	15303.860	16592.642	17467.182	15046.917	17182.049	17155.382
202.617	210.142	200.647	165.659	134.471	142.463	155.063	143.022	149.844	140.236
0.666	0.497	0.344	0.828	0.447	0.628	1.469	0.378	0.286	6.559
0.091	0.039	0.021	0.177	1.042	0.149	0.082	0.086	bdl	0.168
5.196	5.916	4.857	4.526	6.402	8.278	8.866	3.605	6.843	8.085
4.470	3.729	3.478	5.610	11.466	19.473	28.488	3.070	10.795	13.939
8.209	4.845	4.440	5.736	16.529	14.851	20.472	3.752	15.296	17.931
0.007	0.023	0.003	0.110	0.057	0.020	0.022	0.075	0.028	0.013
0.027	0.015	0.007	0.133	0.037	0.030	0.042	0.016	bdl	0.078
0.167	0.092	0.054	0.524	9.544	1.606	0.838	0.246	0.626	2.056
0.223	0.163	0.144	3.328	4.800	4.632	7.471	1.408	5.390	4.851
1.191	0.759	0.688	10.710	19.957	20.532	36.555	2.866	21.991	21.486
0.249	0.172	0.139	1.361	3.308	3.806	6.621	0.275	3.341	3.678
1.498	0.998	0.950	5.246	15.123	19.615	32.407	1.300	14.026	16.824
0.606	0.480	0.448	1.059	3.545	5.613	7.970	0.439	3.074	3.930
0.135	0.110	0.108	0.198	0.348	0.474	0.631	0.147	0.419	0.514
0.850	0.652	0.587	0.986	2.843	4.833	6.348	0.578	2.440	3.267
0.149	0.120	0.107	0.161	0.421	0.766	0.993	0.095	0.384	0.504
0.890	0.732	0.682	1.019	2.432	4.371	5.772	0.604	2.163	2.892
0.192	0.148	0.142	0.216	0.444	0.754	1.070	0.124	0.405	0.544
0.502	0.409	0.400	0.662	1.231	2.012	2.930	0.354	1.129	1.498
0.070	0.061	0.052	0.107	0.161	0.253	0.398	0.059	0.157	0.199
0.481	0.423	0.379	0.707	1.091	1.580	2.538	0.410	1.014	1.286
0.069	0.064	0.059	0.098	0.143	0.212	0.332	0.072	0.157	0.183
0.348	0.229	0.216	0.187	0.440	0.605	0.710	0.155	0.484	0.644
0.001	0.003	bdl	0.023	0.023	0.010	0.012	0.021	0.009	0.016
0.077	0.064	0.023	0.545	0.652	0.767	0.937	0.595	1.012	0.921
0.013	0.039	0.033	0.277	0.163	0.173	0.159	0.150	0.128	0.223
0.010	0.019	0.016	0.100	0.064	0.055	0.055	0.074	0.049	0.054

표 7. (계속)

Pegmatitic gabbroiorite					
J-14120101-2_8	J-14120101-2_9	M171109-06_1	M171109-06_2	M171109-06_3	M171109-06_4
121.958	129.751	118.376	115.369	139.527	145.290
539.502	813.286	947.993	432.034	610.969	898.761
551.816	393.312	617.656	271.268	302.544	1029.731
17979.747	17090.285	22018.820	19487.963	24245.509	30233.794
148.918	142.856	157.543	134.624	161.995	229.835
0.741	0.440	1.217	2.149	0.378	2.039
0.236	bdl	1.098	0.039	0.059	1.226
4.181	8.303	5.044	3.538	4.165	5.951
5.315	28.987	5.370	3.096	5.046	8.440
8.764	19.968	20.860	10.636	16.045	28.697
0.063	0.027	1.394	bdl	0.094	6.646
0.144	bdl	0.074	bdl	0.016	0.118
0.460	0.456	5.044	0.260	0.325	8.174
4.128	8.220	0.835	0.413	0.794	1.503
12.428	36.878	4.068	2.045	3.780	6.646
1.514	6.593	0.711	0.360	0.666	1.049
5.456	31.615	3.372	1.870	3.222	5.107
1.144	7.930	1.014	0.564	0.892	1.579
0.220	0.535	0.096	0.050	0.100	0.156
1.098	6.581	1.068	0.571	0.964	1.592
0.170	1.009	0.174	0.098	0.156	0.256
1.071	6.024	1.042	0.627	0.955	1.557
0.214	1.135	0.215	0.120	0.197	0.303
0.620	3.082	0.649	0.344	0.561	0.913
0.096	0.415	0.089	0.050	0.078	0.136
0.636	2.628	0.636	0.345	0.555	0.899
0.096	0.353	0.092	0.057	0.098	0.134
0.280	0.586	0.558	0.383	0.448	0.787
0.015	0.013	0.154	bdl	0.023	0.428
0.387	0.721	1.090	1.471	0.187	1.325
0.123	0.187	0.376	0.124	0.456	1.280
0.056	0.073	0.175	0.058	0.152	0.449



표 8. 사방회석 주원소(wt.%) 성분표

Lithology Sample	Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite									
	M171109-01_1	M171109-01_2	M171109-01_3	J14120101-01_1	J14120101-01_2	J14120101-01_3	J14120101-01_4	J14120101-01_5	Dy181109-15_1	DY181109-14_1
SiO2	56.06	56.81	57.00	56.34	56.28	56.57	56.25	56.58	57.03	57.21
TiO2	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04
Al2O3	1.29	1.15	1.17	1.21	1.09	1.07	1.25	1.01	1.29	1.56
Cr2O3	0.35	0.30	0.26	0.27	0.16	0.21	0.33	0.22	0.21	0.34
FeO	6.80	6.51	6.61	8.28	8.42	8.79	8.34	8.59	7.38	8.41
MnO	0.20	0.12	0.24	0.18	0.25	0.21	0.21	0.27	0.14	0.24
MgO	34.38	34.33	34.49	32.93	33.13	33.04	32.86	33.32	33.82	32.82
CaO	0.48	0.33	0.30	0.30	0.30	0.43	0.56	0.35	0.34	0.50
Na2O	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl
K2O	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl
TOTAL	99.56	99.55	100.07	99.50	99.63	100.33	99.79	100.34	100.22	101.12
Mg#	0.90	0.90	0.90	0.88	0.88	0.87	0.88	0.87	0.89	0.87

Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite									
DY181109-14_2	DY181109-14_3	DY181109-14_4	DY181109-14_5	DY181109-14_6	DY181109-14_7	DY181109-14_8	DY181109-14_9	DY181109-14_10	DY181109-14_11
56.48	57.51	57.15	57.60	56.38	56.40	56.52	56.62	56.57	56.50
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
1.83	1.09	1.52	0.70	1.42	1.09	1.25	1.15	1.19	1.32
0.38	0.20	0.29	0.13	0.30	0.23	0.34	0.25	0.22	0.29
8.04	8.45	8.11	8.17	8.01	8.42	8.34	8.49	8.58	8.42
0.20	0.17	0.28	0.24	0.24	0.20	0.23	0.23	0.23	0.23
32.01	33.16	32.56	33.26	32.39	32.63	32.40	32.37	32.74	32.47
1.31	0.44	0.62	0.23	0.53	0.34	0.49	0.36	0.47	0.49
0.08	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
100.34	101.03	100.52	100.35	99.30	99.32	99.58	99.48	100.00	99.72
0.88	0.87	0.88	0.88	0.88	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87

표 8. (계속)

Wehrllite/Olv-Orthopyroxente									
DY181109-14_12	DY181109-14_13	DY181109-14_14	J-14120101-01(+)_1	J-14120101-01(+)_2	J-14120101-01(+)_3	J-14120101-01(+)_4	J-14120101-01(+)_5	J-14120101-01(+)_6	J-14120101-01(+)_7
56.04	56.38	56.32	56.35	56.52	56.57	55.97	56.00	56.61	56.81
bdl	bdl	0.04	bdl	0.03	0.04	bdl	bdl	0.06	bdl
1.25	1.14	1.24	1.07	1.18	0.93	1.83	1.06	1.34	1.13
0.25	0.25	0.26	0.22	0.21	0.19	0.33	0.19	0.27	0.29
8.43	8.39	8.21	7.97	8.02	8.07	7.83	8.09	8.05	7.92
0.24	0.20	0.22	0.18	0.22	0.18	0.23	0.17	0.20	0.23
32.43	32.54	32.71	32.89	32.86	33.10	31.84	32.52	32.76	32.79
0.37	0.38	0.38	0.33	0.36	0.27	1.57	0.25	0.47	0.42
bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	0.09	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	0.01	bdl
99.00	99.27	99.37	98.82	99.42	99.35	99.69	98.27	99.75	99.58
0.87	0.87	0.88	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.81

Wehrllite/Olv-Orthopyroxente							
J-14120101-01(+)_8	J-14120101-01(+)_9	M171109-02_2	M171109-02_3	M171109-02_4	M171109-02_5	M171109-02_6	M171109-02_7
56.54	56.72	56.60	56.37	56.15	57.00	56.25	56.81
bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	0.04	bdl	bdl
1.31	1.08	1.06	1.28	1.13	1.18	1.37	0.88
0.29	0.27	0.22	0.33	0.22	0.27	0.28	0.13
8.23	8.19	7.26	7.20	7.48	7.61	7.56	7.47
0.24	0.27	0.24	0.23	0.22	0.25	0.15	0.18
32.78	32.73	33.26	32.70	32.82	33.89	33.08	33.34
0.45	0.41	0.34	1.42	0.57	0.40	0.41	0.33
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
99.84	99.68	98.98	99.55	98.65	100.65	99.06	99.15
0.80	0.80	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89

표 8. (계속)

Orthopyroxenite									
J14120102-1(2)_1	J14120102-1(2)_2	J14120102-1(2)_3	J14120102-1(2)_4	J14120102-1(2)_5	J14120102-1(2)_6	DY181121-07_1	DY181121-07_2	DY181121-07_3	DY181121-07_4
55.52	55.90	55.55	55.35	55.46	55.69	54.71	55.00	55.00	54.64
bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	0.04
1.36	1.41	1.37	1.47	1.45	1.41	1.43	1.42	1.53	1.42
0.49	0.46	0.43	0.51	0.46	0.50	0.53	0.41	0.47	0.37
8.24	9.15	9.18	8.43	9.14	8.48	9.42	9.03	8.70	9.05
0.19	0.17	0.21	0.23	0.20	0.25	0.21	0.17	0.17	0.17
30.04	32.42	32.08	30.83	32.05	30.72	31.84	31.34	31.21	31.97
4.02	0.59	0.65	2.12	0.61	2.99	0.58	1.32	1.67	0.59
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
99.86	100.13	99.47	98.94	99.37	100.11	98.72	98.69	98.75	98.24
0.87	0.86	0.86	0.87	0.86	0.87	0.86	0.86	0.86	0.86

Orthopyroxenite						
DY181121-07_5	DY181109-06A/B_1	DY181109-06A/B_2	DY181109-06A/B_3	DY181109-06A/B_4	DY181109-06A/B_5	DY181109-06A/B_6
56.03	57.33	57.27	57.27	56.98	56.80	57.04
bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	0.03
1.63	1.40	1.42	1.46	1.54	1.43	1.54
0.43	0.52	0.53	0.54	0.52	0.56	0.52
9.10	7.71	7.82	7.93	7.94	7.86	7.61
0.15	0.24	0.21	0.24	0.21	0.24	0.24
31.78	31.78	32.52	33.00	32.95	32.80	32.09
0.62	2.23	1.31	0.66	0.61	0.54	1.83
bdl	0.03	0.02	bdl	bdl	0.02	bdl
bdl	bdl	0.01	0.01	0.01	0.01	bdl
99.73	101.24	101.09	101.10	100.82	100.26	100.91
0.86	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88

표 8. (계속)

Gabbroiorite									
M171109-08_1	M171109-08_2	M171109-08_3	M171109-08_4	M171109-08_5	M171109-10_1	M171109-10_2	M171109-10_3	M171109-10_4	M171109-03_1
54.56	54.60	54.27	54.26	54.67	53.73	53.35	53.85	53.64	53.00
0.05	0.04	0.05	0.04	0.03	bdl	0.04	bdl	bdl	0.11
0.95	1.09	1.03	1.07	1.05	1.08	1.00	1.08	0.96	0.62
0.12	0.18	0.21	0.18	0.19	0.14	0.19	0.24	0.18	0.06
16.87	16.82	16.53	17.16	16.87	17.25	19.13	17.62	17.49	20.89
0.28	0.32	0.34	0.44	0.31	0.31	0.43	0.41	0.36	0.27
26.62	26.49	26.36	26.40	26.42	25.73	24.81	25.63	25.78	23.62
0.89	0.83	1.00	0.83	0.96	0.57	0.77	0.72	0.71	0.87
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
100.33	100.38	99.78	100.37	100.50	98.81	99.72	99.55	99.13	99.46
0.74	0.74	0.74	0.73	0.74	0.73	0.70	0.72	0.72	0.67

Gabbroiorite									
M171109-03_2	M171109-12_1	M171109-12_2	M171109-12_3	M171109-12_4	M171109-12_5	M171109-09_1	M171109-09_2	M171109-09_3	
52.81	53.56	53.44	53.40	54.05	53.83	53.04	52.32	52.55	
0.12	bdl	bdl	0.03	bdl	0.05	0.07	0.10	0.06	
0.73	1.07	1.27	1.20	1.02	1.24	0.76	0.85	0.89	
0.07	0.22	0.20	0.19	0.17	0.19	bdl	0.08	0.08	
20.65	17.43	17.53	17.44	17.05	17.42	21.46	22.15	21.84	
0.35	0.39	0.40	0.35	0.49	0.40	0.43	0.43	0.54	
23.82	25.65	25.69	25.75	25.79	26.05	22.79	22.63	22.68	
0.98	0.80	0.78	0.76	0.60	0.50	0.53	0.87	0.82	
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	
99.53	99.11	99.31	99.12	99.16	99.68	99.07	99.44	99.46	
0.67	0.72	0.72	0.72	0.73	0.73	0.65	0.65	0.65	

표 8. (계속)

Pegmatitic Gabbronorite									
J14120101-2_1	J14120101-2_2	J14120101-2_3	J14120101-2_4	M171109-06_1	M171109-06_3	M171109-06_5	M171109-06_6	M171109-06_7	M171109-06_8
52.80	53.71	52.46	52.44	53.06	52.42	52.98	52.21	52.91	52.93
0.04	0.07	0.03	bdl	0.04	0.08	0.05	0.06	bdl	0.04
1.08	0.96	0.72	0.91	0.92	0.53	0.84	0.69	1.08	0.84
0.04	0.06	0.05	bdl	bdl	0.03	bdl	0.05	0.05	bdl
22.22	19.64	22.93	21.66	19.82	22.90	21.02	21.32	19.09	18.83
0.45	0.43	0.47	0.46	0.39	0.49	0.45	0.42	0.37	0.35
22.66	23.71	22.21	23.06	23.14	20.92	22.49	22.02	24.34	23.63
0.77	1.27	0.71	0.57	0.71	0.55	0.88	0.98	0.51	0.66
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
100.08	99.84	99.58	99.11	98.08	97.92	98.73	97.74	98.36	97.27
0.65	0.68	0.63	0.65	0.68	0.62	0.66	0.65	0.69	0.69



표 9. 사방회석 미량원소(ppm) 성분표

Lithology Sample	Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite									
	M171109-01_1	M171109-01_2	DY181109-14_1	DY181109-14_2	DY181109-14_3	DY181109-14_4	DY181109-14_5	DY181109-14_6	DY181109-14_7	DY181109-14_8
Sc	29.772	25.715	39.387	29.062	29.505	34.004	24.805	29.998	28.774	28.460
Ti	79.041	55.055	118.390	58.876	104.405	106.487	68.985	101.520	109.796	112.253
Cr	4124.784	3637.256	2624.216	2422.421	2800.756	2936.904	1909.955	2999.766	2517.053	2845.397
Fe	13679.693	12573.118	13145.266	15516.241	15600.988	15427.386	14507.393	14722.722	15068.990	13990.011
Ni	417.542	483.668	428.934	383.332	428.849	424.751	365.040	417.481	431.940	404.517
Cu	1.551	1.266	0.915	0.926	1.217	0.631	0.785	0.730	1.608	0.487
Rb	0.024	0.051	0.056	0.151	0.108	bdl	0.065	0.051	0.085	bdl
Sr	0.348	0.422	0.590	1.254	0.360	0.098	0.470	0.298	0.592	0.096
Y	0.201	0.097	0.375	0.100	0.164	0.156	0.034	0.158	0.199	0.107
Zr	0.740	0.286	0.776	0.201	0.378	0.254	0.085	0.263	0.386	0.205
Nb	0.014	0.007	0.028	0.009	0.039	0.010	bdl	0.011	0.018	0.008
Cs	0.024	0.103	bdl	0.127	0.036	bdl	0.020	0.028	bdl	bdl
Ba	0.190	0.199	0.459	1.831	0.551	0.050	0.486	0.488	0.687	0.074
La	0.016	0.009	0.039	0.006	0.039	0.016	bdl	0.021	0.033	0.006
Ce	0.046	0.022	0.115	0.017	0.051	0.015	0.004	0.041	0.103	0.013
Pr	0.008	0.003	0.016	0.003	0.011	0.005	bdl	0.006	0.013	bdl
Nd	0.036	0.012	0.083	0.010	0.055	bdl	bdl	0.018	0.047	bdl
Sm	0.013	0.006	0.030	bdl	0.017	bdl	bdl	bdl	0.015	bdl
Eu	0.005	bdl	0.009	bdl	bdl	0.004	bdl	0.003	0.006	bdl
Gd	0.021	0.006	0.035	0.007	0.013	0.017	bdl	0.014	bdl	bdl
Tb	0.007	0.001	0.006	0.002	0.003	0.005	bdl	0.002	0.005	0.002
Dy	0.033	0.012	0.050	0.009	0.026	0.014	bdl	0.016	0.022	0.016
Ho	0.009	0.004	0.015	0.002	0.007	0.007	0.001	0.006	0.009	0.005
Er	0.026	0.017	0.048	0.013	0.033	0.030	0.006	0.027	0.029	0.024
Tm	0.006	0.003	0.010	0.005	0.005	0.006	0.002	0.005	0.007	0.005
Yb	0.054	0.030	0.094	0.040	0.066	0.057	0.024	0.051	0.071	0.045
Lu	0.010	0.009	0.017	0.010	0.011	0.015	0.004	0.011	0.016	0.008
Hf	0.026	0.005	0.024	bdl	0.015	0.020	bdl	bdl	0.021	bdl
Ta	0.002	0.002	0.014	0.001	bdl	bdl	0.008	0.023	bdl	bdl
Pb	0.048	0.161	0.022	0.133	0.059	0.032	0.076	0.025	0.070	0.015
Th	0.053	0.061	0.089	0.057	0.309	0.202	0.073	0.058	0.071	0.387
U	0.011	0.011	0.033	bdl	0.077	0.051	0.017	0.024	0.036	0.064

표 9. (계속)

Wehrlite/Olv-Orthopyroxenite									
DY181109-14_9	DY181109-14_10	M171109-02_1	M171109-02_2	M171109-02_3	M171109-02_4	M171109-02_5	J14120101-01_1	J14120101-01(+)_1	J14120101-01(+)_2
34.199	31.976	28.027	34.515	27.519	31.017	29.043	40.002	37.628	29.120
134.826	74.216	75.324	86.756	66.140	92.336	72.292	134.022	158.123	108.733
2768.193	3286.618	2899.537	3666.441	3100.088	3084.878	2780.192	2258.503	2500.920	2069.289
13256.918	12730.074	13423.045	12569.989	13746.997	12504.951	11687.066	19153.315	17244.382	18832.686
396.065	373.779	362.808	433.250	386.083	411.586	421.839	515.283	472.249	483.071
0.526	0.571	3.704	2.350	1.848	10.772	4.505	0.696	2.462	0.840
bdl	0.107	0.174	0.144	0.043	0.085	0.064	0.528	0.121	0.054
0.297	1.103	0.445	0.584	0.195	0.353	0.307	1.041	1.020	0.118
0.196	0.192	0.134	0.366	0.090	0.156	0.122	0.710	0.555	0.079
0.353	0.396	0.327	0.720	0.189	0.348	0.240	1.795	1.291	0.254
0.005	0.018	0.022	0.027	0.008	0.016	0.012	0.086	0.032	0.017
bdl	0.058	0.221	0.064	0.065	bdl	0.043	1.088	0.079	0.063
0.034	1.296	0.442	1.023	0.483	0.714	0.248	1.443	1.225	bdl
0.015	0.039	0.027	0.056	0.004	0.021	0.015	0.088	0.086	0.004
0.038	0.072	0.044	0.148	0.016	0.053	0.039	0.297	0.186	0.009
0.004	0.010	0.008	0.017	bdl	0.009	0.006	0.046	0.029	bdl
0.033	0.056	0.028	0.091	bdl	0.028	0.024	0.205	0.171	bdl
0.014	0.018	0.012	0.038	bdl	bdl	bdl	0.057	0.049	bdl
0.005	0.004	0.005	0.015	0.003	0.005	0.004	0.017	0.021	bdl
0.012	0.025	0.018	0.040	bdl	bdl	0.019	0.095	0.059	bdl
0.003	0.003	0.003	0.007	bdl	0.003	0.003	0.015	0.011	0.002
0.022	0.022	0.017	0.061	0.018	0.026	0.025	0.111	0.078	0.009
0.007	0.007	0.006	0.015	0.003	0.006	0.007	0.025	0.021	0.002
0.030	0.028	0.015	0.054	0.016	0.026	0.020	0.091	0.077	0.019
0.005	0.006	0.004	0.009	0.003	0.005	0.004	0.014	0.015	0.006
0.065	0.048	0.046	0.059	0.045	0.057	0.038	0.130	0.122	0.056
0.010	0.009	0.010	0.012	0.008	0.010	0.012	0.023	0.020	0.010
0.017	0.011	0.027	0.022	bdl	0.015	0.009	0.056	0.051	0.010
0.007	bdl	bdl	bdl	bdl	0.002	0.004	0.004	bdl	bdl
0.014	0.085	0.253	0.038	0.207	0.131	0.093	0.226	0.045	0.029
0.135	0.376	0.034	0.050	0.007	0.032	0.045	0.015	0.022	0.034
0.032	0.088	0.017	0.048	0.003	bdl	0.032	0.003	0.004	bdl

표 9. (계속)

Wehrlite/Olv-Orthopyroxene					
J14120101-01(+)_3	J14120101-01(+)_4	J14120101-01(+)_5	J14120101-01(+)_6	J14120101-01(+)_7	J14120101-01(+)_8
30.789	29.606	33.691	28.846	27.733	30.487
150.590	134.570	147.509	121.124	143.786	156.508
2971.027	3028.305	2855.231	1756.390	1778.408	1873.040
18564.776	18501.613	18376.270	18493.675	18452.716	17763.913
466.580	479.677	491.182	416.400	410.264	470.991
1.761	0.544	0.657	0.501	0.593	0.447
0.059	bdl	bdl	0.054	0.109	0.041
0.214	0.107	0.149	0.114	0.215	0.026
0.154	0.106	0.228	0.057	0.079	0.123
0.592	0.370	0.624	0.230	0.207	0.300
0.027	0.015	0.007	0.011	bdl	0.025
bdl	bdl	bdl	0.057	bdl	bdl
0.325	0.049	0.181	0.083	0.284	0.011
0.013	0.015	0.012	0.006	0.005	0.003
0.029	0.038	0.027	0.006	0.011	0.009
bdl	bdl	0.004	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	0.018	bdl	bdl	bdl
0.017	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
0.004	0.003	0.003	bdl	bdl	bdl
0.021	0.014	0.026	bdl	bdl	0.009
bdl	0.004	0.009	0.004	0.002	0.006
0.035	0.020	0.034	0.016	0.016	0.026
0.008	0.006	0.006	0.004	bdl	0.006
0.064	0.070	0.080	0.036	0.056	0.062
0.012	0.013	0.011	0.010	0.012	0.012
0.030	0.020	0.035	bdl	0.010	0.015
bdl	0.003	0.003	bdl	0.007	bdl
0.024	bdl	bdl	0.029	0.020	bdl
0.006	0.010	0.023	0.006	0.004	0.010
0.005	0.006	0.596	bdl	bdl	bdl

표 9. (계속)

Orthopyroxenite						
D181121-07_1	D181121-07_2	D181121-07_3	J14120102-1(2)_1	J14120102-1(2)_2	J14120102-1(2)_3	J14120102-1(2)_4
26.114	28.095	27.062	24.665	25.104	24.424	24.831
78.555	79.522	70.411	63.309	58.354	57.287	60.586
2858.007	3092.516	3184.652	3270.300	3067.145	3258.028	3268.459
16859.285	15355.334	13502.193	14867.479	9492.440	8608.424	8995.614
374.081	378.609	381.819	397.941	397.931	407.367	411.734
0.591	0.540	0.529	0.536	0.533	0.532	0.449
0.070	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.024
0.180	0.053	0.012	0.052	0.030	0.044	0.069
0.116	0.150	0.115	0.117	0.096	0.099	0.113
0.179	0.138	0.106	0.112	0.114	0.083	0.093
0.018	bdl	0.004	0.010	0.003	0.005	0.002
0.012	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
0.265	0.001	0.012	0.001	0.058	0.010	0.012
0.004	0.001		0.003	0.006		0.001
0.003	0.004	bdl	0.006	0.005	0.003	0.003
bdl	bdl	bdl	0.001	bdl	bdl	bdl
bdl	0.006	bdl	bdl	bdl	0.010	bdl
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
bdl	bdl	bdl	0.001	0.002	bdl	0.001
bdl	0.006	0.008	bdl	bdl	bdl	bdl
0.002	0.002	0.002	0.001	bdl	bdl	0.002
0.012	0.019	0.011	0.017	0.015	0.013	0.016
0.005	0.006	0.005	0.004	0.005	0.005	0.005
0.021	0.019	0.022	0.017	0.016	0.017	0.018
0.006	0.004	0.005	0.003	0.004	0.002	0.004
0.044	0.045	0.051	0.033	0.032	0.028	0.030
0.007	0.006	0.007	0.016	0.008	0.005	0.007
0.018	0.006	0.006	0.011	0.005	0.032	0.009
bdl	bdl	bdl	bdl	0.002	bdl	0.001
0.123	bdl	0.023	0.016	0.012	0.015	0.013
bdl	0.002	0.000	0.009	0.001	0.002	bdl
0.001	bdl	bdl	0.007	bdl	0.001	bdl

표 9. (계속)

Gabbroiorite							Pegmatitic gabbroiorite		
M171109-03_1	M171109-03_2	M171109-08_1	M171109-08_2	M171109-08_3	M171109-12_1	M171109-12_2	M171109-06_1	M171109-06_2	M171109-06_3
39.807	44.021	31.914	35.219	35.095	36.261	32.927	48.225	42.160	41.830
368.351	460.066	226.397	184.990	172.193	155.004	66.085	239.137	244.129	377.692
481.701	522.768	985.846	1277.750	1207.436	2221.723	1624.975	221.257	151.010	111.311
42508.782	42411.493	37057.277	27201.405	26215.182	28288.296	27474.658	42583.495	45460.467	46383.213
338.410	348.351	315.690	313.141	302.312	337.154	322.441	194.499	192.982	188.621
0.534	0.952	0.674	0.763	0.627	0.468	0.540	0.596	bdl	0.387
0.023	1.527	0.017	0.013	bdl	bdl	0.027	0.515	bdl	bdl
0.064	0.841		0.024	0.037	0.012	0.133	0.863	0.042	0.023
0.739	0.525	0.497	0.552	0.444	0.225	0.337	0.896	0.693	0.729
0.433	0.305	0.530	0.618	0.524	0.173	0.288	1.549	1.475	1.690
0.002	0.002	0.008	0.002	0.002	0.002	0.002	0.177	0.005	bdl
0.006	0.604	bdl	bdl	0.008	bdl	0.022	0.213	bdl	bdl
0.043	1.991	0.054	0.011	0.701	0.002	0.047	1.382	0.038	0.020
0.005	0.019	0.004	0.003	0.002		0.011	0.077	0.011	bdl
0.015	0.050	0.008	0.009	0.004	0.003	0.006	0.318	0.018	0.008
0.003	0.007	bdl	0.002	0.002	bdl	0.003	0.058	0.005	0.004
0.023	0.034	bdl	0.014	bdl	bdl	0.008	0.234	bdl	bdl
0.019	0.014	0.012	0.007	0.010	bdl	bdl	0.075	bdl	0.017
0.002	0.003	0.004	0.003	0.002	bdl	0.003	0.010	bdl	0.003
0.040	0.016	0.038	0.027	0.018	bdl	0.019	0.092	0.024	0.040
0.011	0.007	bdl	0.008	0.006	0.001	0.005	0.017	0.010	0.008
0.111	0.069	0.067	0.066	0.054	0.026	0.052	0.125	0.090	0.093
0.030	0.022	bdl	0.024	0.017	0.010	0.014	0.033	0.023	0.029
0.110	0.092	0.078	0.082	0.067	0.043	0.049	0.127	0.112	0.116
0.024	0.023	0.015	0.016	0.016	0.007	0.013	0.018	0.022	0.027
0.235	0.198	0.128	0.151	0.128	0.086	0.086	0.183	0.221	0.188
0.043	0.040	0.025	0.024	0.022	0.016	0.021	0.037	0.037	0.040
0.026	0.028	0.029	0.024	0.027	0.015	0.015	0.045	0.058	0.070
0.001	0.001	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.005	0.003	bdl
0.039	0.997	0.023	bdl	bdl	bdl	0.027	0.487	0.014	bdl
0.007	0.038	bdl	0.001	0.006	0.011	0.015	0.136	0.059	0.017
0.002	0.013	bdl	0.005	0.005	0.002	0.002	0.028	0.015	0.011

표 9. (계속)

Pegmatitic Gabbroiorite					
M171109-06_4	M171109-06_5	M171109-06_6	M171109-06_7	J14120101-02_1	J14120101-02_2
40.186	43.597	40.889	44.272	41.385	51.826
280.088	154.087	251.168	145.218	226.540	253.139
281.111	339.846	227.637	310.923	251.197	229.151
42776.213	40525.824	43012.407	40209.253	43972.179	42815.660
206.351	216.152	195.607	215.747	181.119	188.060
0.521	0.611	bdl	bdl	0.821	0.596
0.050	0.033	bdl	bdl	0.540	0.071
0.029	0.081	0.015	0.089	0.858	0.188
0.532	0.547	0.641	0.615	0.903	3.101
1.254	0.382	1.576	0.610	0.706	1.665
0.013	0.032	0.023	0.013	0.006	0.019
bdl	bdl	bdl	bdl	0.456	bdl
0.096	0.140	0.111	0.043	0.479	0.641
bdl	0.017	0.003	0.014	0.018	0.070
0.005	0.060	0.007	0.071	0.055	0.246
bdl	0.009	bdl	0.013	0.009	0.041
bdl	0.052	0.015	0.070	0.043	0.302
bdl	0.021	bdl	0.028	0.030	0.107
0.004	0.006	bdl	0.006	bdl	0.016
0.023	0.032	0.019	0.030	0.043	0.206
0.004	0.008	0.009	0.011	0.015	0.053
0.065	0.060	0.068	0.072	0.119	0.413
0.020	0.023	0.023	0.022	0.031	0.114
0.083	0.076	0.106	0.086	0.128	0.402
0.016	0.017	0.018	0.015	0.025	0.075
0.170	0.171	0.165	0.154	0.247	0.628
0.038	0.033	0.034	0.031	0.051	0.101
0.058	bdl	0.058	0.014	0.027	0.043
bdl	bdl	0.003	bdl	bdl	0.002
0.010	0.020	bdl	0.015	0.176	0.057
0.075	0.123	0.095	0.234	0.026	0.085
0.013	0.022	0.018	0.050	0.009	0.020

표 10. 사장석 주원소(wt.%) 성분표

Lithology	Gabbronorite									
	Sample	M171109-08_1	M171109-08_2	M171109-08_3	M171109-10_1	M171109-10_2	M171109-10_3	M171109-03_1	M171109-03_2	M171109-12_1
SiO2	45.45	46.47	46.42	46.27	45.89	46.02	46.22	46.09	45.82	45.96
TiO2	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	0.06
Al2O3	35.45	34.60	34.87	34.23	34.23	34.02	34.11	33.92	34.70	34.79
Cr2O3	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
FeO	0.14	0.17	0.20	0.17	0.16	0.23	0.10	0.12	0.16	0.18
MnO	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.07	bdl
MgO	0.03	0.07	0.06	bdl	bdl	0.03	0.02	bdl	0.03	0.04
CaO	18.58	17.66	17.55	17.44	17.53	17.73	17.37	17.29	18.02	17.96
Na2O	1.09	1.61	1.64	1.59	1.61	1.49	1.83	1.78	1.37	1.47
K2O	bdl	0.03	0.03	bdl	0.01	0.01	0.05	0.03	0.01	0.01
Total	100.73	100.60	100.78	99.71	99.46	99.54	99.69	99.24	100.17	100.47
An%	90.38	85.68	85.41	85.82	85.73	86.70	83.76	84.13	87.81	87.05

Gabbronorite						Pegmatitic Gabbronorite				
M171109-12_3	M171109-09_1	M171109-09_2	M171109-09_3	M171109-09_4	M171109-09_5	J14120101-2_1	M171109-06_1	M171109-06_2	M171109-06_3	M171109-06_4
45.96	46.13	46.11	46.32	46.17	46.44	49.84	45.34	46.00	45.13	45.91
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	0.00	0.02
34.73	33.86	33.99	34.25	33.91	34.09	31.77	34.77	34.73	34.78	34.52
bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.01	0.02
0.07	0.14	0.16	0.06	0.14	0.07	0.13	0.13	0.17	0.13	0.12
bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	0.03	0.02	0.02
0.03	0.04	0.02	bdl	0.02	bdl	0.03	0.02	0.03	0.04	0.05
18.11	17.25	17.51	17.48	17.35	17.43	14.67	18.26	17.84	18.03	17.51
1.45	1.79	1.71	1.73	1.81	1.76	3.18	1.25	1.50	1.28	1.55
bdl	bdl	0.03	0.02	bdl	bdl	0.07	0.02	0.02	0.02	0.04
100.35	99.25	99.53	99.85	99.41	99.83	99.69	99.80	100.33	99.44	99.74
87.38	84.19	84.85	84.74	84.09	84.52	71.52	88.98	86.78	88.63	86.21



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