

남극 빅토리아랜드 결정질 암석의  
연령 측정



충북대학교 산학협력단

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극 빅토리아랜드 지역 지각진화 및 행성형성과정 연구” 과제의 위탁연구 “남극 빅토리아랜드 결정질 암석의 연령 측정” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2019. 7. 29.

총괄연구책임자	: 이 종 익
위탁연구기관명	: 충북대학교
위탁연구책임자	: 김 윤 섭
위탁참여연구원	: 박 지 영
“	: 부이 빈 하우
“	: 김 태 환
“	: 오 창 환

## 보고서 초록

위탁연구과제명	남극 빅토리아랜드 결정질 암석의 연령 추정				
위탁연구책임자	김윤섭	해당단계 참여연구원수	5	해당단계 연구비	315,000,000
연구기관명 및 소속부서명	충북대학교 지구환경과학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	94
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 랜터만 산맥에서 산출하는 베로이사이트 에클로자이트로부터 변성 조건이 22-25 kbar, 630-680°C와 ~26±3 kbar, 720±80°C의 다중 변성 작용을 정의함.</li> <li>• 각각의 고압 변성 작용의 시기는 저어콘의 중간 부분과 가장자리에서 구한 연령인 515±4 Ma(<i>t<sub>0</sub></i>)와 498±11 Ma(<i>t<sub>0</sub></i>)로 해석함.</li> <li>• 이들 결과로부터 계산한 수직 섭입 속도는 &lt;2mm·a<sup>-1</sup>로 섭입대에서의 온도 증감률(~5-10°C·km<sup>-1</sup>)을 고려할 때 너무 느리기 때문에 이들 사이에 융기 과정이 필요함.</li> <li>• 랜터만 에클로자이트에서 측정된 고압 변성 작용의 시기는 북빅토리아랜드 윌슨테레인 산출하는 화산호 환경의 화성암들의 관입 연령과도 잘 일치함.</li> <li>• 랜터만 에클로자이트의 전암 지구화학 분석 결과는 전형적인 중앙해령현무암의 특징을 보임.</li> <li>• 에클로자이트에서 산출하는 저어콘 결정의 핵은 침상형의 인회석과 석영 포유물을 함유하고 있어, 에클로자이트 상에 해당하는 광물을 포함하고 있는 중간 부분과 가장자리와 대비됨.</li> <li>• 이와 함께 저어콘 결정의 핵에서 측정된 높은 Th/U 비는 이들이 마그마에서부터 정출되었음을 뒷받침함.</li> <li>• 랜터만 산맥에서 에클로자이트와 함께 산출하는 규산쇄설성 편마암으로부터 에클로자이트의 모암이 화산성 비활동형 경계에서 열곡작용에 의해 생성되었을 것으로 해석됨.</li> <li>• 따라서, 랜터만 에클로자이트 저어콘 핵에서 측정된 591±8 Ma(<i>t<sub>0</sub></i>)는 에디아카란 시기에 북빅토리아랜드에 화산-열곡 작용이 있었음을 지시함.</li> <li>• 북빅토리아랜드의 에디아카란 화산-열곡작용은 타스마니아와 호주 동남부의 지사와 일치하는 반면 남빅토리아랜드와는 차이를 보임.</li> <li>• 남빅토리아랜드에서의 발산-수렴형 경계의 변환이 670-570 Ma에 일어난 것에 반해 북빅토리아랜드에서는 590-490 Ma에 일어난 것으로 해석됨.</li> <li>• 윌슨 암체의 포상 편마암에서 산출하는 저어콘에서는 520-500 Ma에 해당하는 과성장이 관찰되지 않고, 변성사암의 쇄설성 저어콘의 연령 분포와 동일한 패턴이 나타남.</li> <li>• 호상편마암을 관입하고 있는 우백질 암맥의 일부 저어콘의 중간 부분에서 500 Ma의 연령이 측정됨.</li> <li>• 우백질 암맥의 관입 연령은 482±4 Ma(<i>t<sub>0</sub></i>)로 추정됨.</li> </ul>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	저어콘, 변성암, 윌슨 암체, 랜터만 산맥, 북빅토리아랜드			
	영 어	Zircon, metamorphic rocks, Wilson terrane, Lanterman Range, northern Victoria Land			

# 요 약 문

## I. 제 목

남극 빅토리아랜드 결정질 암석의 연령 측정

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

장보고기지 인근 월슨터레인에서 산출하는 변성암을 연구하여 신원생대-오르도비스기 빅토리아랜드의 지각형성과정을 이해하고 이를 기반으로 남극 내륙 지질정보 획득 및 남극대륙의 지체구조 및 지각진화 모델을 도출하기 위한 기반 조성

## III. 연구개발의 내용 및 범위

이 위탁개발과제는 남극대륙의 암석을 대상으로 지질탐사와 시료회수를 첫 번째 목표로 삼으며, 대상 지역은 남극대륙을 가로지르는 남극중단산맥의 태평양쪽 끝에 해당하는 빅토리아랜드 지역임. 빅토리아랜드에 분포하는 변성암의 공간적 분포와 특성을 기록하고 그 기원을 밝히기 위한 광물학, 지구화학, 동위원소 분석을 바탕으로 이 지역의 지체구조 진화를 밝힘.

## IV. 연구개발결과

- 랜터만 산맥에서 산출하는 에클로자이트의 온도-압력-시간 경로 및 진화사 규명
- 랜터만 산맥 에클로자이트 모암의 생성환경 및 지구조적 의미 규명
- 월슨 암체 호상 편마암의 저어콘 연령 분포 및 변성 작용 시기 규명

## V. 연구개발결과의 활용계획

- 빅토리아랜드 지체구조진화 모델 구축에 기여
- 곤드와나 초대륙과 관련한 지체구조 모델 구축에 기여
- 곤드와나 초대륙에서 분리된 동아시아지체구조 형성 모델 구축에 기여



# S U M M A R Y

## I. Title

Age dating of crystalline rocks in Victoria Land, Antarctica

## II. Purpose and Necessity of R&D

Metamorphic rocks in the Wilson Terrane around the Jang Bo Go station are investigated in order to understand the crustal evolution of Victoria Land during the late Neoproterozoic to Ordovician times, and further to develop the routes and methods for the inland geological information and tectonic-crustal evolution of Antarctica.

## III. Contents and Extent of R&D

This research project focuses on the geological survey and sample collection from Victoria Land at the Pacific end of the Transantarctic Mountains, and also involves the distribution and characteristics of metamorphic rocks in Victoria Land to reveal its crustal evolution using mineralogy, geochemistry, and isotopic analyses.

## IV. R&D Results

- Two episodic  $P$ - $T$ - $t$  paths of barroisite eclogites in the Lanterman Range during the Cambrian due to yo-yo tectonics along the subduction channel
- Ediacaran rift-related mafic magmatism in the volcanic passive margin along

the paleo-Pacific margin of East Gondwana and its affinity to the southeastern part of Australia and Tasmania

- The U-Pb age distribution pattern of zircon in banded gneisses in the Wilson Terrane identical to that of metasediments and their late Cambrian metamorphism

#### V. Application Plans of R&D Results

- Potential contribution to the development of the Neoproterozoic to Ordovician tectonic model in Victoria Land

- Potential contribution to the development of tectonic model of Gondwana supercontinent

- Potential contribution to the development of tectonic evolution of East Asian blocks separated from Gondwana



## 목 차

제 1 장 서 론 .....	8
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	11
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....	12
제 1 절 야외 지질 답사.....	13
제 2 절 고압 변성암류 변성 진화사.....	23
제 3 절 신원생대 열곡대 화성활동과 지구조적 대비 .....	41
제 4 절 월슨암체 호상편마암의 쇄설성 저어콘 기원지와 변성 연령 .....	48
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도.....	64
제 5 장 연구개발결과의 활용계획.....	65
제 6 장 참고문헌.....	66

# 제 1 장 서 론

해양지각의 소멸과 이에 수반한 대륙지각의 충돌은 판구조론의 과정으로 활동형 대륙연변부, 해안경계부의 부가대, 전호분지, 화산호, 대륙순상지의 형태로 대륙 내부에 존재한다. 남극 대륙은 곤드와나 초대륙의 형성과 분리의 기록이 매우 잘 보존되어 있어 초대륙 스케일의 지체구조운동을 이해하기에 좋은 지역일 뿐만 아니라 장보고 기지가 위치한 빅토리아랜드는 동남극의 판아프리카 조산운동을 대표하는 로스조산대가 발달하고 있다(그림 1.1). 변성암은 해양지각의 섭입과 대륙지각의 충돌에 대한 과정과 시기를 기록하고 있기 때문에 지각의 진화사를 이해할 수 있는 직접적인 재료이다. 따라서, 남극횡단산맥과 빅토리아랜드의 형성과정을 이해하기 위해서는 이 지역에서 산출하는 변성암들의 변성진화사를 이해하는 것이 가장 기초적이고 중요한 과제이다. 이를 바탕으로 장보고 기지를 기점으로 곤드와나 초대륙의 형성과 분열에 수반한 전지구적 지체구조 연구의 기반을 마련할 수 있다.

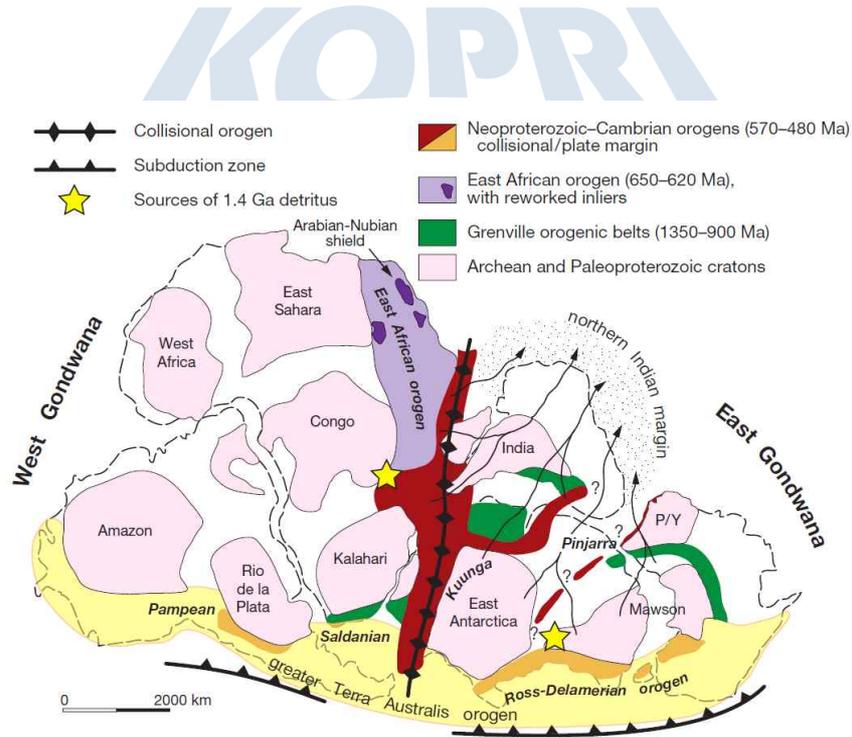


그림 1.1. 약 5 억 년 전의 곤드와나 초대륙의 재구성. 대륙 내부와 주변부에 발달한 지체구조들이 나타나있다. 초대륙을 이루고 있던 현재 대륙들의 모습은 점선으로 표시되어있다 (Myrow *et al.*, 2010)

빅토리아랜드는 남극대륙에서 기반암의 노출이 가장 넓은 지역으로, 과거 곤드와나 대륙의 충돌과 분리에 수반된 지질활동의 흔적이 잘 남아 있음(Palmeri et al., 2003, 2009; Gibson, 2011; Godard and Palmeri, 2013). 곤드와나 초대륙의 중심부에 위치했던 남극대륙의 지각진화와 이와 관련된 지질현상을 규명하는 것은 남극대륙의 발달사를 밝히는 것과 더불어 남극대륙에 존재하는 부존 자원의 기원 및 분포에 대한 정보를 축적하는데 필수적인 사항이다. 장보고 기지의 완공과 함께 빅토리아랜드 일대에 대한 지질학적 조사가 요구되고 있는 시점에서, 기지 인근 약 100마일을 구성하고 있는 변성퇴적암과 이를 관입하고 있는 화성암에 대한 지질조사와 열역사 규명은 가장 우선되어야 할 연구분야이다. 특히, 장보고 기지가 위치한 빅토리아랜드는 지난 수십억 년 동안 대륙의 연변부에 위치해 있어 수많은 지질활동과 여러차례 조산운동을 경험하였기 때문에 이 지역의 지각진화를 이해하기 위해서는 변성진화사를 이해하는 것이 필수적인 요소이다. 남극 빅토리아랜드 결정질 암석의 연령 측정 과제는 1차적으로 변성퇴적암에서 저어콘을 분리해 이에 대한 우라늄-납 동위원소 절대연령을 측정하는데 집중하였다. 이들 쇄설성 저어콘의 연령분석을 통해 빅토리아랜드 기반암의 퇴적물 기원지 및 퇴적연령의 상한을 추정할 수 있다(Fedo et al., 2003). 이러한 쇄설성 저어콘의 연령분포 특징을 이해하는 것은 차년도 과제에서 규명하고자 하는 고변성 혼성암의 변성시기, 중압-고압 변성암 온도-압력-시간 경로, 고압 각섬암, 에클로자이트 석류석-십자석-남정석 편암의 변성 온도-압력 조건 규명을 위해 기초 자료에 해당한다.

곤드와나 초대륙의 형성과 분리 과정을 연구하는 중요한 이유 중 하나는 곤드와나 초대륙의 주요 구성단위였던 아프리카, 남아메리카, 인도, 오스트리아 대륙에는 세계적으로 유수의 금속, 비금속, 석유 자원이 매장되어 있기 때문이다 (그림 1.2). 활동성 대륙 연변부의 조산운동은 광산을 생성하는 주요환경으로 장보고 기지가 위치한 빅토리아랜드는 로스 조산운동의 직접적인 영향을 받은 지역이기 때문에 전통적 금속, 비금속 자원 이외에도 변성작용시 희토류광물들의 생성이 활발하기 때문에 전략자원인 희토류원소의 분포에 대한 조사의 필요성이 제기된다. 21세기 중반부터 논의될 남극자원개발 시대를 대비하여 자원분포, 잠재 자원량 등 핵심자료 확보에 있어서 결정질 암석이 생성연령 측정은 가장 기초가 되는 자료이다.



## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

신원생대 후기-고생대 초기의 판아프리카 조산운동에 대해서는 많은 연구가 이루어져 있으며, 로스 조산운동에 관한 지질학적 연구는 빅토리아랜드에 자국의 남극기지를 거점으로 미국 및 이탈리아 연구자들에 의해 수행되었다(e.g., Grew and Sandiford, 1984; Palmeri, 1997, Goodge et al., 2002, 2004; Goodge, 2007; Palmeri et al., 2003, 2007, 2009; Godard and Palmeri, 2013). 로스 조산운동은 안테스 타입에 해당하며 약 5억년 이전에 고태평양판이 동남극 순상지 아래로 섭입하며 곤드와나 초대륙에 추가되며 일어났다(Goodge et al., 2007). 장보고 기지 인근의 변성암 지대인 월슨터레인은 저압-고온의 변성작용을 경험하였으며, 녹색편암상에서 혼성암에 이르는 다양한 형태의 변성도를 나타냄(Grew and Sandiford, 1984; Palmeri, 1997). 저압-고온 변성암지대인 월슨터레인과 해양성 부가대인 바우어스터레인 사이에는 섭입한 해양지각의 일부가 존재하며, 고압-초고압의 에크로자이트와 초고철질 암석이 산출한다(그림 2.1; Di Vincenzo et al., 1997; Palmeri et al., 2007; Godard and Palmeri, 2013).

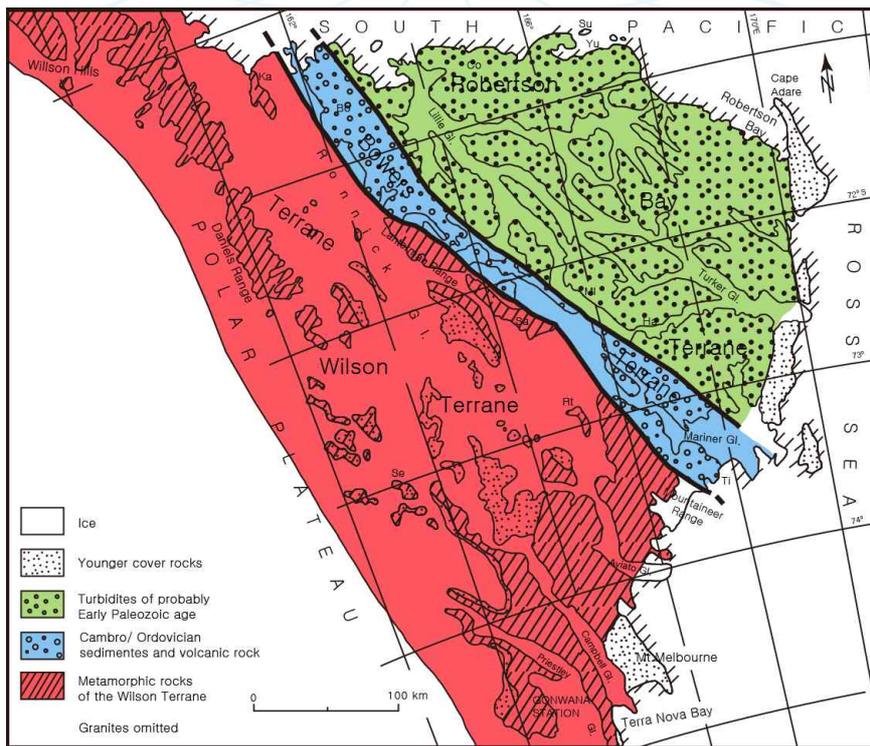


그림 2.1. 북빅토리아랜드를 구성하는 세 부가체.

쇄설성 저어콘을 이용한 월슨테라인 변성퇴적암의 기원지 및 퇴적시기에 대한 자세한 연구문헌은 찾을 수 없지만, 남극종단산맥에서 산출하는 퇴적암에 대한 쇄설성 저어콘 연구로부터 이들이 약 700 Ma부터 퇴적되어 캄브리아기 초기까지 퇴적되었을 것으로 추정할 수 있다(그림 2.2).

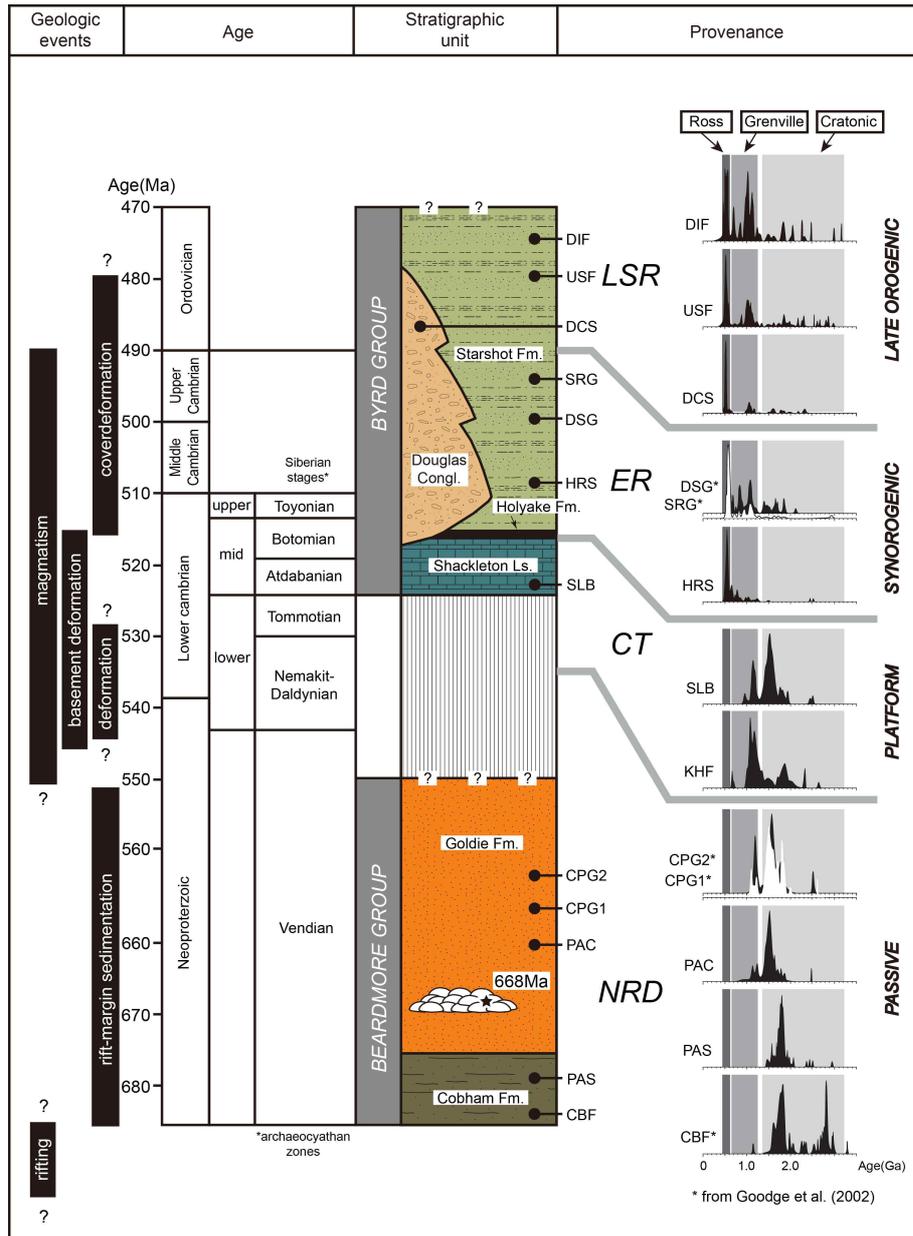


그림 2.2. 남극종단산맥 퇴적암의 쇄설성 저어콘 연령 분포 (after Goode *et al.*, 2004)

남극 종단산맥에서 구해진 쇄설성 저어콘의 연령분포는 로스 조산운동기(500-600 Ma), 그렌빌 조산운동기(0.9-1.2 Ga), 육괴기원(>1.4 Ga)로 구분할 수 있다(그림 2.2). 그렌빌 조산운동에 해당하는 저어콘의 기원지는

빅토리아랜드의 인근의 노출지에서는 찾아볼 수 없다. 최근 남극에서의 지질연구는 지구물리검층을 통해 빙하기저의 기반암에 대한 연구가 진행되고 있다(e.g., Goodge and Fanning, 2010; Goodge and Finn, 2010). 이런 연구 결과 동남극의 기반암들은 여러 개의 미대륙(micro continent)들의 봉합되어 있으며(그림 2.3; Fitzsimons, 2000a, 2000b, 2003), 동남극 대륙을 관통하는 약 1.1 Ga에 형성된 조산대가 존재하며(Ferraccioli et al., 2011), 이 조산대가 700 Ma에 다시 열곡대를 형성 그렌빌 연령을 갖는 쇄설성 저어콘을 공급하였을 것이라는 주장이 제기되었다. 따라서, 이들 쇄설성 저어콘들은 남극 내부의 미노출지로부터 기원했을 가능성이 높다.

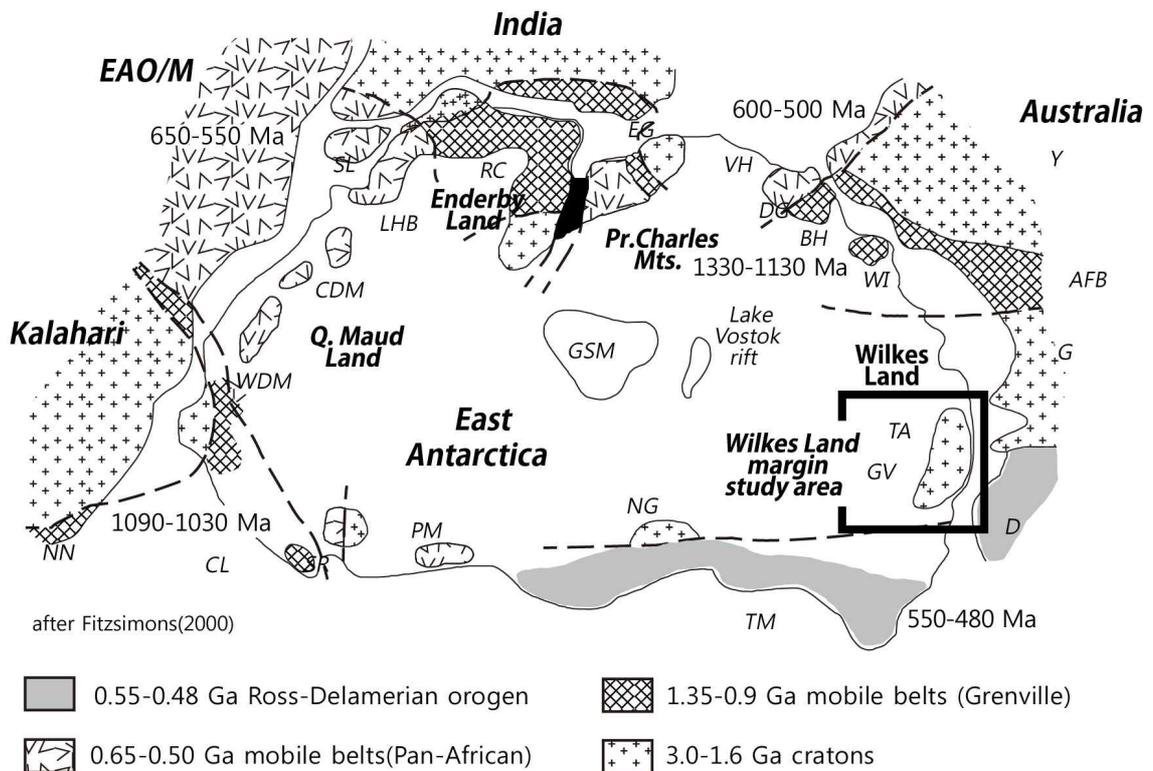


그림 2.3. 5억년 전 곤드와나 초대륙 동쪽의 주요 지구구조체의 분포 (after Fitzsimons, 2000)

국내 연구진에 의한 남극 대륙 내 기반암 및 결정질 암석의 지질/지체구조 연구는 장보고 기지 부지 선정에 위한 사전 답사 이외에는 전무한 실정이다. 저어콘 우라늄-납 연령측정을 위한 장비는 한국기초과학지원연구원에 설치되어 있는 고분해능 이차이온질량분석기(SHRIMP-IIe) 장비를 이용하여 분석하였다. SHRIMP 장비는 크게 Primary column, Sample chamber, ESA(electrostatic analyzer), Magnet, Detector로 구성되어 있다 (그림 2.4). Primary column에서는 분석에 필요한 일차이온빔을 생성한다. 우라늄-토륨-납 동위원소 분석시에는 Duoplasmatron에서 생성된 산소 이온들을 사용하는데, 산소이온들은  $O^+$ ,  $O_2^+$ ,  $OH^+$ 의 형태로 존재한다. 이들 중 Wien mass

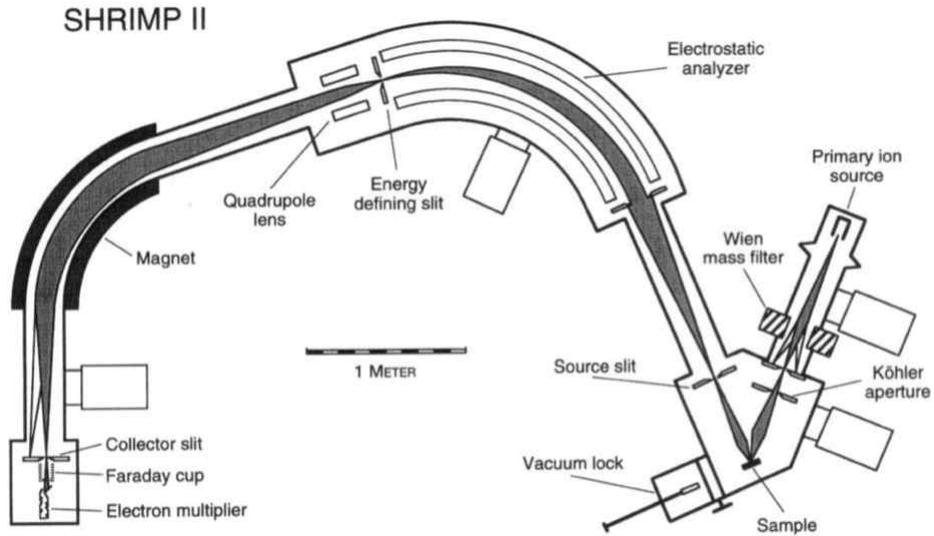


그림 2.4. 고분해능 이차이온질량분석기의 주요 구성 요소

filter를 통해  $O_2^-$  일차이온빔을 추출하고, Köhler aperture를 통해 이온빔의 크기를 조정하여 시료에 조사하게 된다. 일차이온빔의 타격에 의해 생성된 이차이온빔은 ESA와 Magnet을 통과하며 에너지준위와 이온 및 분자들의 질량수에 따라 분리되며, 이렇게 분리한 이차이온들을 Detector에서 EM(electron multiplier)를 사용하여 측정한다. 이 때 산화체 혹은 수화체 형태의 분자와 이온들의 질량차이를 분석하기 위해서는 Mass resolution 5000이상의 sensitivity가 필요하게 된다. 분석에 이용한 상세한 collector의 위치는 그림 2.5와 같다. 연대측정을 위한 검정선 수립방법 및 보통납(common Pb) 보정 등에 관한 사항은 Williams (1998)에 자세히 설명되어 있다.

Sel	Name	AMU	AMU Offset	Time s	Delay s	Coll Pos	Autocenter	Reference	Center	Detector	CUP Set-up	Current CUP Settings
●	190 YbO	189.91427	0.00000	5.0	4.0	40.00	ON	1.0	none	ALL	COUNTER	5
○	199REF	198.88449	0.00000	1.0	2.0	40.00	ON	0.5	none	ALL	COUNTER	5
○	204 Pb	203.99071	0.00000	10.0	1.0	40.00	OFF	0.5	none	ALL	COUNTER	5
○	204.1	204.05072	0.00000	10.0	1.0	40.00	OFF	0.5	BACKGROUND	ALL	COUNTER	5
○	206 Pb	205.98364	0.00000	10.0	2.0	40.00	ON	2.0	REFERENCE	ALL	COUNTER	5
○	207 Pb	206.98386	0.00000	15.0	1.0	40.00	OFF	0.5	none	ALL	COUNTER	5
○	208 Pb	207.98185	0.00000	5.0	1.0	40.00	OFF	0.5	none	ALL	COUNTER	5
○	232 Th	232.05026	0.00000	2.0	2.0	40.00	ON	0.5	REFERENCE	ALL	COUNTER	5
○	238 U	238.06839	0.00000	5.0	2.0	40.00	ON	2.0	REFERENCE	ALL	COUNTER	5
○	248 ThO	248.03322	0.00000	1.0	2.0	40.00	ON	0.5	none	ALL	COUNTER	5
○	254 UO	254.04522	0.00000	2.0	2.0	40.00	ON	0.5	none	ALL	COUNTER	5

그림 2.5. 고분해능 이차이온질량분석기 우라늄-납 연령측정에 사용되는 동위원소

### 제 3 장 위탁연구사업의 내용 및 결과

이번 위탁 연구 최종보고서는 네 개의 절로 구성되어 있다. 첫 번째 절에서는 지난 5년간 이루어 졌던 세 차례의 남극 야외 지질 답사에 대한 내용을 요약하였다. 이후 세 개의 절에서는 야외 지질 답사에서 조사한 내용과 채취한 암석 시료로부터 분석한 광물학적, 암석학적, 지화학적 결과를 요약하였다. 두 번째 절에서는 랜터만 산맥에서 산출하는 베로이사이트 에클로자이트에 대한 암석기재학적 관찰과 함께 석류석, 단사휘석, 각섬석, 펜자이트 등의 광물들에 대한 광물화학 및 전암 주원소 성분과 저어콘 연령 측정 등의 자료들을 포함하고 있다. 이들 자료들로부터 두 번의 시계방향의 온도-압력-시간 경로를 제시하였고, 섭입대에서 이들의 동력학적 의미를 해석하였다. 세 번째 절은 랜터만 산맥 에클로자이트 모암의 생성 환경과 시기에 관한 내용을 담고 있다. 랜터만 에클로자이트에 대한 미량원소 분석 결과는 이들 암석의 모암이 후기 신원생대 열곡대 환경에서 생성된 고철질 심성암임을 지시한다. 이 절에서는 후기 신원생대에디아카란 열곡대가 갖는 지구조적 의미와 함께 남빅토리아랜드, 타즈마니아, 호주 동남부의 후기 신원생대 지각 진화사를 대비하였다. 마지막 절에서는 윌슨 암체 호상편마암에서 분리한 저어콘 결정들의 연령 측정 결과를 제시하였다. 이들 호상편마암에서는 랜터만 에클로자이트에서 측정하였던 연령들이 나타나지 않고, 변성사암의 쇄설성 저어콘 연령 분포와 동일한 결과를 나타낸다. 이에 반해 이들 호상편마암을 관입하고 있는 우백질 암맥에서 분석한 저어콘에서는 이들 변성작용의 흔적이 남아 있다. 이로부터 호상편마암의 변성연령을 제한하였다.

## 제 1 절 야외 지질 답사

### 3.1.1. 1차 야외 지질 답사

#### 3.1.1.1. 활동 내용

북빅토리아랜드 결정질 암석의 변성작용 메카니즘 및 변성시기 규명을 위해 장보고기지 반경 200 km 지역에 위치한 10개의 장소에서 준편마암, 사질/이질편암, 화성암 시료 30여종을 채취함. 이들 시료 중 우선적으로 변성퇴적암의 퇴적시기를 규명하기 위해 사질 편마암/편암 및 이들 암체를 관입하고 있는 화강암에서 저어콘 결정을 분리함. 이 저어콘들에 대한 우라늄-납 동위원소비 측정 결과로부터 윌슨테레인을 구성하는 변성퇴적암의 퇴적물 기원지와 변성시기를 개략적으로 제한함.

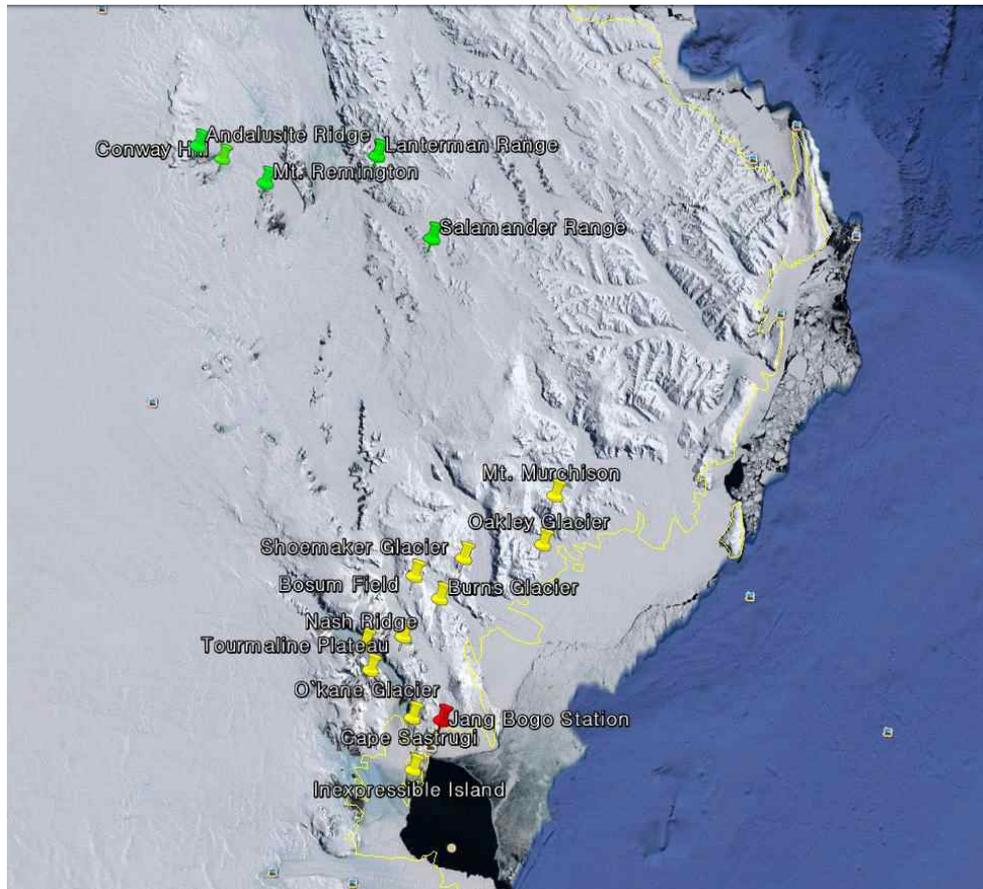


그림 3.1.1. 남극 북빅토리아랜드 윌슨테레인 결정질 암석 기초조사 지역들. 노란색 표시는 1차년도 조사지역을 녹색표시는 2차년도 조사지역을 나타냄.

### 3.1.1.2. 현장조사기간과 조사지역

- 조사기간: 2014. 11. 21 ~ 2014. 12. 18

- 조사지역: 북빅토리아랜드의 Mt. Murchison, Oakley Glacier, Shoemaker Glacier, Burns Glacier, Bosum Field, Tourmaline Plateau, Mt. Borgstrom, O'Kane Glacier, Inexpressible, Island, Cape Sastrugi 인근 지역(그림 3.1.1).

### 3.1.1.3. 분석시료의 암상

북빅토리아랜드 윌슨테레인에서는 다양한 결정질 암석이 산출함(표 3.1.1). 변성퇴적암은 저변성 편암에서부터 고변성 편마암과 혼성암까지 다양한 변성도를 가지고 산출함. 변성퇴적암의 성분은 사질성분이 우세하여 이질 성분의 편암과 편마암에서는 석류석 반상변정이 흔히 산출함. 드물게 각섬암의 산출도 관찰됨.

화성암의 경우 큰 규모로 관찰되는 노두에서는 광물의 산출양상과 조직이 다양하게 나타남. 변성퇴적암을 관입하고 있는 화성암은 흑운모 화강암, 페그마타이트, 석류석 화강암 등 다양하게 나타남. 고철질 암맥도 일부 산출함. 지역적 분포를 고려하여 우선적으로 네 가지 사질 편마암/편암 시료에서 저어콘 결정을 채취함. 또한, 퇴적연대의 하한을 규명하기 위해 사질 편마암을 관입하고 있는 화강암과 편암과 함께 변형받은 화강암 시료에서 각각 저어콘 결정을 채취함.

WT001시료는 윌슨테레인의 가장 북동부에 해당하는 Mountaineer Range에 위치한 Mt. Murchison에서 채취함. 이 노두에서는 습곡된 편마암(WT001A)과 이를 관입하고 있는 화강암(WT001B)이 관찰됨. 이들 암석들은 다시 고철질 암맥에 의해 관입됨. WT008시료와 WT009시료는 윌슨테레인의 중앙부에 해당하는 Deep Freeze Range의 Tourmaline Plateau 인근에서 채취한 시료임. WT008시료는 호상편마암 시료임. WT009시료는 사질편암과 이질편암이 교호하는 형태로 산출하며, 이질편암에서는 흑운모가 반상변정이 뚜렷이 관찰됨. WT011시료는 윌슨테레인의 남서부에 해당되는 Eisenhower Range 지역의 Mt. Borgstrom 인근에서 채취함. 이 시료는 편마암의 우백질과 우흑질이 뚜렷이 구분되는 특징을 나타냄. WT013시료는 WT011시료의 남쪽 O'Kane Glacier 인근에서 채취함. 이 시료의 노두에서는 편암과 이를 관입하고 있는 충돌후 화강암이 관찰됨. 특히, 편암 내에서는 우백질 화강암이 부딘형태로 관찰됨(WT013B).

표 3.1.1. 2014/15 남극 북빅토리아랜드 월슨터레인 결정질 암석시료들의 GPS자료 및 기타 정보.

Sample Site No.	Location	GPS		Lithology	Distance (from JBG)
		DMS	DM		
2014/15 season					
WT001	Mt. Murchison	73°25'56.16"S / 166°37'21.56"E	73°25.936'S / 166°37.359'E	Paragneiss, mafic dyke, leucogranite	156 km
WT002	Oakley Glacier	73°43'52.20"S / 166°2'48.48"E	73°43.870'S / 166°2.808'E	Paragneiss, granite	115 km
WT003	Shoemaker Glacier	73°51'4.2"S / 164°48'28.68"E	73°51.070'S / 164°48.478'E	Paragneiss	90 km
WT004	Burns Glacier	73°55'57.42"S / 164°10'56.58"E	73°55.957'S / 164°10.943'E	Paragneiss	77 km
WT005	Bosum Field	73°51'47.70"S / 163°43'49.98"E	73°51.795'S / 163°43.833'E	Paragneiss, granite	88 km
WT006		73°43'34.80"S / 163°42'5.40"E	73°43.580'S / 163°42.090'E	Paragneiss, granite	88 km
WT007	Tourmaline Plateau	74°6'7.74"S / 163°18'57.06"E	74°6.129'S / 163°18.951'E	Paragneiss, pegmatite, mafic dyke, migmatite	69 km
WT008		74°4'52.02"S / 163°14'14.58"E	74°4.867'S / 163°14.243'E	Paragneiss	69 km
WT009	Mt. Borgstrom	74°12'59.16"S / 163°16'18.78"E	74°12.986'S / 163°16.313'E	Pelitic & psamitic schists	69 km
WT010		74°11'25.50"S / 162°44'7.68"E	74°11.425'S / 162°44.128'E	Schist, mafic dyke	66 km
WT011		74°15'4.08"S / 162°55'45.24"E	74°15.068'S / 162°55.754'E	Paragneiss	66 km
WT012	O'Kane Glacier	74°24'25.02"S / 162°50'25.62"E	74°24.417'S / 162°50.427'E	Quartzite, schist, leucogranite	48 km
WT013		74°20'36.30"S / 162°55'17.82"E	74°20.605'S / 162°55.297'E	Schist, deformed granite, post-tectonic granite	48 km
WT014	Inexpressible Island	74°54'24.90"S / 163°37'20.46"E	74°54.415'S / 163°37.0341'E	Granitoids	36 km
WT015	Cape Sastrugi	74°36'43.20"S / 163°39'48.78"E	74°36.720'S / 163°39.813'E	Pelitic schist	17 km

### 3.1.2. 제 2차 야외 지질 답사

#### 3.1.2.1. 활동 내용

북빅토리아랜드 결정질 암석의 변성작용 메카니즘 및 변성시기 규명을 위해 1차년도에는 장보고기지 반경 200 km 지역에 위치한 10개의 장소에서 준편마암, 사질/이질편암, 화성암 시료 30여종을 채취함. 2차년도에는 장보고기지에서 약 300 km이상 떨어진 헬리윌리힐 캠프 주위 레닉편암지역과 렌터만/살라만더 지역에 대한 고압변성암 및 고변성 편마암/편암 시료들을 채취하여 섭입작용의 연령 측정을 위해 에클로자이트에서 저어콘 결정을 분리함. 이 저어콘들에 대한

우라늄-납 동위원소비 측정 결과와 함께 1차년도에 채취한 편마암시료로부터 모나자이트를 분리 월슨터레인을 구성하는 변성퇴적암 변성시기를 개략적으로 제한함. 제 2차년도 남극 연구조사를 위한 출장 기간은 약 50일이었으나, 남극 입출 중 기상악화로 인한 기간 지체와 남극에서의 기상불량으로 최대 2주로 계획했던 캠프에의 조사기간은 4일이었음.

### 3.1.2.2. 현장조사기간과 조사지역

- 조사기간: 2015. 11. 17 ~ 2015. 12. 30

- 조사지역: 북빅토리아랜드의 Conway Hill, Andalusite Ridge, Mt. Remington, Lanterman Range, Salamander Range 인근 지역(그림 3.1.1).

### 3.1.2.3. 조사지역의 지질학적 배경

월슨터레인과 바우어스터레인 사이에는 렌터만 레인지, 나이아가라폴 레인지, 디센트리지 변성암체 등에 양 터레인 사이에 협재되어 나타나는 고압/중압의 변성암체들이 존재함. 특히, 렌터만 레인지에는 섭입대에서 생성되는 에클로자이트의 산출이 보고됨(Di Vincenzo et al., 1997). 이 암석의 최고변성조건은 850°C, 15 kbar로 추정됨.

렌터만 레인지에서 산출하는 에클로자이트는 성인적으로 호주의 타즈마니아에서 산출되는 에클로자이트와 관련이 깊을 것으로 해석됨(Boger and Miller, 2004). 이들 에클로자이트의 산출은 곤드와나대륙의 형성시기에 남동 고태평양 연안의 섭입대 존재를 의미함. 이들 섭입대는 남극중단산맥을 거쳐 타즈마니아와 호주 내륙으로 연결되어 로스-데라메리안 조산대로 이들 지역에 산재함. 이 지역에서 산출하는 에클로자이트의 형성 시기는 520-490 Ma로 추정되며, 남극중단산맥에서 호주내륙쪽으로 갈수록 생성 연령이 젊어짐(Boger and Miller, 2004).

### 3.1.2.4. 조사지역의 암상

북빅토리아랜드 월슨터레인과 렌터만 레인지와 살라만더 레인지에는 다양한 결정질 암석이 산출함(표 3.1.2). 2차년도 조사 지역 중 Conway Hill, Andalusite Ridge, Mt. Remington 지역에서는 혼성암, 혼성암질 편마암, 석류석 편암 등의 고변성암과 화강암류 암석들이 산출하는 반면, 렌터만 레인지와 살라만더 레인지에서는 고변성의 준편마암과 함께 에클로자이트, 각섬암 등의 고철질 변성암 등이 부딘 형태로 협재되어 나타남.

혼성암의 경우 우백질(leucosome)의 함량이 매우 우세하며, 대부분의 지역에서는 화성암체와 구분하기 어려운 형태로 나타남. 일부 혼성암 노두에서는 습곡된 스트로마틱 혼성암의 형태로 산출하며, 습곡된 멜트포켓도 관찰할 수 있음. 드물게 우흑질(restitite) 편마암이 산출함. 저변성퇴적암의 경우 주로 사질암과 이질암이 교호하는 형태로 산출함. 대부분의 노두에서 눈으로 반상변정을 관찰할 수 없지만, 일부 시료에서는 수 mm 크기의 반상변정이 관찰됨.

표 3.1.2. 2015/16 남극 북빅토리아랜드 월스턴레인 결정질 암석시료들의 GPS자료 및 기타 정보.

Sample Site No.	Location	GPS		Lithology	Distance (from JBG)
		DMS	DM		
2015/16 season					
WT016	Conway Hill	71°36'40.00"S / 160°35'06.50"E	71°36.667'S / 160°35.108'E	Granitoids, Migmatite, gneiss	351 km
WT017		71°32'16.90"S / 160°28'01.50"E	71°32.282'S / 160°28.025'E	Migmatitic gneiss	365 km
WT018	Andalusite Ridge	71°32'35.10"S / 160°18'21.90"E	71°32.585'S / 160°18.365'E	Quartzite, gneiss, schist	367 km
WT019		71°31'47.50"S / 160°16'10.80"E	71°31.792'S / 160°16.180'E	Quartzite, gneiss, schist	369 km
WT020	Mt. Remington	71°43'56.49"S / 161°19'52.59"E	71°43.942'S / 161°19.877'E	Schist	336 km
WT021	Salamander Range	72°06'06.90"S / 164°04'09.72"E	72°06.115'S / 164°04.162'E	Paragneiss, amphibolite eclogite,	284 km
LR001	Lanternman Range	71°40'46.80"S / 163°27'28.68"E	71°40.780'S / 163°27.478'E	amphibolite, paragneiss	330 km
LR002		71°34'40.56"S / 163°10'08.28"E	71°34.676'S / 163°10.138'E	amphibolite, paragneiss	342 km

랜터만 레인지와 살라만더 레인지에서 산출하는 암상은 유사함. 대부분의 노두는 고변성 준편마암으로 구성됨. 이들 사이에 부단화되어 있는 각섬암들이 관찰됨. 이들 부단화된 각섬암들은 습곡되어 있기 때문에, 하부 지각에 해당되는 깊이에서 변성 및 변형작용을 경험한 것으로 해석됨. 랜터만 레인지의 일부 지역에서는 옴파사이트와 석류석 반상변정을 산출이 뚜렷한 에클로자이트를 관찰할 수 있음. 이외에도 사문암도 관찰됨. 후퇴변성작용을 받지 않은 순수한 에크로자이트와 사문암은 노두의 형태로는 잘 관찰되지 않으며, 주로 전석으로 관찰됨.

### 3.1.3. 제 3차 야외 지질 답사

### 3.1.3.1. 활동 내용

북빅토리아랜드 결정질 암석의 변성작용 메카니즘 및 변성시기 규명을 위해 장보고기지 반경 200 km 지역에 위치한 5개의 장소에서 편마암, 사질/이질/석회질 편암, 화성암 시료 30여종을 채취함. 특히, 저압 변성작용의 온도-압력 조건 및 변성 연령 측정을 위해 장보고 기지 인근 O'kane glacier, Mt. Levick, Bier point 지역에서 야외 지질조사를 수행함. 이와 함께 Apostrophe Island-Dessent Ridge 지역에서 Tiger gabbro 및 석류석 각섬암 시료를 추가로 채취함. 2, 3차년도 채집한 랜터만 산맥의 에크로자이트의 온도-압력-시간 경로를 해석하고, 이와 함께 산출하는 석류석 각섬암, 석류석 편암/편마암과 Tiger 반려암 시료에서 저어콘 U-Pb 연령 측정을 실시함. 월슨 암체에서 산출하는 호 환경 화성암에 대한 전암 지화학 및 동위원소 성분 분석을 실시함.

### 3.1.3.2. 현장 조사 기간과 지역

- 조사기간: 2017.11.1. ~ 2017.12.8.

- 조사지역: 북빅토리아랜드 장보고 기지 인근 오케인 빙하 지역, 레빅 산 지역, 비어 포인트 지역 및 어파스트로피 섬-디센트 릿지 지역(그림 3.1.3).

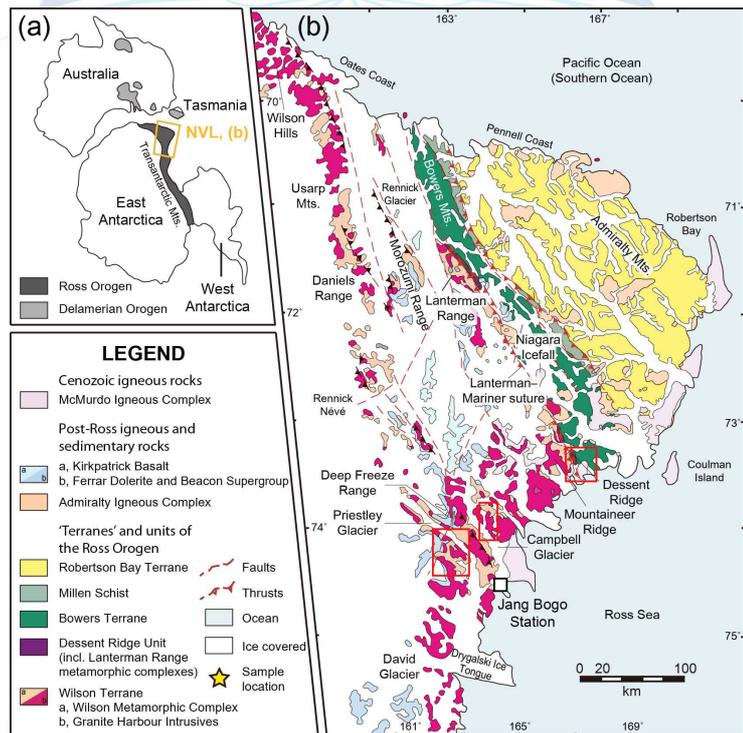


그림 3.1.2. 2017/18 시즌 고생대 변성암 조사지역(붉은색 박스). 남서에서 북동 방향으로 오케인 빙하 지역, 비어 포인트 지역, 어파스트로피 섬-디센트 릿지 지역.

### 3.1.3.3. 현장 조사

지난 1-3 차년도 연구에서 수행한 월슨 암체의 연령 측정 결과, 저압형 변성 작용의 시기는 ~490 Ma로 조사됨(그림 1-8e, f). 이는 ~515 Ma와 ~500 Ma 두 차례에 걸친 변성 작용을 기록하고 있는 랜터만 산맥에서의 변성 연령 결과와는 차이를 보임. 월슨 암체의 변성암은 그래닛 하버 심성암체에 의해 다양한 규모로 관입되어 있어 이들 변성암에서 추정된 연령이 화성암체의 관입에 영향을 받았을 가능성을 완전히 무시할 수 없음. 랜터만 산맥과 월슨 암체 북부에서의 고압 변성작용과 이에 대비되는 저압 변성작용의 시기와 변성 작용 특성을 이해하는 것은 초기 고생대 북빅토리아랜드의 지각 진화를 이해하는데 있어 매우 중요함.

지난 1-3 차년도 연구에서는 노두 단위의 시료 위주 연구를 주로 수행함. 이로 인해 단편적인 지질학적 정보는 축적되었으나, 이를 전체적으로 이해하기 위한 연구가 필요한 시점임. 이러한 필요성에 따라 장보고 기지 인근 조압형 변성작용을 경험한 변성퇴적암 중 변성광물조합이 가장 다양하게 산출하는 오케인 빙하 인근과 레빅 산 및 비어 포인트 인근 지역에서 보다 자세한 야외 지질 조사를 수행함.

### 3.1.3.4. 조사지역의 암상

이들 지역에서 산출하는 변성퇴적암은 주로 석회질 규산염암과 변성이질암으로 구성됨. 이들 중 변성 이질암에서는 석류석-근청석-(규선석)-흑운모의 다양한 광물 조합이 나타남. 이들 광물 조합으로부터 조압형 변성분대를 정의할 수 있을 것으로 기대됨. 이와 동시에 변성이질암의 부분 용융에 의해 생성된 포징 석류석 반정을 포함하고 있는 우백질 암석을 채취함.

기존의 연구에서는 월슨 암체의 저압형 변성작용이 최대 변성 조건을 700-750°C, 4-5 kbar로 해석함(Palmeri et al., 1997). 또한, 초기 석류석+규선석으로 구성된 중압형 광물 조합이 이후 등온감압에 의해 근청석을 포함한 저압형 광물 조합으로 치환되었음을 보고하였다. 이러한 암석기재학적 연구 결과로부터 이 암석들에 최소 2회의 변성작용의 기록이 보존되었을 것으로 추정함. 기존 연구에서 이들 변성작용의 시기에 대한 자료가 전무함.

## 제 2 절 고압 변성암류 변성 진화사

### 3.2.1. 서론

남극중단산맥은 남극 대륙에서 노두가 가장 넓게 분포하는 지역으로, 노출된 기반암류는 대부분 전기 고생대 로스 조산운동의 영향을 받았다. 이 중 해양지각 섭입으로 인한 터레인 부가작용의 증거는 남극중단산맥의 북쪽 끝자락인 북빅토리아랜드에서만 인지되는데, 윌슨과 바워스 터레인 간 융합대인 랜터만 산맥에 산출하는 에클로자이트가 대표적이다(그림 1.1.1). 이번 연구에서는 랜터만 산맥 에클로자이트가 경험한 온도-압력 경로를 정의하고 고분해능 이차이온질량분석기를 이용해 변성 저어콘의 연령을 측정함으로써, 로스 조산운동 내에서 에클로자이트가 갖는 지질학적 의의에 대해 고찰하고자 한다. 아울러 에클로자이트의 전진변성경로 및 변성시기 제한에 관련된 다음의 근본적인 어려움을 해결하고자 한다.

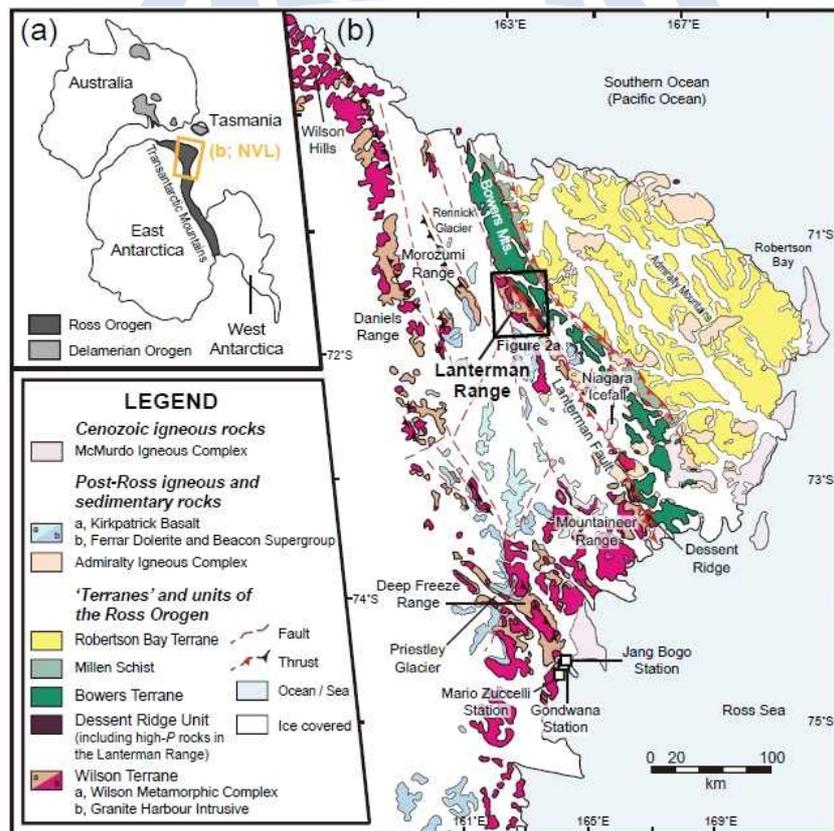


그림 3.2.1. 북빅토리아랜드 지질도.

에클로자이트 암석성인 연구를 위한 기초자료인 온도-압력 조건과 변성시기를 밝히는 일은 그리 간단치 않다. 에클로자이트의 전진변성경로에 대한 정량적 접근은 중고온 환경(>550°C)에서 제한적인데, 이는 주로 최고변성작용이나 이후 고온 후퇴변성작용의 영향 때문이다. 따라서 석류석 등 반상변정 내 포획된 광물조합에 대한 기술 및 열역학 모델링 등을 이용한 접근은 필수적이며, 석류석 성장누대구조가 갖는 특정 원소의 분별을 이용해 더욱 자세한 온도-압력 조건 계산이 가능하다. 이에 못지않게 중요한 것은 에클로자이트 내 저어콘의 U-Pb 동위원소 분석을 통한 변성시기 제한이다. 저어콘 미세영역에 대한 국소 분석은 가장 믿을만한 연령자료를 제공한다고 알려져 있지만, 에클로자이트 내 저어콘에 대한 오랜 기간의 연구결과는 분석 자체의 오차, 상속핵, 납 손실, 비균질성 등 여러 요인 때문에 분산된 연령결과가 도출될 수 있음을 보여준다. 따라서 지질학적-지구조적인 요소들을 면밀히 고려하되, 후퇴변성작용의 영향이 작은 중고온 에클로자이트 시료를 연구대상으로 삼는 것이 가장 바람직하다. 북빅토리아랜드 랜터만 산맥의 에클로자이트는 이러한 조건을 잘 갖추고 있어 에클로자이트의 전진변성경로와 변성시기 제한 및 해석을 논의할 수 있는 최적의 후보로 판단된다. 이번 연구를 통해 온도-압력 조건을 정의함은 물론, 고압 저어콘의 성장사와 섭입-용기 과정에 대한 새로운 견해를 제시하고자 한다.

### 3.2.2 지질학적 배경

북빅토리아랜드는 남빅토리아랜드 및 중부남극종단산맥과 함께 로스 조산대를 구성한다. 로스 조산운동은 곤드와나 형성이후 대륙경계부에서 시작되었으며 남서방향 섭입의 결과로 윌슨, 바워스, 로버트슨 베이 터레인이 접합되어 북빅토리아랜드를 형성하였다(예, GANOVEX Team, 1987; Kleinschmidt & Tessensohn, 1987). 가장 내륙에 위치한 윌슨 터레인은 동남극 대륙경계부에 발달한 화성호로, 조산운동과 관련된 심성암체와 대륙경계부 변성퇴적암류로 구성된다(Bomparola et al., 2007; Estrada et al., 2016). 윌슨 터레인의 동쪽 경계부에 부가된 바워스 터레인은 화산쇄설성 퇴적암류가 우세하며(Weaver et al., 1984), 그 동쪽에 접합된 로버트슨 베이 터레인은 두꺼운 저탁암 대이다(Dallmeyer & Wright, 1992).

에클로자이트가 산출하는 랜터만 산맥은 윌슨-바워스 터레인 경계부인 북서-남동 방향 랜터만 단층대의 중부에 위치한다(그림 3.2.2). 터레인 경계부에 가까워지는 동쪽으로 갈수록 중고압형 변성암류가 우세해지며, 경계부를 따라 부딪

혹은 렌즈상의 에클로자이트, 각섬암, 변성고철질암류가 석영장석질 편암/편마암류 내에 포획된 형태로 산출한다(Di Vincenzo et al., 1997; Ricci et al., 1996). 에클로자이트 표식지는 허스키 패스의 한 능선으로 이탈리아 지질학자들에 의해 많은 연구가 진행된 바 있다(예, Capponi et al., 1997; Di Vincenzo et al., 1997, 2016; Ghiribelli et al., 2002; Palmeri et al., 2003, 2009, 2011). 최대 코에사이트가 안정한 초고압 변성작용과 캄브리아기 변성시기(약 530-500Ma)가 제안되었다.

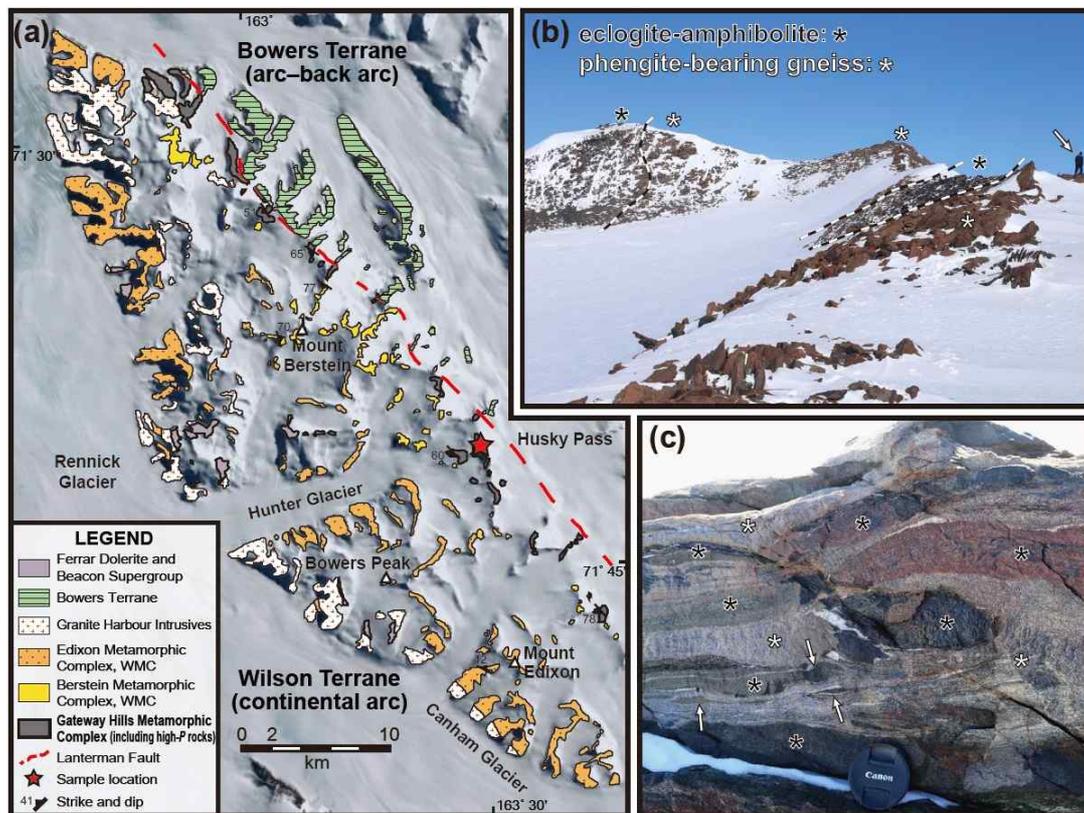


그림 3.2.2. 랜터만 산맥의 지질도와 변성고철질암류의 산출 양상.

### 3.2.3 시료 암석기재

랜터만 산맥 에클로자이트는 대부분 후퇴변성기원 석류석 각섬암류로, 엄밀한 의미의 에클로자이트는 그 양이 작다. 시료 위치는 Capponi et al.(1997)의 지질도 상에서 노두 4번의 북쪽 파트로 Di Vincenzo et al.(2016)에 의해 중온 에클로자이트가 보고된 곳과 같으며, Di Vincenzo et al.(1997)이 보고한 초고압 고온 에클로자이트의 위치보다는 더 북쪽에 위치한다. 본 연구에서는 후퇴변성작용 효과를 가능한 배제하기 위해 두 개의 에클로자이트 시료(E-1a와 E-1c)에 집중하였다.

에클로자이트 시료는 중립질이며 엽리가 대체로 잘 발달하나 선구조는 뚜렷하지 않다. 대표광물조합은 석류석-옴파사이트-각섬석-녹렴석-금홍석으로, 소량이 펜자이트와 석영이 산출한다. 석류석 반상변정은 크기, 조직, 포획물에 따라 크게 세 종류로 나눌 수 있다(그림 3.2.3). 첫 번째 석류석(Grt I)은 반자형 내지 자형이고 포획물이 많은 중심부와 포획물이 거의 없는 외연부가 특징이다. 중심부의 포획물은 옴파사이트, 각섬석, 녹렴석, 파라고나이트, 금홍석, 석영 등이며, 티타나이트가 종종 관찰된다. 이 중 석영과 금홍석 포획물은 S자형 배열을 보이기도 한다. 환상의(atoll-shaped) 두 번째 석류석 반상변정(Grt II) 역시 Grt I과 유사한 포획물을 가지며, 상대적으로 입자 크기가 작은 세 번째 석류석(Grt III)은 포획물이 적고 반자형 내지 타형으로 엽리에 잘 배열한다.

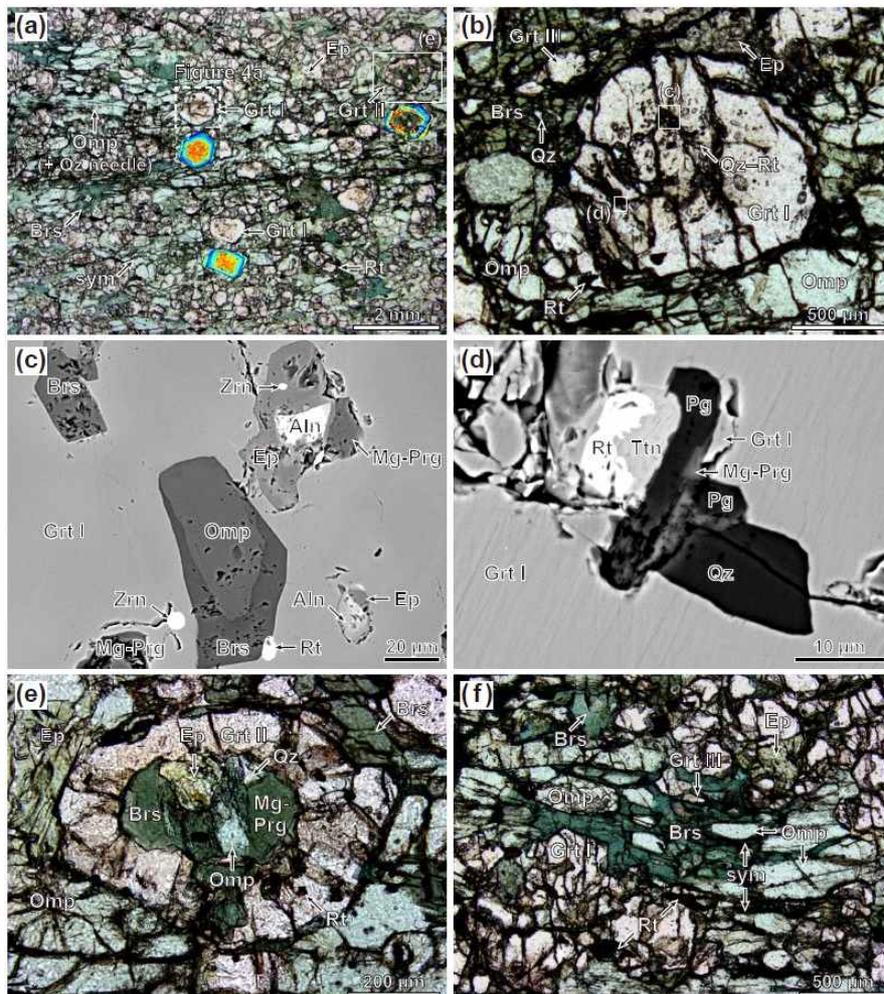


그림 3.2.3. 에클로자이트 시료의 광물조합과 공생관계를 보여주는 현미경사진(a,b,e,f)과 후방산란전자영상(c,d).

기질 내 옴파사이트는 주로 반자형이고 석영, 금홍석 등의 포획물이 풍부한 중심부가 특징이다. 세립질의 단사회석은 사장석과 교대성장하여 옴파사이트를 치환한다. 각섬석은 석류석 및 옴파사이트와 접하는 반자형과 기질의 타형 반상변정으로 산출한다. 녹렴석은 일부 후퇴변성기원 반자형으로 관찰되며, 펜사이트와 파라고나이트는 저어콘, 갈럼석, 인회석 등 부성분광물처럼 기질에는 거의 산출하지 않는다.

### 3.2.4. 분석 방법

광물화학조성과 X-선 매핑은 극지연구소의 JEOL JXA-8530F 전계방출(field emission) 전자현미분석기(EPMA)를 이용하여 분석하였다. 금홍석 내 Zr 함량은 같은 기기를 사용하여 분석하였으며, Zack et al.(2002, 2004)의 방법을 따랐을 때 검출한계는 약 8 ppm이다. 200 ppm 이상의 Si가 측정된 경우는 주변 규산염광물로 인한 것으로 판단하여 제외하였다. 에클로자이트의 전암조성은 캐나다 온타리오의 Actlabs에 의뢰, 유도결합 광학발광분석기를 이용하여 측정되었다.

에클로자이트 시료 E-1a에서 Cheong et al.(2013)의 중액처리법을 통해 저어콘을 분리하고 수선별하였다. SL13과 FC-1 표준시료는 각각 U 함량과  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  비 보정을 위해 분리된 저어콘과 함께 마운트로 제작하였다. 기초과학지원연구원의 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 음극선발광(CL)영상을 촬영하여 내부조직을 관찰하고, 포획물이 있는 경우 판별하였다. U-Pb 연령측정은 기초과학지원연구원의 고분해능 이차이온질량분석기(SHRIMP-IIe)를 이용하였다.

### 3.2.5. 광물 화학

#### 3.2.5.1 석류석

석류석 반상변정 대부분은 뚜렷한 누대구조를 갖는다(그림 3.2.4). Grt I은 종모양의 Mn 성분변화( $\text{Sps}=\text{Mn}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg}+\text{Ca}+\text{Mn})=0.03 - 0.16$ )를 가지며, 나머지 석류석은 Mn 함량이 매우 낮다( $\text{Sps}<0.05$ ; 그림 3.2.5). Grt I의 중심부는  $\text{Ca}(\text{Grs}=\text{Ca}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg}+\text{Ca}+\text{Mn})=0.17 - 0.25)$ 이 상대적으로 풍부하고, 외연부는 바깥으로 갈수록  $\text{Mg}(\text{Prp}=0.27 - 0.40)$ 은 증가하고  $\text{Ca}(\text{Grs}=0.18 - 0.08)$ 은 감소하는 경향을 보인다. Grt I의 전반적인  $X_{\text{Fe}}$  값( $=\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})=0.56 - 0.85$ )은 바깥으로 갈수록 대체로 감소한다. Grt II의 성분 변화경향은 Mn이 결핍된 것을 제외하고는 Grt I과 유사하다. Grt III의 중심부( $\text{Prp}=0.30 - 0.41$ ;  $\text{Grs}=0.09 - 0.17$ ;

$X_{Fe}=0.51 - 0.64$ )는 Grt I의 외연부와 성분이 유사하다. Ca X-선 지도에서 외연부보다 더 바깥쪽의 Ca이 풍부한 영역이 2개 추가로 관찰되는데 안쪽 아영역(sub-domain; Prp=0.27 - 0.29, Grs=0.26 - 0.30,  $X_{Fe}=0.60 - 0.62$ )이 바깥쪽 아영역(Prp=0.32 - 0.36; Grs=0.16 - 0.20;  $X_{Fe}=0.55 - 0.59$ )보다 Ca은 풍부하고 Mg은 결핍된다.

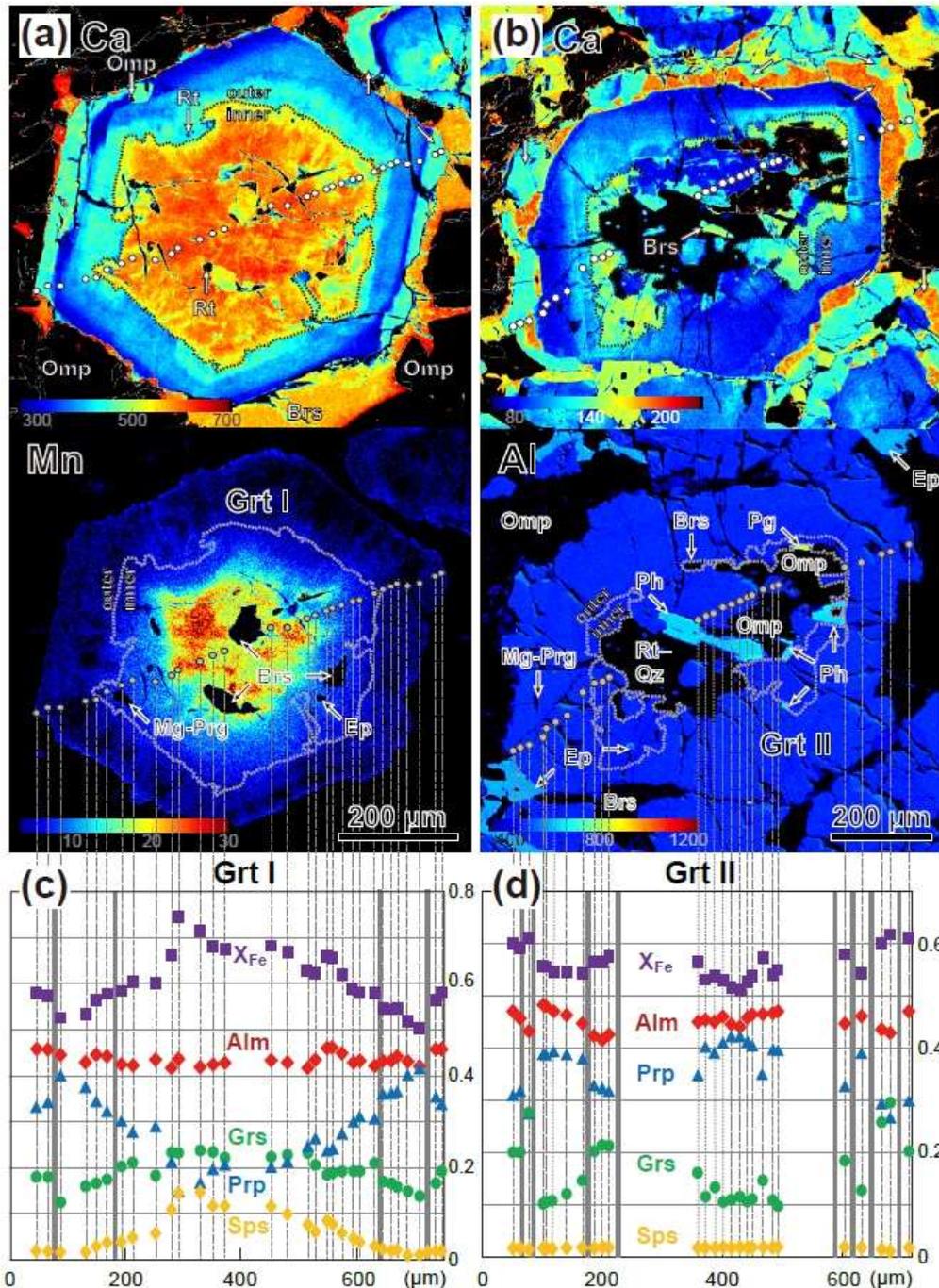


그림 3.2.4. 석류석 반상변정의 X선 지도(a,b)와 성분 변화도(c,d).

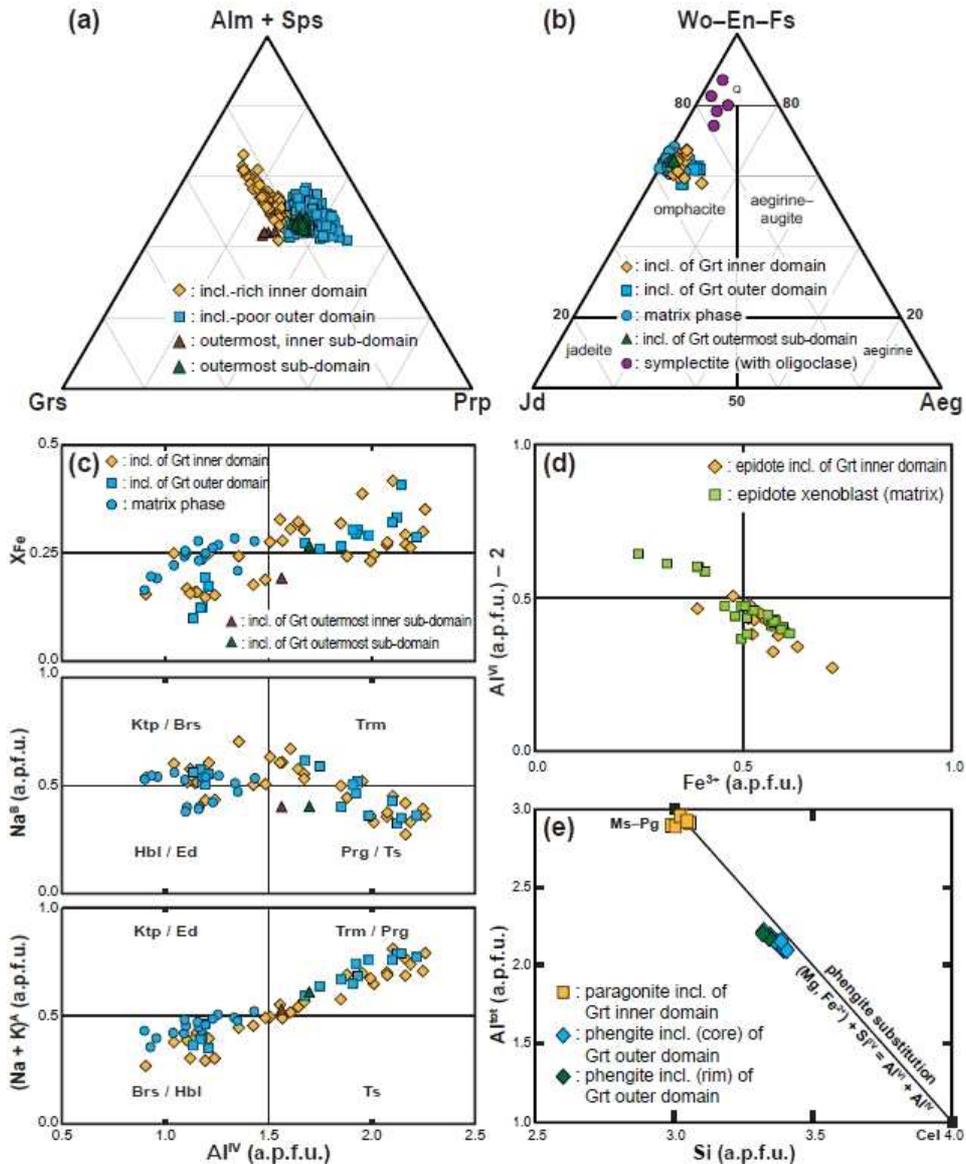


그림 3.2.5. 에클로자이트 내 주요광물들의 성분도. (a) 석류석, (b) 단사회석, (c) 각섬석, (d) 녹렴석, (e) 펜자이트와 파라고나이트.

### 3.2.5.2. 단사회석

석류석 반상변정 내 옴파사이트 포획물의 제이다이트 함량( $Jd = Na - Fe^{3+} - Cr$ )과  $X_{Fe}$  값은 각각 0.28-0.35, 0.21-0.25이다(그림 1.1.5). Ca이 풍부한 최외연부 아영역의 옴파사이트 포획물은 제이다이트 함량( $Jd=0.34$ )이 균일하나  $X_{Fe}$  값(0.24-0.29)은 약간 더 높다. 기질 내 옴파사이트 반상변정은 유사한 제이다이트 함량( $Jd=0.34 - 0.36$ )과  $X_{Fe}$  값(0.22-0.27)을 갖는다. 세립질의 사장석과 교대성장하는 단사회석은 투회석에 해당한다( $Jd=0.09-0.20$ ).

### 3.2.5.3. 각섬석

각섬석은 성분상 소듐-칼슘 및 칼슘 각섬석으로, 각각 배로이사이트와 Mg-과가사이트가 우세하다(그림 1.1.5). Grt I의 중심부에 포획된 각섬석은 두 개의 성분군으로 나눌 수 있다;  $Al^{IV}$ 가 결핍된 과가사이트 군( $<1.25a.p.f.u.$ )과  $Al^{IV}$ 이 상대적으로 풍부한 배로이사이트 군( $>1.35 a.p.f.u.$ ). 전자는 주로 단독광물 포획물로, 후자는 옴파사이트 혹은 파라고나이트와 교대성장한 포획물로 산출한다. Grt I과 Grt II 외연부에 포획된 각섬석 역시 중심부 포획물과 유사한 조성을 가지며, 기질 내 반상변정 각섬석은 대부분  $Na^B(0.38-0.56 a.p.f.u.)$ 가 풍부한 배로이사이트이다. 석류석의 최외연부 아영역에도 포획물로서 각섬석이 존재하는데 대부분 과가사이트에 해당한다.

### 3.2.5.4. 녹렴석

석류석 중심부에 포획된 녹렴석의  $X_{Fe^{3+}}$  값( $=Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Al^{VI}-2)=0.46-0.72$ )은 기질 내 반상변정( $0.28-0.61$ )보다 높다. 갈럼석의 성분은 분석하지 않았다.

### 3.2.5.5. 펜사이트와 파라고나이트

석류석 반상변정 내 펜사이트 포획물은 뚜렷하진 않으나 내부( $Si=3.34 - 3.40a.p.f.u.$ )에서 외부( $Si=3.32 - 3.36a.p.f.u.$ )로 갈수록 Si값이 감소하는 경향을 보인다.

### 3.2.5.6. 금홍석과 사장석

금홍석의 Zr 함량은 입자 크기나 조직에 관계없이 약 160-230ppm이다. 세립질의 단사휘석과 교대성장하는 사장석은 성분상 올리고클래스( $An=Ca/(Ca+Na+K)=0.14 - 0.16$ )에 해당하고, 석류석 중심부의 포획물은 알바이트( $An=0.04-0.07$ )이다.

## 3.2.6. 변성 진화사

에클로자이트 암석기재와 광물화학을 바탕으로 M1-M4의 변성단계가 정의된다(그림 3.2.6). 에클로자이트상 M<sub>1</sub> 전진변성단계는 석류석 중심부와 다양한 포획광물조합의 산출이 특징이다. 석류석 중심부  $X_{Fe}$  값의 감소 경향과 종모양 Mn 부화경향은 석류석이 녹니석 붕괴로 Konrad-Schmolke et al.(2008)의 반응(녹니석 + 녹렴석 + 석영 = 석류석 + 과가사이트 + H<sub>2</sub>O)을 통해 성장하였음을 지시한다.

M<sub>2</sub> 단계에서는 배로이사이트 반응물을 통해 석류석이 성장하고 옴파사이트의 제이다이트 함량이 증가한다. 이 역시 Konrad-Schmolke et al.(2008)의 반응식 3과 유사한 반응을 거친다(배로이사이트 + Jd 낮은 단사회석 = 석류석 + Jd 높은 단사회석 + 석영 + H<sub>2</sub>O). 이 반응은 각섬석의 Na이 풍부해지는 경향과 잘 일치한다.

metamorphic stage mineral	Prograde M1 EAE*-facies	Prograde M2 AE*-facies	M3A	Peak M3B AE*-facies	retrograde M4 A*-facies
Garnet	Mn-rich, X <sub>Fe</sub> = 0.56–0.85 Grs = 0.17–0.25	Mn-poor, X <sub>Fe</sub> = 0.51–0.64 Grs = 0.09–0.17	X <sub>Fe</sub> = 0.60–0.62 Grs = 0.26–0.30	X <sub>Fe</sub> = 0.55–0.59 Grs = 0.16–0.20	
Omphacite	Jd = 0.33–0.42			Jd = 0.34	
Amphibole	Mg-Prg > Brs	Brs > Mg-Prg	Mg-Prg		
Epidote	X <sub>Fe3+</sub> = 0.46–0.72				
Phengite	(+ paragonite)	Si = 3.36–3.40 p.f.u.			
Rutile		Zr = 160–230 ppm			
Titanite	(pre-M1)	* EAE: epidote–amphibole eclogite AE: amphibole eclogite A: amphibolite			
Quartz					
Plagioclase	(pre-M1 albite) An = 0.04–0.07				oligoclase An = 0.14–0.16

그림 3.2.6. 에클로자이트의 광물공생관계와 변성단계.

M<sub>3A</sub> 단계는 석류석의 최외연부 아영역이 정의하는데, Ca 부화는 옴파사이트나 각섬석 등 반응물 내 Ca의 느린 확산도와 탈수반응 후의 건조한 환경으로 설명된다(예, Kim & Cho, 2008; Rubie, 1990). M<sub>3B</sub> 단계의 석류석 아영역은 상대적으로 Ca이 결핍되며, M<sub>2</sub> 석류석의 성장과 같은 반응이 기대된다. 후퇴변성작용에 해당하는 M<sub>4</sub> 단계는 투회석-올리고클래스의 옴파사이트 치환과 같은 감압경로로 정의된다.

### 3.2.7. 온도-압력 계산

#### 3.2.7.1. 지온지압계

Ravna & Terry(2004)의 석류석-단사회석-펜자이트-석영 지온지압계와 Tomkins et al.(2007)의 금홍석 내 Zr 함량 지온계, Holland(1983)의 지온지압계를 사용하였다(그림 3.2.7). M<sub>2</sub> 석류석과 이에 포획된 옴파사이트, 펜자이트를 이용한

결과는 약  $660 \pm 100^\circ\text{C}$ ,  $25 \pm 3\text{kbar}$  ( $2\sigma$ )이다.  $M_{3B}$  석류석-옴파사이트-팬자이트는 약  $720 \pm 80^\circ\text{C}$ ,  $26 \pm 3\text{kbar}$  ( $2\sigma$ )를 도출하였고, 금홍석 내 Zr 함량 지온계는 상대적으로 균일한 약  $650\text{--}700^\circ\text{C}$ 를 도출하였다.  $M_4$  감압 단계는 투회석 성분으로부터  $500\text{--}600^\circ\text{C}$ 에서 약  $7\text{--}12\text{kbar}$ 로 추정되었다.

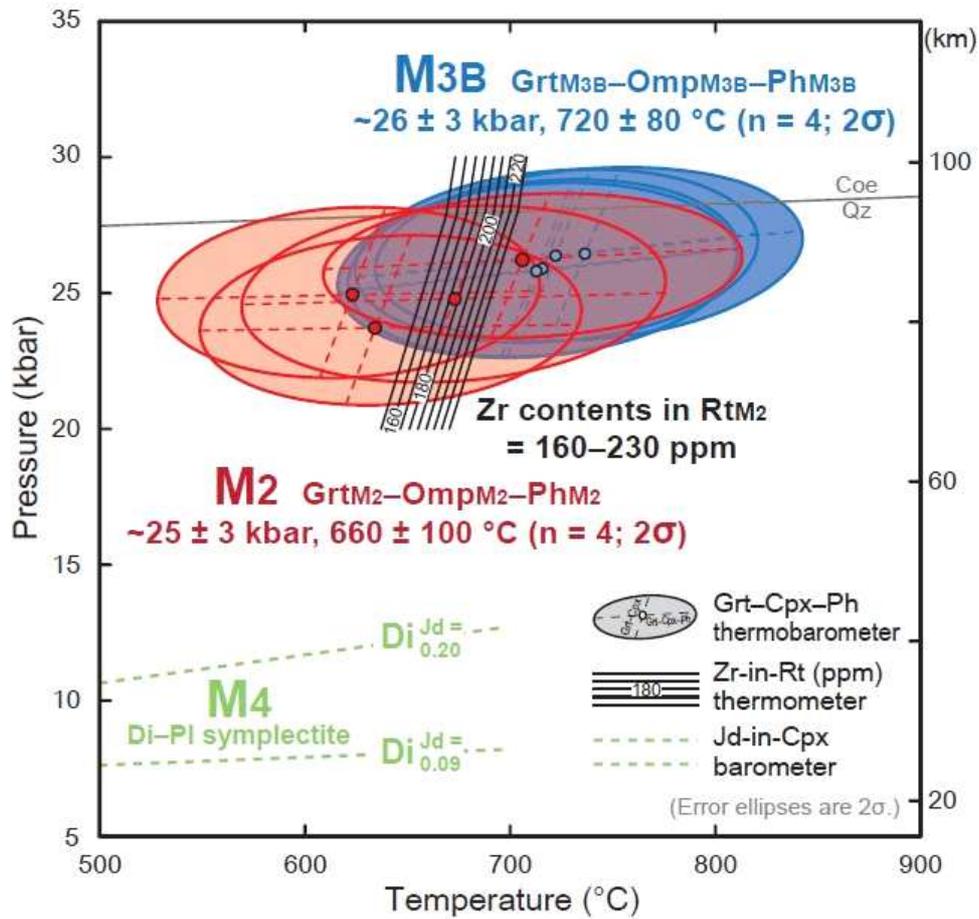


그림 3.2.7. 지온지압계 계산결과.

### 3.2.7.2. 열역학 모델링

열역학 모델링은 Holland & Powell(1998, 2011)의 열역학 데이터베이스와 de Capitani & Petrakakis(2010)의 Theriak-Domino 소프트웨어를 이용하였다. 고용체 광물은 석류석, 단사휘석, 각섬석, 백운모류, 경녹니석, 녹니석, 장석이며, 로소나이트, 석영/코에사이트, 물이 추가로 고려되었다. 전암성분 중 물 함량을 유추하기 위한 모델링 결과는  $M_1$ 과  $M_2$  광물조합에 각각 10 mol.%와 1 mol.% 이상의 물이 필요함을 보여준다(그림 3.2.8). 유사한 방법으로 전암성분 내  $\text{Fe}^{3+}$ 의 함량을 근사하기 위한 모델링 결과(그림 3.2.9), 기존 전암성분의 경우  $X_{\text{Fe}^{3+}} (= \text{Fe}_2\text{O}_3 / (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)) = 0.18$ , 석류석  $M_1$  영역에 해당하는 성분을 추출한 경우는

$X_{Fe^{3+}}=0.40$ 의 값을 사용했다. 부분용융은 고려하지 않았다.

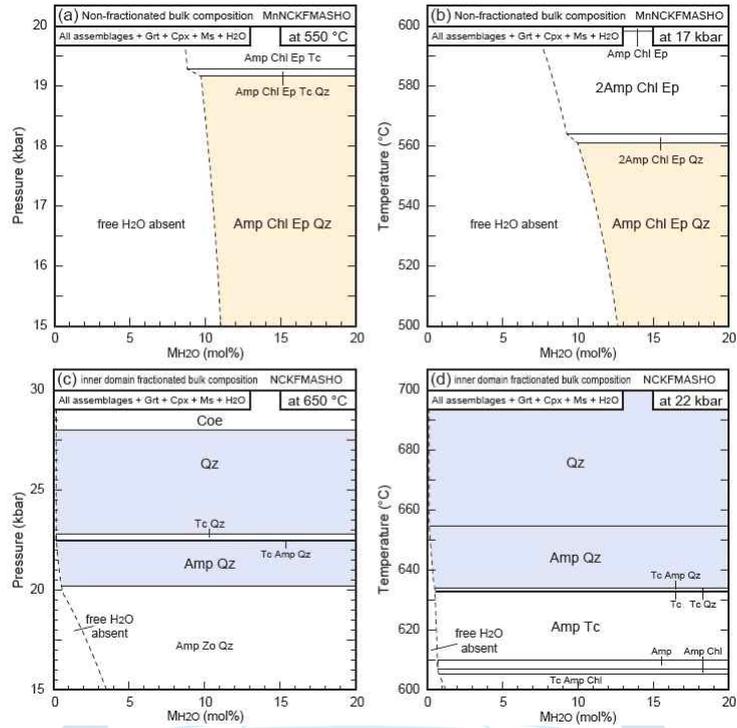


그림 3.2.8. 압력-H<sub>2</sub>O 및 온도-H<sub>2</sub>O 모델링 결과.

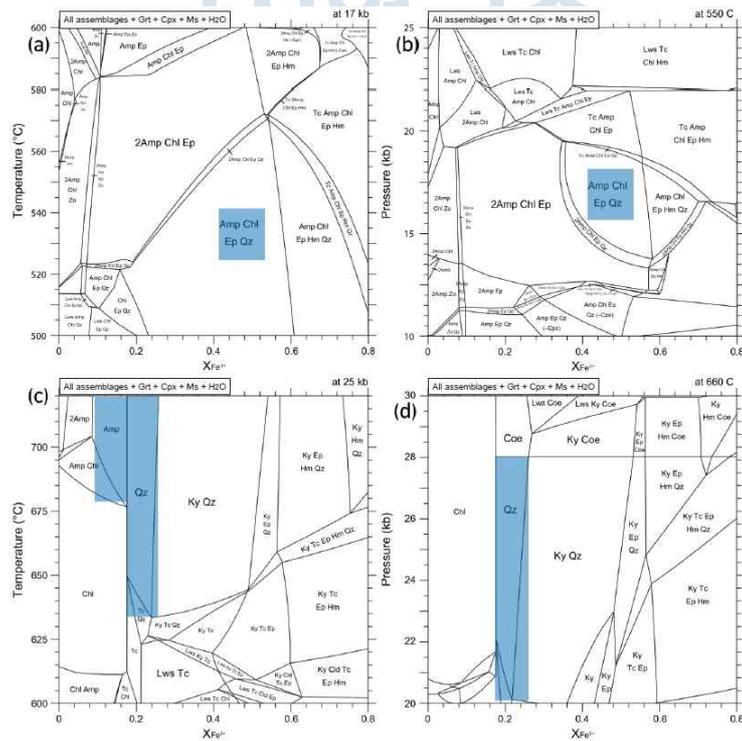


그림 3.2.9. 압력-Fe<sub>3+</sub> 및 온도-Fe<sub>3+</sub> 모델링 결과.

열역학 모델링은 전암조성과  $M_1$  석류석 성분을 분별한 조성, 두 가지 경우를 상정하였다(그림 3.2.10). 전자의 경우,  $M_1$  전진변성조건은 석류석-옴파사이트-각섬석-녹니석-녹렴석-석영이 안정한 약 520-570°C, 15-20kbar이며 이는  $M_1$  석류석의 등치선(isopleth)와도 잘 일치한다.  $M_1$  석류석, 즉 Mn을 뺀 조성을 이용한 모델링 결과는 석류석-옴파사이트-각섬석-펜자이트-석영 조합이 약 630-650°C, 20-23kbar에서 안정함을 보여준다.  $M_2$  석류석의 Prp, Grs 등치선과 각섬석의  $Na^B$  등치선도 이를 뒷받침하며, 지온지압계의 결과와도 잘 일치한다.

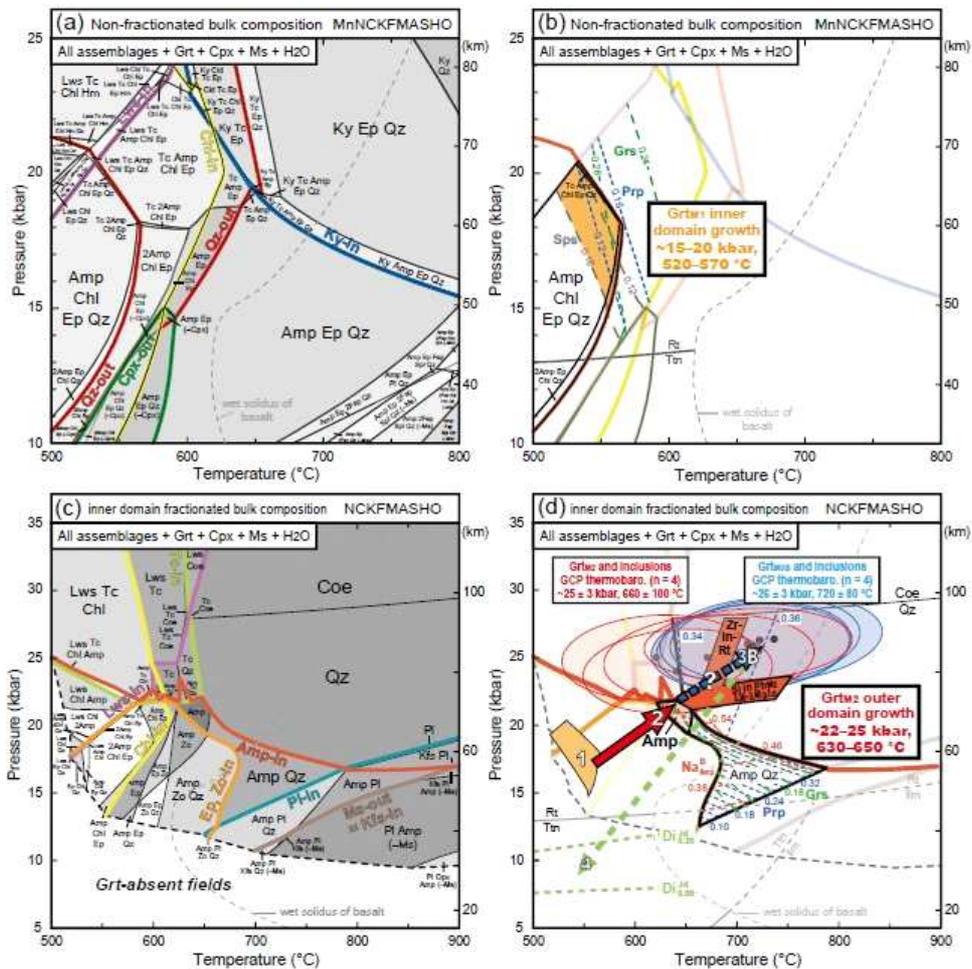


그림 3.2.10. 에클로자이트의 열역학 모델링 결과.

### 3.2.8. 저어콘 연령측정

에클로자이트 시료 E-1a에서 분리한 저어콘 결정들은 반자형 내지 타형이며 약 50-300 $\mu$ m 크기이다. 저어콘 결정들은 음극선발광 영상에서 밝은

신변정(neoblast)을 제외하고는 흔히 중심부, 외연부 및 최외부의 뚜렷한 누대구조를 갖는다(그림 3.2.11). 저어콘의 중심부는 석영과 바늘 모양의 인회석을 포획하는 화성기원인데 반해, 외연부와 최외부는 석류석, 옴파사이트, 녹렴석, 갈럼석, 금홍석 등을 포획하고 있어, 에클로자이트상 변성기원임을 지시한다(그림 3.2.12, 3.2.13). 신변정 역시 변성광물들을 포획한다.

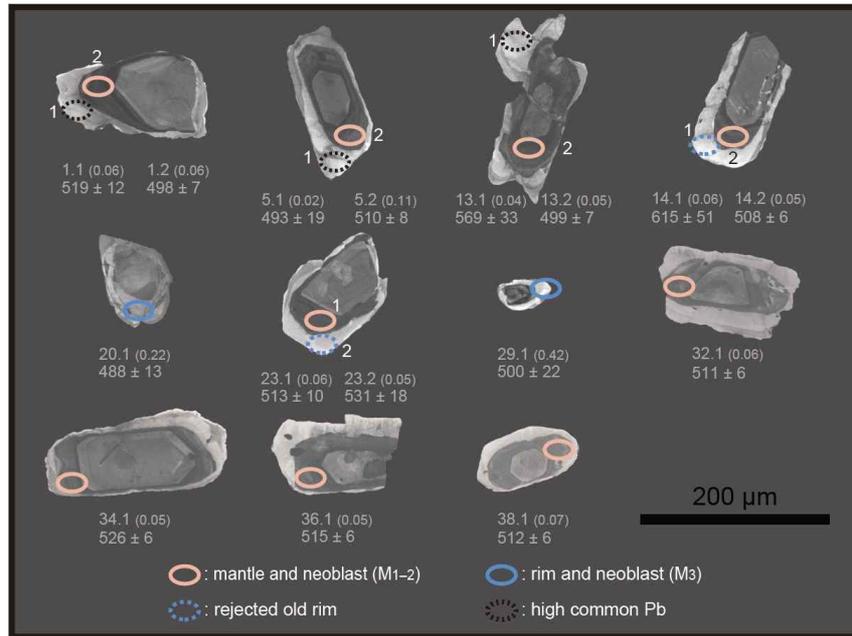


그림 3.2.11. 에클로자이트 저어콘의 음극선발광영상.

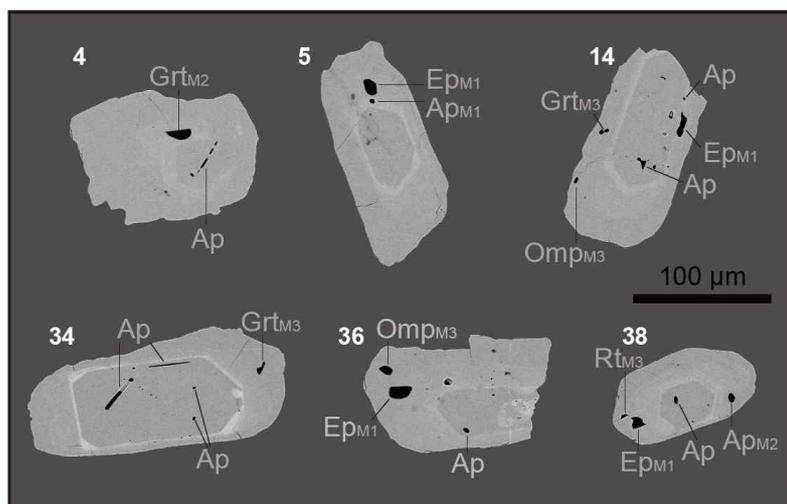


그림 3.2.12. 저어콘 내 포획광물(후방산란전자 영상).

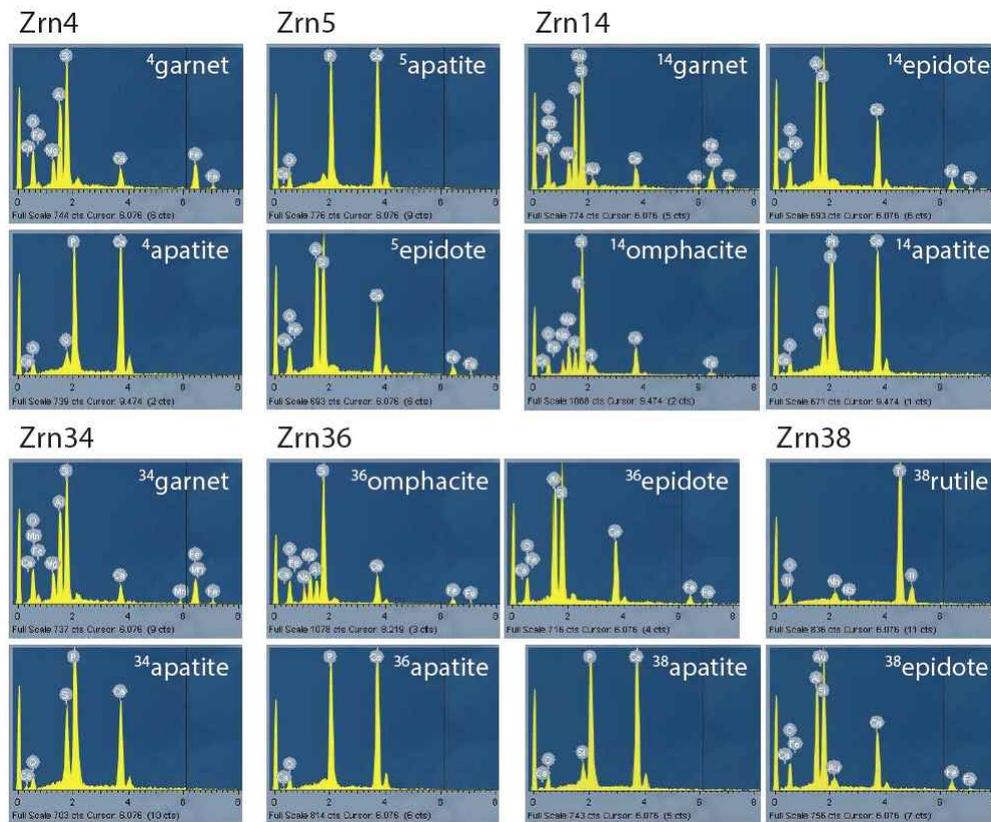


그림 3.2.13. 저어콘 포획광물의 EDS 자료.

SHRIMP 분석결과, 대부분의 저어콘 결정에서 U, Th 함량이 낮아 방사성붕괴 기원 Pb 양도 작다. 불가피한 보통납의 높은 함량으로 인해, 오차도 상대적으로 크고 불일치도도 높다. Th/U 비가 낮은 23개의 외연부와 최외부 영역 및 신변정으로부터 2개의 걸보기연령군이 인지된다;  $529 \pm 13 \text{Ma}(1\sigma) \sim 508 \pm 8 \text{Ma}(1\sigma)$ 와  $503 \pm 8 \text{Ma}(1\sigma) \sim 488 \pm 18 \text{Ma}(1\sigma)$ . 이들로부터 오차범위에서 분리되는  $515 \pm 4 \text{Ma}(t_0; n=17; \text{MSWD}=0.82)$ 와  $498 \pm 11 \text{Ma}(t_0; n=6; \text{MSWD}=0.36)$ 의 U-Pb 연령을 도출하였다(그림 3.2.14).

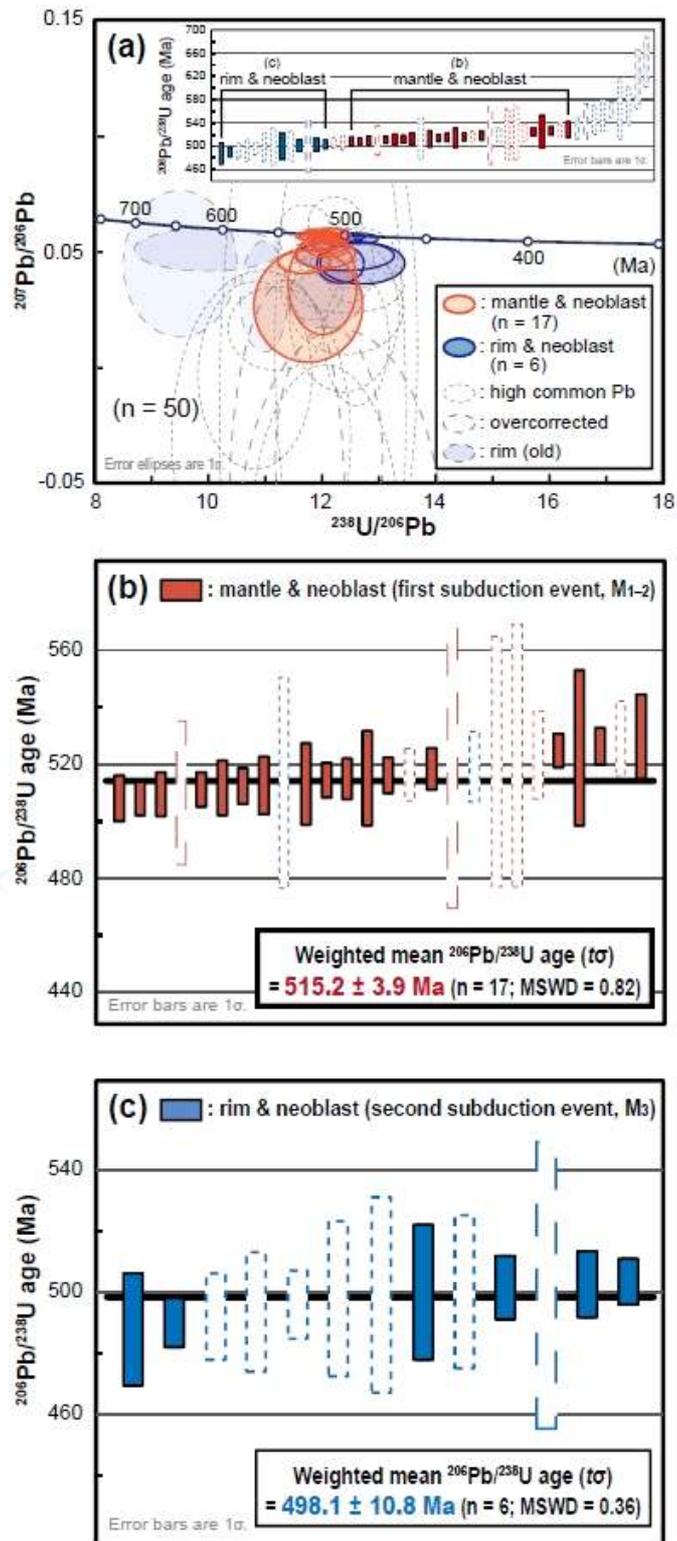


그림 3.2.14. 저어콘 분석결과를 도시한 테라-와서버그도(a)와 변성연령(b,c).

### 3.2.9. 토의

#### 3.2.9.1. 랜터만 산맥 에클로자이트의 온도-압력 경로

에클로자이트의 전진변성경로는 크게  $M_{1-2}$ 와  $M_3$  두 부분으로 나뉜다.  $M_1$  변성조건은 열역학 모델링과 석류석의 등치선으로부터 얻은 약 520–570°C, 15–20kbar인데, 이는 각섬석, 녹렴석, 파라고나이트, 펜자이트 등 포획된 함수광물의 존재와 잘 일치한다.  $M_2$  변성단계는 배로이사이트와 펜자이트 외에는 무수광물로 이루어진 조합이 안정한 약 630–650°C, 22–25kbar 조건으로의 섭입을 지시한다(50–65km 깊이에서 70–80km 깊이로의 매몰). 한 가지 특기할 것은, 석류석 반상변정의 Ca/Mg 비가 외부로 갈수록 낮아지는 경향이다. 이러한 석류석의 성분변화 양상은 북빅토리아랜드 랜터만 산맥, 히말라야의 Tso Morari, 중국 다비-수루 조산대를 포함해 여러 중온/고압 터레인의 에클로자이트로부터 보고된 바 있다(예, Konrad-Schmolke et al., 2008; O'Brien, 1997; Page et al., 2007; St-Onge et al., 2013; Wang et al., 1992; Zhang et al., 2005). 이들 에클로자이트의 광물조합 역시 랜터만 산맥 에클로자이트의 것과 매우 유사하다. Ca/Mg 비의 감소가 특징인 석류석의 누대구조는 석류석을 만드는 주요 반응물이 Ca이 풍부한 상에서 상대적으로 결핍된 상으로의 변화로 잘 설명된다(Konrad-Schmolke et al., 2008).

$M_{3B}$  변성단계는 추가적으로 약 85–95km 깊이로의 섭입을 지시한다. 비록  $M_2$  변성조건과 오차범위 내에서 겹치나, 석류석의 비평형성장을 야기한  $M_{3A}$  단계에 의해 분리된다. 위 온도-압력 경로를 종합하면 평균지온구배가 약 5–7°C/km( $M_1 - M_2$ )에서 7–10°C/km( $M_2 - M_3$ )로 증가함을 유추할 수 있다. 이는 섭입속도의 감소 혹은 열적완화로 설명이 가능한데, 후자는 바위스 터레인처럼 상대적으로 가벼운 지괴가 월슨 터레인으로 부가하는 과정과도 잘 일치한다(예, Groppo et al., 2009; Rosenbaum et al., 2002). 다른 설명은 섭입대에서 해양지각 암석들이 섭입-용기의 순환을 경험하는 것이다(예, Kabir & Takasu, 2010; Rubatto et al., 2011).

이 연구에서 정의한  $M_1$ – $M_3$ 의 전진변성경로는 Di Vincenzo et al.(2016)에 의해 보고된 중온 에클로자이트의 것과 유사하다. 배로이사이트와 함께 코에사이트보다 석영이 안정한 최고변성조건 외에도 유사한 암석학적 특징을 공유하는데: (1) 석류석 반상변정 내 영역끼리의 대비가 가능하고 특징적으로 Ca/Mg 비가 외연부로 갈수록 감소한다는 것이 첫째이고; (2) 둘째로는 금홍석 내 Zr 함량, 즉 변성온도가 오차범위에서 일치한다는 점이다. 반면 Di Vincenzo et

al.(1997)의 초고압 에클로자이트에서는 석류석의  $X_{Fe}$  값이 감소하는 후퇴변성작용이 인지된 바 있다. 에클로자이트 시료 간 온도-압력 경로의 비균일성은 석류석-펜자이트를 함유한 변성이질암에서도 인지된다(Di Vincenzo et al., 1997; Palmeri et al., 2003). 따라서 섭입대 내에서 온도-압력 경로의 다양성이 확인되고, 이는 맨틀췌기의 측회류로 인해 고압 변성작용을 경험한 암석들이 용기하는 깊이와 시점이 각각 다를 수 있음을 의미한다(예, Stöckhert & Gerya, 2005). 랜터만 산맥 에클로자이트의 주변암으로 화성호 화강암류가 부재한 점과 변성고철질 암류의 지화학조성이 다양한 점은 지구조 멜란지 모델을 뒷받침하는 것으로도 볼 수 있다.

### 3.2.9.2. 단편적(episodic) 저어콘 성장사와 순환적 섭입-용기과정

변성저어콘에서 얻은 겔보기연령의 범위는  $529 \pm 13 \text{Ma}(1\sigma) \sim 488 \pm 18 \text{Ma}(1\sigma)$ 으로 Di Vincenzo et al.(2016)이 중온 에클로자이트로부터 제안한 고압 저어콘의 성장 연령(약 530-500Ma)과 비슷하다. 본 연구 결과와 종합하면, 랜터만 산맥의 에클로자이트 내 저어콘이 캄브리아기 때 고압 환경에서 성장 혹은 재결정화했음은 분명하다. 그러나 Di Vincenzo et al.(2016)이 제안한 지속적인 저어콘의 재결정은 받아들이기 어렵다. 비록 같은 조산대 내에서도 변성작용의 시기와 기간이 다를 수 있으나, 약 30Ma 동안 섭입대 온도-압력 조건 하에 놓여있었다면 부분용융을 경험했을 확률이 높기 때문이다. 본 연구의 에클로자이트는 저어콘의 서로 다른 내부조직들이 오차범위 내에서 분리가능한 변성연령을 도출한다는 점에서, 저어콘의 성장 혹은 재결정작용이 연속적이기 보다는 단편적이라는(episodic) 해석에 더 무게를 둔다. 또한 외연부와 최외부 저어콘 영역에서 얻은 변성연령,  $515 \pm 4 \text{Ma}(1\sigma)$ 와  $498 \pm 11 \text{Ma}(1\sigma)$ 은 각각  $M_{1-2}$ 와  $M_3$  단계의 변성시기를 지시하며, 이는 다시 두 번의 섭입 혹은 매몰단계에 대비된다. 랜터만 산맥 에클로자이트의 변성시기는 대략적인 칼크-알칼라인 화성호 화성활동의 시기(예, Bomparola et al., 2007; Giacomini et al., 2007)와 일치함과 동시에, 윌슨 터레인 변성퇴적암의 퇴적상한이 약 600-530Ma(예, Estrada et al., 2016; Kim et al., 2017)라는 점과도 잘 맞는다. 약 500Ma 변성시기는 윌슨과 바위스 터레인 사이 바다가 이때 소멸되었음을 지시한다(예, Kleinschmidt & Tessensohn, 1987; Rocchi et al., 2011).

에클로자이트의 변성 온도-압력 경로와 저어콘 변성연령을 종합하면, 약 15Ma라는 시간 내의 평균수직매몰속도가 2mm/year 이하라는 계산을 낳는다. 이는 앞서 계산된 지온구배(5 - 10°C/km)뿐만 아니라, 부분용융의 부재와도 맞지 않는다. 우리는 이러한 비현실적으로 느린 겔보기매몰속도가 다단계의 혹은 순환적인

섭입-용기과정에 의한 것으로 해석한다. 이러한 과정은 소위 요요 지구조운동(yo-yo tectonics)으로 불리며 대륙충돌대인 알프스(Rubatto et al., 2011)에서 알려진 바 있고, 비충돌형인 일본의 산바가와대(Kabir & Takasu, 2010), 나아가 수치모델링 결과(예, Stöckhert & Gerya, 2005)로도 주장된 바 있다. 요컨대 에클로자이트의 두 매몰단계 사이에 간헐적인 용기단계가 필요하며, 이는 연속적/지속적 섭입(Di Vincenzo et al., 2016)을 배제한다.

### 3.2.10. 결론

우리는 본 연구를 통해 북빅토리아랜드 랜터만 산맥의 에클로자이트에서 정량적인 온도-압력 경로와 두 단계의 변성시기를 제한하였다. 전진변성경로는 기존 연구결과와 유사하거나 다른 것으로, 낮은 지온구배는 캄브리아기 섭입이 차가운 환경이었음을 지시한다. 에클로자이트 상  $M_{1-2}$ 와  $M_3$  변성단계는 각각  $515 \pm 4 \text{Ma}(\text{to})$ 와  $498 \pm 11 \text{Ma}(\text{to})$  때 일어난 서로 다른 섭입 단계로, 고압 저어콘의 성장사는 지속적이기보다 단편적이었음을 지시한다. 짧은 고압 변성시기는 바워스 터레인의 봉합과도 잘 일치한다. 평균매몰속도가 현저히 낮은 점은 두 섭입단계 사이에 용기단계가 존재했음을 지시하며, 이는 랜터만 산맥 에클로자이트가 로스 조산운동 동안 적어도 두 차례의 섭입-용기 과정을 겪었음을 뒷받침한다.

### 제 3 절 신원생대 열곡대 화성활동과 지구조적 대비

#### 3.3.1. 서론

남극중단산맥과 호주 동부 타스마나이드(Tasmanides)의 대륙경계부는 신원생대 동안 대체적으로 동일한 지각발달사를 공유한다(그림 3.3.1). 이런 이유로 호주-남극 간 연결고리는 로디니아 초대륙의 고지리 복원에서 항상 중요하게 다뤄져왔다. 하지만 신원생대 대륙열곡대나 수동형 경계부의 암석들은 주로 호주 동부에서 보고되고, 상대적으로 남극중단산맥에서는 그 증거가 빈약하다. 로디니아 분열 이전의 호주-남극 간 선캠브리아 지질의 대비는 공고한 편이나, 남극중단산맥, 특히 호주 남동부와 직접적으로 맞닿았을 북빅토리아랜드에서 신원생대 후기 암석에 대한 보고가 드물어 광역적인 대비에 한계가 있다. 특히 호주 동부에서 광범위하게 인지되는 에디아카라 화성활동(약 600-580Ma)이 남극중단산맥에서는 전혀 보고되지 않아, 호주 동부보다 약 70Ma 먼저 열곡활동이 일어났다는 주장도 제기된 바 있다(Cooper et al., 2011).

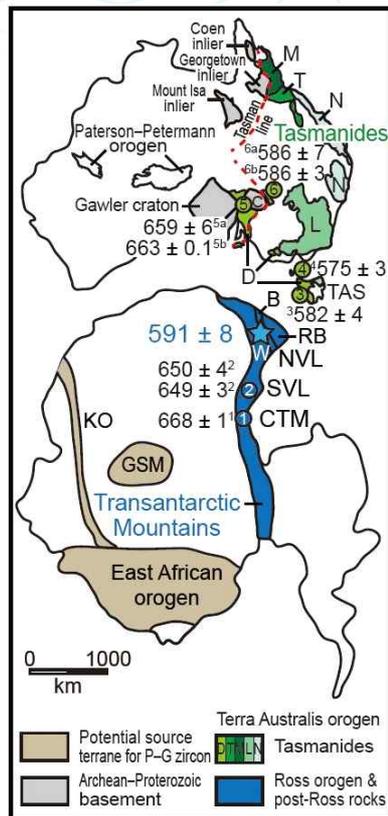


그림 3.3.1. 분열 이전의 호주와 남극 및 주요 조산대. 숫자는 신원생대 후기 화성활동의 U-Pb 저어콘 연령.

남극중단산맥과 타스마나이드의 신원생대 자료는 태평양-곤드와나 저어콘 연령군의 기원지 후보 중 하나로, 그 중요도는 더욱 높아진다. 이 쇄설성 저어콘군은 캄브리아기부터 트라이아스기에 이르는 호주 동부 대륙경계부 퇴적암류와 이에 상응하는 남극중단산맥의 암류 내에서 가장 두드러지는 연령 첨두를 형성한다. 젊은 캄브리아기 연령집단은 상대적으로 가까운 로스-텔라머리안 조산대가 기원지라는데 이견이 없으나, 신원생대 후기 연령군의 기원은 모호하다. 공급원의 후보로 멀게는 동남극지괴, 동아프리카 조산대, 호주 서부의 패터슨 조산대, 가깝게는 얼음으로 덮여있는 대륙 쪽의 로스 조산운동 초기 암석들, 그리고 본 연구에서 다룬 신원생대 후기 열곡대까지도 거론된다.

우리는 북빅토리아랜드 랜터만 산맥에 산출하는 에클로자이트의 전암화학조성과 저어콘 U-Pb 연령자료를 통해, 남극중단산맥에서는 처음으로 에디아카라 시기 열곡대 고철질 화성활동을 보고한다. 이 발견은 (1) 신원생대 후기 대륙열곡활동이 크라이오제니아 및 에디아카라 시기 두 차례에 걸쳐 호주 동부와 동남극의 대륙경계부에서 대비되며, (2) 두 열곡활동 사이에 남극중단산맥에서 인지되는 압축력에 의해 섭입 및 화성호가 발달했고, (3) 에디아카라 대륙열곡대 화성활동이 태평양-곤드와나 저어콘의 주요 공급원 중 하나였음을 뒷받침한다.

### 3.3.2. 지질학적 배경

북빅토리아랜드 지질에 대한 개론은 앞서 3.2.2에서 기술한 것으로 같음하고, 여기서는 신원생대 지질에 대해 기술한다. 신원생대 열곡활동은 중부남극중단산맥과 남빅토리아랜드의 몇몇 노두에서 보고된 것으로 약 670 Ma와 650 Ma 화성활동과 함께 교호하는 규산쇄설성 퇴적암류가 각각 산출한다. 북빅토리아랜드는 믿을만한 신원생대 화성 연령이 전무하고, 쇄설성 저어콘에 의한 퇴적상한으로만 인지된다. 동곤드와나 경계부를 통틀어 신원생대 대륙열곡활동이 가장 잘 알려진 지역은 호주 남동부 텔라머리안 조산대의 아텔레이드 열곡대복합체이다(Preiss, 2000). 초기에는 퇴적분지 발달과 함께 약 830-780Ma의 맨틀 플룸 활동이 고철질 암맥류 형태로 발달한다. 이후 지반 침하 및 수동형 경계부 퇴적작용이 일어나고, 약 600-580Ma의 열곡대 재활동은 두꺼운 고철질 용암류를 수반한다. 같은 시기 규산쇄설성 퇴적작용과 상대적으로 작은 양의 고철질 화산활동이 호주 북동부의 톰슨 조산대에서도 인지된 바 있다.

### 3.3.3. 시료 기재 및 전암 지구화학 조성

에클로자이트 시료(E-1a, E-1c)들은 북빅토리아랜드의 윌슨-바위스 봉합대인 랜터만 산맥에서 채집하였다. 에클로자이트는 최대 수십 m 규모의 부단화된 블록들로, 석류석-펜자이트 편암/편마암류에 의해 둘러싸인 형태로 산출한다. 석류석-옴파사이트-각섬석-녹립석-펜자이트-파라고나이트-금홍석-석영이 대표적 광물조합이다(Kim et al., 2019).

에클로자이트 시료들의 주원소와 미량원소 함량은 캐나다 온타리오 Actlabs에 설치된 장비들로 분석하였으며, 남극중단산맥과 타스마나이드의 신원생대 고철질 화성암류 자료와 함께 도시하고 비교하였다(그림 3.3.2). 에클로자이트 시료들은 Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y 분류도에서 아알칼라인 현무암 영역에 도시된다. 희토류원소 함량은 중간 정도로 분화된 E-MORB에 가까운 경향을 보인다. 거미도(spider diagram)에서는 약한 Nb 음의 이상이 있으나 Ta은 음의 이상이 없다. Nb-Ta 음의 이상은 남극중단산맥과 타스마나이드의 신원생대 암석들에도 대체적으로 뚜렷하지 않다. Nb-Zr-Y과 Y-La-Nb 지구조판별도에서 시료들은 각각 관내부 현무암-E-MORB 경계와 대륙현무암-E-MORB에 도시되며, 남극중단산맥과 타스마나이드의 암석들의 대략적인 평균에 해당한다.

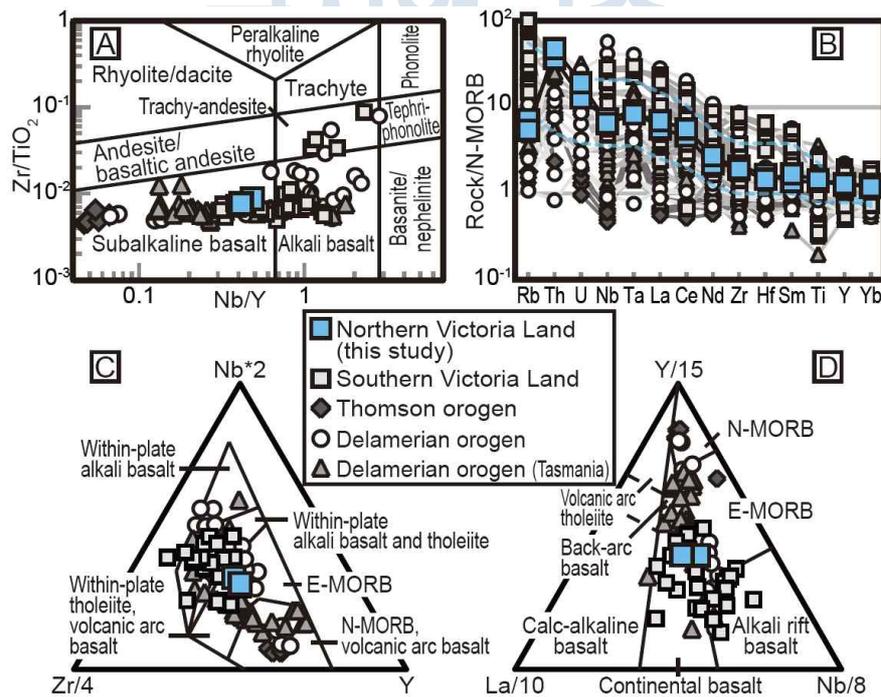


그림 3.2.2. 남극중단산맥-타스마나이드의 신원생대 후기 고철질 화성암류 지구화학 자료.

### 3.3.4. 저어콘 연령측정

저어콘 결정들은 시료 E-1a에서 추출되었으며, U-Pb 분석은 기초과학지원연구원의 SHRIMP-IIe를 사용하였다. 음극선발광영상 하에서 중심부-외연부-최외부의 뚜렷한 누대구조를 보이는데(그림 3.3.3), 본 연구에서는 바늘 모양 인회석을 포획하고 약한 진동누대구조를 갖는 화성기원 중심부에 대한 연령측정 결과를 보고한다. 외연부와 최외부는 각각 변성연령인  $515 \pm 4 \text{Ma}(t_0)$ 와  $498 \pm 11 \text{Ma}(t_0)$ 의 가중평균연령을 도출한 바 있다(Kim et al., 2019).

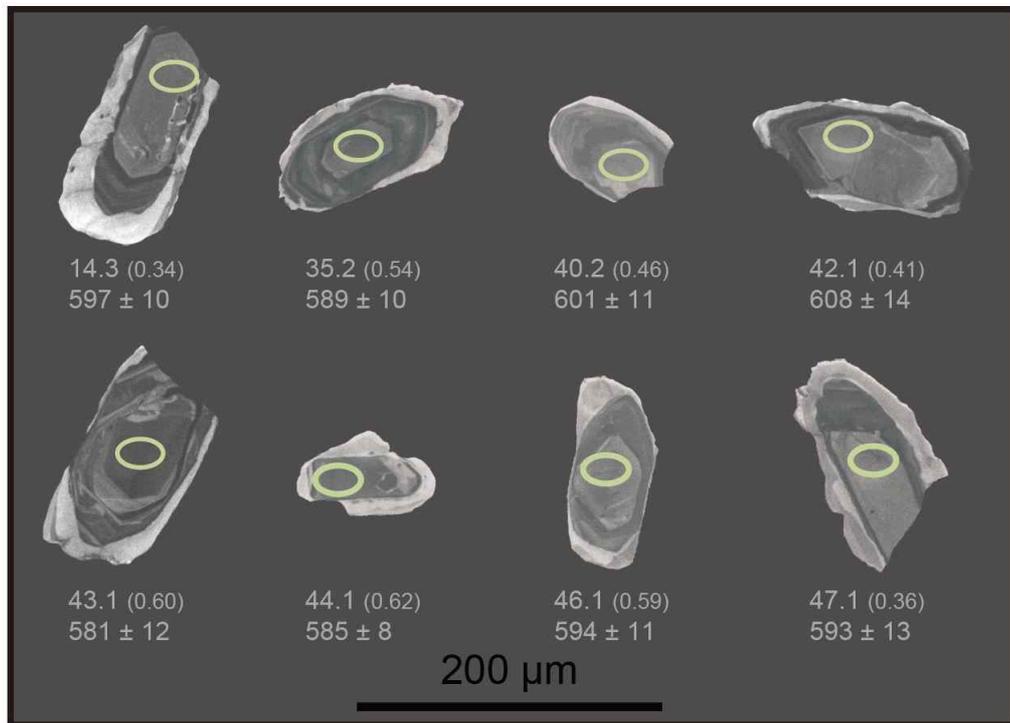


그림 3.3.3. 에클로자이트 저어콘의 음극선발광영상과 연령분석 위치.

14개 점분석 결과는 음극선발광영상에서 밝은 하나를 제외하고는(점분석 6.3; U=8ppm, Th=0.2ppm) 낮은 U(29-189ppm)과 Th 함량(18-113ppm)을 보여주지만, 보통납의 함량은 낮다. 점분석 6.3(Th/U=0.03)을 제외하면, Th/U 비는 0.34-0.67로 화성기원을 뒷받침한다. 불일치도가 높은 5개 점분석(1.3, 2.2, 34.2, 45.1, 48.1)과 점분석 6.3을 제외하면, 남은 8개 점분석의  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  겉보기연령은 약 610-580 Ma이고, 가중평균연령은  $591 \pm 8 \text{Ma}(t_0; \text{MSWD}=0.80)$ 이다(그림 3.3.4).

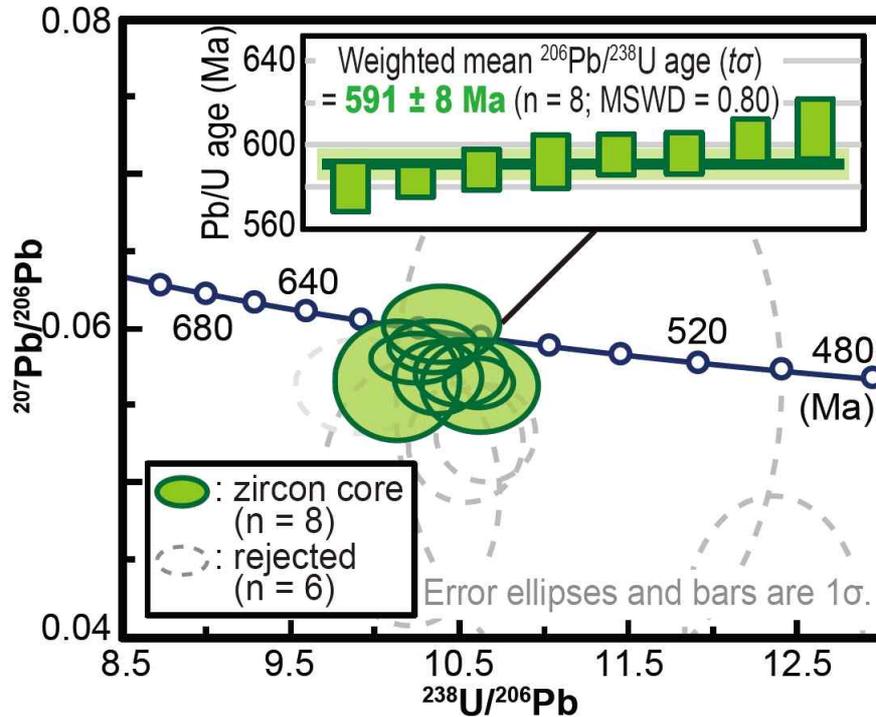


그림 3.3.4. 저어콘 중심부의 U-Pb 분석결과를 보여주는 테라-와서버그도.

### 3.3.5 토의

로스 조산대에서 신원생대 열곡대 화성활동에 대한 연령보고는 중부남극중단산맥의 약 668 Ma 반려암과 남빅토리아랜드의 약 650 Ma 유문암질 쇄설암이 전부이다. 바늘 모양 인회석 포획물, 진동누대구조, 높은 Th/U 비(0.34-0.67) 등은 저어콘 중심부가 심성암체 내에서 성장했음을 강하게 지시한다(Bacon, 1989; Corfu et al., 2003). 열곡대를 지시하는 전암조성과 저어콘의 외래결정/상속핵의 부재는 반려암질 모암이 신장되어 얇아진 대륙지각으로 별다른 혼염없이 정치했음을 뒷받침한다. 결론적으로 우리는 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령분석을 통해 남극중단산맥에서 처음으로 에디아카라(약 590 Ma) 열곡대 화성활동을 발견했다.

호주 동부의 신원생대 후기 열곡대 화성활동에 대한 믿을만한 연령자료는 공간적으로는 남동부의 텔라머리안 조산대에, 시간적으로는 에디아카라 시기에 집중된다; 쿠넨베리대의 유문암(586±7Ma, Crawford et al., 1997; 586±3 Ma, Greenfield et al., 2011)과 타스마니아 및 킹 섬의 고철질 암맥(582±4 Ma, 575±3 Ma; Calver et al., 2004). 또한 Direen & Crawford (2003)은 대규모 고철질 용암류인 해양방향반사체(seaward dipping reflector)가 약 600-580 Ma

화성암류들과 대비된다고 주장하였다. 그 외에도 지화학적으로 N-MORB에 가깝고 규모는 작으나 톱슨 조산대의 변성고철질암류 역시 같은 시기의 수동형 경계부 화성암류로 제안된 바 있다(Fergusson et al., 2009). 텔라머리안 조산대의 아텔레이드 열곡대복합체에서 응회암에 대해  $659 \pm 6$  Ma(Fanning & Link, 2006)의 연령이 보고되었으며, 최근 연구에 의해 재현된 바 있다( $663 \pm 0.1$ Ma; Cox et al., 2018). 남극종단산맥의 신원생대 후기 화성활동과 대비하면, 크라이오제니아 화성활동은 중부남극종단산맥(Goodge et al., 2002)과 남빅토리아랜드의 것들(Cooper et al., 2011)과 함께 약 670–650 Ma의 첫 번째 열곡대 화성활동을 나타내고, 에디아카라 화성활동은 본 연구의  $591 \pm 8$  Ma 반려암질 모암과 함께 약 600–580 Ma의 두 번째 단계임을 의미한다.

에디아카라 열곡대 화성활동의 시기는 Goodge et al.(2012)이 남극종단산맥 내륙의 빙하퇴적물에서 채집한 화강암류 쇄설물들에 대한 저어콘 연령측정을 통해 주장한 로스 조산운동과 관련된 화성활동의 시작(약 590 Ma)과 시간적으로 겹친다. 남빅토리아랜드의 변성암류 내 석류석과 모나자이트에서 보고된 연령은 로스 조산운동의 시작이 최대 약 620 Ma까지 거슬러 올라갈 수 있음을 시사하였다(Hagen-Peter et al., 2016). 따라서 남극종단산맥에서 에디아카라 열곡대 화성활동에 앞서 해양지각 섭입을 알리는 압축운동과 화성호활동(약 620–590 Ma)이 있었으며, 이는 크라이오제니아 열곡대 이후 섭입대로의 전환이 있었음을 의미한다.

화성암류의 연령 비교를 통한 호주 동부와 동남극 내 신원생대 열곡대에 대한 지구조적 대비는 화성암류와 교호하는 퇴적암류의 퇴적환경 및 쇄설성 저어콘 연령분포에 의해서도 지지된다. 텔라머리안과 톱슨 조산대의 열곡대 퇴적암류는 규산쇄설성 조성이 우세하고, 그 퇴적상한도 신원생대 후기이다. 전자의 흑색세일은 Re-Os 등시선에 의해 직접 약 650 Ma의 연령이 측정되기도 하였다. 로스 조산대의 열곡대/수동형 경계부 퇴적암에 대한 연구 역시 유사한 조성과 퇴적상한이 제안되었다; 중부남극종단산맥의 비어스모어군, 남빅토리아랜드의 스킨튼군, 북빅토리아랜드의 윌슨 터레인(Goodge et al., 2002, 2004; Stump et al., 2007; Cooper et al., 2011; Adams et al., 2014; Estrada et al., 2016; Paulsen et al., 2016). 종합하면, 본 연구에서 에디아카라 화성활동의 존재가 북빅토리아랜드에서 밝혀짐에 따라 호주-남극 사이에 대륙열곡대 발달 시기에 차이가 있다는 주장보다는 신원생대 후기에 적어도 2회의 열곡대 화성활동 및 관련된 퇴적작용이 대비됨을 제안한다.

마지막으로, 본 연구결과는 남극종단산맥과 타스마나이드에 산출하는 신원생대

후기부터 트라이아스기 퇴적암류뿐만 아니라 에오세 빙하퇴적물 내 태평양-곤드와나 저어콘 연령군(약 700-500 Ma; 예, Ireland et al., 1998; Fergusson et al., 2007, 2017; Licht & Palmer, 2013; Paulsen et al., 2016, 2017; Estrada et al., 2016; Glen et al., 2017; Kim et al., 2017)의 기원에 대한 의미있는 단서를 제공한다. 연령 집단 중 600-580 Ma의 저어콘 공급지에 대한 논쟁이 심하다(Ireland et al., 1998; Fergusson et al., 2007; Cooper et al., 2011; Goodge et al., 2012; Paulsen et al., 2017). 우리는 로스 이전, 약 600-580Ma의 열곡대 화성활동이 이 태평양-곤드와나 저어콘 군의 1차적인 기원지 중 하나라고 제안한다. 노출된 열곡대 화성암류의 상대적인 결핍은 주로 고철질의 조성과 빈약한 보존력 때문인 것으로 설명이 가능하다(Hawkesworth et al., 2009; Cawood et al., 2012). 약 600-580 Ma의 에디아카라 열곡대 화성활동은 동일기원의 규장질, 중성질 화성암도 만들었고, 600 Ma 이후의 퇴적물 내 에디아카라 저어콘의 공급지를 가장 쉽게 설명할 수 있다(예, Crawford et al., 1997, Calver et al., 2004, Meffre et al., 2004).

### 3.3.6. 결론

북빅토리아랜드 로스 조산대의 캄브리아기 에클로자이트로부터 열곡대를 지시하는 전암조성과 반려암질 모암의 에디아카라 시기(약 590 Ma) 저어콘 U-Pb 연령을 남극종단산맥에서 최초로 보고한다. 이는 호주 동부 타스마나이드에서 광범위하게 보고되는 약 600-580 Ma의 고철질 화산암류와 관련된 퇴적암류와 잘 일치할 뿐만 아니라, 남극종단산맥에서 호주 동부보다 크라이오제니아 시기에 먼저 열곡대가 발달했다는 기존의 의견에 수정이 필요함을 지시한다. 또한 우리는 최근 주장된 약 620-590 Ma에 시작된 로스 화성호활동을 함께 고려하여, 크라이오제니아 열곡대-로스 섭입 시작-에디아카라 열곡대의 순환이 있었음을 제안한다. 약 600-580 Ma 에디아카라 화성활동은 타스마나이드와 남극종단산맥에 광범위하게 산출하는 신원생대 이후 대륙경계부 퇴적암류의 태평양-곤드와나 저어콘 연령군의 기원지 중 하나일 가능성이 농후하다.

## 제 4 절 율슨암체 호상편마암의 쇄설성 저어콘 기원지와 변성 연령

### 3.4.1. 서론

남극 대륙은 과거 로디니아, 곤드와나 초대륙의 중심부에 위치하였으며, 이들 초대륙의 형성과 분리에 관한 지질 기록이 잘 보존되어 있어 대륙 규모의 지구조운동을 연구하기에 적합한 지역이다(e.g., Boger and Miller, 2004; Goodge et al., 2008). 장보고 기지가 위치한 북빅토리아랜드(northern Victoria Land)는 초기 고생대 시기 고태평양해(palaeo-Pacific ocean)에 인접한 곤드와나 대륙의 연변부로 로스(Ross) 조산대가 발달하였다(Palmeri et al., 2009; Gibson et al., 2011; Godard and Palmeri, 2013). 로스 조산대는 남극종단산맥(Transantarctic Mountains)을 따라 남극대륙을 관통하여 그 흔적을 찾을 수 있으며, 남극해를 지나 타즈마니아를 거쳐 호주 남부의 데라메리안(Delamerian) 조산대로 연장된다(그림 3.4.1a; Boger and Miller, 2004; Goodge, 2007; Fergusson et al., 2009, 2013; Palmeri et al., 2009). 북빅토리아랜드는 수 천 킬로미터에 달하는 이 조산대의 중심부에 위치한 지리적 특성을 가지고 있기 때문에 동곤드와나(East Gondwana) 대륙의 고태평양해 연안에서의 지구조운동 메카니즘 및 곤드와나 초대륙의 형성 과정을 이해하는데 있어서도 매우 중요한 지역이다. 로스조산대의 형성 과정은 해양지각의 섭입과 이에 수반한 활동형 대륙 연변부, 해안 경계부의 부가대, 전호분지, 화산호의 형성과, 이후 이들 지구조체들의 부가 작용으로 해석되어 안데스 산맥의 형성 과정에 대비된다(Cawood, 2005; Tessensohn and Henjes-Kunst, 2005; Ramos and Folguera, 2009). 북빅토리아랜드는 신생대 융기운동을 제외하고는 로스 조산대 형성 이후 대륙 충돌 등 대규모 지질사건을 경험하지 않아 초기 고생대 조산대의 구조를 비교적 잘 보존하며, 화산암들이 주로 노출된 안데스 산맥과 달리 심성암들이 우세한 지질학적 특징이 나타나 판구조 운동에 의한 부가형 조산대 형성 과정을 이해하기 적합한 지역이다(Fitzgerald et al., 1986; Tessensohn and Henjes-Kunst, 2005; Ramos and Folguera, 2009; Melchiorre et al., 2011).

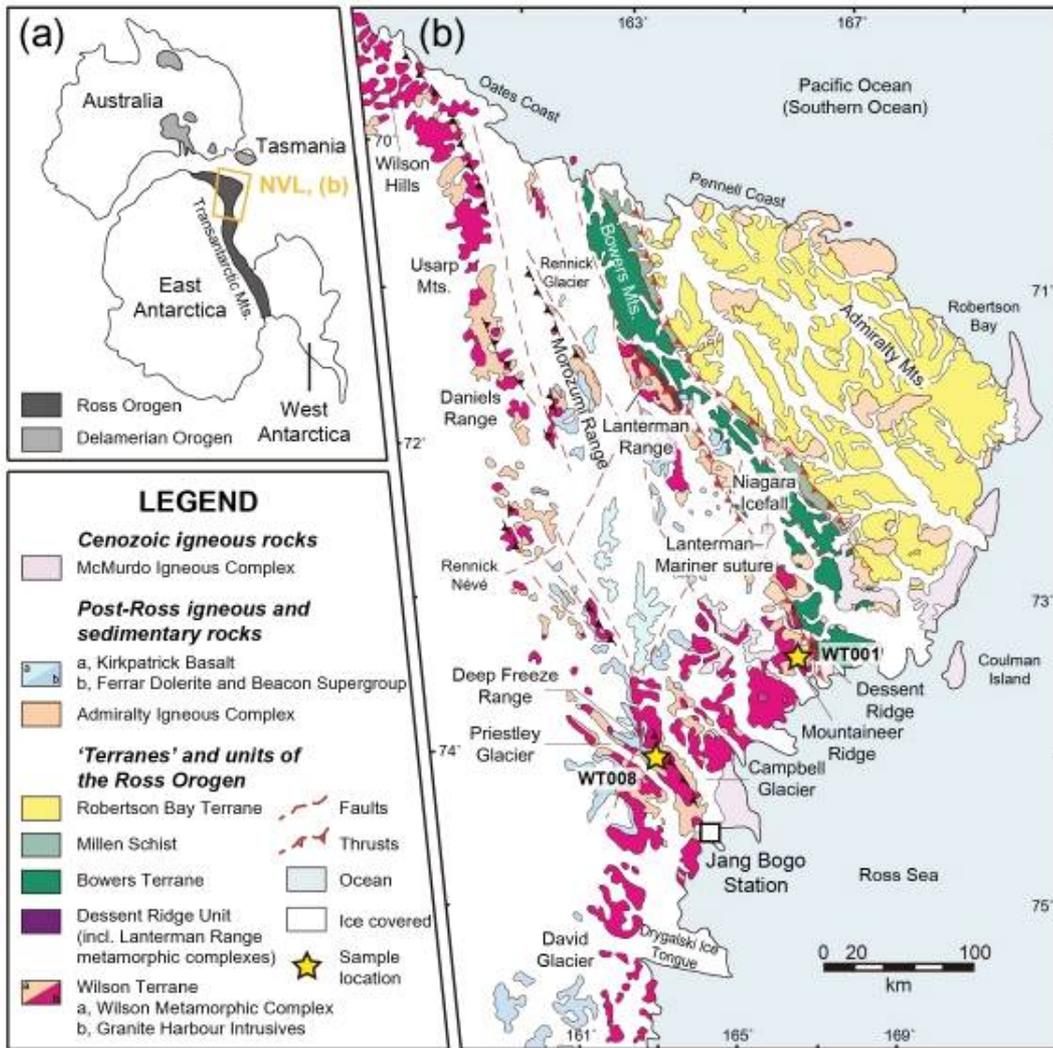


그림 3.4.1. (a) 곤드와나 분리 이전 호주 대륙과 남극 사이의 지리적 근접성과 이에 따른 로스-데라메리아 조산대의 연관성을 보여주는 고지리도. (b) 서남극 북빅토리아 랜드의 지체구조도와 시료 위치. 지체구조도는 Läufer et al. (2011)의 결과를 수정 하였음. 지체구조도 내의 흰 상자는 장보고 과학기지의 위치를 나타냄.

북빅토리아랜드는 서에서 동으로 세 개의 지구조체인 윌슨(Wilson), 바우어스(Bowers), 로버트슨 베이(Robertson Bay) 암체(terrane)로 구성되어 있으며(그림 3.4.1b), 캄브리아기-오르도비스기에 이 암체들의 봉합으로 형성된 것으로 알려져 있다(Weaver et al., 1984; Kleinschmidt and Tessensohn, 1987; Roland et al., 2004; Tessensohn and Henjes-Kunst, 2005; Federico et al., 2006). 봉합 과정에 대한 지구조 모델로는 서쪽 방향으로의 안데스 형 섭입 후 주향이동운동에 의해 지금의 지형적 형태를 갖추었다는 주장과 각 암체 사이에 두 개의 서쪽 방향 섭입대에 의해 부가체 지체구조가 만들어졌다는 논쟁이 초기부터 진행되었다(Weaver et al., 1984; Bradshaw et al., 1985; Gibson and Wright, 1985;

Kleinschmidt and Tessensohn, 1987). 이후 연구를 통해 지질학적, 지화학적, 지구연대학적 자료가 축적됨에 따라 수정되어 왔으나, 북빅토리아랜드 형성에 관해서 기본적으로는 후자의 모델을 따르고 있다(Roland et al., 2004; Tessensohn and Henjes-Kunst, 2005; Federico et al., 2006; Rocchi et al., 2011; Rosetti et al., 2011; Estrada et al., 2016). 북빅토리아랜드의 암체들을 구성하는 초기 고생대 퇴적물의 외래성 기원에 대한 논쟁은 이 암체들을 구분하는 초기부터 이어져 왔다(Weaver et al., 1984; Bradshaw et al., 1985; Kleinschmidt and Tessensohn, 1987). 최근 연구 결과에 따르면, 윌슨, 바우어스, 로버트슨 베이 암체에서의 쇄설성 저어콘 U-Pb 연령의 확률밀도분포는 북동쪽의 두 암체에서 오르도비스기 쇄설성 저어콘의 존재가 뚜렷한 것을 제외하면 매우 유사하다(Estrada et al., 2016; Paulsen et al., 2016). 초기 고생대 퇴적물들의 이러한 특성은 운모류의  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연령 패턴에서도 유사하게 보고되었다(Di Vincenzo et al., 2014). 따라서, 북빅토리아랜드 윌슨, 바우어스, 로버트슨 베이 암체의 초기 고생대 퇴적물들은 유사한 기원지에서 유래하였고, 윌슨 암체로의 퇴적물 공급이 캄브리아기에 중단된 반면 바우어스, 로버트슨 베이 암체에서는 초기 오르도비스기까지 지속되었을 것으로 해석된다(Estrada et al., 2016; Paulsen et al., 2016).

로스 조산운동과 관련된 윌슨 암체의 변성작용 특성 및 시기에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다(e.g., Grew and Sandiford, 1984; Talarico and Castelli, 1995; Palmeri, 1997; Henjes-Kunst et al., 2004; Schüssler et al., 2004; Goodge, 2007). 윌슨암체의 변성작용은 바우어스 암체와의 경계에서 나타나는 랜터만(Lanterman) 산맥의 고압 변성작용과는 대조적인 저압형이 주류를 이루지만, 백립암상 변성암들이 일부 보존된 것으로 알려져 있다(Palmeri, 1997; Di Vincenzo et al., 2007, 2016). 백립암상을 비롯한 변성작용 시기 및 퇴적 상한(maximum depositional age) 제한과 기원지 추적을 위한 쇄설성 광물 연령 측정은 주로 변성퇴적암으로 구성된 윌슨 암체의 지구조환경을 이해하기 위해 필수적인 요소이지만 체계적인 연구가 미진하다. 장보고 과학기지가 북빅토리아랜드 테라노바(Terra Nova) 만에 건설된 이래로 이 지역에서 국내 지질학자들도 기초 지질조사를 진행 중이다(KAGEX, 2015, 2016). 이 연구에서는 지난 남극 하계지질조사 동안 채취한 북빅토리아랜드 윌슨 암체의 두 개 편마암 시료와 이를 관입하고 있는 화성 암맥 시료로부터 광물조합 및 미구조를 관찰하고, 고분해능 이차이온질량분석기를 사용하여 수선별한 저어콘 결정의 U-Pb 연령을 측정하였다. 이를 토대로 로스 조산운동과 관련된 윌슨 암체의 변성작용 시기와 특성을 소개하고 이 시료들에서 저어콘 연령이 갖는 의미에 대해 토의한다.

### 3.4.2. 지질학적 배경

북빅토리아랜드는 남극대륙에서 캄브리아기-오르도비스기의 로스 조산운동 시기에 형성된 암석들이 가장 넓게 분포하는 지역이다(그림 3.4.1b; Kleinschmidt and Tessensohn, 1987). 이들 초기 고생대암석들은 서에서 동으로 북북서-남남동의 주향으로 배열하고 있는 윌슨, 바우어스, 로버트슨 베이 암체로 세분된다. 이들 암체의 경계는 랜터만 단층대와 립이어(Leap Year) 단층대에 의해 정의된다(그림 3.4.1b; Capponi et al., 1999; Crispini et al., 2007; Rossetti et al., 2011; Di Vincenzo et al., 2014). 윌슨 암체를 구성하는 초기 고생대 암석들은 변성퇴적암 및 혼성암과 함께 다양한 조성의 캄브리아기-오르도비스기 심성암으로 구성되어 있다(e.g., Grew and Sandiford, 1984; Talarico and Castelli, 1995; Palmeri, 1997; Bomparola et al., 2007; Giacomini et al., 2007; Rocchi et al., 2011). 바우어스 암체는 초-중기 캄브리아기의 다양한 화산암과 쇠철성 퇴적암으로 구성된 슬레저스(Sledgers) 층군과 중-후기 캄브리아기의 얇은 바다에서 쌓인 이질암, 석회암, 사암 및 역암으로 구성된 메리너(Mariner) 층군, 그리고 이를 부정합으로 덮고있는 후기 캄브리아기-초기 오르도비스기 사암-역암이 우세한 립이어 층군으로 구성되어 있다(Roland et al., 2004; Di Vincenzo et al., 2014; Estrada et al., 2016; Paulsen et al., 2016). 윌슨 암체와 바우어스 암체 사이에는 랜터만 단층대를 따라 고압의 에클로자이트, 초고철질암석 등 해양지각의 섭입과 관련된 변성암들이 산출한다(Di Vincenzo et al., 1997, 2016; Palmeri et al., 2007). 로버트슨 베이 암체는 원양성 심해 퇴적암으로 구성되어 있다(Kleinschmidt and Tessensohn, 1987).

윌슨 암체의 암상은 캄브리아기-오르도비스기 변성퇴적암과 화성암 그리고 이를 부정합으로 피복하는 후기 페름기-쥬라기 비콘(Beacon) 및 페라(Ferrar) 누층군과 신생대 맥머도(McMurdo) 화산암체로 구성되어 있다(GANOVEX, 1987). 변성퇴적암의 성분은 사질 성분이 우세하고 이질 성분의 편암과 편마암에서는 석류석 반상변정이 흔히 산출한다(e.g., Schubert, 1987; Ulitzka, 1987; Palmeri, 1997). 이와 함께 석회질 규산염암과 각섬암도 관찰된다(e.g., Schubert, 1987). 변성이질암에서 산출하는 근청석-규선석-석류석 광물조합은 저압형 변성야외구배(metamorphic field gradient)를 정의하며, 최고 변성 온도-압력 조건은 약 700-750°C, 4-5 kbar로 추정된다(Palmeri, 1997). 변성이질암의 변성도는 지역에 따라 편차를 보이며, 일부 퇴적 구조를 보존하고 있는 저변성-중변성

변성퇴적암으로 구성된 레닉(Rennick) 편암, 모로주미(Morozumi) 천매암, 리트릿 힐스(Retreat Hills) 편암 등과 고변성 편마암과 혼성암으로 구성된 윌슨 편마암, 머치슨(Murchison)층 등이 함께 윌슨 변성복합체(Wilson Metamorphic Complex)를 구성한다(그림 3.4.1b; GANOVEX, 1987). 일부 편마암체에서는 백립암상 변성암들이 보존되어 있으며, 이들로부터 추정된 백립암상 변성작용의 온도-압력 조건은 약 700-900°C, 6-9 kbar이다(Talarico et al., 1995). 윌슨 암체의 북서부에 위치한 윌슨 힐스 지역의 혼성암 내 모나자이트와 저어콘의 U-Pb연령으로부터 추정된 백립암상 변성작용의 시기는 약 500 Ma이다(Henjes-Kunst et al., 2004). 변성사암의 쇄설성 저어콘 U-Pb 연령은 0.5-0.7 Ga, 0.9-1.3 Ga, >1.6 Ga에 분포가 집중되어 있으며, 이로부터 윌슨 암체 변성퇴적암들의 모암 퇴적 상한이 약 530 Ma로 추정된 바 있다(Estrada et al., 2016; Paulsen et al., 2016). 윌슨 암체의 캄브리아기-오르도비스기 화성암인 그라니트 하버 심성암류(Granite Harbour Intrusives)는 문조화강암, 화강섬록암, 토날라이트 등으로 암상이 다양하다(Borg et al., 1987; Ghezzo et al., 1987; Armienti et al., 1990; Rocchi et al., 1998, 2004). 이들을 분석한 지화학자료는 화산호 환경에서의 켈크-알칼라인(calc-alkaline) 계열의 마그마 형성을 지시하지만, K 함량의 변화가 크고 I-형 저알루미늄(metaluminous) 및 S-형 과알루미늄(peraluminous)의 지화학적 특성을 갖는 심성암이 모두 산출한다(Borg et al., 1987; Vetter and Tessensohn, 1987; Armienti et al., 1990; Biagini et al., 1991a, 1991b; Di Vincenzo and Rocchi, 1999; Dallai et al., 2003; Rocchi et al., 2004, 2011). 심성암의 관입이 변성퇴적암 엽리의 형성보다 선행, 동시, 후행하는 구조가 모두 나타나며, 이들의 정치 연령은 480-530 Ma이다(Armienti et al., 1990; Tonarini and Rocchi, 1994; Fioretti et al., 2005; Bomparpla et al., 2007; Giacomini et al., 2007).

### 3.4.3. 암석 기재

저어콘 U-Pb 연령 측정을 위해 윌슨 암체에서 두 개의 호상 편마암과 이를 관입하고 있는 우백질 암맥 시료를 채취하였다. 첫 번째 편마암 시료는 마운트니어(Mountaineer) 변성암 복합체 내 머치슨 층에서 채취하였다(그림 3.4.1b). 이 시료(WT001A)는 우흑대와 우백대의 구분이 뚜렷한 단사회석-흑운모 편마암으로(그림 3.4.2a,b), 변형된 석영맥과 페그마타이트 암맥이 함께 산출한다(그림 3.4.2b). 호상 편마암의 엽리를 자르며 관입한 우백질 암맥과(WT001B)과 이를 다시 자르며 관입한 고철질 암맥을 관찰할 수 있다(그림

3.4.2a). 호상 편마암내부에는 습곡을 이루고 있는 우백질 암맥이 관찰되는데 이는 호상 편마암의 엽리를 자르고 있는 우백질 암맥(WT001B)보다 이른 시기에 관입한 것으로 해석된다(그림 3.4.2a). 호상 편마암(WT001A)의 대표 광물 조합은 단사휘석-흑운모-정장석-석영-사장석으로(그림 3.4.3a), 소량의 백운모, 티타나이트와 함께 저어콘과 인회석이 부구성 광물로 산출한다. 흑운모, 석영과 사장석이 각각 농집된 우흑대와 우백대가 교호하며 성분적층(compositional layering)을 잘 정의한다. 단사휘석은 대개 500  $\mu\text{m}$  이하인 반자형 내지 타형으로, 흑운모로 치환되는 조직을 제외하고는 다른 주구성 광물들과의 경계부가 뚜렷하여 조직적 평형관계에 있고(그림 3.4.3a), 상대적으로 흑운모가 결핍된 우백질은 부딘(boudin)화된 렌즈 형태로 엽리에 조화롭게 산출한다. 석영은 단결정과 파동소광이 우세하며, 주변부에서 재결정 작용에 의해 입자 경계가 불규칙한 아입자(subgrain)가 관찰된다(그림 3.4.3b). 사장석은 흔히 끝이 점점 가늘어지는 취편쌍정(polysynthetic twin)이 특징적이며, 흑운모-석영 포획물을 함유한 반상변정으로도 산출한다(그림 3.4.3b). 티타나이트-각섬석-단사휘석-사장석-석영이 호상 편마암을 관입하고 있는 우백질 암맥(WT001B)의 대표 광물 조합이다(그림 3.4.3c). 사장석이 풍부한 우백질 영역과 단사휘석 및 각섬석이 풍부한 우흑질 영역이 약한 엽리를 정의한다. 휘석 및 각섬석은 중립질의 반자형 내지 타형(1-3 mm), 사장석은 대부분 조립질의 자형 내지 반자형 결정(장경 3-10mm)으로 산출한다. 고철질 광물들 및 사장석은 흑운모-녹니석 및 견운모로의 변질이 심하다(그림 3.4.3c).



그림 3.4.2. 머치슨 산(a, b)과 딥 프리즈 레인지(c, d)에서 산출하는 편마암과 암맥 사이의 관입 관계를 보여주는 노두 사진. (a) 호상 편마암(WT001A 시료)의 엽리가 우백질 암맥(WT001B 시료)에 의해 절단되어 있으며, 두 암체는 고철질 암맥에 의해 다시 관입되어 있음. (b) 엽리에 평행한 석영 맥과 페그마타이트질 패치를 가지고 있는 호상 편마암. (c) 우백질과 우흑질에 의해 엽리가 잘 정의되어 있는 호상 편마암(WT008). (d) 호상 편마암을 관입하고 있는 함석류석-근청석 우백질 화강암.

두 번째 편마암 시료는 딥 프리즈 레인지(Deep Freeze Range)의 프리스틀리(Priestley) 편암 지역에서 채취하였다(그림 3.4.1b). 이 시료(WT008)는 흑운모 편마암으로, 앞서 서술한 편마암 시료와 유사하게 우백질과 우흑질로 분리된 뚜렷한 엽리를 보이며 우백질 화강암에 의해 관입된 구조를 나타낸다(그림 3.4.2c,d). 흑운모편마암의 대표광물조합은 흑운모-정장석-사장석-석영으로, 소량의 티타나이트와 백운모 및 부구성광물인 저어콘과 인회석을 포함한다. 흔히 얇은 조각(flake; 장경 <math><1\text{ mm}</math>) 혹은 집합체 형태로 산출하는 흑운모와 단결정이 우세한 조립질의 석영(~5 mm)이 약하게 발달한 엽리를 정의한다(그림 3.4.3d). 석영보다는 입자가 작은 자형 내지 반자형의 사장석 및 정장석 또한 다양한 정도로 엽리에 배열한다. 석영은 파동소광과 고온(약 650°C 이상)에서의 변형을 지시하는 체스보드 소광(chessboard extinction)이 특징적인 반면(Kruhl, 1996), 사장석과 정장석에서는 연성변형작용에 의한 미구조가 특별히 관찰되지 않는다(그림 3.4.3d). 주 구성

광물들의 입자 경계는 곡선형이 우세하다. 티타나이트와 백운모는 두께가 500  $\mu\text{m}$  이하인 얇은 풀 혹은 띠 형태의 흑운모-K-장석-사장석-석영±티타나이트±백운모 교대성장으로만 산출한다. 이 다광물 집합체 역시 대체로 엽리에 배열하고 석영-장석 입자들의 간극을 충전하는데, 이러한 조직은 K 및 Al ( $\pm\text{Ti}$ )이 농집된 용융물이 결정화하였음을 지시한다. 이차 광물로는 녹니석이 산출한다.

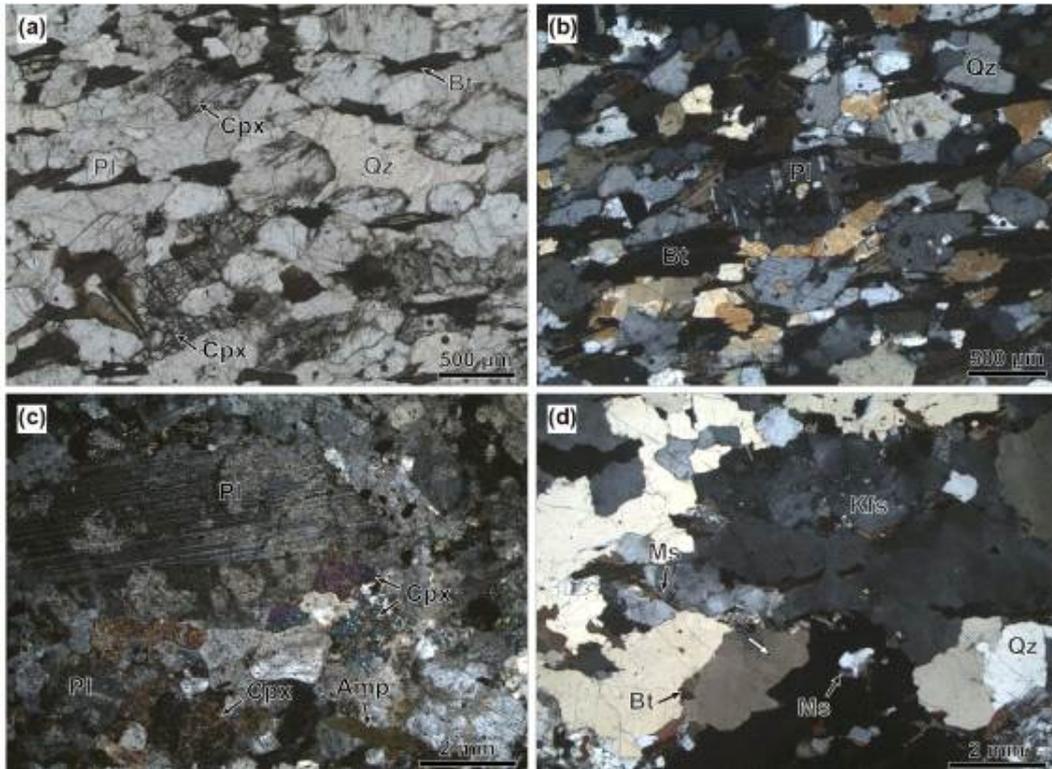


그림 3.4.3. 호상 편마암과 우백질 암맥의 광물조합과 미구조를 보여주는 현미경 사진. (a, b) 단사 휘석이 풍부한 영역(a)과 결핍된 영역(b)으로 구분되는 단사 휘석-흑운모 호상 편마암(WT001A 시료). (a)영역의 단사 휘석은 다른 조암 광물과 조직적 평형을 보임. (b)영역에서는 포유물이 많은 사장석 반상변장이 관찰됨. 엽리에 평행한 석영 맥과 페그마타이트질 패치를 가지고 있는 호상 편마암. (c) 자형의 사장석, 반자형-타형의 단사휘석과 각섬석 및 세리사이트가 관찰되는 변질임 심한 우백질 암맥(WT001B 시료). (d) 석영에서 체스보드 소광(흰색 화살표), 정장석의 용리, 세립질 백운모와 흑운모가 관찰되는 호상 편마암. Amp-amphibole; Bt-biotite; Cpx-clinopyroxene; Kfs-K-feldspar; Ms-muscovite; Pl-plagioclase; Qz-quartz.

#### 3.4.4. 분석 방법

채취한 암석 시료들을 유압파쇄기와 진동컵분쇄기를 이용하여 분말로 만들었다. 체를 사용하여 이 분말에서 230  $\mu\text{m}$  이하의 광물 결정들을 분리한 후 물과 증액을

이용한 전통적인 비중분리법과 자성분리법을 적용한 후 마지막으로 수작업을 거쳐 저어콘 결정들을 추출하였다(Cheong et al., 2013). 분리된 저어콘 결정들을 표준시료와 함께 에폭시마운트에 시료별로 고정시킨 후, 저어콘 입자가 절반정도 드러날 때까지 연마하였다. U 농도를 측정하기 위하여 SL13 저어콘 표준시료를 사용하였고(238 ppm U; Claoué-Long et al., 1995), U-Pb 동위원소 조성은 미국 미네소타 주에 산출하는 둘루스 복합체(Duluth Complex)의 FC1 저어콘 표준시료를 사용하여 검정선을 수립하였다( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}=0.1859$ ; Paces and Miller, 1993). 연마된 저어콘 결정들의 내부 조직 관찰을 위한 후방산란전자영상 및 음극선발광영상은 한국기초과학지원연구원 오창 캠퍼스에 설치된 주사전자현미경(SEM; JEOL-6610LV)을 이용하여 촬영하였다.

저어콘의 U-Pb 성분은 한국기초과학지원연구원 오창 캠퍼스에 설치되어 있는 고분해능 이차이온질량분석기(SHRIMP-IIe) 장비를 이용하여 분석하였다. 동위원소 분석을 위하여  $\text{O}_2^-$  일차이온 빔을 사용하였으며, 빔의 크기와 전류는 각각 약 20  $\mu\text{m}$  및 3nA였다. 산화체 혹은 수화체 형태의 분자 이온들에 의한 질량 간섭을 제거하기 위해 약 5,000의 질량 분해능을 이용하였다. 연령측정을 위한 검정선 수립은 Williams (1998)에 제시된 방법에 따라 수행하였고, 분석한 저어콘의 U-Th-Pb 동위원소비는 PRAWN/LEAD 6.5.5 프로그램(T.R. Ireland, written communication, 1996)을 사용하여 계산하였다. 이후 등시성연령, 가중평균연령, 확률밀도분포도 작성에는 Isoplot/EX 프로그램(Ludwig, 2003)을 이용하였다. 보통납의 보정은 보통납 모델 성분을 이용하여 실시하였으며(Cumming and Richards, 1975), 1,200 Ma보다 오래된 저어콘에 대해서는  $^{204}\text{Pb}$  보정법을, 그리고 이보다 젊은 저어콘은  $^{207}\text{Pb}$  보정법을 적용하였다(Williams, 1998). 불확실도(uncertainty) 계산에는 계측통계학적(counting statistics) 오차, 배경 값에 기인한 오차와 함께 표준시료의 검정선 수립에서 발생한 오차( $\pm 0.5\%$ )를 반영하였다. 이로부터 구한 연령의 불확실도는 95% 신뢰수준( $t\sigma$ )으로 계산하였다.

일부 시료의 저어콘 중 보통납의 함량이 전체 납에서 1%가 넘는 경우는 이후 연령 계산에서 제외하였다. 일부 분석치는 서로 다른 연령의 방사성 기원 납들이 혼합되었거나, 납 손실에 의해  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 과  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  연령의 불일치도가 높다. 따라서, 불일치도가 10% 이상인 경우에도 이후 계산에서 제외하였다. 일부 시료의 U 함량이 높은 저어콘 결정들( $>2,500$  ppm)은 표준시료와의 U 농도 차이에서 생기는 기질효과(matrix effect)가 발생할 뿐만 아니라(Kikuchi and Hidaka, 2009) 납 손실의 가능성도 크기 때문에 연령의 지질학적 의미를 이해하기 어려워 역시 연령 계산에서 제외하였다.

### 3.4.5. 결과

#### 3.4.5.1. 저어콘 결정 형태와 누대 구조

머치슨 층의 호상 편마암 시료(WT001A)에서 산출하는 저어콘 결정들은 대부분 자형-반자형의 결정형을 나타내지만, 원마도와 내부 구조가 다양하다(그림 3.4.4a). 일부 저어콘 결정들은 진동누대 구조(e.g., 결정번호 2, 4, 40) 혹은 핵-가장자리(core-rim) 누대구조를 나타내는 결정도 있는 반면(e.g., 결정번호 33), 뚜렷한 누대구조가 나타나지 않는 결정도 관찰된다(e.g., 결정번호 16, 18, 22). 또한 일부 결정들에서 가장자리에 매우 어두운 음극선발광의 얇은 과성장 띠가 관찰된다(e.g., 결정번호 27, 29, 33). 이 과성장 띠는 변성 기원일 가능성이 있지만 고분해능 이차이온질량분석기의 공간 분해능에 비해 폭이 좁다. 우백질 암맥 시료(WT001B)에서 산출하는 저어콘 결정들은 대부분 자형이며, 장단축비(aspect ratio)는 2:1-3:1 범위이다(그림 3.4.4b). 저어콘 결정의 내부 구조는 상속핵과 가장자리의 진동누대 구조로 대표된다(e.g., 결정번호 14, 15, 26). 일부 결정에서는 상속핵과 진동누대 구조를 갖는 가장자리(회색의 음극선발광) 사이에 어두운 음극선발광으로 구분되는 내부조직이 나타나고(e.g., 결정번호 2, 5, 13, 15, 18, 23, 28), 가장자리 진동누대구조가 결여되어 있는 결정도 관찰된다(e.g., 결정번호 1, 8, 20). 프리스틀리 편암지역에서 채취한 흑운모 호상 편마암 시료(WT008)에서 산출하는 저어콘 결정들은 머치슨 층의 단사회석-흑운모 호상 편마암 시료(WT001A)의 저어콘 결정들과 유사한 내부 구조와 원마도를 가지며 반자형-타형의 결정형을 보인다(그림 3.4.4c).

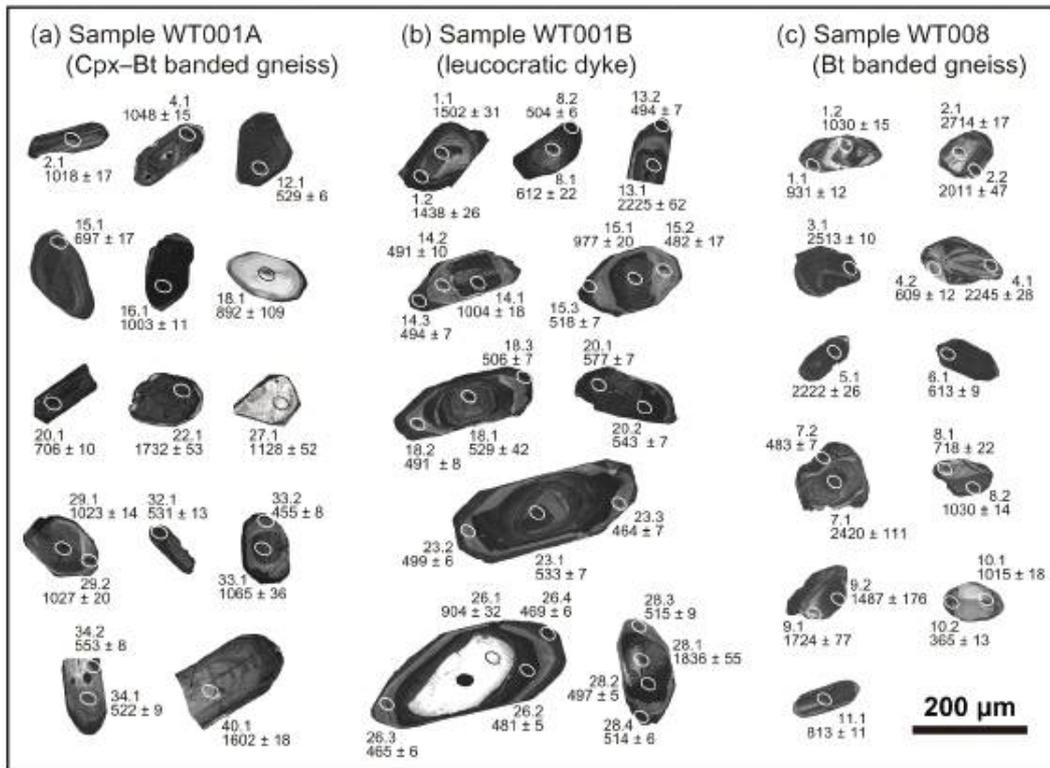


그림 3.4.4. 저어콘 결정들의 음극선 발광 영상. (a) 단사회석-흑운모 호상 편마암 (WT001A 시료). (b) 우백질 암맥(WT001B 시료). (c) 흑운모 호상 편마암(WT008 시료). 결정 내 표시된 타원은 SHRIMP 점 분석 위치를, 숫자는  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  또는  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  연령을 나타냄.

### 3.4.5.2. 저어콘 U-Pb 연령

세 개 시료의 79개 저어콘 결정에서 총 122개 점 분석을 실시하였으며, 이 중 상당수의 점 분석에서 10% 이상의 불일치도가 나타났다. 머치슨 층 단사회석-흑운모 호상 편마암 시료(WT001A)의 저어콘 결정에서 총 47개의 점 분석을 실시하였으며, 이를 일치곡선 상에 도시하였다(그림 3.4.5a). 4개의 점 분석은 U 함량이 2,500 ppm 이상이거나 보통 납의 함량이 1% 이상이다(그림 3.4.5a). 90% 이상의 일치도를 나타내는 28개의 점 분석은 1.0-1.2 Ga와 530-700 Ma 범위에 집중되고, 한 개 점 분석의 겉보기연령이 약 1.8 Ga이다(그림 3.4.5a). 이에 반해 1.2-1.6 Ga와 700-900 Ma 범위에는 점 분석이 전무하다(그림 3.4.5a). 530-700 Ma에 해당하는 점 분석들은 산개형으로 분포하며, 넓은 범위의 Th/U 비(0.02-0.98)를 갖는다. 이 시료를 관입하고 있는 우백질 암맥 시료(WT001B)에서 채취한 저어콘 결정에서 총 57개의 점 분석을 실시한 결과, U와 보통납의 함량이 각각 2,500 ppm과 1% 이상인 4개의 점 분석을 제외하면(그림 3.4.5b) 일치도가 90% 이상인 점 분석 연령은 470-520 Ma 범위에 집중된다. 저어콘 결정 상속핵의

점 분석 연령 분포는 호상 편마암 시료(WT001A)의 저어콘 연령 분포와 유사하다. 저어콘 결정의 가장자리에서 측정된 점 분석들은 Th/U 비가 상대적으로 낮고( $<0.1$ ), 500 Ma보다 젊은 후기 캄브리아기-초기 오르도비스기 U-Pb 연령을 나타낸다(그림 3.4.4b, 3.4.5b). 진동누대 구조가 특징적인 가장자리에서 측정된 U-Pb 성분 중 90% 이상의 일치도를 보이는 점 분석들에서 계산한 가중평균연령은  $482 \pm 4$  Ma ( $t_0$ )이다(그림 3.4.6). 프리스틀리 편암 지역에서 채취한 흑운모 호상 편마암 시료(WT008)의 11개 저어콘 결정에서 총 18개의 점 분석을 실시하였으며, 분석한 저어콘의 동위원소 성분은 납 손실과 이중 방사성 기원 납의 혼합에 의해 불일치도가 높다(그림 3.4.5c). 하지만 일부 일치도가 높은 점 분석 연령들은 머치슨 층 호상 편마암 시료(WT001A)의 저어콘에서와 유사한 U-Pb 연령 분포 형태를 나타낸다(그림 3.4.5a,c).

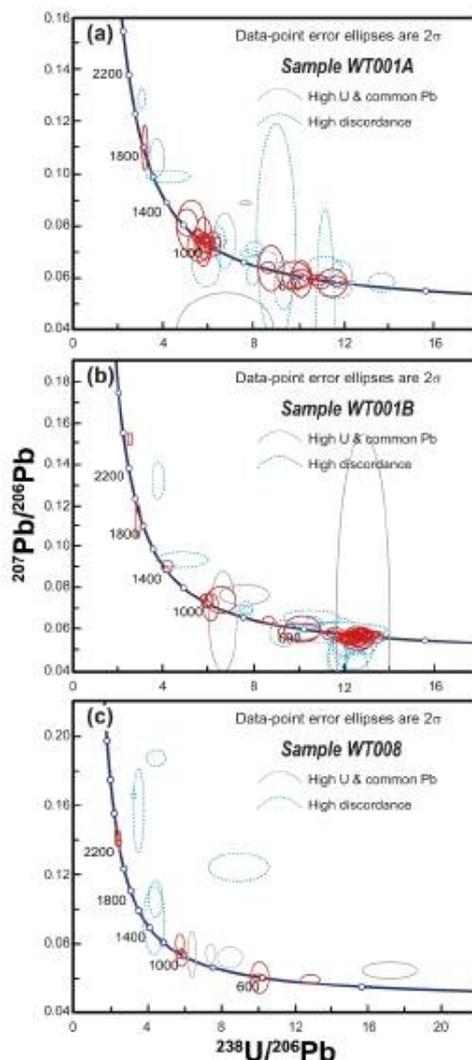


그림 3.4.5. 저어콘 점 분석 U-Pb 성분의 테라-와서버거 등시도. (a) 단사회석-흑운모 호상 편마암 (WT001A 시료). (b) 우백질 암맥 (WT001B 시료). (c) 흑운모 호상 편마암(WT008 시료). 회색 타원은 U와 보통 Pb의 함량이 높은 점 분석을 청색 타원은 불일치도가 10%가 넘는 점 분석을 나타냄. 적색 타원으로 나타낸 점 분석만 연령 계산에 사용함.

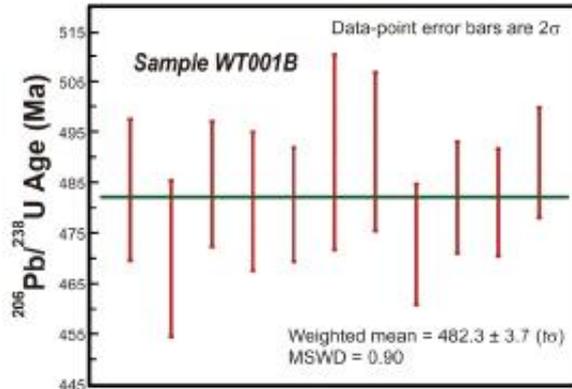


그림 3.4.6. 우백질 암맥(WT001B 시료)에서 산출하는 저어콘 중 Th/U 비가 0.1 이하인 저어콘 과성장 띠에서 측정된  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연령. MSWD=mean square of weighted deviates.

### 3.4.6. 토의

북빅토리아랜드 월슨 암체를 구성하는 퇴적암들의 기원지 정보와 변성작용 시기에 대한 연구는 제한적으로 이루어졌다. 최근 수행된 연구는 월슨 암체의 남에서 북으로 프리스틀리 편암, 월슨 편마암, 랜터만편암-편마암, 모로주미천매암, 레닉편암, 버그 층군(Berg Group) 등의 암석들에서 로스-판아프리카(Pan-African)-그렌빌(Grenville) 조산운동 시기 저어콘 연령이 우세하고 남극 대륙 기반암을 지시하는 중원생대 이상의 연령이 산재하는 등 모두 유사한 쇄설성 저어콘 연령 분포 특징을 확인한 바 있다(그림 3.4.7b; Adams et al., 2014; Estrada et al., 2016; Paulsen et al., 2016). 또한 주로 변성사암들에서 가장 젊은 저어콘 연령인 약 530 Ma가 퇴적 상한으로 추정되었다. Henjes-Kunst et al. (2004)은 월슨 힐스(Wilson Hills)에 산출하는 상부각섬암상-백립암상의 혼성암 내 저어콘 U-Pb 연령측정을 통해 메타텍사이트(metatexite)에서는  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연령이  $500 \pm 4$  Ma ( $2\sigma$ )와  $484 \pm 5$  Ma ( $2\sigma$ )의 쌍모식(bimodal) 일치연령을, 다이아텍사이트(diatexite)와 혼성암질 편마암에서는 메타텍사이트 저어콘의 젊은 일치연령과 불확실도 내에서 동일한 각각  $475 \pm 4$  Ma,  $488 \pm 6$  Ma를 도출하였다. 이는 지구조운동 후 화강암맥의 정치연령인  $482 \pm 4$  Ma와도 유사하다(Henjes-Kunst et al., 2004). 저어콘과는 달리 동일한 메타텍사이트와 다이아텍사이트 시료에서 측정된 모나자이트의  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연령은  $499 \pm 10$  Ma ( $2\sigma$ )과  $493 \pm 9$  Ma ( $2\sigma$ )로 저어콘 보다 오래된 연령이 도출되었다. 이들 결과를 종합하여 백립암상의

변성작용 시기를 약 500 Ma로 제안하고, 이후 490-470 Ma 시기를 감압 또는 냉각에 따른 후퇴변성 작용의 시기로 해석한 바 있다(Henjes-Kunst et al., 2004; Schüssler et al., 2004). 500 Ma의 변성 연령은 지구조운동 전, 중, 후 화성암의 관입 연령으로부터 추정된 바도 있다(Rocchi et al., 2011).

머치슨 층과 딥 프리즈 레인지에서 채취한 호상 편마암 시료 WT001A와 WT008에서 분석한 저어콘의 점 분석 연령은 1.0-1.2 Ga와 530-700 Ma 사이에 집중되고, 1.6 Ga 이상에서 산재한 반면, 700-900 Ma와 1.2-1.6 Ga 사이에는 결여된 분포 특징을 보인다(그림 3.4.5a,c). 이러한 연령 분포 형태는 우백질 암맥 시료(WT001B)의 저어콘 상속핵의 연령 분포에서도 동일하게 확인된다(그림 3.4.5b). 호상 편마암 시료의 저어콘과 우백질 암맥의 저어콘 상속핵 U-Pb 연령 분포를 통계적으로 이해하기 위하여 확률밀도분포도를 작성한 결과(그림 3.4.7a), 저어콘 연령들은 약 530 Ma, 600 Ma, 1.0 Ga의 첨두를 가지며, 이들 연령은 각각 로스, 판아프리카, 그렌빌 조산운동 시기를 대표함을 알 수 있다(그림 3.4.7a). 그 외 남극 기반암으로부터의 퇴적물 유입을 지시하는 더 오래된 선캠브리아기 연령들(>1.6 Ga)이 산재한다. 확률밀도분포도상에서 나타나는 또 다른 큰 특징으로는 판아프리카-그렌빌 연령 사이와 그렌빌-대륙 기반암 연령 사이에 연령 밀도가 현저히 낮아지는 영역이 존재한다는 점이다. 이러한 연령 결핍은 최근 보고된 율슨 암체 변성사암들의 쇄설성 저어콘 U-Pb 연령 분포와 유사하다(그림 3.4.7b; Adams et al., 2014; Estrada et al., 2016; Paulsen et al., 2016). 호상 편마암 시료의 저어콘 점 분석 중 가장 젊은  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  연령은  $529 \pm 6$  Ma ( $1\sigma$ )이며, Th/U 비는 0.77이다. 이 연령은 기존 연구에서 변성사암의 쇄설성 저어콘으로부터 추정된 퇴적 상한(약 530 Ma)과 불확실도 내에서 일치한다(Estrada et al., 2016; Paulsen et al., 2016). 초기 캠브리아기 저어콘의 상대적으로 낮은 산출 빈도, 높은 Th/U 비, 변성작용을 지시하는 내부 구조의 부재는 호상 편마암 시료들의 가장 젊은 점 분석 연령이 쇄설성 기원임을 뒷받침하고, 저어콘 결정들에서 관찰되는 다양한 누대구조와 원마도의 차이는 복수의 기원지에서 쇄설성 저어콘 결정들이 공급되었을 가능성을 시사한다(Fedo et al., 2003). 이러한저어콘 U-Pb 연령 측정의 결과로부터 호상 편마암 시료 WT001A와 WT008의 광물 조합인 단사휘석-흑운모-정장석-석영-사장석과 흑운모-정장석-사장석-석영의 안정 영역에서 변성 저어콘의 과성장이 미약하거나 거의 일어나지 않은 것으로 추정된다(e.g., Williams, 2001).

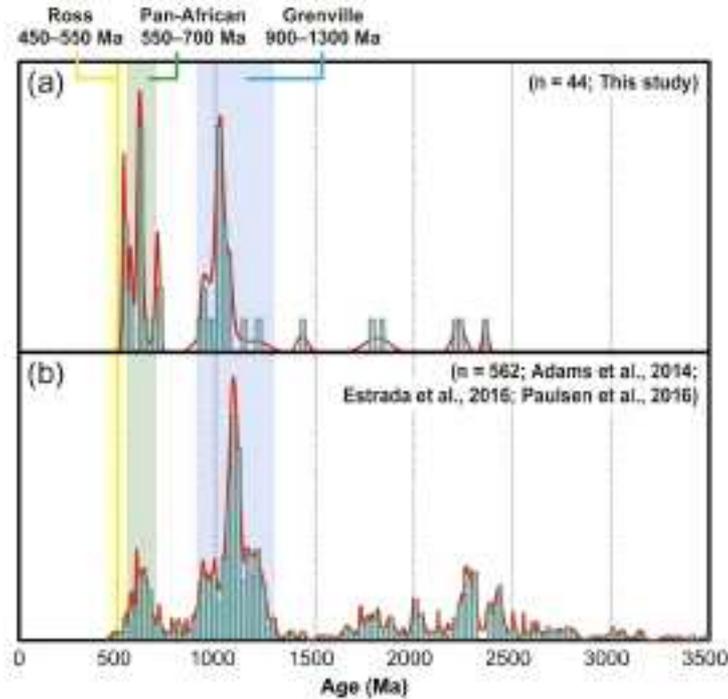


그림 3.4.7. 쇠설성 저어콘의 U-Pb 연령 분포도를 나타내는 확률밀도분포도. (a) 두 개의 호상 편마암과 우백질 암맥 시료(this study). (b) 프리슬리 편암에서 측정된 기존 연구에서 편집함(Adams et al., 2014; Estrada et al., 2016; Paulsen et al., 2016). 노란색, 녹색, 청색 띠는 각각 로스, 팬-아프리카, 그렌빌 조산 운동의 기간을 나타냄.

호상 편마암 시료(WT001A)를 관입하고 있는 우백질 암맥 시료(WT001B)에서 분석한 저어콘의 점 분석 중 상속핵의 U-Pb 연령 분포가 호상 편마암 시료 WT001A와 WT008의 저어콘 U-Pb 연령 분포와 유사한 점을 미루어 보아, 이 관입 암맥의 기원이 호상 편마암과 같은 변성퇴적암의 재용융 작용에 의한 것임을 추정할 수 있다(그림 3.4.5). 이 암맥 시료의 저어콘 결정은 대부분 자형이고, 가장자리에 진동누대 구조를 가지는 과성장 띠가 존재한다(그림 3.4.4b). 이 과성장 띠에서 측정된 점 분석들의 Th/U 비는 0.1보다 낮으며, 일치도가 90% 이상인 점 분석들의 가중평균연령은  $482 \pm 4$  Ma (*1 $\sigma$* )이다(그림 3.4.6). 이로부터 우백질 암맥의 관입 시기가 약 480 Ma임과 함께 호상 편마암의 변성작용 시기가 퇴적 상한과 관입 연령의 사이인 480-530 Ma 사이임을 알 수 있다. 호상 편마암의 저어콘 결정으로부터 변성시기를 제한할 수 있는 직접적인 증거를 찾을 수 없지만, 우백질 암맥의 저어콘으로부터 간접적인 증거를 찾을 수 있다. 우백질 암맥의 일부 저어콘 결정에서 상속핵과 가장자리 진동누대 구조 사이에 어두운 음극선발광영상의 내부

영역과 진동누대 구조가 결여되어 있는 결정을 관찰할 수 있다(그림 3.4.4b). 이 영역에 대한 점 분석  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  연령은  $500\pm 7$  Ma ( $1\sigma$ ),  $504\pm 6$  Ma ( $1\sigma$ ),  $499\pm 6$  Ma ( $1\sigma$ ),  $497\pm 6$  Ma ( $1\sigma$ )이고, Th/U 비는 약 0.03으로 낮다(그림 4b). 이러한 내부 조직과 Th/U 비는 저어콘 결정의 이 영역이 재결정 작용 중 성장하였을 가능성을 제시한다(Hoskin and Schaltegger, 2003). 호상 편마암과 이를 관입하고 있는 화성 암맥에서의 저어콘 U-Pb 연령 측정 결과를 종합하면 율슨 암체를 구성하는 고생대 퇴적물의 공급은 적어도 초기 캄브리아기까지 이어졌으며, 퇴적물들이 경험한 백립암상의 광역변성 작용은 약 500 Ma에 일어났고, 이들 변성퇴적암들의 재용융은 약 480 Ma에 일어난 것으로 해석할 수 있다. Kelsey et al. (2008)은 저어콘과 모나자이트의 포화도 실험 자료와 이질암과 사암 성분을 이용하여 규장질 마그마에서 저어콘과 모나자이트의 성장에 관한 열역학 모델링을 실시하였고, 용융체에서 저어콘의 성장이 모나자이트에 비해 앞서는 결과를 도출하였다(Kelsey et al., 2008). Henjes-Kunst et al. (2004)가 보고한 율슨 힐스에서 산출하는 혼성암, 특히 다이아텍사이트에서 성장한 모나자이트의 연령은 저어콘에 비해 20 Ma 오래된 결과를 보여주고 있어, Kelsey et al. (2008)의 모델링 결과를 고려하면 율슨 힐스 혼성암의 모나자이트  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  연령(약 500 Ma)과 저어콘  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  연령(490-470 Ma)을 각각 백립암상의 변성작용 시기와 이후 후퇴변성작용의 시기로 특정하기에는 어려움이 있다. 이번 연구에서 관찰된 저어콘의 내부 구조와 약 500 Ma의  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  점 분석 연령은 백립암상의 변성작용 시기로 해석한 기존 연구결과와 잘 일치하며(그림 3.4.4b), 이와 함께 약 480 Ma의 새로운 열적 유입에 의한 용융 작용이 있었음을 제시한다(그림 3.4.4b, 3.4.6).

### 3.4.7. 결론

남극 북빅토리아랜드 율슨 암체에서 산출하는 호상 편마암과 이를 관입하고 있는 우백질 암맥의 저어콘 U-Pb 연령 측정 결과, 율슨 암체로의 퇴적물의공급이 적어도 초기 캄브리아기까지 이어졌으며, 이후 백립암상의 광역 변성작용이 약 500 Ma에 일어났음을 지시한다. 또한 우백질 암맥의 저어콘 상속핵과 호상 편마암 저어콘들의 연령 분포의 유사성에 미루어 보아 약 480 Ma에 또 다른 열적 공급에 의해 변성퇴적암의 재용융이 일어났음을 알 수 있다.

## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

이번 위탁연구는 본 연구인 “남극 빅토리아랜드 지역 지각진화 및 행성형성과정 연구”의 주요 세부 연구과제로서 빅토리아랜드의 변성사를 규명하는데 집중하였다. 야외 현장 지질조사를 통한 시료 확보 및 절대 연령 분석과 학회발표 등에서는 목표를 충분히 달성하였다.

빅토리아랜드의 변성사 규명은 남극 대륙의 지체구조진화 해석에 있어 필수적인 요소이며, 곤드와나 초대륙의 형성과 분리 및 한반도의 형성과정을 이해하는데에도 활용할 수 있다. 또한, 2014년 장보고 기지 준공 이후 첫발을 내디딘 남극대륙 연구에 필요한 경험을 쌓고 빅토리아랜드 지질정보를 조종하여 미래개발시대 대비 및 연구주도권 확보에 초석이 될 수 있다.



## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

이번 위탁연구는 본 연구인 “남극 빅토리아랜드 지역 지각진화 및 행성형성과정 연구”의 주요 세부 연구과제로서 빅토리아랜드의 변성사를 규명하는데 집중하였다. 특히, 변성사 규명은 남극 대륙의 지체구조진화 해석에 있어 필수적인 요소이며, 곤드와나 초대륙의 형성과 분리 및 한반도의 형성과정의 이해에도 활용할 수 있다. 이번 연구를 통해 빅토리아랜드 미노출지의 암석특성을 예측하는데 결과를 활용할 수 있다. 이는 5억 년 전 남극대륙과 초대륙의 고지리 복원에 기여할 수 있을 뿐만 아니라 남극에서의 자원개발이 허용될 때를 대비하여 남극 대륙의 암석 및 자원 분포에 대한 기초자료로 활용할 수 있다.



## 제 6 장 참고문헌

- Adams, C.J., Bradshaw, J.D. & Ireland, T.R. (2014). Provenance connections between late Neoproterozoic and early Palaeozoic sedimentary basins of the Ross Sea region, Antarctica, south-east Australia and southern Zealandia. *Antarctic Science*, 26, 173-182.
- Agard, P., Yamato, P., Jolivet, L. & Burov, E. (2009). Exhumation of oceanic blueschists and eclogites in subduction zones: Timing and mechanisms. *Earth-Science Reviews*, 92(1 - 2), 53 - 79. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.11.002>
- Ahn, J.H., Peacor, D.R. & Essene, E.J. (1985). Coexisting paragonite - phengite in blueschist eclogite: a TEM study. *American Mineralogist*, 70(11 - 12), 1193 - 1204.
- Allibone, A. & Wysoczanski, R. (2002). Initiation of magmatism during the Cambrian - Ordovician Ross orogeny in southern Victoria Land, Antarctica. *Geological Society of America Bulletin*, 114(8), 1007 - 1018. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2002\)114<1007:IOMDTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2002)114<1007:IOMDTC>2.0.CO;2)
- Anderson, D.L. (2007). *New theory of the earth*. New York, NY: Cambridge University Press. 384 pp. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167291>
- 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*, 2, 103-123.
- Bacon, C.R. (1989). Crystallization of accessory phases in magmas by local saturation adjacent to phenocrysts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(5), 1055 - 1066. doi: 10.1016/0016-7037(89)90210-X.
- Baldwin, J.A., Powell, R., Brown, M., Moraes, R. & Fuck, R.A. (2005). Modelling of mineral equilibria in ultrahigh-temperature metamorphic rocks from the Itauçu Complex, central Brazil. *Journal of Metamorphic Geology*, 23(7), 511 - 531. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2005.00591.x>
- Baldwin, S.L., Monteleone, B.D., Webb, L.E., Fitzgerald, P.G., Grove, M. & Hill, E.J. (2004). Pliocene eclogite exhumation at plate tectonic rates in eastern Papua New Guinea. *Nature*, 431, 263 - 267.

<https://doi.org/10.1038/nature02846>

- Bebout, G.E. (2007). Metamorphic chemical geodynamics of subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 260(3 - 4), 373 - 393. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.050>
- Biagini, R., Di Vincenzo, G. & Ghezzo, C. (1991a). Petrology and geochemistry of peraluminous granitoids from Priestley and Aviator glacier region, Northern Victoria Land, Antarctica. *Memorie della Societa Geologica Italiana* 46, 205-230.
- Biagini, R., Di Vincenzo, G. & Ghezzo, C. (1991b). Mineral chemistry of metaluminous granitoids between the David and Campbell glaciers, Victoria Land, Antarctica. *Memorie della Societa Geologica Italiana*, 46, 231-247.
- Bingen, B., Austrheim, H., Whitehouse, M.J. & Davis, W.J. (2004). Trace element signature and U - Pb geochronology of eclogite-facies zircon, Bergen Arcs, Caledonides of W Norway. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147(6), 671 - 683. <https://doi.org/10.1007/s00410-004-0585-z>
- Boger, S.D. & Miller, J.McL. (2004). Terminal suturing of Gondwana and the onset of the Ross - Delamerian Orogeny: the cause and effect of an Early Cambrian reconfiguration of plate motions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219, 35 - 48.
- Boger, S.D. (2011). Antarctica - Before and after Gondwana. *Gondwana Research*, 19(2), 335 - 371. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.09.003>
- Bomparola, R.M., Ghezzo, C., Belousova, E., Griffin, W.L. & O'Reilly, S.Y. (2007). Resetting of the U - Pb zircon system in Cambro-Ordovician intrusives of the Deep Freeze Range, northern Victoria Land, Antarctica. *Journal of Petrology*, 48, 327 - 364.
- Borg, S.G., Stump, E., Chappell, B.W., McCulloch, M.T., Wyborn, D., Armstrong, R.L. & Holloway, J.R. (1987). Granitoids of northern Victoria Land, Antarctica; implications of chemical and isotopic variations to regional crustal structure and tectonics. *American Journal of Science*, 287, 127-169.
- Bradshaw, J.D. & Laird, M.G. (1983). Pre-Beacon geology of northern Victoria Land: A review, in Oliver, R.L., James, P.R., and Jago, J.B., eds., *Antarctic earth sciences*: Canberra, Australian Academy of Science, p. 98 - 101.
- Bradshaw, J.D., Weaver, S.D. & Laird, M.G. (1985). Suspect terranes in northern

- Victoria Land, Antarctica. In: Craddock, C. (eds.), Antarctic Geoscience. University of Wisconsin Press, Madison, 36-39.
- Brown, M. (2007). Metamorphic conditions in orogenic belts: A record of secular change. *International Geology Review*, 49(3), 193 - 234. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.49.3.193>
- Calver, C.R., Black, L.P., Everard, J.L. & Seymour, D.B. (2004). U-Pb zircon age constraints on late Neoproterozoic glaciation in Tasmania. *Geology*, 32(10), 893 - 896. doi: 10.1130/g20713.1.
- Capponi, G., Castelli, D., Fioretti, A.M. & Oggiano, G. (1997). Geological mapping and field relationships of eclogites from the Lanterman Range (Northern Victoria Land, Antarctica). In C. A. Ricci (Ed.), *The Antarctic region: Geological evolution and processes* (pp. 219 - 225). Siena: Terra Antartica Publication.
- Capponi, G., Crispini, L. & Meccheri, M. (1999). Structural history and tectonic evolution of the boundary between the Wilson and Bowers terranes, Lanterman Range, northern Victoria Land, Antarctica. *Tectonophysics*, 312, 249 - 266.
- Carswell, D. A. (1990). *Eclogite facies rocks*. New York, NY: Chapman & Hall. 396pp. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-9263-0>
- Castro, A.E. & Spear, F.S. (2017). Reaction overstepping and re-evaluation of peak P - T conditions of the blueschist unit Sifnos, Greece: implications for the Cyclades subduction zone. *International Geology Review*, 59(5 - 6), 548 - 562. <https://doi.org/10.1080/00206814.2016.1200499>
- Cawood, P.A. (2005). Terra Australis Orogen: Rodinia breakup and development of the Pacific and Iapetus margins of Gondwana during the Neoproterozoic and Paleozoic. *Earth-Science Reviews*, 69, 249 - 279.
- Cawood, P.A., Hawkesworth, C.J. & Dhuime, B., 2012, Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology*, 40(10), 875 - 878. doi: 10.1130/g32945.1.
- Chen, Y., Ye, K., Wu, T. F. & Guo, S. (2013). Exhumation of oceanic eclogites: thermodynamic constraints on pressure, temperature, bulk composition and density. *Journal of Metamorphic Geology*, 31(5), 549 - 570. <https://doi.org/10.1111/jmg.12033>
- Cheng, H., Liu, X.C., Vervoort, J.D., Wilford, D. & Cao, D.D. (2016).

- Micro-sampling Lu - Hf geochronology reveals episodic garnet growth and multiple high-P metamorphic events. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(4), 336 - 377. <https://doi.org/10.1111/jmg.12185>
- Cheong, W., Cho, M. & Kim, Y. (2013). An efficient method for zircon separation using the gold pan. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 22, 63-70 (in Korean with English abstract).
- Chernoff, C.B. & Carlson, W.D. (1997). Disequilibrium for Ca during growth of pelitic garnet. *Journal of Metamorphic Geology*, 15(4), 421 - 438. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1997.00026.x>
- Chopin, C. (1984). Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: a first record and some consequences. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86(2), 107 - 118. <https://doi.org/10.1007/bf00381838>
- Chopin, C. (2003). Ultrahigh-pressure metamorphism: tracing continental crust into the mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 212(1 - 2), 1 - 14. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(03\)00261-9](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00261-9)
- Claoué-Long, J.C., Compston, W., Roberts, J. & Fanning, C.M. (1995). Two Carboniferous ages: a comparison of SHRIMP zircon dating with conventional zircon ages and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  analysis. In: Berggren, W.A., Kent, D.B., Aubrey, M.P., and Hardenbol, J. (eds.), *Geochronology, Time Scales, and Global Stratigraphic Correlation*. SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication, 4, 3-21.
- Coggon, R. & Holland, T.J.B. (2002). Mixing properties of phengitic micas and revised garnet-phengite thermobarometers. *Journal of Metamorphic Geology*, 20(7), 683 - 696. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2002.00395.x>
- Cooper, A.F., Maas, R., Scott, J.M. & Barber, A.J.W. (2011). Dating of volcanism and sedimentation in the Skelton Group, Transantarctic Mountains: Implications for the Rodinia-Gondwana transition in southern Victoria Land, Antarctica. *Geological Society of America Bulletin*, 123(3 - 4), 681 - 702. doi: 10.1130/b30237.1.
- Cottrell, E. & Kelly, K.A. (2011). The oxidation state of Fe in MORB glasses and the oxygen fugacity of the upper mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 305(3 - 4), 270 - 282. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.03.014>
- Cox, G.M., Isakson, V., Hoffman, P.F., Gernon, T.M., Schmitz, M.D., Shahin, S.,

- Collins, A.S., Preiss, W., Blades, M.L., Mitchell, R.N. & Nordsvan, A. (2018). South Australian U-Pb zircon (CA-ID-TIMS) age supports globally synchronous Sturtian deglaciation. *Precambrian Research*, 315, 257 - 263. doi: 10.1016/j.precamres.2018.07.007.
- Crawford, A.J., Stevens, B.P.J. & Fanning, M. (1997). Geochemistry and tectonic setting of some Neoproterozoic and Early Cambrian volcanics in western New South Wales: *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(6), 831 - 852. doi: 10.1080/08120099708728358.
- Crispini, L., Di Vincenzo, G. & Palmeri, R. (2007). Petrology and  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$  dating of shear zones in the Lanterman Range (northern Victoria Land, Antarctica): implications for metamorphic and temporal evolution at terrane boundaries. *Mineralogy and Petrology*, 89, 217 - 249.
- Cumming, G.L. & Richards, J.R. (1975). Ore lead isotope ratios in a continuously changing earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 28, 155 - 171.
- Dallai, L., Ghezzo, C. & Sharp, Z.D. (2003). Oxygen isotope evidence for crustal assimilation and magma mixing in the Granite Harbour Intrusives, Northern Victoria Land, Antarctica. *Lithos*, 67, 135-151.
- Dallmeyer, R.D. & Wright, T.O. (1992). Diachronous cleavage development in the Robertson Bay terrane, Northern Victoria Land, Antarctica: Tectonic implications. *Tectonics*, 11(2), 437 - 448. <https://doi.org/10.1029/91tc02891>
- Dalziel, I.W.D. (1991). Pacific margins of Laurentia and East Antarctica-Australia as a conjugate rift pair: Evidence and implications for an Eocambrian supercontinent. *Geology*, 19(6), 598 - 601. doi: 10.1130/0091-7613(1991)019<0598:PMOLAE>2.3.CO;2.
- de Capitani, C. & Petrakakis, K. (2010). The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software. *American Mineralogist*, 95(7), 1006 - 1016. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3354>
- de Sigoyer, J., Guillot, S., Lardeaux, J. M. & Mascle, G. (1997). Glaucofane-bearing eclogites in the Tso Moriri dome (eastern Ladakh, NW Himalaya). *European Journal of Mineralogy*, 9(5), 1073 - 1083. <https://doi.org/10.1127/ejm/9/5/1073>
- Desmons, J. & Smulikowski, W. (2007). A systematic nomenclature for metamorphic rocks: 4. High P/T metamorphic rocks. Recommendations by

- the IUGS Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks. Recommendations, web version of 01.02.2007 (<https://www.bgs.ac.uk/scmr/products.html>).
- Direen, N.G. & Crawford, A.J. (2003). Fossil seaward-dipping reflector sequences preserved in southeastern Australia: a 600 Ma volcanic passive margin in eastern Gondwanaland: *Journal of the Geological Society*, 160(6), 985 - 990. doi: 10.1144/0016-764903-010.
- Diener, J.F.A. & Powell, R. (2012). Revised activity - composition models for clinopyroxene and amphibole. *Journal of Metamorphic Geology*, 30(2), 131 - 142. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2011.00959.x>
- Di Vincenzo, G. & Palmeri, R. (2001). An  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$  investigation of high-pressure metamorphism and the retrogressive history of mafic eclogites from the Lanterman Range (Antarctica): evidence against a simple temperature control on argon transport in amphibole. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(1), 15 - 35. <https://doi.org/10.1007/s004100000226>
- Di Vincenzo, G., Palmeri, R., Talarico, F., Andriessen, P.A.M. & Ricci, C.A. (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.
- Di Vincenzo, G., Ghiribelli, B., Giorgetti, G. & Palmeri, R. (2001). Evidence of a close link between petrology and isotope records: constraints from SEM, EMP, TEM and in situ  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$  laser analyses on multiple generations of white micas (Lanterman Range, Antarctica). *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3), 398 - 405. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00454-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00454-X)
- Di Vincenzo, G., Carosi, R., Palmeri, R. & Tiepolo, M. (2007). A comparative U-Th-Pb (zircon-monazite) and  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$  (muscovite-biotite) study of shear zones in northern Victoria Land (Antarctica): implications for geochronology and localized reworking of the Ross Orogen. *Journal of Metamorphic Geology*, 25, 605-630.

- Di Vincenzo, G., Grande, A. & Rossetti, F. (2014). Paleozoic siliciclastic rocks from northern Victoria Land (Antarctica): Provenance, timing of deformation, and implications for the Antarctica–Australia connection. *Geological Society of America Bulletin*, 126, 1416–1438.
- Di Vincenzo, G., Horton, F. & Palmeri, R. (2016). Protracted (~30 Ma) eclogite–facies metamorphism in northern Victoria Land (Antarctica): Implications for the geodynamics of the Ross/Delamerian Orogen. *Gondwana Research*, 40, 91–106.
- Du, J. X., Zhang, L.F., Bader, T., Chen, Z.Y. & Lü, Z. (2014). Metamorphic evolution of relict lawsonite-bearing eclogites from the (U) HP metamorphic belt in the Chinese southwestern Tianshan. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(6), 575 - 598. <https://doi.org/10.1111/jmg.12080>
- Duchêne, S., Blichert-Toft, J., Luais, B., Télouk, P., Lardeaux, J.-M. & Albarède, F. (1997). The Lu - Hf dating of garnets and the ages of the Alpine high-pressure metamorphism. *Nature*, 387, 586 - 589. <https://doi.org/10.1038/42446>
- Engi, M. (2017). Petrochronology based on REE-minerals: Monazite, allanite, xenotime, apatite. In M. J. Kohn, M. Engi, & P. Lanari (Eds.), *Petrochronology: Methods and applications, Reviews in Mineralogy and Geochemistry* (v. 83, pp. 365 - 418). Chantilly, VA: The Mineralogical Society of America. <https://doi.org/10.2138/rmg.2017.83.12>
- Ernst, R.E., Buchan, K.L. & Campbell, I.H. (2005). Frontiers in large igneous province research. *Lithos*, 79(3 - 4), 271 - 297. doi: 10.1016/j.lithos.2004.09.004.
- Ernst, W.G. (2001). Subduction, ultrahigh-pressure metamorphism, and regurgitation of buoyant crustal slices – implications for arcs and continental growth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 127(1 - 4), 253 - 275. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(01\)00231-X](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(01)00231-X)
- Ernst, W.G., Maruyama, S. & Wallis, S. (1997). Buoyancy-driven, rapid exhumation of ultrahigh-pressure metamorphosed continental crust. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94(18), 9532 - 9537. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.18.9532>
- Estrada, S., Läufer, A., Eckelmann, K., Hofmann, M., Gätner, A. & Linnemann, U. (2016). Continuous Neoproterozoic to Ordovician sedimentation at the

- East Gondwana margin – Implications from detrital zircons of the Ross Orogen in northern Victoria Land, Antarctica. *Gondwana Research*, 37, 426-448.
- 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. (2010). Fault - slip analysis and transpressional tectonics: A study of Paleozoic structures in northern Victoria Land, Antarctica. *Journal of Structural Geology*, 32(5), 667 - 684. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.04.001>
- Fedo., C.M., Sircombe, K.N. & Rainbird, R.H. (2003). Detrital zircon analysis of the sedimentary record. In: Hanchar, J.M. and Hoskin, P.W.O. (eds.), *Zircon. Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 53. 277-304.
- Fergusson, C.L., Henderson, R.A., Fanning, C.M. & Withnall, I.W. (2007). Detrital zircon ages in Neoproterozoic to Ordovician siliciclastic rocks, northeastern Australia: implications for the tectonic history of the East Gondwana continental margin. *Journal of the Geological Society*, 164(1), 215 - 225. doi: 10.1144/0016-76492005-136.
- Fergusson, C.L., Offler, R. & Green, T.J. (2009). Late Neoproterozoic passive margin of East Gondwana: geochemical constraints from the Anakie Inlier, central Queensland, Australia. *Precambrian Research*, 168, 301 - 312.
- Fergusson, C.L., Nutman, A.P., Kamiichi, T. & Hidaka, H. (2013). Evolution of a Cambrian active continental margin: The Delamerian - Lachlan connection in southeastern Australia from a zircon perspective. *Gondwana Research*, 24, 1051-1066.
- Fergusson, C.L., Henderson, R.A. & Offler, R. (2017). Late Neoproterozoic to early Mesozoic sedimentary rocks of the Tasmanides, eastern Australia, in Mazumder, R., ed., *Sediment provenance: Influences on compositional change from source to sink*, Amsterdam, Elsevier, p. 325 - 369. doi: 10.1016/b978-0-12-803386-9.00013-7.
- Ferraccioli, F., Finn, C.A., Jordan, T.A., Bell, R.E., Anderson, L.M. & Damaske, D. (2011). East Antarctic rifting triggers uplift of the Gamburseev Mountains. *Nature*, 479, 388-392.

- Fioretti, A.M., Capponi, G., Black, L.P., Varne, R. & Visona, D. (2005). Surgeon island granite SHRIMP zircon ages: a clue for the Cambrian tectonic setting and evolution of the Palaeopacific margin of Gondwana (northern Victoria Land, Antarctica). *Terra Nova*, 17, 242-249.
- Fitzgerald, P.G., Sandiford, M., Barrett, P.J. & Gleadow, A.J.W. (1986). Asymmetric extension associated with uplift and subsidence in the Transantarctic Mountains and Ross Embayment. *Earth and Planetary Science Letters*, 81, 67 - 78.
- Fitzsimons, I.C.W. (2000a). A review of tectonic events in the East Antarctic Shield, and their implications for Gondwana and earlier supercontinents. *Journal of African Earth Sciences*, 31, 3-23.
- Fitzsimons, I.C.W. (2000b). Greville-age basement provinces in East Antarctica: Evidences for three separate collisional orogens. *Geology*, 28, 879-882.
- Fitzsimons, I.C.W. (2003). Proterozoic basement provinces of southern and southwestern Australia, and their correlation with Antarctica: in *Proterozoic East Gondwana: Supercontinent Assembly and Breakup* (eds) M. Yoshida et al., Geological Society Special Publication 206, 93-130.
- Field, B.D. & Findlay, R.H. (1983). The sedimentology of the Robertson Bay Group, north Victoria Land. In R. L. Oliver, P. R. James, & J. B. Jago (Eds.), *Antarctic earth sciences* (pp. 102 - 106). Canberra: Australian Academy of Science.
- Fotoohi Rad, G.R., Droop, G.T.R., Amini, S. & Moazzen, M. (2005). Eclogites and blueschists of the Sistan Suture Zone, eastern Iran: A comparison of P - T histories from a subduction mélange. *Lithos*, 84(1 - 2), 1 - 24. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.01.007>
- Gaidies, F., de Capitani, C. & Abart, R. (2008). THERIA\_G: a software program to numerically model prograde garnet growth. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(5), 657 - 671. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0263-z>
- GANOVEX (1987). German Antarctic North Victoria Land Expedition 1982/83, GANOVEX III Volume 2, *Geologisches Jahrbuch B66*, 324p.
- Ghiribelli, B., Frezzotti, M. L. & Palmeri, R. (2002). Coesite in eclogites of the Lanterman Range (Antarctica): Evidence from textural and Raman studies. *European Journal of Mineralogy*, 14(2), 355 - 360.

<https://doi.org/10.1127/0935-1221/2002/0014-0355>

- Giacomini, F., Tiepolo, M., Dallai, L. & Ghezzo, C. (2007). On the onset and evolution of the Ross-orogeny magmatism in North Victoria Land - Antarctica. *Chemical Geology*, 240, 103 - 128.
- Ghezzo, C., Baldelli, C., Biagini, R., Carmignani, L., Di Vincenzo, G., Gosso, G., Lelli, A., Lombardo, B., Montrasio, A., Pertusati, P. C. & Salvini, F. (1987). Granitoids from the David Glacier - Aviator Glacier segment of the Transantarctic Mountains, Victoria Land, Antarctica. *Memorie della Societa Geologica Italiana*, 33, 143 - 159.
- Gibson, G.M. & Wright, T.O. (1985). Importance of thrust faulting in the tectonic development of northern Victoria Land, Antarctica. *Nature*, 315, 480 - 483.
- Gibson, G.M., Morse, M.P., Ireland, T.R. & Nayak, G.K. (2011). Arc-continent collision and orogenesis in western Tasmansides: insights from reactivated basement structures and formation of an ocean-continent transform boundary off western Tasmania. *Gondwana Research*, 19, 608-627.
- Gibson, G.M., Champion, D.C. & Ireland, T.R. (2015). Preservation of a fragmented late Neoproterozoic - earliest Cambrian hyper-extended continental-margin sequence in the Australian Delamerian Orogen, in Gibson, G.M., Roure, F., and Manatschal, G., eds., *Sedimentary basins and crustal processes at continental margins: From modern hyper-extended margins to deformed ancient analogues*: London, Geological Society [London] Special Publication, 413, p. 269 - 299. doi: 10.1144/SP413.8.
- Gilotti, J.A., Nutman, A.P. & Brueckner, H.K. (2004). Devonian to Carboniferous collision in the Greenland Caledonides: U-Pb zircon and Sm-Nd ages of high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(2), 216 - 235. <https://doi.org/10.1007/s00410-004-0600-4>
- Glen, R.A., Fitzsimons, I.C.W., Griffin, W.L. & Saeed, A. (2017). East Antarctic sources of extensive Lower - Middle Ordovician turbidites in the Lachlan Orogen, southern Tasmanides, eastern Australia: *Australian Journal of Earth Sciences*, 64(2), 143 - 224. doi: 10.1080/08120099.2017.1273256.
- Giorgetti, G., Tropper, P., Essene, E.J. & Peacor, D.R. (2000). Characterization of

- non-equilibrium and equilibrium occurrences of paragonite/muscovite intergrowths in an eclogite from the Sesia - Lanzo Zone (Western Alps, Italy). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 138(4), 326 - 336. <https://doi.org/10.1007/s004100050566>
- Glodny, J., Ring, U., Kühn, A., Gleissner, P. & Franz, G. (2005). Crystallization and very rapid exhumation of the youngest Alpine eclogites (Tauern Window, Eastern Alps) from Rb/Sr mineral assemblage analysis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149(6), 699 - 712. <https://doi.org/10.1007/s00410-005-0676-5>
- Godard, G. & Palmeri, R. (2013). High-pressure metamorphism in Antarctica from the Proterozoic to the Cenozoic: A review and geodynamic implications. *Gondwana Research*, 23, 844-864.
- Goode, J.W. (2007). Metamorphism in the Ross orogen and its bearing on Gondwana margin tectonics. *Geological Society of America Special Paper* 419, 185-203.
- Goode, J.W. & Dallmeyer, R.D. (1996). Contrasting thermal evolution within the Ross orogen, Antarctica: evidence from mineral  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages. *Journal of Geology*, 104(4), 435 - 458. <https://doi.org/10.1086/629838>
- Goode, J.W. & Fanning, C.M. (2010). Composition and age of the East Antarctic Shield in eastern Wilkes Land determined by proxy from Oligocene-pleistocene glaciomarine sediment and Beacon Supergroup sandstones, Antarctica. *Geological Society of America Bulletin*, 122, 1135-1159.
- Goode, J.W. & Finn, A.F. (2010). Glimpses of East Antarctica: Aeromagnetic and satellite magnetic view from the central Transantarctic Mountains of East Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 115, 1135-1159.
- Goode, J.W., Myrow, P., Williams, I.S. & Bowring, S. (2002). Age and provenance of Beardmore Group, Antarctica: Constraints on Rodinia supercontinent breakup. *Journal of Geology*, 110, 393-406.
- Goode, J.W., Williams, I.S. & Myrow, P. (2004). Provenance of Neoproterozoic and lower Paleozoic siliciclastic rocks of the central Ross orogen, Antarctica: Detrital record of rift-, passive, and active-margin sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*, 116, 1253-1279.

- Goode, J.W., Vervoort, J.D., Fanning, C.M., Brecke, D.M., Farmer, G.L., Williams, I.S., Myrow, P.M. & DePaolo, D.J. (2008). A positive test of East Antarctica - Laurentia juxtaposition within the Rodinia supercontinent. *Science*, 321, 235 - 240.
- Goode, J.W., Fanning, C.M., Norman, M.D. & Bennett, V.C. (2012). Temporal, isotopic and spatial relations of early Paleozoic Gondwana-margin arc magmatism, central Transantarctic Mountains, Antarctica. *Journal of Petrology*, 53(10), 2027 - 2065. doi: 10.1093/petrology/egs043.
- Gordard, G. & Palmeri, R. (2013). High-pressure metamorphism in Antarctica from the Proterozoic to the Cenozoic: A review and geodynamic implications. *Gondwana Research*, 23, B09103.
- Green, E., Holland, T. J. B. & Powell, R. (2007). An order-disorder model for omphacitic pyroxenes in the system jadeite-diopside-hedenbergite-acmite, with applications to eclogitic rocks. *American Mineralogist*, 92(7), 1181 - 1189. <https://doi.org/10.2138/am.2007.2401>
- Grew, E.S. and Sandiford, M., 1984, A staurolite-talc assemblage in tourmaline-phlogopite-chlorite schists from northern Victoria Land, Antarctica, and its petrogenetic significance. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 87, 337-350.
- Groppo, C., Beltrando, M. & Compagnoni, R. (2009). The P - T path of the ultra-high pressure Lago Di Cignana and adjoining high-pressure meta-ophiolitic units: insights into the evolution of the subducting Tethyan slab. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(3), 207 - 231. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00814.x>
- Groppo, C. & Castelli, D. (2010). Prograde P - T evolution of a lawsonite eclogite from the Monviso meta-ophiolite (Western Alps): Dehydration and redox reactions during subduction of oceanic FeTi-oxide gabbro. *Journal of Petrology*, 51(12), 2489 - 2514. <https://doi.org/10.1093/petrology/egq065>
- Hacker, B.R., Ratschbacher, L., Webb, L., Ireland, T., Walker, D. & Shuwen, D. (1998). U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling - Dabie Orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1 - 4), 215 - 230. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(98\)00152-6](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(98)00152-6)
- Hacker, B.R., Wallis, S.R., Ratschbacher, L., Grove, M. & Gehrels, G. (2006).

- High-temperature geochronology constraints on the tectonic history and architecture of the ultrahigh-pressure Dabie-Sulu Orogen. *Tectonics*, 25(5), TC5006. <https://doi.org/10.1029/2005tc001937>
- Hagen-Peter, G., Cottle, J.M., Smit, M. & Cooper, A.F. (2016). Coupled garnet Lu - Hf and monazite U - Pb geochronology constrain early convergent margin dynamics in the Ross orogen, Antarctica. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(4), 293 - 319. doi: 10.1111/jmg.12182.
- Hawkesworth, C., Cawood, P., Kemp, T., Storey, C. & Dhuime, B. (2009). A matter of preservation. *Science*, 323(5910), 49 - 50. doi: 10.1126/science.1168549.
- Henjes-Kunst, F., Roland, N.W., Dunphy, J.M. & Fletcher, I.R. (2004). SHRIMP U-Pb Dating of High-Grade Migmatites and Related Magmatites from Northwestern Oates Land (East Antarctica): Evidence for a Single High-Grade Event of Ross-Orogenic Age. *Terra Antarctica*, 11(1), 67-84.
- Hoffman, P.F. (1991). Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out?. *Science*, 252(5011), 1409 - 1412. doi: 10.1126/science.252.5011.1409.
- Holland, T., Baker, J. & Powell, R. (1998). Mixing properties and activity-composition and relationships of chlorites in the system MgO-FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *European Journal of Mineralogy*, 10(3), 395 - 406. <https://doi.org/10.1127/ejm/10/3/0395>
- Holland, T.J.B. (1980). The reaction albite = jadeite + quartz determined experimentally in the range 600 - 1200 °C. *American Mineralogist*, 65(1 - 2), 129 - 134.
- Holland T.J.B. (1983). The experimental determination of activities in disordered and short-range ordered jadeitic pyroxenes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 82(2 - 3), 214 - 220. <https://doi.org/10.1007/bf01166616>
- Holland, T.J.B. & Powell, R. (1998). An internally consistent data set for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3), 309 - 343. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00140.x>
- Holland, T.J.B. & Powell, R. (2011). An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(3), 333 - 383. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00923.x>

- Holm, O.H., Crawford, A.J. & Berry, R.F. (2003). Geochemistry and tectonic settings of meta-igneous rocks in the Arthur Lineament and surrounding area, northwest Tasmania. *Australian Journal of Earth Sciences*, 50(6), 903 - 918. doi: 10.1111/j.1400-0952.2003.01033.x.
- Hoskin, P.W.O. & Schaltegger, U. (2003). The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Hanchar, J.M. and Hoskin, P.W.O. (eds.), *Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53, 26-62.
- Inger, S. & Cliff, R. A. (1994). Timing of metamorphism in the Tauern Window, Eastern Alps: Rb - Sr ages and fabric formation. *Journal of Metamorphic Geology*, 12(5), 695 - 707. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1994.tb00052.x>
- Ireland, T.R., Flöttmann, T., Fanning, C.M., Gibson, G.M. & Preiss, W.V. (1998). Development of the early Paleozoic Pacific margin of Gondwana from detrital-zircon ages across the Delamerian orogen. *Geology*, 26(3), 243 - 246. doi: 10.1130/0091-7613(1998)026<0243:dotepp>2.3.co;2.
- Kabir, M.F., & Takasu, A. (2010). Evidence for multiple burial - partial exhumation cycles from the Onodani eclogites in the Sambagawa metamorphic belt, central Shikoku, Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(8), 873 - 893. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00898.x>
- KAGEX (2015). Excursion information map of northern Victoria Land, Antarctica with information of the basecamp at Eureka Spurs. Korea Polar Research Institute, Incheon, 32p.
- KAGEX (2016). Excursion information map of Northern Victoria Land, Antarctica with information of the basecamp at Helliwell Hills. Korea Polar Research Institute, Incheon, 35p.
- Kaneko, Y., Katayama, I., Yamamoto, H., Misawa, K., Ishikawa, M., Rehman, H. U., ... Shiraishi, K. (2003). Timing of Himalayan ultrahigh-pressure metamorphism: sinking rate and subduction angle of the Indian continental crust beneath Asia. *Journal of Metamorphic Geology*, 21(6), 589 - 599. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2003.00466.x>
- Katayama, I., Parkinson, C. D., Okamoto, K., Nakajima, Y. & Maruyama, S. (2000). Supersilicic clinopyroxene and silica exsolution in UHPM eclogite and pelitic gneiss from the Kokchetav massif, Kazakhstan. *American Mineralogist*, 85(10), 1368 - 1374. <https://doi.org/10.2138/am-2000-1004>

- Kelsey, D.E., Clark, C. & Hand, M. (2008). Thermobarometric modelling of zircon and monazite growth in melt-bearing systems: examples using model metapelitic and metapsammitic granulites. *Journal of Metamorphic Geology*, 26, 199–212.
- Kendall, B., Creaser, R.A., & Selby, D. (2006). Re–Os geochronology of postglacial black shales in Australia: Constraints on the timing of “Sturtian” glaciation. *Geology*, 34(9), 729 – 732. doi: 10.1130/g22775.1.
- Kikuchi, M. & Hidaka, H. (2009). In-situ U–Pb analyses of highly altered zircon from sediments overlying the Bangombe natural fission reactor, Gabon. *Geosciences Journal*, 13, 257–264.
- Kim, Y. & Cho, M. (2008). Two-stage growth of porphyroblastic biotite and garnet in the Barrovian metapelites of the Imjingang belt, central Korea. *Journal of Metamorphic Geology*, 26(3), 385 – 399. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2008.00767.x>
- Kim, Y., Kim, T., Lee, J. I. & Kim, S. J. (2017). SHRIMP U–Pb ages of zircon from banded gneisses and a leucocratic dyke in the Wilson Terrane, northern Victoria Land, Antarctica. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53(4), 489 – 507 (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14770/jgsk.2017.53.4.489>
- 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*. doi: 10.1111/jmg.12474.
- Kleinschmidt, P.B. & Tessensohn, F. (1987). Early Paleozoic westward directed subduction at the Pacific continental margin of Antarctica, Sixth Gondwana Symposium. American Geophysical Union, Geophysical Monograph, 40, pp. 89–105.
- Kleinschmidt, G., Roland, N.W. & Schubert, W. (1984). The Metamorphic basement complex in the Mountaineer Range, North Victoria Land, Antarctica. In N. W. Roland (Ed.), German Antarctic North Victoria Land Expedition 1982/83, GANOVEX III (vol. 1), *Geologisches Jahrbuch* (vol. B60, pp. 213 – 251). Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Kohn, M.J., Corrie, S.L. & Markley, C. (2015). The fall and rise of metamorphic

- zircon. *American Mineralogist*, 100(4), 897 - 908.  
<https://doi.org/10.2138/am-2015-5064>
- Konrad-Schmolke, M., O'Brien, P.J., de Capitani, C. & Carswell, D. A. (2008). Garnet growth at high- and ultra-high pressure conditions and the effect of element fractionation on mineral modes and composition. *Lithos*, 103(3 - 4), 309 - 332. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.10.007>
- Krogh, E. J. (1982). Metamorphic evolution of Norwegian country-rock eclogites, as deduced from mineral inclusions and compositional zoning in garnets. *Lithos*, 15(4), 305 - 321. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(82\)90021-4](https://doi.org/10.1016/0024-4937(82)90021-4)
- Kruhl, J.H. (1996). Prism- and basal-plane parallel subgrain boundaries in quartz: a microstructural geothermobarometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 14, 581-589.
- Lambert, I.B., & Wyllie, P.J. (1972). Melting of gabbro (quartz eclogite) with excess water to 35 kilobars, with geological applications. *Journal of Geology*, 80(6), 693 - 708. <https://doi.org/10.1086/627795>
- Lapen, T.J., Johnson, C.M., Baumgartner, L.P., Mahlen, N.J., Beard, B.L. & Amato, J.M. (2003). Burial rates during prograde metamorphism of an ultra-high-pressure terrane: an example from Lago di Cignana, western Alps, Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 215(1 - 2), 57 - 72. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(03\)00455-2](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00455-2)
- Läufer, A., Lisker, F. & Phillips, G. (2011). Late Ross-orogenic deformation of basement rocks in the northern Deep Freeze Range, Victoria Land, Antarctica: the Lichen Hills Shear Zone. *Polarforschung*, 80, 60 - 70.
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E.S., Brich, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., ... Youzhi, G. (1997). Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *European Journal of Mineralogy*, 9(3), 623 - 651. <https://doi.org/10.1127/ejm/9/3/0623>
- Li, Z. & Gerya, T.V. (2009). Polyphase formation and exhumation of high- to ultrahigh-pressure rocks in continental subduction zone: Numerical modeling and application to the Sulu ultrahigh-pressure terrane in eastern China. *Journal of Geophysical Research*, 114(B9), B09406. <https://doi.org/10.1029/2008jb005935>

- Li, Z.X., Bogdanova, S.V., Collins, A.S., Davidson, A., De Waele, B., Ernst, R.E., Fitzsimons, I.C.W., Fuck, R.A., Gladkochub, D.P., Jacobs, J., Karlstrom, K.E., Lu, S., Natapov, L.M., Pease, V., Pisarevsky, S.A., Thrane, K. & Vernikovsky, V. (2008). Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. *Precambrian Research*, 160(1 - 2), 179 - 210. doi:10.1016/j.precamres.2007.04.021.
- Liati, A. & Gebauer, D. (1999). Constraining the prograde and retrograde P-T-t path of Eocene HP rocks by SHRIMP dating of different zircon domains: inferred rates of heating, burial, cooling and exhumation for central Rhodope, northern Greece. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135(4), 340 - 354. <https://doi.org/10.1007/s004100050516>
- Liati, A., Theye, T., Fanning, C. M., Gebauer, D. & Rayner, N. (2016). Multiple subduction cycles in the Alpine orogeny, as recorded in single zircon crystals (Rhodope zone, Greece). *Gondwana Research*, 29(1), 199 - 207. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.11.007>
- Licht, K.J. & Palmer, E.F. (2013). Erosion and transport by Byrd Glacier, Antarctica during the Last Glacial Maximum: Quaternary Science Reviews, 62, 32 - 48. doi: 10.1016/j.quascirev.2012.11.017.
- Liou, J.G., Zhang, R., Liu, F., Zhang, Z. & Ernst, W.G. (2012). Mineralogy, petrology, U-Pb geochronology, and geologic evolution of the Dabie-Sulu classic ultrahigh-pressure metamorphic terrane, East-Central China. *American Mineralogist*, 97(10), 1533 - 1543. <https://doi.org/10.2138/am.2012.4169>
- Lister, G.S. & Forster, M.A. (2016). White mica  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age spectra and the timing of multiple episodes of high-P metamorphic mineral growth in the Cycladic eclogite - blueschist belt, Syros, Aegean Sea, Greece. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(5), 401 - 421. <https://doi.org/10.1111/jmg.12178>
- Liu, D., Jian, P., Kröner, A. & Xu, S. (2006). Dating of prograde metamorphic events deciphered from episodic zircon growth in rocks of the Dabie - Sulu UHP complex, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 250(3 - 4), 650 - 666. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.07.043>
- Liu, F.L. & Liou, J.G. (2011). Zircon as the best mineral for P - T - time history of UHP metamorphism: A review on mineral inclusions and U - Pb

- SHRIMP ages of zircons from the Dabie - Sulu UHP rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(1), 1 - 39. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.08.007>
- Liu, J., Bohlen, S.R., & Ernst, W.G. (1996). Stability of hydrous phases in subducting oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 143(1 - 4), 161 - 171. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(96\)00130-6](https://doi.org/10.1016/0012-821x(96)00130-6)
- Ludwig, K.R. (2003). User's manual for Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 47p.
- Ludwig, K.R. (2008). User's manual for Isoplot 3.6: A geochronological toolkit for Microsoft Excel, Berkeley Geochronology Center Special Publication (no. 4). Berkeley: Berkeley Geochronology Center. 77 pp.
- Martin, E.L., Collins, W.J. & Kirkland, C.L. (2017). An Australian source for Pacific-Gondwanan zircons: Implications for the assembly of northeastern Gondwana. *Geology*, 45(8), 699 - 702. doi: 10.1130/g39152.1.
- Massonne, H.-J. (2012). Formation of amphibole and clinozoisite - epidote in eclogite owing to fluid infiltration during exhumation in a subduction channel. *Journal of Petrology*, 53(10), 1969 - 1998. <https://doi.org/10.1093/petrology/egs040>
- Massonne, H.-J. & Kopp, J. (2005). A low-variance mineral assemblage with talc and phengite in an eclogite from the Saxonian Erzgebirge, central Europe, and its P - T evolution. *Journal of Petrology*, 46(2), 355 - 375. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh079>
- Mattinson, C.G., Wooden, J.L., Liou, J.G., Bird, D.K. & Wu, C.L. (2006). Age and duration of eclogite-facies metamorphism, North Qaidam HP/UHP terrane, Western China. *American Journal of Science*, 306(9), 683 - 711. <https://doi.org/10.2475/09.2006.01>
- McClelland, W.C., Power, S.E., Gilotti, J.A., Mazdab, F.K. & Wopenka, B. (2006). U-Pb SHRIMP geochronology and trace-element geochemistry of coesite-bearing zircons, North-East Greenland Caledonides. In B. R. Hacker, W. C. McClelland, & J. G. Liou (Eds.), *Ultrahigh-pressure metamorphism: Deep continental subduction*, Geological Society of America Special Paper (vol. 403, pp. 23 - 43). Boulder, CO.: The Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2006.2403\(02\)](https://doi.org/10.1130/2006.2403(02))
- Meffre, S., Diren, N.G., Crawford, A.J. & Kamenetsky, V. (2004). Mafic volcanic

- rocks on King Island, Tasmania: evidence for 579 Ma break-up in east Gondwana: *Precambrian Research*, 135(3), 177 - 191. doi: 10.1016/j.precamres.2004.08.004.
- Melchiorre, M., Coltorti, M., Bonadiman, C., Faccini, B., O'Reilly, S.Y. & Pearson, N.J. (2011). The role of eclogite in the rift-related metasomatism and Cenozoic magmatism of Northern Victoria Land, Antarctica. *Lithos*, 124, 319-330.
- Meschede, M. (1986). A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb - Zr - Y diagram. *Chemical Geology*, 56(3 - 4), 207-218. doi: 10.1016/0009-2541(86)90004-5.
- Miller, C., Zanetti, A., Thöni, M. & Konzett, J. (2007). Eclogitisation of gabbroic rocks: Redistribution of trace elements and Zr in rutile thermometry in an Eo-Alpine subduction zone (Eastern Alps). *Chemical Geology*, 239(1 - 2), 96 - 123. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.01.001>
- Moore, E.M. (1991). Southwest U.S.-East Antarctic (SWEAT) connection: A hypothesis. *Geology*, 19(5), 425 - 428. doi: 10.1130/0091-7613(1991)019<0425:SUSEAS>2.3.CO;2.
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A.K., Ginzburg, I.V., Ross, M., Seifert, F. A., ... Gottardi, G. (1988). Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogical Magazine*, 52(367), 535 - 550. <https://doi.org/10.1180/minmag.1988.052.367.15>
- Myrow, P.M., Hughes, N.C., Goodge, J.W., Fanning, C.M., Williams, I.S., Peng, S., Bhargava, O.N., Parcha, S.K. & Pogue, K.R. (2010). Extraordinary transport and mixing of sediment across Himalayan central Gondwana during the Cambrian - Ordovician. *Geological Society of America Bulletin*, 122, 1660-1670.
- Mysen, B. & Griffin, W.L. (1973). Pyroxene stoichiometry and the breakdown of omphacite. *American Mineralogist*, 58(1 - 2), 60 - 63.
- Nakamura, D. & Hirajima, T. (2000). Granulite-facies overprinting of ultrahigh-pressure metamorphic rocks, northeastern Su-Lu region, eastern China. *Journal of Petrology*, 41(4), 563 - 582. <https://doi.org/10.1093/petrology/41.4.563>
- O'Brien, P.J. (1997). Garnet zoning and reaction textures in overprinted eclogites,

- Bohemian Massif, European Variscides: A record of their thermal history during exhumation. *Lithos*, 41(1 - 3), 119 - 133. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(97\)82008-7](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(97)82008-7)
- Paces, J.B. & Miller, J.D. (1993). Precise U - .Pb ages of Duluth Complex and related mafic intrusions, northeastern Minnesota: geochronological insights to physical, petrogenetic, paleomagnetic, and tectonomagmatic processes associated with the 1.1 Ga midcontinent rift system. *Journal of Geophysical Research*, 98, 13997-14013.
- Page, F.Z., Armstrong, L.S., Essene, E.J. & Mukasa, S.B. (2007). Prograde and retrograde history of the Junction School eclogite, California, and an evaluation of garnet - phengite - clinopyroxene thermobarometry: Contributions to Mineralogy and Petrology, 153(5), 533 - 555. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0161-9>
- Palin, R.M., Reuber, G.S., White, R.W., Kaus, B.J.P. & Weller, O.M. (2017). Subduction metamorphism in the Himalayan ultrahigh-pressure Tso Moriri massif: An integrated geodynamic and petrological modelling approach. *Earth and Planetary Science Letters*, 467, 108 - 119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.03.029>
- Palmeri, R. (1997). P-T paths and migmatite formation: An example from Deep Freeze Range, northern Victoria Land, Antarctica. *Lithos*, 42, 47-66.
- Palmeri, R., Ghiribelli, B., Talarico, F. & Ricci, C.A. (2003). Ultra-high-pressure metamorphism in felsic rocks: the garnet-phengite gneisses and quartzites from the Lanterman Range, Antarctica. *European Journal of Mineralogy*, 15, 513-525.
- Palmeri, R., Ghiribelli, B., Ranalli, G., Talarico, F. & Ricci, C.A. (2007). Ultrahigh-pressure metamorphism and exhumation of garnet-bearing ultramafic rocks from the Lanterman Range (northern Victoria Land, Antarctica). *Journal of Metamorphic Geology*, 25, 225-243.
- Palmeri, R., Frezzotti, M.L., Godard, G. & Davies, R.J. (2009). Pressure-induced incipient amorphization of  $\alpha$ -quartz and transition to coesite in an eclogite from Antarctica: a first record and some consequences. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(9), 685 - 705. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00843.x>

- Palmeri, R., Ghmielowski, R., Sandroni, S., Talarico, F. & Ricci, C.A. (2009). Petrology of the eclogites from western Tasmania: insights into the Cambro-Ordovician evolution of the paleo-Pacific margin of Gondwana. *Lithos*, 109, 223-239.
- Palmeri, R., Talarico, F.M. & Ricci, C.A. (2011). Ultrahigh-pressure metamorphism at the Lanterman Range (northern Victoria Land, Antarctica). *Geological Journal*, 46(2 - 3), 126 - 136. <https://doi.org/10.1002/gj.1243>
- Paulsen, T.S., Deering, C., Sliwinski, J., Bachmann, O. and Guillong, M., 2016, Detrital zircon ages from the Ross Supergroup, north Victoria Land, Antarctica: Implications for the tectonostratigraphic evolution of the Pacific-Gondwana margin. *Gondwana Research*, 35, 79-96.
- Paulsen, T.S., Deering, C., Sliwinski, J., Valencia, V., Bachmann, O. & Guillong, M. (2017). Detrital zircon ages and trace element compositions of Permian - Triassic foreland basin strata of the Gondwanide orogen, Antarctica. *Geosphere*, 13(6), 2085 - 2093. doi: 10.1130/ges01482.1.
- Peacock, S.M. (1996). Thermal and petrologic structures of subduction zones. In J. P. Platt (Ed.), *Subduction: Top to bottom*. American Geophysical Union (AGU) Geophysical Monograph Series (vol. 96, pp. 119 - 133). Washington, DC: AGU. <https://doi.org/10.1029/gm096p0119>
- Penniston-Dorland, S.C., Kohn, M.J. & Manning, C.E. (2015). The global range of subduction zone thermal structures from exhumed blueschists and eclogites: Rocks are hotter than models. *Earth and Planetary Science Letters*, 428, 243 - 254. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.07.031>
- Peřestý, V., Lexa, O., Holder, R., Jeřábek, P., Racek, M., Štípská, P., Schulmann, K. & Hacker, B. (2017). Metamorphic inheritance of Rheic passive margin evolution and its early-Variscan overprint in the Teplá-Barrandian Unit, Bohemian Massif. *Journal of Metamorphic Geology*, 35(3), 327 - 355. DOI 10.1111/jmg.12234.
- Poli, S. (1993). The amphibolite-eclogite transformation: an experimental study on basalt. *American Journal of Science*, 293(10), 1061 - 1107. <https://doi.org/10.2475/ajs.293.10.1061>
- Preiss, W.V. (2000). The Adelaide Geosyncline of South Australia and its significance in Neoproterozoic continental reconstruction. *Precambrian*

- Research, 100(1 - 3), 21 - 63. doi: 10.1016/s0301-9268(99)00068-6.
- Ramos, V.A. & Folguera, A. (2009). Andean flat-slab subduction through time. In: Murphy, J.B., Keppie, J.D. and Hynes, A.J. (eds.), *Ancient Orogens and Modern Analogues*. Geological Society, London, Special Publications, 327, 31 - 54.
- Ravna, E.J.K. & Paquin, J. (2003). Thermobarometric methodologies applicable to eclogites and garnet ultrabasites. In D. A. Carswell, & R. Compagnoni (Eds.), *Ultrahigh pressure metamorphism*, European Mineralogical Union Notes in Mineralogy (vol. 5, pp. 229 - 259). Budapest: University Press. <https://doi.org/10.1180/emu-notes.5.8>
- Ravna, E.J.K. & Terry, M.P. (2004). Geothermobarometry of UHP and HP eclogites and schists - an evaluation of equilibria among garnet - clinopyroxene - kyanite - phengite - coesite/quartz. *Journal of Metamorphic Geology*, 22(6), 579 - 592. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2004.00534.x>
- Rebay, G., Powell, R. & Diener, J.F.A. (2010). Calculated phase equilibria for a MORB composition in a P - T range, 450 - 650 °C and 18 - 28 kbar: the stability of eclogite. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(6), 635 - 645. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00882.x>
- Ricci, C.A., Talarico, F., Palmeri, R., Di Vincenzo, G. & Pertusati, P.C. (1996). Eclogite at the Antarctic palaeo-Pacific active margin of Gondwana (Lanternman Range, northern Victoria Land, Antarctica). *Antarctic Science*, 8(3), 277 - 280. <https://doi.org/10.1017/s0954102096000399>
- Ricci, C.A. & Tessensohn, F. (2003). The Lanterman-Mariner suture: Antarctic evidence for active margin tectonics in Paleozoic Gondwana. In F. Tessensohn, & C. A. Ricci (Eds.), *Aspects of a suture zone: The Mariner Glacier area, Antarctica*, *Geologisches Jahrbuch* (vol. B85, pp. 305 - 332). Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Rocchi, S., Tonarini, S., Armienti, P., Innocenti, F. & Manetti, P. (1998). Geochemical and isotopic structure of the early Palaeozoic active margin of Gondwana in northern Victoria Land, Antarctica. *Tectonophysics*, 284, 261 - 281.
- Rocchi, S., Di Vincenzo, G. & Ghezzo, C. (2004). The Terra Nova Intrusive Complex (Victoria Land, Antarctica). *Terra Antarctica Reports*, 10, 1-49.

- Rocchi, S., Bracciali, L., Di Vincenzo, G., Gemelli, M. & Ghezzi, C. (2011). Arc accretion to the early Paleozoic Antarctic margin of Gondwana in Victoria Land. *Gondwana Research*, 19, 594 - 607.
- Rocchi, S., Di Vincenzo, G., Dini, A., Petrelli, M., & Vezzoni, S. (2015). Time - space focused intrusion of genetically unrelated arc magmas in the early Paleozoic Ross - Delamerian Orogen (Morozumi Range, Antarctica). *Lithos*, 232, 84 - 99. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.06.006>
- Roland, N.W., Läufer, A.L. & Rossetti, F. (2004). Revision of the terrane model of northern Victoria Land (Antarctica). *Terra Antarctica*, 11(1), 55 - 65.
- Root, D.B., Hacker, B.R., Mattinson, J.M. & Wooden, J.L. (2004). Zircon geochronology and ca. 400 Ma exhumation of Norwegian ultrahigh-pressure rocks: an ion microprobe and chemical abrasion study. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(3 - 4), 325 - 342. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.10.019>
- Rosenbaum, G., Lister, G.S. & Duboz, C. (2002). Relative motions of Africa, Iberia and Europe during Alpine orogeny. *Tectonophysics*, 359(1 - 2), 117 - 129. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(02\)00442-0](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(02)00442-0)
- Rossetti, F., Vignaroli, G., Di Vincenzo, G., Gerdes, A., Ghezzi, C., Theye, T. & Balsamo, F. (2011). Long lived orogenic construction along the paleo Pacific margin of Gondwana (Deep Freeze Range, North Victoria Land, Antarctica). *Tectonics*, 30, TC4008.
- Rubatto, D. (2002). Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U - Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184(1 - 2), 123 - 138. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(01\)00355-2](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(01)00355-2)
- Rubatto, D. & Hermann, J. (2003). Zircon formation during fluid circulation in eclogites (Monviso, Western Alps): implications for Zr and Hf budget in subduction zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(12), 2173 - 2187. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(02\)01321-2](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(02)01321-2)
- Rubatto, D. & Hermann, J. (2007). Experimental zircon/melt and zircon/garnet trace element partitioning and implications for the geochronology of crustal rocks. *Chemical Geology*, 241(1 - 2), 38 - 61. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.01.027>
- Rubatto, D., Gebauer, D. & Compagnoni, R. (1999). Dating of eclogite-facies zircons: the age of Alpine metamorphism in the Sesia - Lanzo Zone

- (Western Alps). *Earth and Planetary Science Letters*, 167(3 - 4), 141 - 158.  
[https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(99\)00031-x](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(99)00031-x)
- Rubatto, D., Regis, D., Hermann, J., Boston, K., Engi, M., Beltrando, M., ...  
 McAlpine, S.R.B. (2011). Yo-yo subduction recorded by accessory minerals  
 in the Italian Western Alps. *Nature Geoscience*, 4(5), 338 - 342.  
<https://doi.org/10.1038/ngeo1124>
- Rubie, D.C. (1990). Role of kinetics in the formation and preservation of  
 eclogites. In D. A. Carswell (Ed.), *Eclogite facies rocks* (pp. 111 - 140). New  
 York, NY: Chapman & Hall. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-9263-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-010-9263-0_5)
- Ruffet, G., Gruau, M., Ballèvre, M., Féraud, G., & Philippot, P. (1997). - - - -  
[https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(97\)00052-1](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(97)00052-1)
- Sawyer, E.W. (2008). Atlas of migmatites. *The Canadian Mineralogist*, Special  
 Publication (vol. 9). Ontario: NRC Research Press. 371 pp.  
<https://doi.org/10.5860/choice.46-5039>
- Scherer, E.E., Cameron, K.L. & Blichert-Toft, J. (2000). Lu - Hf garnet  
 geochronology: Closure temperature relative to the Sm - Nd system and the  
 effects of trace mineral inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,  
 64(19), 3413 - 3432. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(00\)00440-3](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(00)00440-3)
- Schmidt, M.W. & Poli, S. (1998). Experimentally based water budgets for  
 dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. *Earth and  
 Planetary Science Letters*, 163(1 - 4), 361 - 379.  
[https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(98\)00142-3](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(98)00142-3)
- Smith, D.C. (1988). Eclogites and eclogite-facies rocks, *Developments in  
 Petrology* (vol. 12). New York, NY: Elsevier. 524 pp.
- Schubert, W. (1987). Petrography of the Eastern Thompson Spur, Daniels Range,  
 North Victoria Land, Antarctica. In: Tessensohn, F. and Roland, N.W.  
 (eds.), *German Antarctic North Victoria Land Expedition 1982/83*,  
 GANOVEX III Volume 2, *Geologisches Jahrbuch B66*, p. 131 - 144.
- Schüssler, U., Henjes-Kunst, F., Talarico, F. & Flöttmann, T. (2004).  
 High-Grade Crystalline Basement of the Northwestern Wilson Terrane and  
 Oates Coast: New Petrological and Geochronological Data and Implications  
 for Its Tectonometamorphic Evolution. *Terra Antarctica*, 11(1), 15-34.
- Sircombe, K.N. (1999). Tracing provenance through the isotope ages of littoral

- and sedimentary detrital zircon, eastern Australia. *Sedimentary Geology*, 124(1 - 4), 47 - 67. doi: 10.1016/s0037-0738(98)00120-1.
- Squire, R., Campbell, I., Allen, C. & Wilson, C. (2006). Did the Transgondwanan Supermountain trigger the explosive radiation of animals on Earth?: *Earth and Planetary Science Letters*, 250(1 - 2), 116 - 133. doi: 10.1016/j.epsl.2006.07.032.
- Štípská, P. & Powell, R. (2005). Constraining the P - T path of a MORB-type eclogite using pseudosections, garnet zoning and garnet-clinopyroxene thermometry: an example from the Bohemian Massif. *Journal of Metamorphic Geology*, 23(8), 725 - 743. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2005.00607.x>
- Stöckhert, B. & Gerya, T. V. (2005). Pre-collisional high pressure metamorphism and nappe tectonics at active continental margins: A numerical simulation. *Terra Nova*, 17(2), 102 - 110. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2004.00589.x>
- St-Onge, M.R., Rayner, N., Palin, R.M., Searle, M.P. & Waters, D. J. (2013). Integrated pressure-temperature-time constraints for the Tso Moriri dome (Northwest India): implications for the burial and exhumation path of UHP units in the western Himalaya. *Journal of Metamorphic Geology*, 31(5), 469 - 504. <https://doi.org/10.1111/jmg.12030>
- Stump, E., Gehrels, G., Talarico, F., Carosi, R. (2007). Constraints from detrital zircon geochronology on the early deformation of the Ross orogen, Transantarctic Mountains, Antarctica: U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1047, 3 p.
- Talarico, F. & Castelli, D. (1995). Relict granulites in the Ross orogen of northern Victoria Land (Antarctica), I. Field occurrence, petrography and metamorphic evolution. *Precambrian Research*, 75, 141 - 156.
- Talarico, F., Ghiribelli, B., Siddoway, C. S., Palmeri, R. & Ricci, C. A. (1998). The northern Victoria Land segment of the Antarctic paleo-Pacific margin of eastern Gondwana: new constraints from the Lanterman and Mountaineer Ranges. *Terra Antarctica*, 5(2), 245 - 252.
- Talarico, F. M., Palmeri, R. & Ricci, C. A. (2004). Regional metamorphism and P-T evolution of the Ross Orogen in northern Victoria Land (Antarctica): a review. *Periodico di Mineralogia*, 73, 185 - 196.

- Tatsumi, Y. (1989). Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones. *Journal of Geophysical Research*, 94(B4), 4697 - 4707. <https://doi.org/10.1029/JB094iB04p04697>
- Tessensohn, F. & Henjes-Kunst, F. (2005). Northern Victoria Land Terranes, Antarctica: Far-travelled or local products?. In: Vaughan, A.P.M., Leat, P.T. and Pankhurst, R.J. (eds.), *Terrane Processes at the Margins of Gondwana*. Geological Society, London, Special Publications, 246, 275 - 291.
- Timmermann, H., Štědrá, V., Gerdes, A., Noble, S.R., Parrish, R.R. & Dörr, W. (2004). The problem of dating high-pressure metamorphism: a U - Pb isotope and geochemical study on eclogites and related rocks of the Mariánské Lázně Complex, Czech Republic. *Journal of Petrology*, 45(7), 1311 - 1338. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh020>
- Tomaschek, F., Kennedy, A.K., Villa, I.M., Lagos, M. & Ballhaus, C. (2003). Zircons from Syros, Cyclades, Greece—recrystallization and mobilization of zircon during high-pressure metamorphism. *Journal of Petrology*, 44(11), 1977 - 2002. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg067>
- Tomkins, H.S., Powell, R. & Ellis, D.J. (2007). The pressure dependence of the zirconium-in-rutile thermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(6), 703 - 713. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00724.x>
- Tonarini, S. & Rocchi, S. (1994) Geochronology of Cambro-Ordovician intrusives in northern Victoria Land: a review. *Terra Antarctica*, 1, 46-50.
- Tsujimori, T., Sisson, V.B., Liou, J.G., Harlow, G.E. & Sorensen, S.S. (2006). Petrologic characterization of Guatemalan lawsonite eclogite: Eclogitization of subducted oceanic crust in a cold subduction zone. In B.R. Hacker, W.C. McClelland, & J.G. Liou (Eds.), *Ultrahigh-pressure metamorphism: Deep continental subduction*, Geological Society of America Special Paper (vol. 403, pp. 147 - 168). Boulder, CO.: The Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2006.2403\(09\)](https://doi.org/10.1130/2006.2403(09))
- Ulitzka, S. (1987). Petrology and geochemistry of the migmatites from Thompson Spur, Daniels Range, North Victoria Land, Antarctica. In: Tessensohn, F. and Roland, N.W. (eds.), *German Antarctic North Victoria Land Expedition 1982/83, GANOVEX III Volume 2, Geologisches Jahrbuch B66*, p. 81 - 130.
- Veevers, J.J., Belousova, E. A., Saeed, A., Sircombe, K., Cooper, A.F. & Read,

- S.E. (2006). Pan-Gondwanaland detrital zircons from Australia analysed for Hf-isotopes and trace elements reflect an ice-covered Antarctic provenance of 700 - 500 Ma age,  $T_{DM}$  of 2.0 - 1.0 Ga, and alkaline affinity. *Earth-Science Reviews*, 76(3 - 4), 135 - 174. doi: 10.1016/j.earscirev.2005.11.001.
- Veevers, J.J. & Saeed, A. (2008). Gamburtsev Subglacial Mountains provenance of Permian - Triassic sandstones in the Prince Charles Mountains and offshore Prydz Bay: Integrated U - Pb and  $T_{DM}$  ages and host-rock affinity from detrital zircons. *Gondwana Research*, 14(3), 316 - 342. doi: 10.1016/j.gr.2007.12.007.
- Vetter, U. & Tessensohn, F. (1987). S- and I-type granitoids of North Victoria Land, Antarctica, and their inferred geotectonic setting. *Geologische Rundschau*, 76, 233-243.
- Wan, Y., Li, R., Wilde, S.A., Liu, D., Chen, Z., Yan, L., ... Yin, X. (2005). UHP metamorphism and exhumation of the Dabie Orogen, China: Evidence from SHRIMP dating of zircon and monazite from a UHP granitic gneiss cobble from the Hefei Basin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(17), 4333 - 4348. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.03.055>
- Wang, X., Liou, J.G. & Maruyama, S. (1992). Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains, central China: Petrogenesis, P-T Paths, and implications for regional tectonics. *Journal of Geology*, 100(2), 231 - 250. <https://doi.org/10.1086/629585>
- Weaver, S.D., Bradshaw, J.D. & Laird, M.G. (1984). Geochemistry of Cambrian volcanics of the Bowers Supergroup and implications for the early Paleozoic tectonic evolution of northern Victoria Land, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 68, 128 - 140.
- Wei, C.J. & Clark, G.L. (2011). Calculated phase equilibria for MORB compositions: a reappraisal of the metamorphic evolution of lawsonite eclogite. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(9), 939 - 952. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2011.00948.x>
- Weller, O.M., St-Onge, M.R., Rayner, N., Waters, D.J., Searle, M.P. & Palin, R.M. (2016). U - Pb zircon geochronology and phase equilibria modelling of a mafic eclogite from the Sumdo complex of south-east Tibet: Insights into

- prograde zircon growth and the assembly of the Tibetan plateau. *Lithos*, 262, 729 - 741. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.06.005>
- White, R.W., Powell, R. & Holland, T.J.B. (2007). Progress relating to calculation of partial melting equilibria for metapelites. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(5), 511 - 527. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00711.x>
- White, R.W., Powell, R., Holland, T.J.B. & Worley, B.A. (2000). The effect of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  on metapelitic assemblages at greenschist and amphibolite facies conditions: mineral equilibria calculations in the system  $\text{K}_2\text{O} - \text{FeO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{TiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ . *Journal of Metamorphic Geology*, 18(5), 497 - 511. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2000.00269.x>
- Whitney, D.L. & Evans, B.W. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1), 185 - 187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Williams, I.S. (1998). U - Th - Pb geochronology by ion microprobe. In: Mickibben, M.A., Shanks III, W.C., Ridley, W.I. (eds.), *Applications of Micro Analytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. *Reviews of Economic Geology* 7, 1 - 35.
- Williams, I.S. (2001). Response of detrital zircon and monazite, and their U - Pb isotopic systems, to regional metamorphism and host-rock partial melting, Cooma Complex, southeastern Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48, 557-580.
- Wingate, M.T.D., Campbell, I.H., Compston, W. & Gibson, G.M. (1998). Ion microprobe U - Pb ages for Neoproterozoic basaltic magmatism in south-central Australia and implications for the breakup of Rodinia. *Precambrian Research*, 87(3 - 4), 135 - 159. doi: 10.1016/s0301-9268(97)00072-7.
- Xia, L.Q. (2014). The geochemical criteria to distinguish continental basalts from arc related ones. *Earth-Science Reviews*, 139, 195 - 212. doi: 10.1016/j.earscirev.2014.09.006.
- Zack, T., Kronz, A., Foley, S. F. & Rivers, T. (2002). Trace element abundances in rutiles from eclogites and associated garnet mica schists. *Chemical Geology*, 184(1 - 2), 97 - 122. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(01\)00357-6](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(01)00357-6)
- Zack, T., Moraes, R. & Kronz, A. (2004). Temperature dependence of Zr in

- rutile: empirical calibration of a rutile thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(4), 471 - 488. <https://doi.org/10.1007/s00410-004-0617-8>
- Zhang, J.X., Mattinson, C.G., Yu, S.Y., Li, J.P. & Meng, F.C. (2010). U - Pb zircon geochronology of coesite-bearing eclogites from the southern Dulan area of the North Qaidam UHP terrane, northwestern China: spatially and temporally extensive UHP metamorphism during continental subduction. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(9), 955 - 978. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00901.x>
- Zhang, R.Y., Iizuka, Y., Ernst, W.G., Liou, J.G., Xu, Z.Q., Tsujimori, T., ... Jahn, B.M. (2009). Metamorphic P - T conditions and thermal structure of Chinese Continental Scientific Drilling main hole eclogites: Fe - Mg partitioning thermometer vs. Zr-in-rutile thermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(9), 757 - 772. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00831.x>
- Zhang, Z., Xiao, Y., Liu, F., Liou, J. G. & Hoefs, J. (2005). Petrogenesis of UHP metamorphic rocks from Qinglongshan, southern Sulu, east-central China. *Lithos*, 81(14), 189 - 207. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.10.002>
- Zheng, Y.F. (2012). Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. *Chemical Geology*, 328, 5 - 48. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.02.005>

## 주 의

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.