

**남극 빅토리아랜드 결정질 암석의 연령  
측정: 쇄설성 저어콘 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” 과제의 최종보고서(보고서 제목: “쇄설성 저어콘 연령 측정”)로 제출합니다.

2015. 7. 31

총괄연구책임자 : 이 중 익

위탁연구기관명 : 충북대학교

위탁연구책임자 : 김 윤 섭

위탁참여연구원 : 박 지 영

위탁참여연구원 : 부이 빈 하우

# 요 약 문

## I. 제 목

남극 빅토리아랜드 결정질 암석의 연령 측정: 쇠설성 저어콘 연령

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

장보고기지 인근 월슨테레인에서 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

본 위탁개발과제는 남극대륙의 암석을 대상으로 지질탐사와 시료회수를 첫 번째 목표로 삼으며, 대상 지역은 남극대륙을 가로지르는 남극종단산맥의 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. 1차년도에는 빅토리아랜드 월슨테레인의 쇠설성 저어콘 연령분석을 통한 기원물질 경로 및 퇴적연령 추정에 집중함.

## IV. 연구개발 결과 및 활용 계획

- 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

The Wilson terrane, together with the Bowers and Robertson Bay terranes to the northeast, is located at the Pacific end of the Transantarctic Mountains, Antarctica. This terrane is primarily composed of Precambrian - Early Paleozoic medium- to high-grade NW-striking quartzo-feldspathic schists, gneisses, and migmatites as well as Cambro-Ordovician intrusive rocks. The U - Pb isotopic compositions of zircon from four metasedimentary rocks along a NE-to-SW traverse from Mt. Murchison to the O'Kane Glacier in the Wilson terrane were measured using a SHRIMP-II ion microprobe as a preliminary constraint on their provenance. Banded-gneiss samples WT001A and WT008 consisting of biotite, K-feldspar, plagioclase and quartz with or without pyroxene were collected from Mt. Murchison at the northeastern margin of traverse and near the Capsize Glacier in the Deep Freeze Range, respectively. Sample WT009 was collected from quartzite layers alternating with biotite schists near Mt. Levick in the Deep Freeze Range. Another banded-gneiss sample WT011 cropped out near Nash Ridge to the southwestern end of traverse. All the four samples similarly yielded 50 - 200  $\mu\text{m}$  long subhedral-to-anhedral zircon crystals showing variable internal zonation. In spite of small number of analyses, a significant contrast in the U - Pb age distribution patterns of detrital zircon has been observed.

Eighty-five spots were analyzed from eighty-one detrital zircon crystals of sample WT009, and their U - Pb age distribution is characterized by major populations at ca. 600 Ma, 1.1 Ga, and 2.2 - 2.5 Ga with a prominent absence of middle Neoproterozoic (700 - 900 Ma) and middle-to-late Mesoproterozoic (1.2 - 1.7 Ga) zircon. The median age of youngest group is 587 Ma, probably representing the maximum depositional age of the quartzite layers. The U - Pb age distribution pattern of zircon is similar to that of banded-gneiss samples WT001A and WT008 except for conspicuous early Cambrian populations in the former gneiss. The weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age of the early Cambrian fraction of zircon is  $534 \pm 11$  Ma (*t<sub>0</sub>*). This can be interpreted either as the timing of metamorphism in the banded gneiss or as an input of young syn-orogenic sediments progressively towards the northeastern margin of Wilson terrane. On the other hand, twenty-six

spots were analyzed from sixteen zircon crystals of WT011, and their U - Pb age distribution is characterized by strong major populations at ca. 1.2 Ga, and minor populations at 1.5 - 1.7 Ga, except for one population at ca. 2.5 Ga.

The U - Pb compositions of zircon from a granitic dyke (sample WT001B) intruding the banded gneiss, sample WT001A of this study, and a boudinized granite (Sample WT013B) in schists near the O'Kane Glacier were also measured as a constraint on the minimum depositional ages of host-metasedimentary rocks. Zircon crystals in the former sample are euhedral and up to 400  $\mu\text{m}$  in length, mostly with concentric zonation and apparently inherited cores. The weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age of outer rims is  $483\pm 5$  Ma( $t\sigma$ ), probably representing the timing of late- to post-orogenic magmatism. In contrast, zircon crystals in the latter sample are mostly subhedral and less than 100  $\mu\text{m}$  in length, with heterogeneous zonation. Their U - Pb ages are mostly discordant, owing to their high U and common Pb concentrations, and eleven best-concordant ages are older than 800 Ma. The weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age of coexisting monazite in sample WT013 is  $502\pm 23$  Ma ( $t\sigma$ ), probably representing the timing of peak metamorphism.

In summary, all the above preliminary geochronological data may reflect: (1) presence of heterogeneous stratigraphic units juxtaposed during the Ross orogeny; (2) a series of geological processes involving the late Neoproterozoic sedimentation, late Cambrian metamorphism, and late- to post-orogenic magmatism in the Wilson terrane; and (3) stratigraphic successions younging towards the northeast, metamorphosed possibly between 534 Ma and 483 Ma.

# C O N T E N T S

Chapter 1	Introduction .....	1
Chapter 2	Recent technological development.....	7
Chapter 3	Analytical results.....	9
Section 1	Sample descriptions.....	9
Section 2	Cathodoluminescence images of zircon .....	13
Section 3	Isotopic compositions of zircon .....	26
Section 4	Age interpretation .....	39
Chapter 4	The evaluation and potential contribution of the research .....	51
Chapter 5	Future application of the research .....	52
Chapter 6	References.....	53



# 목 차

제 1 장 서 론.....	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황.....	4
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과.....	8
제 1 절 시료 정보.....	9
제 2 절 음극선 발광 영상 분석.....	20
제 3 절 동위원소 성분 분석.....	26
제 4 절 연령 해석.....	39
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도.....	51
제 5 장 연구개발결과의 활용계획.....	52
제 6 장 참고문헌.....	53

# 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(Fig. 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.

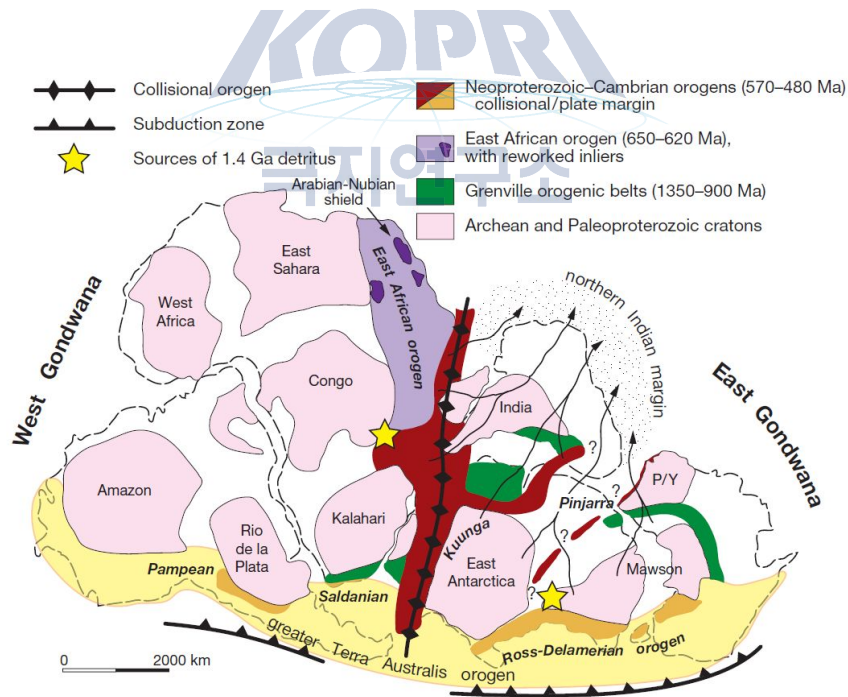


Fig. 1. 약 5 억 년 전의 곤드와나 초대륙의 재구성. 대륙 내부와 주변부에 발달한 지체구조들이 나타나있다. 초대륙을 이루고 있던 현재 대륙들의 모습은 점선으로 표시되어있다 (Myrow *et al.*, 2010)



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 과제 1차년도에는 윌슨테레인의 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 (Fig. 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.



Fig. 2. 남극과 주변대륙의 자원분포도



## 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 부가되며 일어났다(Goodge et al., 2007). 장보고 기지 인근의 변성암 지대인 윌슨테레인은 저압-고온의 변성작용을 경험하였으며, 녹색편암상에서 혼성암에 이르는 다양한 형태의 변성도를 나타냄(Grew and Sandiford, 1984; Palmeri, 1997). 저압-고온 변성암지대인 윌슨테레인과 해양성 부가대인 바우어스테레인 사이에는 섭입한 해양지각의 일부가 존재하며, 고압-초고압의 에크로자이트와 초고철질 암석이 산출한다(Fig. 3; Di Vincenzo et al., 1997; Palmeri et al., 2007; Godard and Palmeri, 2013).

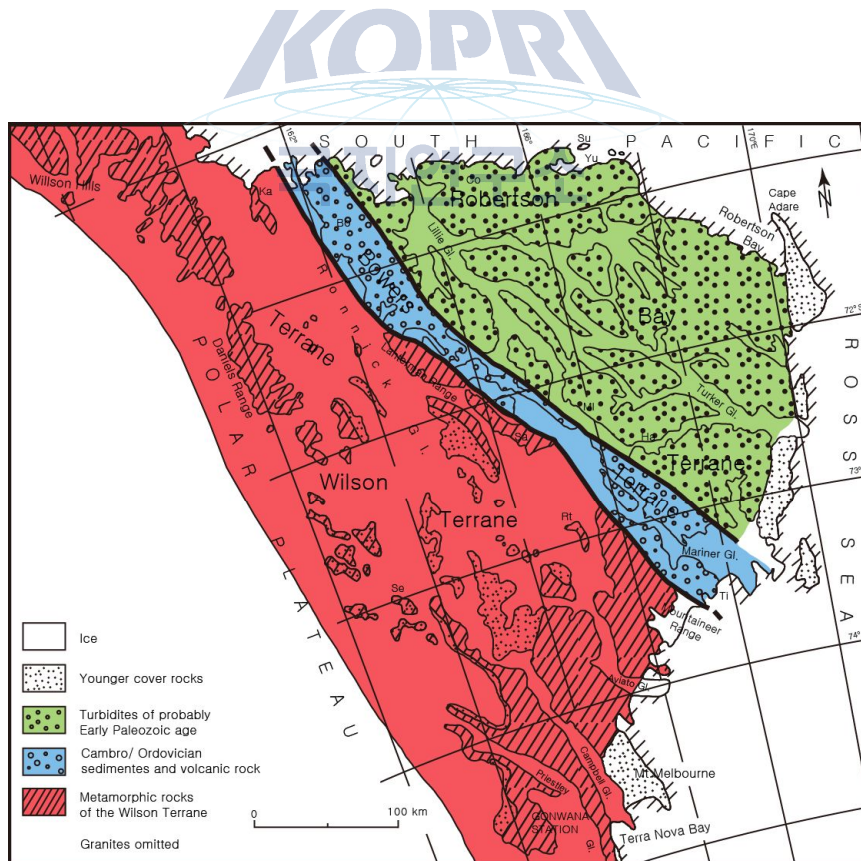


Fig. 3. 북빅토리아랜드를 구성하는 세 부가체.

쇄설성 저어콘을 이용한 윌슨테라인 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(Fig. 4).

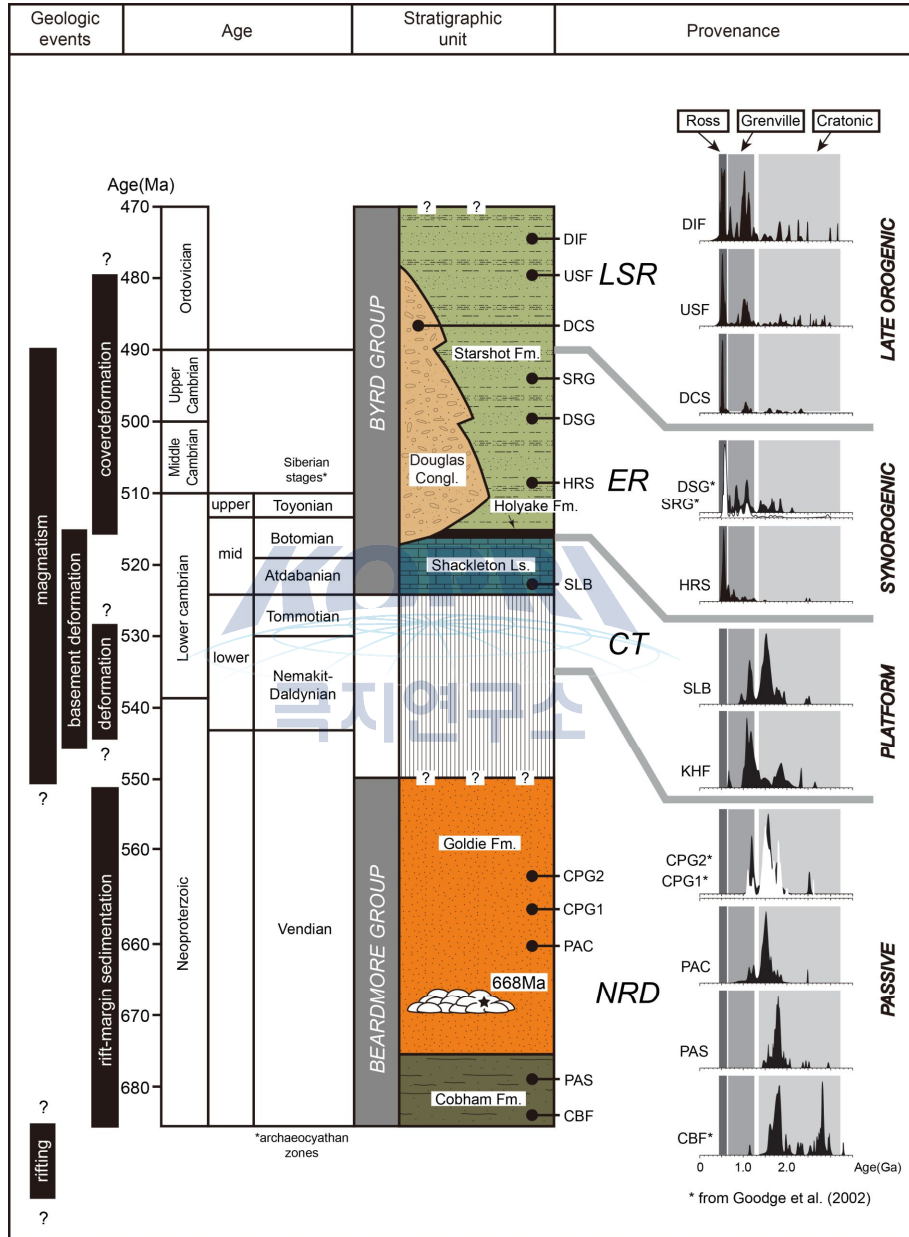


Fig. 4. 남극종단산맥 퇴적암의 쇄설성 저어콘 연령 분포 (after Goodge et al., 2004)

남극 종단산맥에서 구해진 쇄설성 저어콘의 연령분포는 로스 조산운동기(500-600 Ma), 그린빌 조산운동기(0.9-1.2 Ga), 육괴기원(>1.4 Ga)로 구분할 수 있다(Fig. 4). 그린빌 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(Fig. 4; Fitzsimons, 2000a & b, 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.

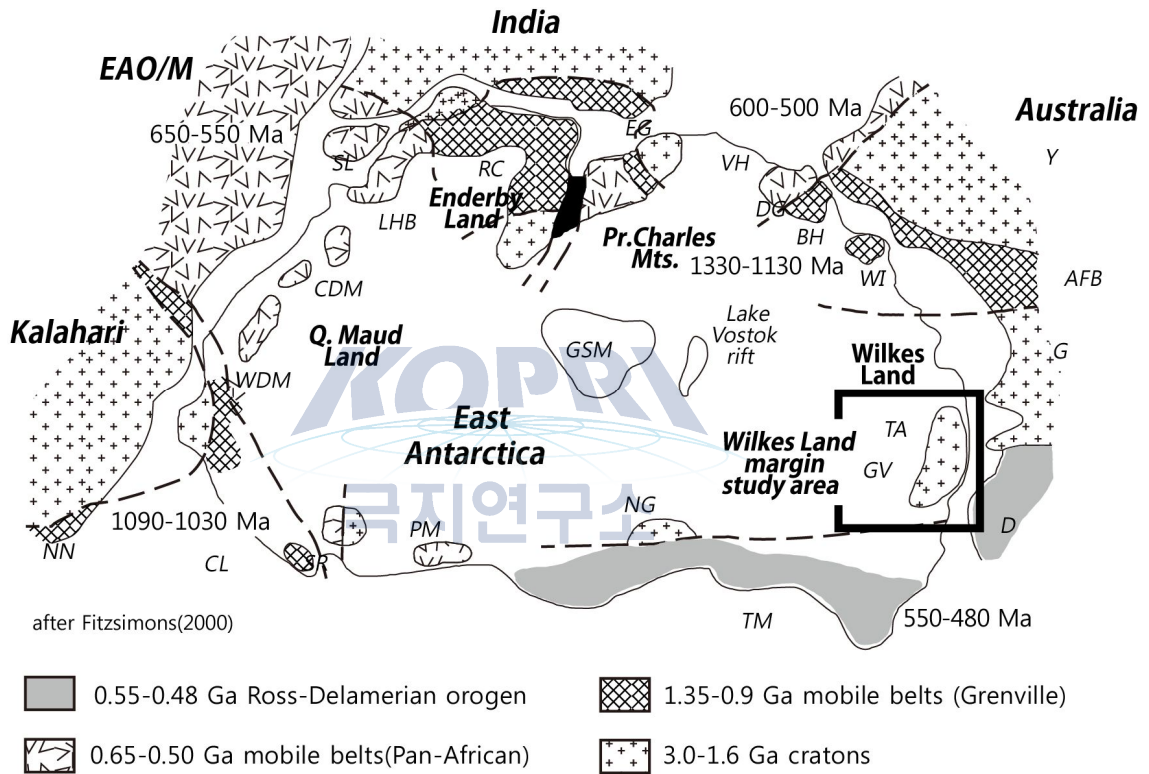


Fig. 5. 5억년 전 곤드와나 초대륙 동쪽의 주요 지구구조체의 분포 (after Fitzsimons, 2000)

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 (Fig. 6). Primary column에서는 분석에 필요한 일차이온빔을 생성한다. 우라늄-토륨-납 동위원소 분석시에는 Duoplasmatron에서 생성된 산소 이온들을 사용하는데, 산소이온들은  $O^+$ ,  $O_2^+$ ,  $OH^+$ 의

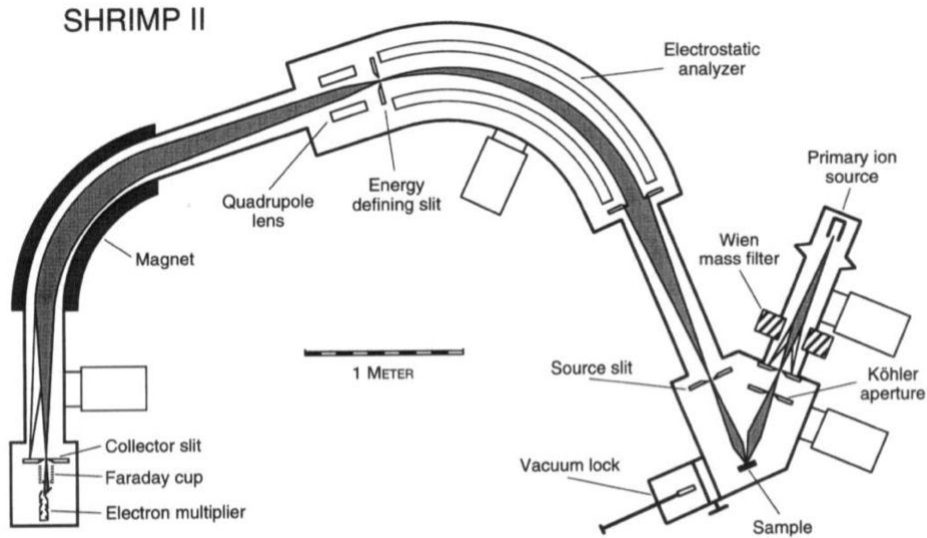


Fig. 6. 고분해능 이차이온질량분석기의 주요 구성 요소

형태로 존재한다. 이들 중 Wien mass 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 Fig. 7과 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
●	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

Fig. 7. 고분해능 이차이온질량분석기 우라늄-납 연령측정에 사용되는 동위원소

### 제 3 장 위탁연구사업의 내용 및 결과

이번 1차년도 위탁 연구를 위해서 북빅토리아랜드 결정질 암석의 변성작용 메카니즘 및 변성시기 규명을 위해 장보고기지 반경 200 km 지역에 위치한 10개의 장소에서 준편마암, 사질/이질편암, 화성암 시료 30여종을 채취하였다. 이들 시료 중 우선적으로 변성퇴적암의 퇴적시기를 규명하기 위해 사질 편마암/편암 및 이들 암체를 관입하고 있는 화강암에서 저어콘 결정을 분리하였다. 이 저어콘들에 대한 우라늄-납 동위원소비 측정 결과로부터 윌슨터레인을 구성하는 변성퇴적암의 퇴적물 기원지와 변성시기를 개략적으로 제한할 수 있었다. 현장 조사는 2014. 11. 21~2014. 12. 18 사이에 이루어 졌으며, 조사지역은 북빅토리아랜드의 Mt. Murchison, Oakley Glacier, Shoemaker Glacier, Burns Glacier, Bosum Field, Tourmaline Plateau, Mt. Borgstrom, O’Kane Glacier, Inexpressible, Island, Cape Sastrugi 인근 지역들이다(Fig. 8).

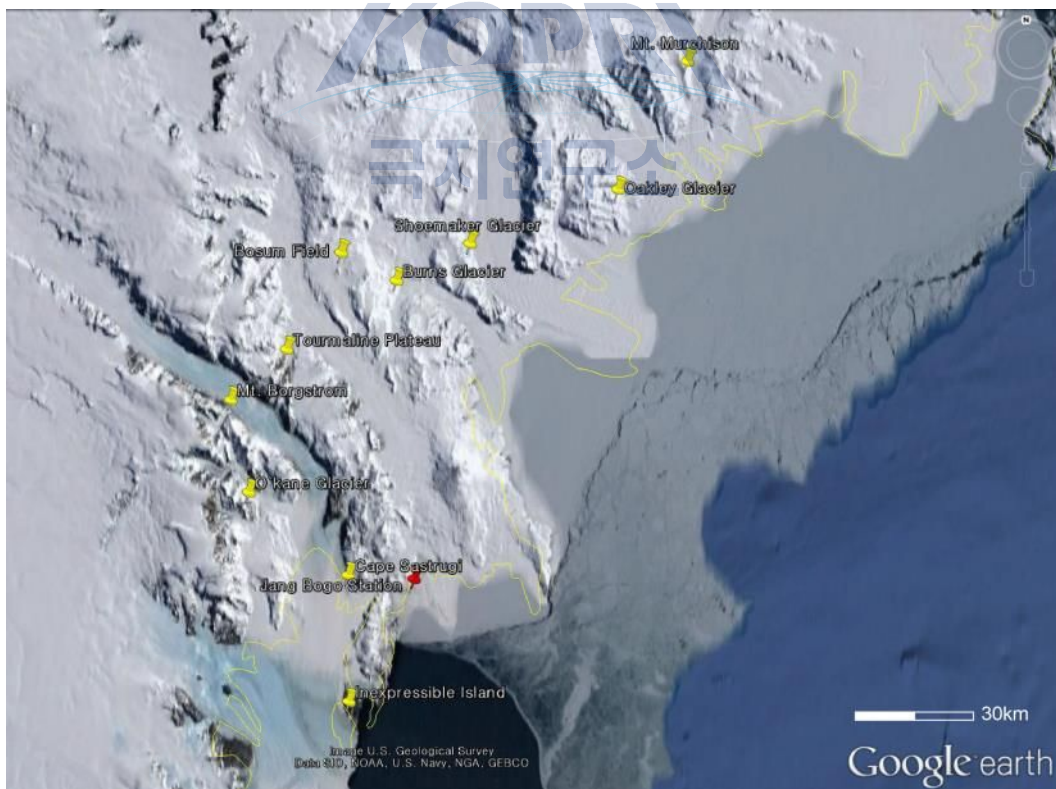


Fig. 8. 2014/15 남극 북빅토리아랜드 윌슨터레인 결정질 암석 기초조사 지역들

## 제 1 절 시료 정보

북빅토리아랜드 윌슨테레인에서는 다양한 결정질 암석이 산출하며, 이번 조사를 통해 수집한 암석들의 위치는 Table 1에 정리하였다. 변성퇴적암은 저변성 편암에서부터 고변성 편마암과 혼성암까지 다양한 변성도를 가지며, 변성퇴적암의 성분은 사질성분이 우세하고 이질 성분의 편암과 편마암에서는 석류석 반상변정이 흔히 산출한다. 석회질 규산염암석과 함께 각섬암의 산출도 관찰된다. 화성암의 경우 큰 규모로 관찰되는 노두에서는 광물의 산출양상과 조직이 다양하다. 변성퇴적암을 관입하고 있는 화성암은 흑운모 화강암, 페그마타이트, 우백질 화강암 등 그 종류가 다양하며, 고철질 암맥도 일부 산출한다.

Table 1. sample locations and major lithologies.

Sample Site No.	Location	Coordination		Lithology	Distance (from JBG)
		DMS	DM		
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		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	Tourmaline Plateau	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



1. sample site# WT001 : 이 시료는 윌슨테레인의 최북단에 위치한 머치슨산에서 채집하였다. 기존의 연구에서 이 지역을 구성하는 암상들을 머치슨층으로 명명하였으며, 주로 혼성암질 흑운모 편암과 편마암이 산출하는 것으로 보고된 바 있다(Kleinchmidt et al., 1987). 광역적으로는 윌슨테레인 내부의 마운트니어 변성암 복합체(Mountaineer metamorphic complex)의 일부로 흑운모 편암과 편마암으로 주로 구성되어 있으며, 편마암에서는 석류석과 단사휘석의 잔존물의 형태로 산출하는 것으로 보고되어 있다.

분석을 위한 시료는 머치슨산 중턱과 정상 인근에서 채취하였다. 주요 구성암석은 호상편마암(WT001A)으로 우흑질과 우백질의 구분이 뚜렷하며(Fig. 9a, b), 변형된 석영맥과 페그마타이트가 함께 산출한다(Fig. 9b). 호상편마암의 엽리를 자르며 관입해 있는 화강암(WT001B)과 이를 다시 자르며 관입해 있는 염기성 암맥(WT001C)도 관찰할 수 있다(Fig. 9a). 호상편마암 내부에서는 습곡을 이루고 있는 화강암맥이 관찰되는데 이는 호상편마암의 엽리를 자르고 있는 화강암에 비해 보다 이른 시기에 관입한 것으로 해석된다.

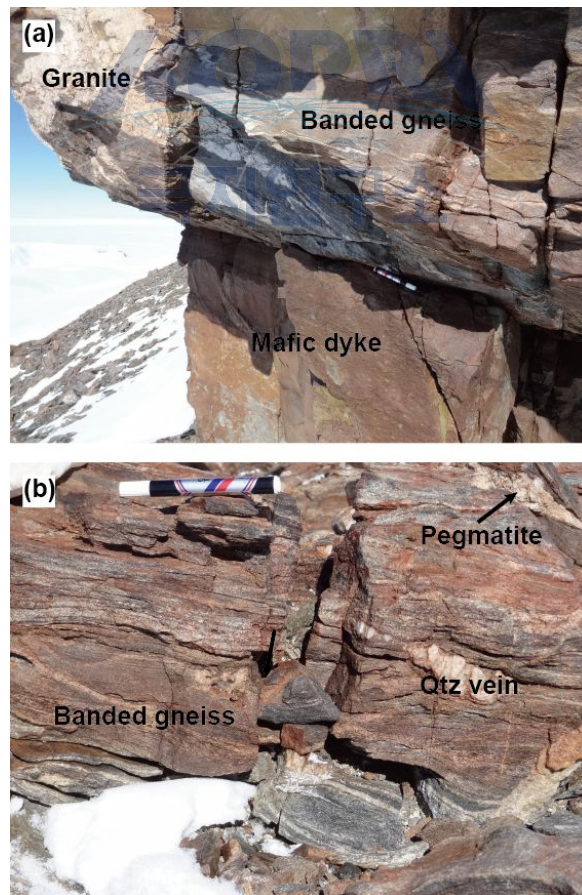


Fig. 9. 머치슨산에서 산출하는 호상편마암과 이를 관입하고 있는 화강암 및 염기성 암맥

2. sample site# WT002 : 이 시료는 오클리 빙하(Oakley glacier)의 남쪽 사면에서 채집하였다. 대부분의 노출된 암석은 화강암으로 구성되어 있으며, 일부 편마암들이 산출한다. 전반적으로 암석들이 기계적 풍화에 의해 조각나 있고, 눈과 빙하에 의해 편마암들의 연속성을 관찰할 수 없다. 따라서, 편마암 시료들은 전석인지 노두인지가 불명확하다.

3. sample site# WT003 : 이 시료는 슈마커 빙하(Shoemaker glacier) 남단 사면에서 채집하였다. 산출 암석은 편암-편마암으로 심하게 습곡을 받고 있으며, 부딘화된 석영맥을 쉽게 관찰할 수 있다(Fig. 10a). 우백질 화강암이 변성퇴적암의 엽리를 자르며 관입하고 있다(Fig. 10b).

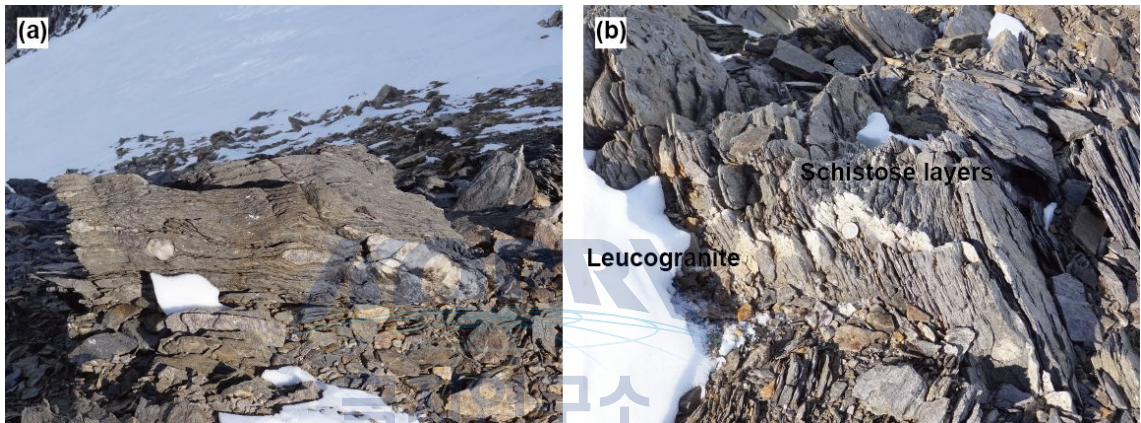


Fig. 10. 슈마커 빙하 남단 사면에서 산출하는 편암-편마암과 이를 관입하고 있는 우백질 화강암

4. sample site# WT004 : 이 시료는 번스 빙하(Burns glacier) 북서쪽에서 채집하였다. 산출 암석은 흑운모 편암으로 압쇄화된 형태를 나타낸다. 일부 시료에서는 각섬석을 다량 함유한 녹색 층과 교호하는 형태를 나타낸다. 편암을 관입하고 있는 우백질 화강암은 습곡되어 있어 관입 후 변형작용을 경험했음을 알 수 있다.

5. sample site# WT005 : 이 시료는 보섬 필드(Bosum field) 가장 자리에 노출되어 있는 노두에서 채집하였다. 이 지역에는 안구상 편마암, 사질 편마암과 사질 편암이 주요 암상으로 산출하며, 이 변성퇴적암을 관입하고 있는 화강암을 관찰 할 수 있다(Fig. 11a). 편마암의 산출양상은 호상편마암이 우세하며(Fig. 11b). 일부에서 안구상 및 사질 편마암의 형태를 나타낸다. 편마암과 함께 편암도 산출하며, 노두상에서도 쉽게 경계를 관찰할 수 있다(Fig. 11c).



Fig. 11. 보섬 필드에서 산출하는 편마암, 편암, 화강암. (a) 화강암과 편마암의 접촉 경계. (b) 대표 암석인 호상편마암. (c) 편마암과 편암의 경계. (d) 편암의 암상.

6. sample site# WT006 : 이 시료는 보섬 필드(Bosum field) 북쪽 가장자리에서 채집하였다. 산출하는 암상은 WT005 편암시료와 유사하다(Fig. 11d).

7. sample site# WT007 : 이 시료는 터멀린 평원(Tourmaline plateau) 북쪽에서 채집되었다. 이 지역은 혼성암과 이를 둘러싸고 있는 화강암체로 구성되어 있다(Fig. 12). 혼성암체 내에서도 다양한 암상이 산출한다. 혼성암에서 산출하는 주요 암상은 호상편마암이다(Fig. 13a). 호상편마암은 페그마타이트와 함께 산출하며(Fig. 13b), 우백질(leucosome)과 우흑질(melanosome)로도 구분 할 수 있다(Fig. 13c). 우백질은 화강암 성분에 해당하며(Fig. 13d), 부분적으로 소규모 전단대가 발달한 곳은 빈 공간을 채우고 있는 석영맥이 함께 변형받은 구조를 관찰할 수 있다(Fig. 13e). 혼성암과 페그마타이트를 관입하고 있는 고철질 암맥도 관찰할 수 있으며, 이 암맥이 시기적으로 가장 최후에 관입한 암상에 해당한다(Fig. 13f).



Fig. 12. 터멀린 평원 북쪽에 산출하는 혼성암과 화강암체

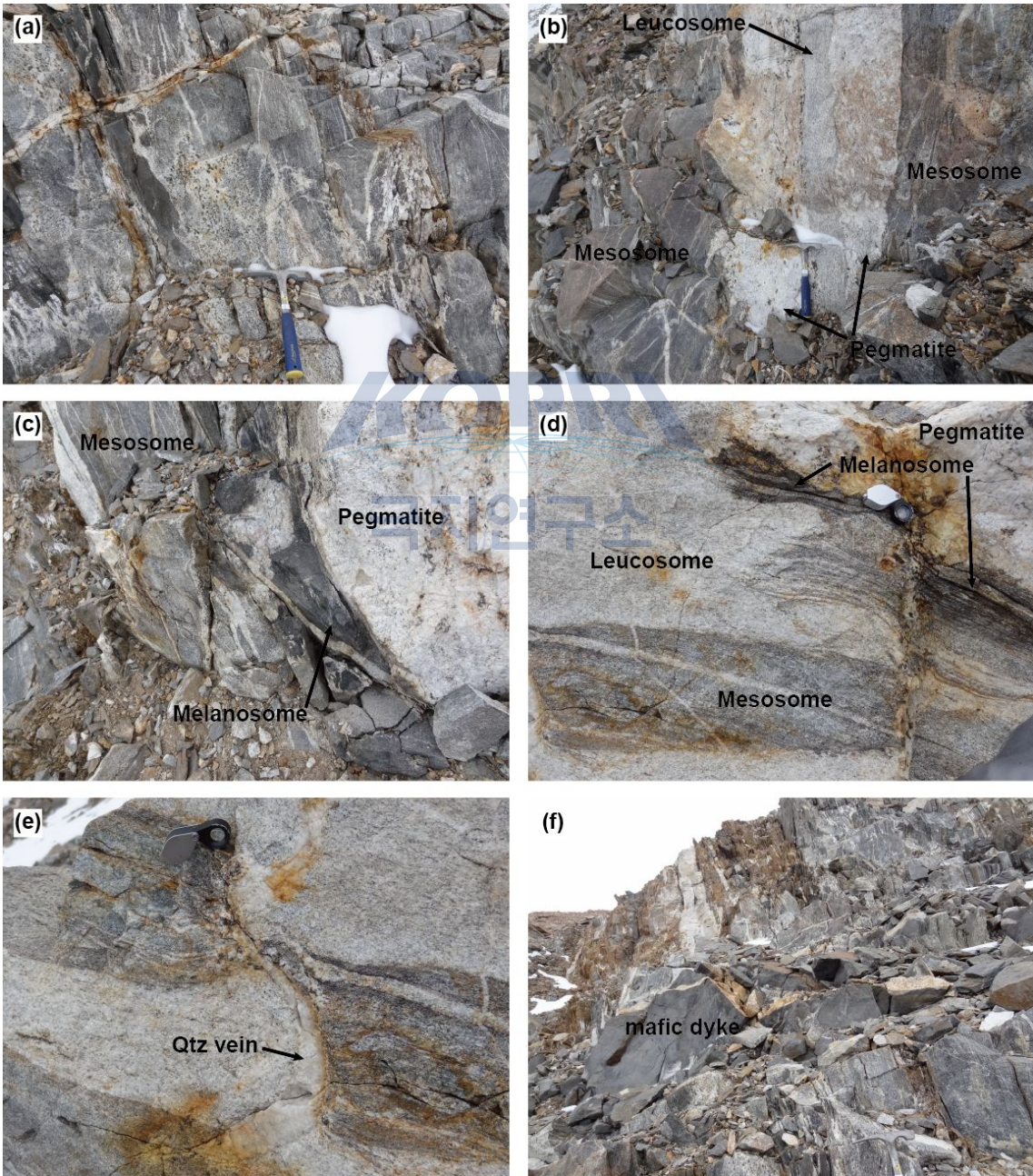


Fig. 13. 터멀린 평원 북쪽에 산출하는 혼성암의 산출 양상

8. sample site# WT008 : 이 시료는 터멀린 평원(Tourmaline plateau)과 캡사이즈 빙하(Capsize glacier) 사이에서 채집되었다. 주요산출암상은 호상편마암, 석류석 편마암, 혼성암과 이들 편마암을 관입하고 있는 우백질 화강암으로 구성되어 있다(Fig. 14).



Fig. 14. WT008 지역에서 산출하는 암상. (a) 호상편마암. (b) 편마암을 관입하고 있는 우백질 화강암. (c) 함석류석 편마암. (d) 혼성암.

9. sample site# WT009 : 이 시료는 터멀린 평원(Tourmalne plateau)의 서쪽으로 프리슬리 빙하(Priestley glacier)와 인접해 있는 지역에서 채집되었다. 레빅산(Mt Levick) 자락에 작은 노두가 산출해 있으며(Fig. 15a), 층과 층사이에 엽리를 잘 정의하고 있다(Fig. 15b). 주요 산출 암상은 변성사암과 변성이질암의 호층으로 변성이질암은 특징적으로 흑운모 반상변정을 함유하고 있다(Fig. 15c). 이 노두 이외의 인근지역에서도 변성퇴적암의 호층구조가 잘 발달한다(Fig. 15d).

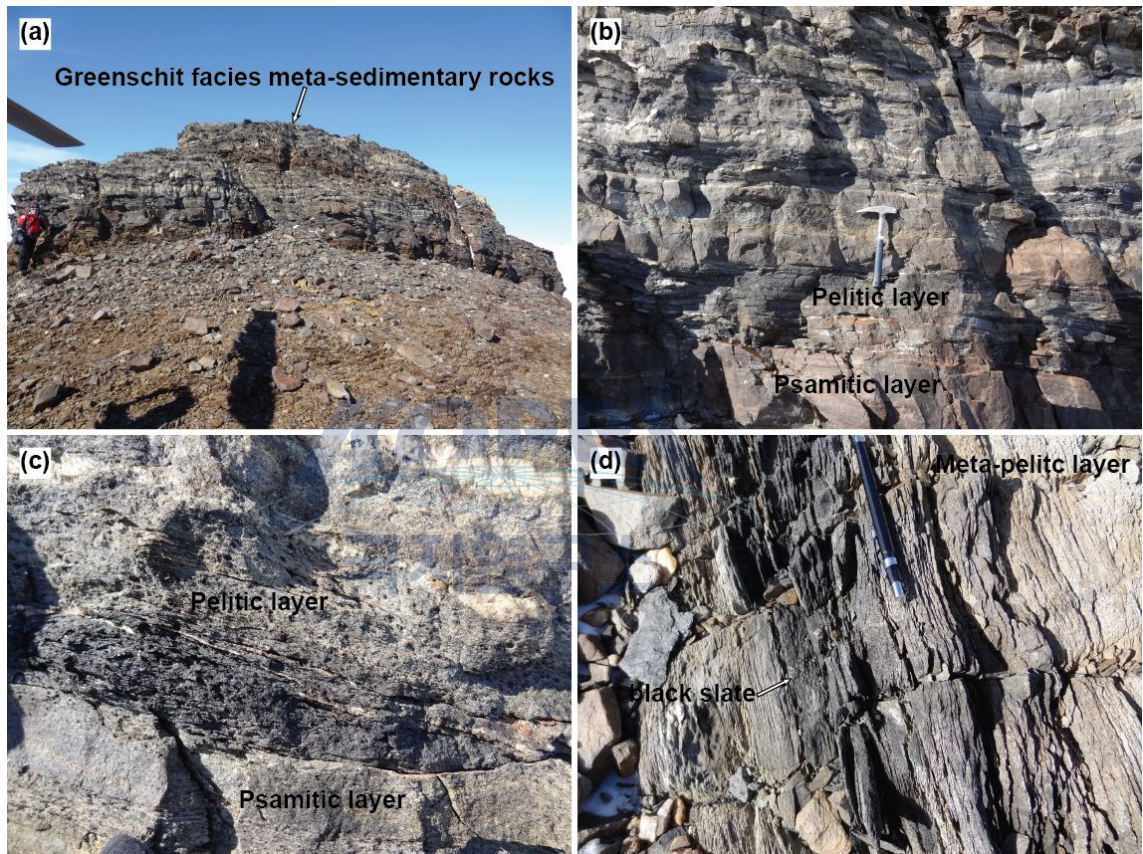
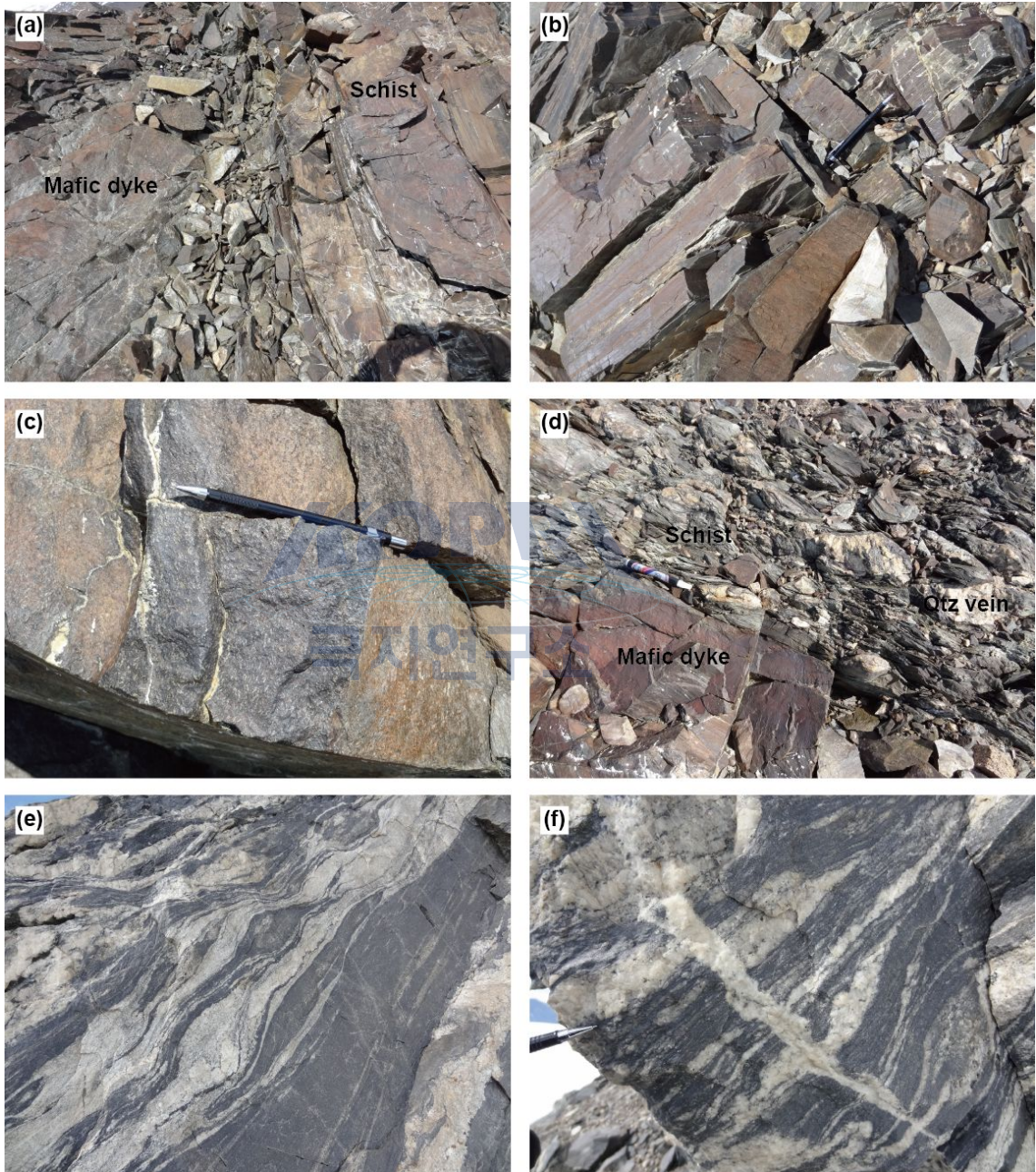


Fig. 15. WT009 지역에서 산출하는 암상. (a) 변성퇴적암 노두 산출양상. (b) 편암-규암 호층 구조. (c) 흑운모 이질암과 규암. (d) 편암의 성분 변화.

10. sample site# WT010 : 이 시료는 보르그스트롬산(Mt Borgstrom) 북쪽으로 프리슬리 빙하(Priestley glacier)와 접해 있는 지역에서 채집하였다. 주요 산출 암상은 편암과 염기성 암맥이다(Fig. 16a-d).

11. sample site# WT011 : 이 시료는 보르그스트롬산(Mt Borgstrom) 북동쪽으로 프리슬리 빙하(Priestley glacier)와 접해 있는 지역에서 채집하였다. 이 지역에서 산출하는 암상은 호상편마암으로 인근지역인 WT010과는 매우 다른

양상을 나타낸다(Fig. 16e). 이 편마암을 자세히 관찰하면 정장석 반정(porphyroclast)를 관찰할 수 있다. 이 반정들은 다시 화강암맥에 의해 절단되어 있는데, 이 화강암맥도 외부와는 단절된 구조를 나타낸다(Fig. 16f).



**Fig. 16.** 모르그스토롬산 인근에서 산출하는 암상. (a) 편암을 관입하고 있는 염기성 암맥(WT010). (b) 편암. (c) 염기성 암맥. (d) 편암과 염기성 암맥의 경계. (e, f) 호상편마암(WT011)

12. sample site# WT012 : 이 시료는 오케인 빙하(O'Kane glacier) 남쪽 사면에서 채집되었다. 산출하는 주요 암상은 변성퇴적암으로 엽리의 연장성이 매우 잘 발달하고 있다. 변성퇴적암을 실(sill)의 형태로 관입하고 있는 형태의 화강암이 흔히 관찰된다(Fig. 17a). 이들 화강암의 일부는 부딘화되어 있다(Fig. 17a, b). 하지만 이 화강암을 자세히 관찰하면 변성퇴적암의 엽리를 자르고 있는 모습을 보여주고 있으므로(Fig. 17b), 이들 화강암은 운동 후(post-kinematic) 화강암으로 해석할 수 있다.

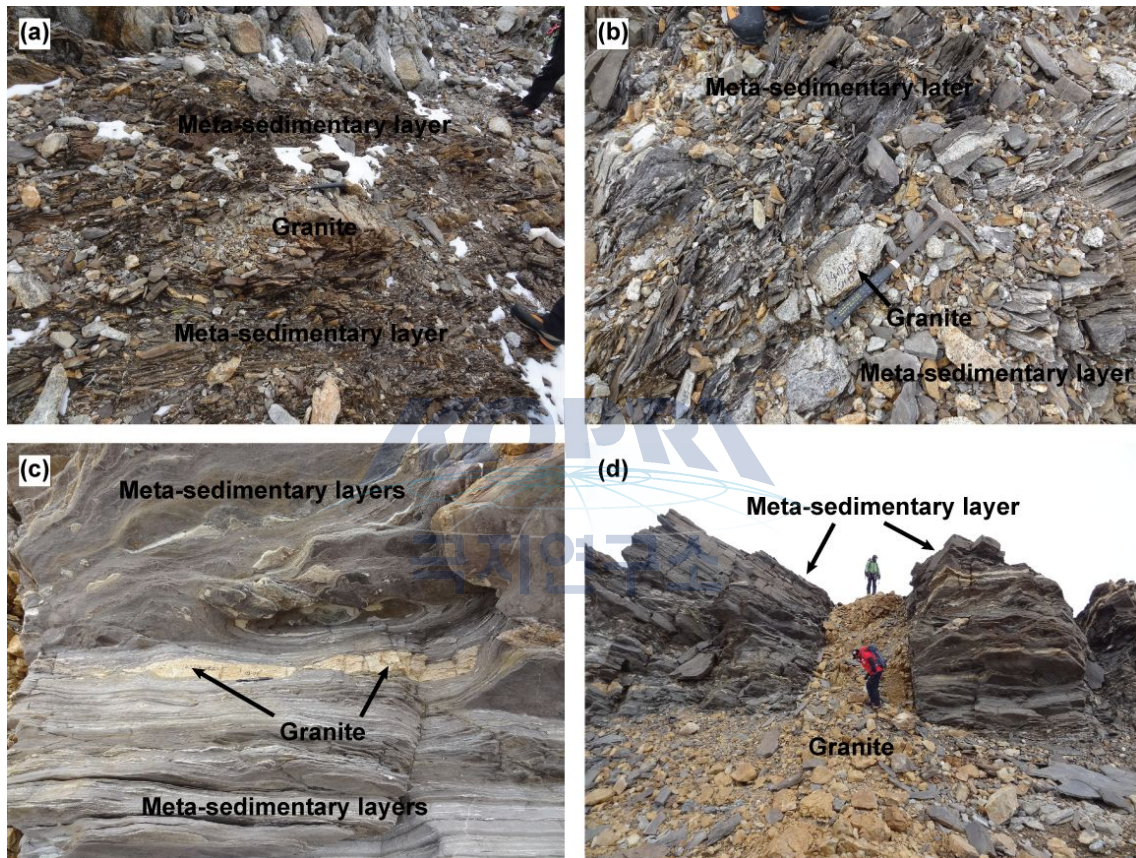


Fig. 17. 오케인 빙하 인근에서 산출하는 암상

13. sample site# WT013 : 이 시료는 오케인 빙하(O'Kane glacier) 북쪽 사면에서 채집되었다. 이 지역의 암상도 WT012 지역과 유사한 형태를 보여주고 있다. 하지만, WT012 시료와는 다르게 부딘화된 화강암들이 엽리와 함께 신장된 조직을 보여주고 있다(Fig. 17c). 따라서, 이 부딘화된 화강암(WT013A)은 운동 전(pre-kinematic) 화강암을 해석할 수 있다. 이 밖에도 변성퇴적암의 주엽리면을 자르며 관입해 있는 운동 후(post-kinematic) 화강암도 산출한다(Fig. 17d).



14. sample site# WT014 : 이 시료는 장보고 기지 남쪽 해안에 위치해 있는 인익스프레서블섬(Inexpressible island)에서 채집되었다. 이 섬은 다양한 화성암체로 구성되어 있으며, 이중 가장 눈에 띄는 것은 에그마타이트(agmatite)의 산출이다(Fig. 18a, b). 에그마타이트는 변성작용에 의한 각력 혹은 각력과 유사한 암석을 통칭하며, 각력에 해당하는 암석은 기질에 비해 더 고철질 성분을 갖는다. 이 밖에도 다양한 성분의 화성암과 편마암 등이 산출한다.

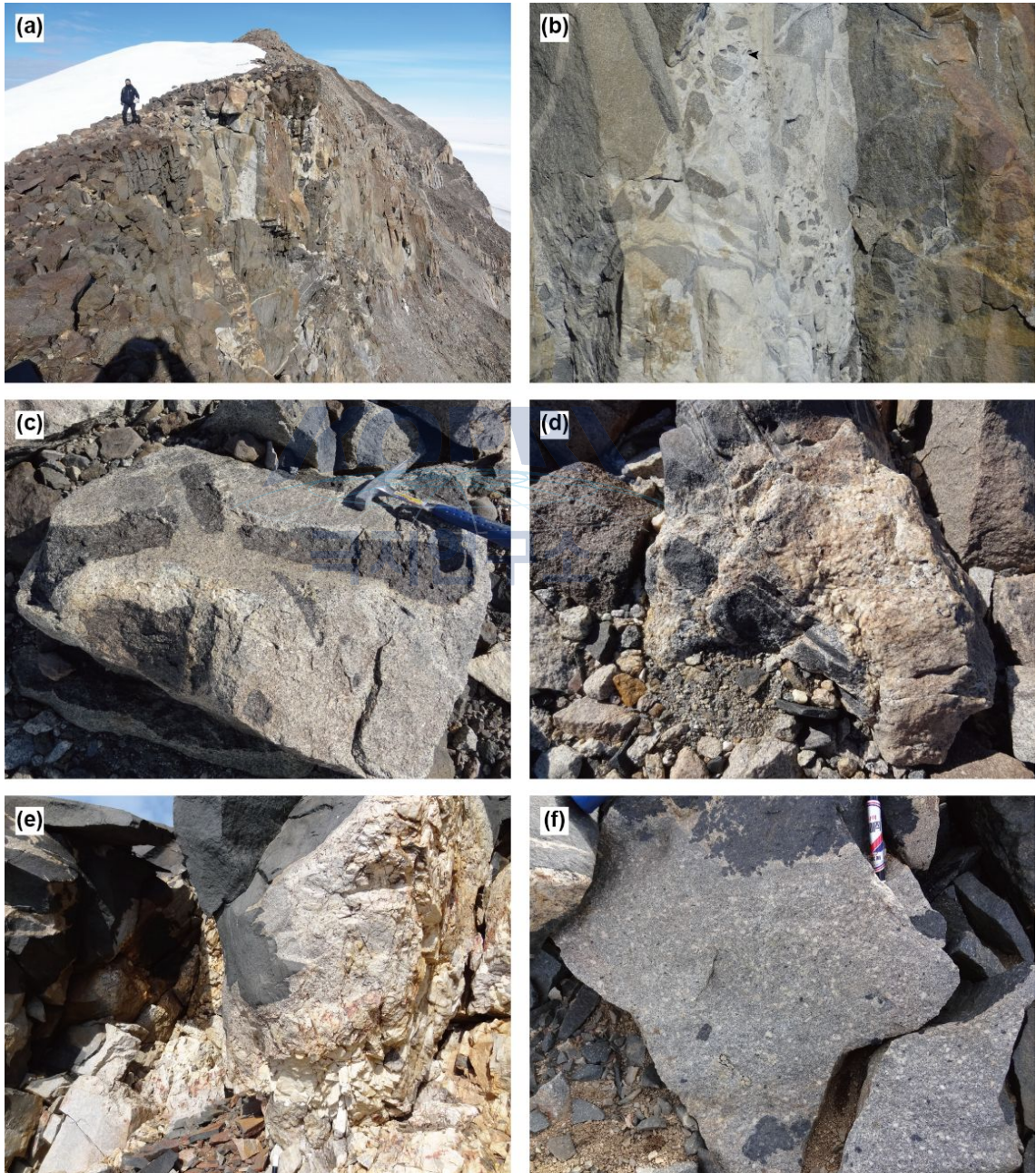


Fig. 18. 인익스프레서블섬에서 산출하는 암상

화성암체에서는 마그마 혼합과 같은 구조(Fig. 18c)와 화강암으로 둘러 쌓인 편마암 포획암도 관찰 할 수 있다(Fig. 18d). 이 밖에도 염기성 암맥과 반상 화강암도 함께 산출한다(Fig. 18e, f).

15. sample site# WT015 : 이 시료는 장보고 기지 서쪽에 위치한 사스트루기봉(Cape Sastrugi)에서 채집되었다. 이 지역에 산출하는 주요 암석은 변성이질암으로 석류석 반상변정을 포함하고 있다.



## 제 2 절 저어콘 음극선 발광 영상 분석

저어콘의 연령측정을 위하여 채취한 시료들을 유압파쇄기와 진동컴분쇄기를 이용하여 분말로 만들었다. 이 분말을 체를 사용하여 230  $\mu\text{m}$  이하의 광물입자들을 분리한 후 물과 증액을 이용한 전통적인 비중분리법과 자성분리법을 적용한 후 마지막으로 수작업을 거쳐 저어콘 결정들을 추출하였다(Cheong et al., 2013). 분리된 저어콘 입자들을 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 동위원소성분은 미국 미네소타주 둘루스 복합체(Duluth Complex)에서 산출하는 FC1 저어콘 표준시료를 사용하여 측정하였다( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}=0.1859$ ; Paces and Miller, 1993). 연마된 저어콘 입자들의 내부 조직 관찰을 위한 후방산란전자영상 및 음극선 발광 영상은 한국기초과학지원연구원 오창본원에 설치된 주사전자현미경(SEM; JEOL6610LV)을 이용하여 촬영하였다. 음극선 발광 영상과 함께 표시된 타원은 고분해능 이차이온질량분석기를 이용한 점분석 위치이다. 점분석 위치와 함께 분석번호와 점분석 연령을 표시하였다.

1. WT001A 시료: 이 시료는 머치슨산(Mt Murchison) 자락에서 채취한 호상편마암 시료이다. 대부분의 저어콘 결정들은 반자형에서 자형의 결정형태를 나타내며, 원마도 또한 다양하게 나타난다(Fig. 19). 저어콘 결정의 내부구조 또한 다양하게 나타난다. 일부 저어콘 결정들은 진동(oscillatory)누대구조를 나타내는 반면(e.g., 결정번호 2, 4, 40 번 in Fig. 19), 핵-가장자리(core-rim) 누대구조를 나타내는 결정도 있으며(e.g., 결정번호 33 in Fig. 19), 뚜렷한 누대구조를 나타내지 않는 결정도 있다. 이와 같이 다양한 누대구조, 결정형 및 원마도의 차이는 복수의 기원지에서 쇄설성 저어콘 결정들이 공급되었음을 뒷받침 한다. 또한 많은 결정들에서 가장자리에 매우 어두운 음극선 발광 영상으로 대표되는 과성장 띠가 관찰된다(e.g., 결정번호 27, 29, 33 in Fig. 19). 이 과성장 띠는 변성작용 중 발달했을 가능성이 매우 높지만 그 폭이 고분해능 이차이온질량분석기의 공간분해능에 비해 너무 적어 분석할 수 없다.



Fig. 19. WT001A 시료에서 산출하는 저어콘의 음극선 발광 영상

2. WT001B 시료: 이 시료는 WT001A 시료와 마찬가지로 머치슨산(Mt Murchison) 자락에서 채취한 화강암 시료로, WT001A 호상편마암을 관입하고 있다(Fig. 9a). 대부분의 저어콘 결정들은 자형의 결정형태를 나타내며, 장단축비(aspect ratio)도 대부분 2:1~3:1을 나타낸다(Fig. 20). 저어콘 결정의 내부구조는 진동(oscillatory)누대구조로 대표되며, 몇 개의 결정에서는 상속핵이 뚜렷이 관찰된다(e.g., 결정번호 14, 15, 26 in Fig. 20). 특히, 14번 결정과 같은 경우에는 상속핵을 둘러싼 회색의 과성장띠를 다시 검은 과성장띠가 덧자라고 있는 형태를 보여준다. 따라서, 초기의 저어콘이 마그마에 일부 용해된 이후 2회에 걸쳐 재성장 했을 가능성이 있다.

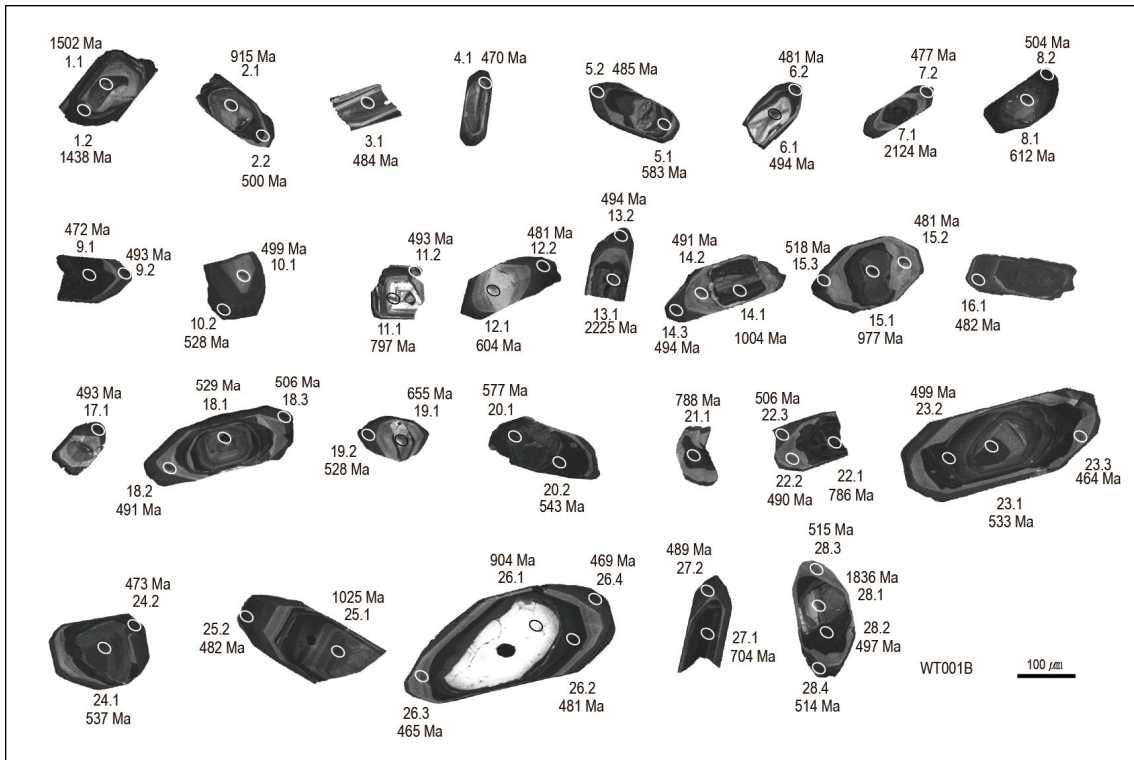


Fig. 20. WT001B 시료에서 산출하는 저어콘의 음극선 발광 영상

3. WT009 시료: 이 시료도 터말린 평원(Tourmaline plateau) 인근에서 채취한 호상편마암 시료로, WT001A 시료의 저어콘 결정들과 유사한 결정형, 내부구조 및 원마도를 보여준다(Fig. 21).

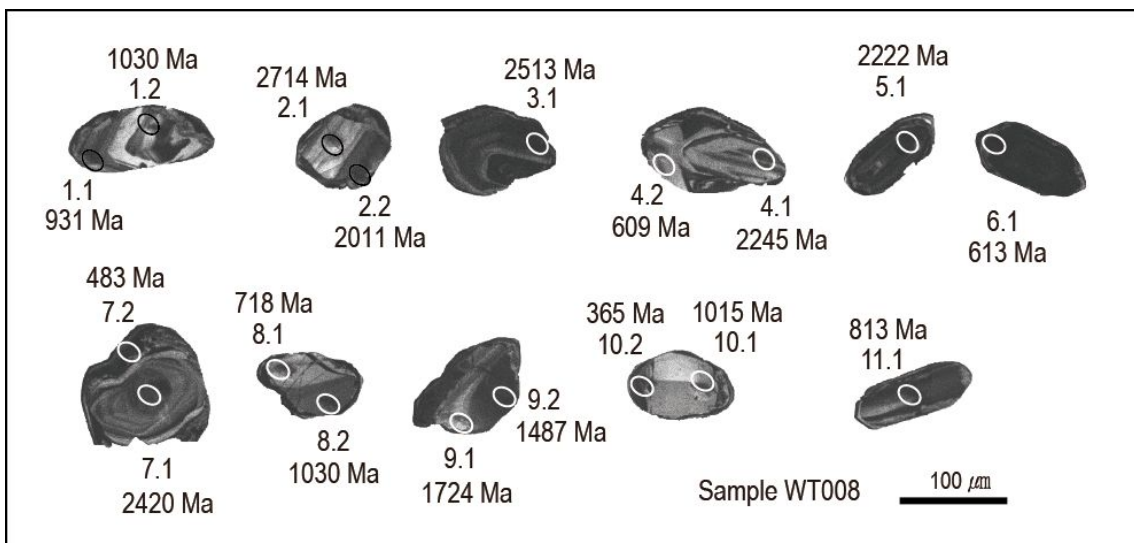


Fig. 21. WT008 시료에서 산출하는 저어콘의 음극선 발광 영상

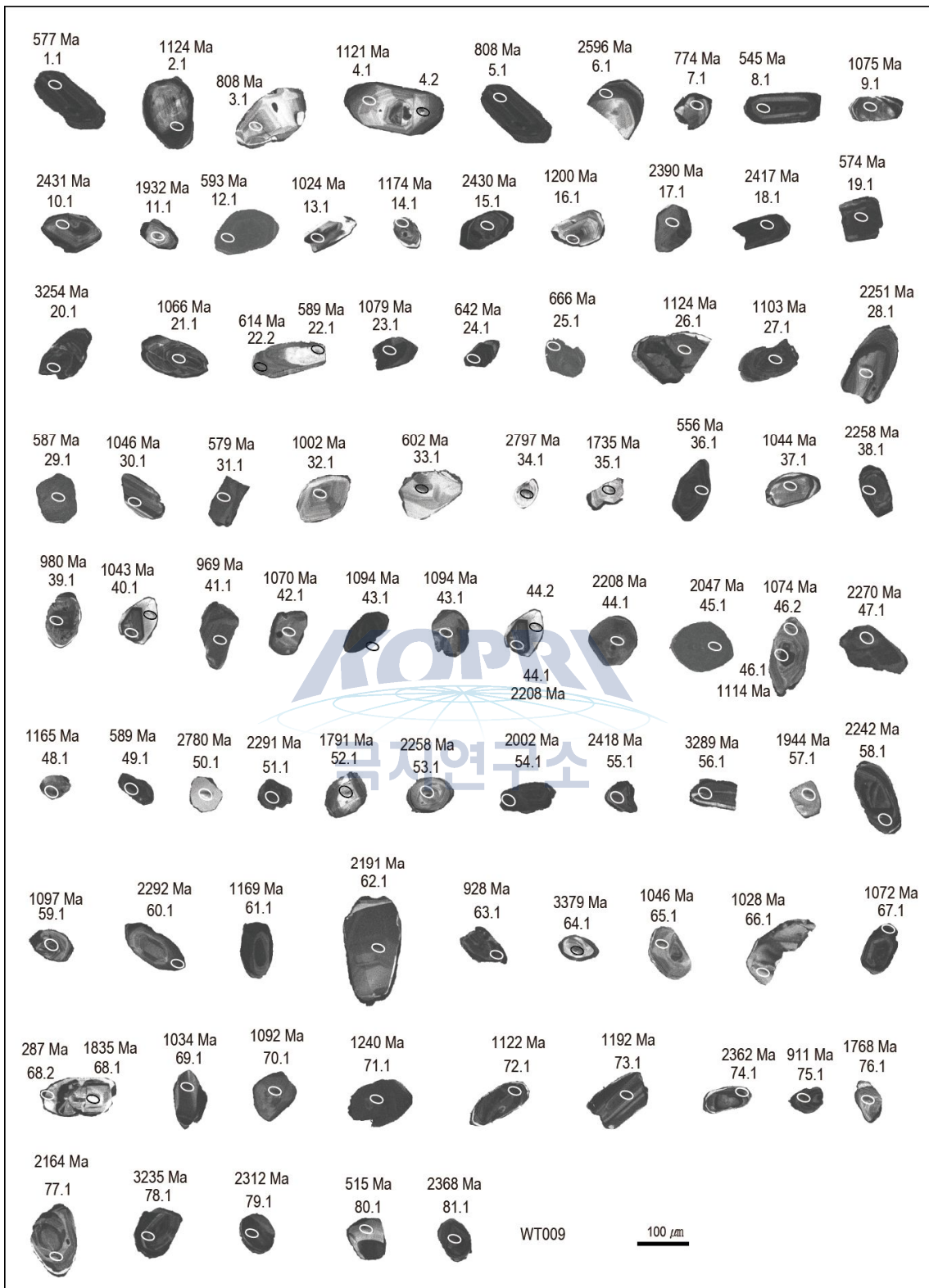


Fig. 22. WT009 시료에서 산출하는 저어콘의 음극선 발광 영상

4. WT009 시료: 이 시료도 터멀린 평원(Tourmaline plateau) 인근에서 흑운모 편암과 규암의 호층대에서 채취하였으며(Fig. 15), 이 중 규암층에서 저어콘 결정들을 분리하였다. 다른 WT001A와 WT008 저어콘 결정들과 마찬가지로 이 시료들의 저어콘 결정들도 반자형-자형의 결정형을 보여주고 있으며, 매우 다양한 형태의 내부구조와 원마도를 보여준다(Fig. 22). 다른 편마암 시료에서 산출하는 저어콘 결정들에 비해 이 시료의 저어콘 결정들은 상대적으로 원마도가 높고, 결정의 크기가 상대적으로 작은, 장단축비(aspect ratio)가 1:1인 결정들이 다수 관찰된다. 위와 같은 특징들은 이 시료에서 산출하는 저어콘 결정들이 쇄설성 기원임을 반증하고 있다.

5. WT011 시료 : 이 시료는 모르그스트롬산(Mt Morgstrom) 인근에서 채취한 호상편마암에서 채취하였다(Fig. 16e, f). 대부분의 저어콘 결정들은 반자형-자형의 결정형태를 나타내며, 장단축비(aspect ratio)도 대부분 2:1~3:1을 나타낸다(Fig. 23). 저어콘 결정의 내부구조는 진동(oscillatory)누대구조로 뚜렷하고(결정번호 7, 8, 11 in Fig. 23), 상속핵이 가지는 결정들도 관찰된다(e.g., 결정번호 1, 13, 14 in Fig. 23). 13, 14번 결정에서는 매우 어두운 음극선 발광 영상이 가장자리에서 미약하게 발달하고 있지만, 대부분의 결정에서 뚜렷한 과성장띠는 관찰되지 않는다.

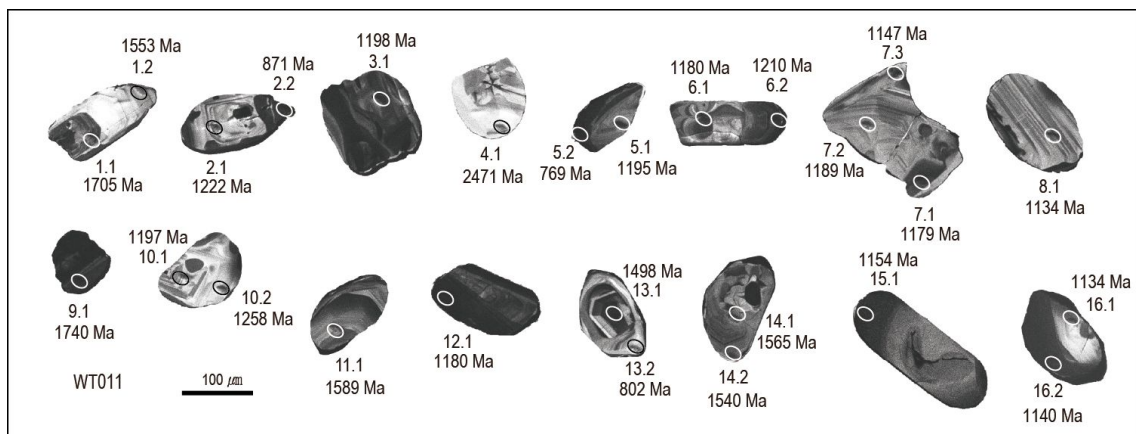


Fig. 23. WT011 시료에서 산출하는 저어콘의 음극선 발광 영상

6. WT013A 시료: 이 시료는 오케인 빙하(O'Kane glacier) 인근에서 채취한 압쇄 화강암이다(Fig. 15c). 대부분의 저어콘 결정들은 자형의 결정형태를 나타내며 일부 시료는 반자형을 형태를 띤다(Fig. 24). 장단축비(aspect ratio)는 대부분 2:1~3:1의 범위를 보인다(Fig. 20). 이들 저어콘 결정의 내부구조는 진동(oscillatory)누대구조가 대표적으로 나타나고, 일부 결정들은 상속핵을 갖는다. 일부 결정들에서는 어두운 음극선 발광 영상으로 대표되는 과성장 띠를 보여주지만, 그 두께는 매우 얇다(결정번호 10, 22 in Fig. 24). .



Fig. 24. WT013A 시료에서 산출하는 저어콘의 음극선 발광 영상



### 제 3 절 동위원소 성분 분석

저어콘의 U-Th-Pb 동위원소성분 분석은 한국기초과학지원연구원 오창센터의 고분해능이차이온질량분석기(SHRIMP)를 이용해서 수행하였다. SHRIMP 장비를 이용한 U-Th-Pb 동위원소성분 분석법은 Williams (1998)에 기술된 과정을 따랐다. 동위원소 분석을 위하여  $O_2^-$  1차이온 빔(beam)을 사용하였으며, 빔의 크기와 전류는 각각 ca. 20  $\mu m$  및 ca. 3 nA이다. 점분석은 상속핵에 의한 교란을 피하기 위해 저어콘 입자의 연변부에 대하여 주로 실시하였다. 일부 결정들은 상속핵을 연령을 측정하였다. 쇄설성 저어콘 분석의 통계학적 유효성을 만족시키기 위하여 WT009시료에 대해서는 60점 이상을 분석하였고(Fedo et al., 2003), 나머지 시료들은 WT009시료와 유사한 연령분포 패턴을 보이거나 명확하게 다른 패턴을 보였기 때문에 분석수를 제한하였다.

분석한 저어콘의 U-Th-Pb 동위원소비는 PRAWN/LEAD 6.5.5 프로그램을 사용하여 계산하였고, 계산된 동위원소비는 Isoplot/EX (Ludwig, 2003)을 이용하여 동시성연령과 가중평균연령 도표를 작성하였다. 보통 납 모델 성분을 이용하여 보통 납(common Pb)의 보정을 실시하였으며(Cumming and Richard, 1975), 1200 Ma 보다 오래된 저어콘에 대해서는  $^{204}Pb$  보정법을, 그리고 이보다 젊은 저어콘은  $^{207}Pb$  보정법을 적용하였다(Williams, 1998). 불확실도 계산에는 계측통계학적(counting statistics) 오차, 배경값에 기인한 오차와 함께 표준시료의 검정선 수립에서 발생한 오차  $\pm 0.5\%$ 를 반영하였다. 이로부터 구한 연령의 불확실도는 95% 신뢰수준으로 계산하였다.

일부 시료의 저어콘은 다량의 보통 납 성분을 함유하고 있다(Table 2). 보통 납의 함량의 전체 납에서 1%을 넘는 경우는 이후 연령계산에서 제외하였다. 일부 분석치는 서로 다른 연령의 방상성 기원의 납들이 혼합되었거나, 납 손실에 의해 연령의 불일치도가 높다. 따라서,  $^{207}Pb/^{206}Pb$ 과  $^{206}Pb/^{238}U$ 의 값이 10%가 넘게 차이나는 경우에도 이후 계산에서는 제외하였다. 일부 시료의 경우 저어콘의 U 함량도 높게 나타나는데, 우라늄 함량이 높을 경우 표준시료와의 U 농도의 차이에서 생기는 기질효과(matrix effect)가 발생할 뿐만 아니라(Kikuchi and Hidaka, 2009), 납 손실의 가능성도 크기 때문에 연령의 지질학적 의미를 이해하기 어렵다. 따라서, U 함량이 2,500 ppm 이상이 분석치도 이하 연령계산에서는 제외하였다. 분석한 저어콘의 우라늄과 토륨의 농도, Th/U 비, 보통 납 농도와 동위원소 비는 Table 2에 정리하였다.

Table 2. U - Th - Pb isotope compositions of zircon.

Grain.area	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Common					Apparent age (Ma)			Concordance (%)
				206Pb(%)	207Pb*/206Pb	208Pb*/206Pb	206Pb*/238U	208Pb*/232Th	207Pb/206Pb	206Pb/238U	208Pb/232Th	
Sample WT001A												
1.1	218	199	0.91	0.15	0.07592 ± 113	0.2683 ± 65	0.18128 ± 339	0.05332 ± 172	1093 ± 30	1074 ± 19	1050 ± 33	98.3
2.1	228	186	0.81	-0.22	0.07002 ± 136	0.2408 ± 96	0.17101 ± 311	0.05054 ± 227	929 ± 40	1018 ± 17	997 ± 44	109.2
3.1	1115	282	0.25	0.69	0.07431 ± 85	0.0648 ± 19	0.15285 ± 249	0.03919 ± 135	1050 ± 23	917 ± 14	777 ± 26	87.8
4.1	242	112	0.46	0.03	0.07396 ± 123	0.1430 ± 40	0.17651 ± 279	0.05445 ± 181	1040 ± 34	1048 ± 15	1072 ± 35	100.7
5.1	297	69	0.23	-0.33	0.06077 ± 161	0.0754 ± 36	0.12587 ± 177	0.04105 ± 207	631 ± 58	764 ± 10	813 ± 40	120.6
6.1	97	23	0.24	0.87	0.07421 ± 431	0.0505 ± 113	0.14918 ± 446	0.03204 ± 722	1047 ± 122	896 ± 25	637 ± 142	86.1
7.1	358	75	0.21	0.08	0.05803 ± 104	0.0617 ± 28	0.09111 ± 126	0.02678 ± 129	531 ± 40	562 ± 7	534 ± 25	105.7
8.1	68	85	1.24	0.05	0.12869 ± 178	0.3556 ± 65	0.32935 ± 611	0.09449 ± 279	2080 ± 25	1835 ± 32	1825 ± 52	88.2
9.1	156	125	0.80	0.06	0.10990 ± 358	0.2356 ± 45	0.31529 ± 506	0.09239 ± 237	1798 ± 61	1767 ± 25	1786 ± 44	98.3
10.1	89	67	0.75	0.11	0.05937 ± 286	0.2385 ± 68	0.09885 ± 182	0.03124 ± 110	581 ± 108	608 ± 11	622 ± 22	104.5
11.1	364	357	0.98	0.02	0.05942 ± 149	0.2984 ± 84	0.09918 ± 181	0.03011 ± 102	583 ± 55	610 ± 11	600 ± 20	104.5
12.1	845	648	0.77	0.13	0.05840 ± 81	0.2366 ± 37	0.08544 ± 105	0.02635 ± 54	545 ± 31	529 ± 6	526 ± 11	97.0
13.1	1561	25	0.02	0.00	0.06055 ± 55	0.0050 ± 14	0.10082 ± 130	0.03204 ± 897	623 ± 20	619 ± 8	637 ± 176	99.4
14.1	1807	620	0.34	-0.01	0.07483 ± 37	0.1020 ± 11	0.18049 ± 206	0.05362 ± 86	1064 ± 10	1070 ± 11	1056 ± 17	100.5
15.1	270	55	0.20	0.16	0.06347 ± 364	0.0522 ± 95	0.11417 ± 295	0.02944 ± 541	724 ± 126	697 ± 17	586 ± 107	96.3
16.1	1939	787	0.41	0.18	0.07390 ± 75	0.1176 ± 22	0.16840 ± 205	0.04880 ± 109	1039 ± 21	1003 ± 11	963 ± 21	96.7
17.1	459	112	0.24	0.56	0.07411 ± 229	0.0614 ± 65	0.15530 ± 282	0.03896 ± 420	1045 ± 64	931 ± 16	773 ± 82	89.5
18.1	41	13	0.32	-3.43	0.04006 ± 571	0.1575 ± 198	0.14834 ± 1922	0.07299 ± 1332	-	892 ± 109	1424 ± 225	-
19.1	441	103	0.23	-0.01	0.05899 ± 83	0.0751 ± 33	0.09259 ± 139	0.02974 ± 139	567 ± 31	571 ± 8	592 ± 27	100.7
20.1	568	1110	1.95	0.14	0.06380 ± 91	0.5910 ± 60	0.11575 ± 173	0.03503 ± 68	735 ± 30	706 ± 10	696 ± 13	96.2
21.1	307	146	0.48	0.39	0.07353 ± 77	0.1440 ± 25	0.15871 ± 250	0.04790 ± 118	1029 ± 21	950 ± 14	946 ± 23	92.6
22.1	347	68	0.20	0.03	0.10601 ± 300	0.0585 ± 21	0.26988 ± 974	0.08085 ± 435	1732 ± 53	1540 ± 50	1571 ± 81	88.9

All the isotopic compositions were calculated by a combination of the  $^{207}\text{Pb}$  and  $^{204}\text{Pb}$  correction methods,  $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  ratios corrected by  $^{204}\text{Pb}$ .

Table 2. (continued).

Grain.area	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Common						207Pb/206Pb
				206Pb/(%)	207Pb*/206Pb	208Pb*/206Pb	206Pb*/238U	208Pb*/232Th	207Pb/206Pb	
23.1	364	103	0.28	0.11	0.07283 ± 153	0.0908 ± 48	0.16883 ± 406	0.05408 ± 317	1009 ± 43	
24.1	533	53	0.10	-0.94	0.06492 ± 355	0.0503 ± 93	0.16944 ± 733	0.08525 ±	772 ± 120	
25.1	1131	297	0.26	0.08	0.06081 ± 216	0.0762 ± 62	0.10235 ± 312	0.02969 ± 260	632 ± 78	
26.1	41	29	0.71	0.76	0.07636 ± 1745	0.2231 ± 118	0.11126 ± 430	0.03482 ± 234	1105 ± 541	
27.1	50	24	0.49	0.31	0.07970 ± 412	0.1387 ± 133	0.19114 ± 954	0.05421 ± 592	1190 ± 106	
28.1	61	37	0.60	0.09	0.08114 ± 208	0.1729 ± 49	0.19877 ± 747	0.05735 ± 297	1225 ± 51	
29.1	392	259	0.66	0.17	0.07483 ± 97	0.1988 ± 35	0.17205 ± 247	0.05180 ± 121	1064 ± 26	
29.2	149	47	0.31	-0.04	0.7285 ± 114	0.0959 ± 38	0.17270 ± 356	0.05267 ± 240	1010 ± 32	
30.1	174	68	0.39	0.13	0.07291 ± 197	0.1205 ± 78	0.16147 ± 360	0.04990 ± 350	1011 ± 56	
30.2	554	8	0.01	0.20	0.05713 ± 392	0.0060 ± 27	0.10714 ± 192	0.04473 ± 2017	496 ± 159	
31.1	4851	981	0.20	0.07	0.05796 ± 35	0.0636 ± 10	0.08256 ± 111	0.02597 ± 56	528 ± 13	
32.1	1624	62	0.04	-0.04	0.05510 ± 128	0.0154 ± 26	0.08593 ± 212	0.03440 ± 631	416 ± 53	
33.1	588	245	0.42	-0.34	0.07198 ± 244	0.1276 ± 83	0.17973 ± 653	0.05502 ± 430	985 ± 71	
33.2	733	135	0.18	0.46	0.05793 ± 151	0.0635 ± 27	0.07321 ± 125	0.02523 ± 116	527 ± 58	
34.1	226	146	0.64	0.28	0.06095 ± 219	0.1900 ± 51	0.08431 ± 143	0.02486 ± 83	638 ± 79	
34.2	742	65	0.09	0.30	0.03764 ± 1990	0.0265 ± 28	0.08953 ± 134	0.02700 ± 291	-	
35.1	1029	344	0.33	0.88	0.07118 ± 106	0.1112 ± 31	0.12467 ± 234	0.04148 ± 148	963 ± 31	
35.2	878	180	0.20	0.92	0.06397 ± 160	0.0654 ± 39	0.08985 ± 257	0.0287 ± 192	741 ± 54	
36.1	1964	23	0.01	0.56	0.06927 ± 53	-0.0079 ± 13	0.12773 ± 296	-0.08622 ± 1456	907 ± 16	
37.1	50	19	0.37	0.35	0.07388 ± 387	0.1144 ± 97	0.17339 ± 476	0.05325 ± 478	1038 ± 110	
37.2	26	0	0.00	2.04	0.06784 ± 708	0.0030 ± 194	0.03474 ± 2578	0.04347 ± 2871	864 ± 233	
38.1	4384	966	0.22	2.91	0.08869 ± 34	0.0019 ± 14	0.13100 ± 189	0.00111 ± 80	1398 ± 7	
39.1	1071	647	0.60	0.62	0.06687 ± 121	0.1824 ± 41	0.11632 ± 246	0.03515 ± 121	834 ± 38	

All the isotopic compositions were calculated by a combination of the  $^{207}\text{Pb}$  and  $^{204}\text{Pb}$  correction methods,  $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  ratios corrected

Table 2. (continued).

Grain.area	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Common						207Pb/206Pb
				206Pb(%)	207Pb*/206Pb	208Pb*/206Pb	206Pb*/238U	208Pb*/232Th	207Pb*/206Pb	
39.2	136	8	0.06	0.27	0.05783 ± 217	0.0179 ± 41	0.08710 ± 204	0.02568 ± 588	1009 ± 43	
40.1	473	178	0.38	0.01	0.09884 ± 97	0.1485 ± 16	0.23787 ± 2226	0.03981 ± 1033	772 ± 120	
Sample WT001B										
1.1	314	241	0.77	0.12	0.09371 ± 150	0.2385 ± 37	0.20594 ± 1981	0.06397 ± 747	1502 ± 31	
1.2	1292	53	0.04	0.01	0.09060 ± 120	0.0126 ± 5	0.23960 ± 601	0.07370 ± 354	1438 ± 26	
2.1	504	186	0.37	0.58	0.07422 ± 264	0.0935 ± 81	0.15249 ± 627	0.03862 ± 377	1048 ± 73	
2.2	987	35	0.04	0.00	0.05630 ± 79	0.0113 ± 20	0.08061 ± 120	0.02586 ± 466	464 ± 31	
3.1	372	435	1.17	0.06	0.05771 ± 122	0.3663 ± 84	0.07792 ± 117	0.02442 ± 68	519 ± 47	
4.1	706	48	0.07	0.19	0.05602 ± 118	0.0193 ± 28	0.7564 ± 129	0.02155 ± 319	453 ± 47	
5.1	679	112	0.17	0.87	0.06594 ± 132	0.0328 ± 34	0.09469 ± 450	0.01882 ± 221	805 ± 42	
5.2	601	47	0.08	0.14	0.05703 ± 120	0.0232 ± 26	0.07811 ± 104	0.02317 ± 258	493 ± 47	
6.1	207	231	1.11	0.06	0.05484 ± 250	0.3464 ± 97	0.07973 ± 142	0.02483 ± 85	406 ± 106	
6.2	753	50	0.07	0.16	0.05764 ± 93	0.0175 ± 26	0.07754 ± 114	0.02030 ± 302	516 ± 36	
7.1	1521	139	0.09	0.01	0.13193 ± 364	0.0246 ± 6	0.26549 ± 788	0.07145 ± 306	2124 ± 49	
7.2	708	46	0.07	0.22	0.05244 ± 177	0.0169 ± 15	0.07680 ± 106	0.01986 ± 180	305 ± 79	
8.1	344	101	0.29	-0.16	0.05893 ± 167	0.0918 ± 57	0.09966 ± 382	0.03112 ± 241	565 ± 63	
8.2	1914	61	0.03	0.01	0.05523 ± 82	0.0105 ± 14	0.8128 ± 107	0.02662 ± 366	422 ± 34	
9.1	2622	111	0.04	0.11	0.05708 ± 37	0.0112 ± 10	0.07600 ± 101	0.02012 ± 175	495 ± 15	
9.2	641	41	0.06	0.16	0.05496 ± 132	0.0185 ± 27	0.07944 ± 105	0.02318 ± 338	411 ± 55	
10.1	79	24	0.30	-0.29	0.05009 ± 382	0.1099 ± 67	0.08056 ± 232	0.02969 ± 209	199 ± 186	
10.2	842	56	0.07	0.03	0.04709 ± 316	0.0223 ± 27	0.08536 ± 112	0.02865 ± 347	54 ± 153	
11.1	172	88	0.51	1.43	0.07676 ± 200	0.2019 ± 70	0.13159 ± 775	0.05202 ± 396	1115 ± 53	
11.2	225	27	0.12	0.74	0.02246 ± 1277	0.0317 ± 39	0.07942 ± 156	0.02082 ± 262	-	

All the isotopic compositions were calculated by a combination of the <sup>207</sup>Pb and <sup>204</sup>Pb correction methods, <sup>207</sup>Pb\*/<sup>206</sup>Pb\* ratios corrected

Table 2. (continued).

Grain.area	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Common					207Pb/206Pb	Ap
				206Pb(%)	207Pb*/206Pb	208Pb*/206Pb	206Pb*/238U	208Pb*/232Th		
12.1	49	72	1.47	0.05	0.06028 ± 253	0.4696 ± 198	0.09825 ± 323	0.03132 ± 174	614 ± 93	
12.2	1166	101	0.09	0.11	0.05644 ± 75	0.0253 ± 17	0.07744 ± 94	0.02254 ± 150	470 ± 30	
13.1	538	142	0.26	0.02	0.15198 ± 121	0.0773 ± 15	0.39756 ± 711	0.11635 ± 343	2368 ± 14	
13.2	941	69	0.07	0.21	0.05847 ± 112	0.0177 ± 31	0.07958 ± 120	0.01922 ± 338	547 ± 42	
14.1	864	486	0.56	0.15	0.07392 ± 142	0.1711 ± 49	0.16848 ± 328	0.05125 ± 178	1039 ± 39	
14.2	190	76	0.40	-0.02	0.05669 ± 186	0.1212 ± 44	0.07916 ± 161	0.02400 ± 104	480 ± 74	
14.3	881	52	0.06	-0.06	0.05670 ± 97	0.0211 ± 23	0.07956 ± 122	0.02825 ± 309	480 ± 38	
15.1	309	177	0.57	0.05	0.07086 ± 273	0.1726 ± 116	0.16370 ± 366	0.04925 ± 363	953 ± 81	
15.2	154	45	0.29	8.84	0.06629 ± 3594	0.1087 ± 567	0.07764 ± 291	0.02901 ± 1517	816 ± 1939	
15.3	1004	63	0.06	-0.07	0.05623 ± 79	0.0224 ± 18	0.08360 ± 115	0.03001 ± 246	462 ± 31	
16.1	1558	100	0.06	0.29	0.05364 ± 102	0.0255 ± 20	0.07765 ± 106	0.03093 ± 242	356 ± 43	
17.1	935	67	0.07	0.10	0.05709 ± 65	0.0204 ± 17	0.07940 ± 116	0.02254 ± 187	495 ± 25	
18.1	538	232	0.43	0.26	0.05865 ± 201	0.1367 ± 43	0.08547 ± 710	0.02714 ± 280	554 ± 76	
18.2	190	69	0.36	0.22	0.05405 ± 251	0.1115 ± 68	0.07918 ± 131	0.02433 ± 155	373 ± 108	
18.3	822	51	0.06	-0.03	0.05643 ± 103	0.0207 ± 26	0.08173 ± 116	0.02735 ± 347	469 ± 41	
19.1	137	81	0.59	0.21	0.05809 ± 265	0.1669 ± 97	0.10691 ± 286	0.03017 ± 199	533 ± 103	
19.2	1156	62	0.05	0.36	0.04599 ± 471	0.0202 ± 31	0.08533 ± 126	0.03224 ± 493	-	
20.1	477	74	0.16	0.73	0.06364 ± 112	0.0458 ± 30	0.09362 ± 122	0.02755 ± 187	730 ± 38	
20.2	1015	121	0.12	0.51	0.06050 ± 114	0.0341 ± 28	0.08796 ± 111	0.02519 ± 209	621 ± 41	
21.1	598	261	0.44	0.63	0.06996 ± 141	0.1283 ± 39	0.13007 ± 208	0.03826 ± 135	927 ± 42	
22.1	1365	392	0.29	0.70	0.06932 ± 57	0.0944 ± 16	0.12973 ± 159	0.04260 ± 90	908 ± 17	
22.2	194	63	0.32	0.43	0.05510 ± 202	0.0952 ± 48	0.07904 ± 178	0.02325 ± 132	416 ± 84	
22.3	610	48	0.08	0.05	0.05481 ± 97	0.0246 ± 21	0.08160 ± 120	0.02553 ± 219	404 ± 40	

All the isotopic compositions were calculated by a combination of the  $^{207}\text{Pb}$  and  $^{204}\text{Pb}$  correction methods,  $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  ratios corrected

Table 2. (continued).

Grain.area	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Common					207Pb/206Pb	Ap
				206Pb(%)	207Pb*/206Pb	208Pb*/206Pb	206Pb*/238U	208Pb*/232Th		
24.1	483	259	0.54	-0.01	0.05721 ± 88	0.1620 ± 43	0.08682 ± 138	0.02628 ± 83	499 ± 34	
24.2	844	43	0.05	0.10	0.05757 ± 75	0.0131 ± 16	0.07613 ± 99	0.01975 ± 244	514 ± 29	
25.1	521	222	0.43	0.27	0.07512 ± 66	0.1211 ± 29	0.17229 ± 210	0.04903 ± 133	1072 ± 18	
25.2	1310	104	0.08	0.07	0.05679 ± 80	0.0233 ± 21	0.07767 ± 92	0.02292 ± 206	483 ± 31	
26.1	47	15	0.31	2.41	0.06408 ± 995	0.0870 ± 123	0.15048 ± 567	0.04156 ± 614	744 ± 368	
26.2	1977	76	0.04	0.09	0.05724 ± 40	0.0098 ± 11	0.07750 ± 88	0.01984 ± 213	501 ± 15	
26.3	526	57	0.11	0.17	0.05756 ± 67	0.0285 ± 20	0.07477 ± 99	0.01957 ± 140	513 ± 26	
26.4	821	60	0.07	0.18	0.05779 ± 51	0.0162 ± 15	0.07544 ± 96	0.01690 ± 153	522 ± 19	
27.1	1444	158	0.11	0.22	0.06443 ± 69	0.0303 ± 17	0.11535 ± 142	0.03197 ± 189	756 ± 23	
27.2	819	59	0.07	0.00	0.05637 ± 100	0.0230 ± 22	0.07882 ± 91	0.02515 ± 244	467 ± 40	
28.1	320	311	0.97	0.02	0.11225 ± 332	0.2572 ± 59	0.34809 ± 661	0.09208 ± 288	1836 ± 55	
28.2	1387	48	0.03	0.13	0.05794 ± 54	0.0078 ± 13	0.08021v86	0.01818 ± 295	527 ± 20	
28.3	190	80	0.42	0.11	0.05562 ± 400	0.1300 ± 56	0.08309 ± 148	0.02562 ± 122	437 ± 168	
28.4	829	64	0.08	0.86	0.05226 ± 202	0.0223 ± 20	0.08298 ± 95	0.02412 ± 213	297 ± 90	
Sample	WT009									
1.1	1300	622	0.48	0.41	0.05860 ± 121	0.1403 ± 20	0.09358 ± 125	0.02746 ± 55	552 ± 46	
2.1	444	146	0.33	0.28	0.07680 ± 124	0.0979 ± 24	0.19043 ± 302	0.05648 ± 176	1116 ± 32	
3.1	131	93	0.71	0.72	0.06944 ± 300	0.2475 ± 93	0.13349 ± 311	0.04682 ± 214	912 ± 92	
4.1	130	36	0.28	-0.30	0.07327 ± 263	0.0868 ± 60	0.19002 ± 570	0.05971 ± 461	1022 ± 74	
5.1	36	42	1.17	1.44	0.06231 ± 749	0.3119 ± 141	0.13360 ± 616	0.03569 ± 250	685 ± 280	
6.1	512	55	0.11	0.03	0.17391 ± 118	0.0293 ± 8	0.46803 ± 612	0.12734 ± 384	2596 ± 11	
7.1	407	98	0.24	0.82	0.07051 ± 135	0.0877 ± 29	0.12756 ± 221	0.04626 ± 180	943 ± 40	
8.1	2797	2256	0.81	1.25	0.05887 ± 121	0.2186 ± 30	0.08829 ± 100	0.02393 ± 43	562 ± 46	

All the isotopic compositions were calculated by a combination of the  $^{207}\text{Pb}$  and  $^{204}\text{Pb}$  correction methods,  $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  ratios correct

Table 2. (continued).

Grain.area	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Common					207Pb/206Pb	Ap
				206Pb/(%)	207Pb*/206Pb	208Pb*/206Pb	206Pb*/238U	208Pb*/232Th		
9.1	247	140	0.57	0.33	0.07636 ± 191	0.1669 ± 70	0.18146 ± 354	0.05342 ± 254	1105 ± 21	
10.1	320	135	0.42	0.03	0.15770 ± 128	0.1132 ± 19	0.42361 ± 748	0.11394 ± 297	2431 ± 14	
11.1	129	90	0.70	0.38	0.11839 ± 191	0.1889 ± 41	0.35321 ± 684	0.09532 ± 297	1932 ± 29	
12.1	1311	851	0.65	1.98	0.05788 ± 194	0.1904 ± 29	0.09630 ± 117	0.02826 ± 57	525 ± 75	
13.1	360	313	0.87	0.63	0.07414 ± 208	0.2524 ± 46	0.17221 ± 359	0.04990 ± 151	1045 ± 58	
14.1	206	175	0.85	0.46	0.08108 ± 275	0.2485 ± 51	0.19973 ± 383	0.05828 ± 172	1223 ± 68	
15.1	455	386	0.85	0.04	0.15761 ± 90	0.2311 ± 7	0.42586 ± 652	0.11590 ± 237	2430 ± 10	
16.1	186	132	0.71	0.00	0.08010 ± 178	0.2136 ± 69	0.20495 ± 529	0.06175 ± 273	1200 ± 44	
17.1	200	86	0.43	0.03	0.15394 ± 173	0.1208 ± 25	0.41151 ± 996	0.11493 ± 398	2390 ± 19	
18.1	1692	107	0.06	0.01	0.15639 ± 69	0.0171 ± 5	0.39560 ± 668	0.10740 ± 374	2417 ± 7	
19.1	547	701	1.28	0.10	0.05801 ± 108	0.3861 ± 81	0.09320 ± 139	0.02810 ± 74	530 ± 41	
20.1	642	403	0.63	0.02	0.26127 ± 81	0.1625 ± 13	0.60715 ± 771	0.15708 ± 253	3254 ± 5	
21.1	265	217	0.82	0.25	0.07539 ± 137	0.2337 ± 45	0.17977 ± 374	0.05133 ± 157	1079 ± 37	
22.1	24	0	0.02	2.29	-0.01056 ± 3927	-0.0030 ± 194	0.09574 ± 582	-0.01901 ± 12381	-	
22.2	145	2	0.01	-0.39	0.05476 ± 230	0.0149 ± 39	0.09999 ± 182	0.10343 ± 2793	403 ± 97	
23.1	772	248	0.32	-0.15	0.07341 ± 76	0.0986 ± 21	0.18229 ± 216	0.05597 ± 141	1025 ± 21	
24.1	1499	1189	0.79	5.37	0.06109 ± 233	0.2097 ± 37	0.10478 ± 234	0.02771 ± 133	642 ± 84	
25.1	1194	263	0.22	1.77	0.06640 ± 199	0.0763 ± 35	0.10890 ± 138	0.03771 ± 182	819 ± 64	
26.1	199	60	0.30	-0.14	0.07461 ± 175	0.0941 ± 43	0.19040 ± 655	0.05938 ± 359	1058 ± 48	
27.1	524	343	0.66	-0.28	0.07318 ± 65	0.2020 ± 32	0.18663 ± 479	0.05754 ± 202	1019 ± 18	
28.1	115	64	0.56	-0.01	0.14190 ± 133	0.1570 ± 32	0.38140 ± 1069	0.10668 ± 404	2251 ± 16	
29.1	368	141	0.38	0.05	0.05834 ± 119	0.1175 ± 33	0.09536 ± 129	0.02919 ± 92	542 ± 45	
30.1	335	152	0.45	0.32	0.07591 ± 145	0.1310 ± 46	0.17618 ± 978	0.05097 ± 386	1093 ± 39	

All the isotopic compositions were calculated by a combination of the  $^{207}\text{Pb}$  and  $^{204}\text{Pb}$  correction methods,  $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  ratios corrected

Table 2. (continued).

Grain.area	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Common					207Pb/206Pb
				206Pb(%)	207Pb*/206Pb	208Pb*/206Pb	206Pb*/238U	208Pb*/232Th	
31.1	283	86	0.30	0.07	0.05931 ± 148	0.0885 ± 40	0.09404v129	0.02746 ± 130	578 ± 55
32.1	79	35	0.44	0.27	0.07354 ± 230	0.1303 ± 60	0.16824 ± 343	0.04991 ± 257	1029 ± 64
33.1	145	135	0.93	0.02	0.05720 ± 205	0.2970 ± 74	0.09785 ± 183	0.03132 ± 100	499 ± 81
34.1	52	27	0.52	0.13	0.19649 ± 764	0.1417 ± 64	0.52584 ± 2155	0.14310 ± 918	2797 ± 65
35.1	57	47	0.82	0.36	0.10618 ± 231	0.2333 ± 66	0.31362 ± 772	0.08921 ± 353	1735 ± 40
36.1	490	214	0.44	0.41	0.06191 ± 136	0.1285 ± 39	0.09011 ± 132	0.02654 ± 90	671 ± 48
37.1	156	106	0.68	0.30	0.07595 ± 86	0.2067 ± 38	0.17572 ± 484	0.05341 ± 195	1094v23
38.1	254	439	1.73	0.02	0.14252 ± 127	0.4878 ± 32	0.41440 ± 578	0.11709 ± 193	2258 ± 16
39.1	288	558	1.94	0.74	0.07643 ± 96	0.5998 ± 73	0.16421 ± 323	0.05082 ± 128	1106 ± 25
40.1	195	137	0.70	0.28	0.07558 ± 198	0.2258 ± 55	0.17566 ± 356	0.05663 ± 188	1084 ± 53
40.2	180	114	0.63	0.23	0.08024 ± 264	0.2008 ± 69	0.15480 ± 425	0.04914 ± 232	1203 ± 66
41.1	258	267	1.04	0.53	0.07507 ± 137	0.3091 ± 71	0.16225 ± 390	0.04846 ± 171	1070 ± 37
42.1	131	97	0.74	0.32	0.07516 ± 187	0.2146 ± 59	0.18059 ± 307	0.05267 ± 176	1073 ± 51
43.1	191	68	0.36	-0.01	0.07477 ± 153	0.1064 ± 43	0.18490 ± 267	0.05530 ± 241	1062 ± 42
44.1	197	25	0.13	0.01	0.13845 ± 98	0.0354 ± 8	0.39956 ± 635	0.11122 ± 321	2208 ± 12
45.1	635	7	0.01	0.02	0.12628 ± 769	0.0030 ± 5	0.32106 ± 1582	0.08802 ± 1582	2047 ± 112
46.1	525	823	1.57	-0.09	0.07459 ± 102	0.4592 ± 49	0.18856 ± 315	0.05526 ± 122	1058 ± 28
46.2	137	53	0.39	-0.01	0.07328 ± 365	0.1236 ± 86	0.18137 ± 398	0.05752 ± 425	1022 ± 104
47.1	222	57	0.26	0.04	0.14350 ± 238	0.0736 ± 22	0.41673 ± 1169	0.11839 ± 544	2270 ± 29
48.1	207	157	0.76	0.35	0.08011 ± 164	0.2292 ± 54	0.19812 ± 537	0.05986 ± 231	1200 ± 41
49.1	899	984	1.09	-0.08	0.05844 ± 99	0.3391 ± 52	0.09571 ± 237	0.02965 ± 99	546 ± 37
50.1	62	30	0.49	0.03	0.19448 ± 186	0.1375 ± 24	0.51072 ± 1072	0.14292 ± 421	2780 ± 16
51.1	666	82	0.12	0.01	0.14529 ± 495	0.0362 ± 14	0.40294 ± 1467	0.11822 ± 649	2291 ± 60

All the isotopic compositions were calculated by a combination of the <sup>207</sup>Pb and <sup>204</sup>Pb correction methods, <sup>207</sup>Pb\*/<sup>206</sup>Pb\* ratios corrected



Table 2. (continued).

Grain.area	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Common					207Pb/206Pb	Ap
				206Pb(%)	207Pb*/206Pb	208Pb*/206Pb	206Pb*/238U	208Pb*/232Th		
52.1	86	84	0.98	-0.03	0.10948 ± 135	0.3011 ± 56	0.31765 ± 788	0.09796 ± 335	1791 ± 23	
53.1	298	101	0.34	0.03	0.14253 ± 409	0.1013 ± 49	0.43619 ± 1823	0.13019 ± 913	2258 ± 50	
54.1	827	148	0.18	0.11	0.12311 ± 102	0.0519 ± 12	0.23473 ± 389	0.06804 ± 197	2002 ± 15	
55.1	238	139	0.59	0.03	0.15650 ± 188	0.1659 ± 27	0.44557 ± 768	0.12625 ± 325	2418 ± 21	
56.1	304	74	0.24	0.03	0.26710 ± 610	0.0600 ± 11	0.58651 ± 2507	0.14483 ± 763	3289 ± 36	
57.1	78	43	0.55	0.10	0.11918 ± 280	0.1461 ± 32	0.31975 ± 1318	0.08567 ± 465	1944 ± 43	
58.1	374	80	0.21	0.06	0.14118 ± 88	0.0600 ± 15	0.36118 ± 613	0.10169 ± 317	2242 ± 11	
59.1	231	95	0.41	0.11	0.07599 ± 91	0.1153 ± 33	0.18555 ± 245	0.05180 ± 177	1095 ± 24	
60.1	531	45	0.08	0.01	0.14534 ± 56	0.0224 ± 4	0.40827 ± 578	0.10819 ± 268	2292 ± 7	
61.1	726	205	0.28	0.03	0.08093 ± 56	0.0840 ± 14	0.19886 ± 263	0.05901 ± 129	1220 ± 14	
62.1	161	149	0.92	0.02	0.13710 ± 185	0.2677 ± 26	0.38693 ± 781	0.1198 ± 278	2191 ± 24	
63.1	712	327	0.46	0.77	0.07585 ± 102	0.1229 ± 30	0.15490 ± 330	0.04152 ± 142	1091 ± 27	
64.1	97	71	0.73	0.03	0.28290 ± 290	0.1903 ± 25	0.67764 ± 1296	0.17564 ± 456	3379 ± 16	
65.1	103	83	0.81	0.38	0.07575 ± 250	0.2419 ± 55	0.17613 ± 388	0.05277 ± 178	1088 ± 68	
66.1	112	43	0.38	0.22	0.07358 ± 213	0.1064 ± 55	0.17288 ± 378	0.04813 ± 277	1030 ± 60	
67.1	855	79	0.09	0.28	0.07611 ± 70	0.0243 ± 17	0.18098 ± 226	0.04793 ± 343	1098 ± 19	
68.1	57	40	0.71	0.02	0.11219 ± 249	0.2098 ± 54	0.32381 ± 973	0.09625 ± 400	1835 ± 41	
68.2	307	183	0.60	25.04	0.06696 ± 1119	0.0225 ± 181	0.04548 ± 104	0.00172 ± 138	837 ± 393	
69.1	255	67	0.26	0.78	0.07968 ± 139	0.0635 ± 39	0.17406 ± 377	0.04208 ± 274	1189 ± 35	
70.1	155	108	0.70	0.16	0.07708 ± 176	0.1978 ± 71	0.18459 ± 382	0.05214 ± 223	1123 ± 46	
71.1	428	189	0.44	0.02	0.08177 ± 72	0.1317 ± 22	0.21484 ± 471	0.06399 ± 193	1240 ± 17	
72.1	488	208	0.43	0.10	0.07992 ± 94	0.1276 ± 31	0.19017 ± 283	0.05710 ± 170	1195 ± 23	
73.1	242	123	0.51	0.04	0.08170 ± 119	0.1574 ± 84	0.20306 ± 307	0.06289 ± 350	1238 ± 29	

All the isotopic compositions were calculated by a combination of the <sup>207</sup>Pb and <sup>204</sup>Pb correction methods, <sup>207</sup>Pb\*/<sup>206</sup>Pb\* ratios corrected

Table 2. (continued).

Grain.area	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Common						207Pb/206Pb
				206Pb(%)	207Pb*/206Pb	208Pb*/206Pb	206Pb*/238U	208Pb*/232Th	207Pb/206Pb	
74.1	510	25	0.05	0.88	0.15146 ± 193	0.0124 ± 21	0.32499 ± 528	0.08276 ± 1413	2362 ± 22	
75.1	588	93	0.16	0.51	0.07232 ± 100	0.0392 ± 24	0.15172 ± 372	0.03751 ± 252	995 ± 28	
76.1	118	56	0.48	0.17	0.10813 ± 119	0.1367 ± 37	0.31499 ± 806	0.09050 ± 363	1768 ± 20	
77.1	78	60	0.76	0.71	0.13502 ± 434	0.2291 ± 92	0.35975 ± 1054	0.10827 ± 553	2164 ± 57	
78.1	761	638	0.84	0.02	0.25809 ± 294	0.2229 ± 33	0.59326 ± 2329	0.15771 ± 792	3235 ± 18	
79.1	425	170	0.40	0.02	0.14708 ± 125	0.1199 ± 31	0.42310 ± 573	0.12669 ± 507	2312 ± 15	
80.1	240	959	4.00	14.44	0.11105 ± 1984	0.3912 ± 242	0.08308 ± 801	0.00813 ± 113	1817 ± 366	
81.1	1215	79	0.07	0.01	0.15195 ± 40	0.0154 ± 3	0.40697 ± 638	0.09617 ± 240	2368 ± 4	
Sample WT011										
1.1	181	203	1.12	0.13	0.10448 ± 110	0.33443 ± 603	0.28625 ± 457	0.08543 ± 215	1705 ± 19	
1.2	203	113	0.56	0.39	0.09627 ± 124	0.18524 ± 467	0.26995 ± 380	0.08993 ± 266	1553 ± 24	
2.1	98	133	1.35	0.38	0.07989 ± 255	0.40601 ± 890	0.20865 ± 505	0.06254 ± 216	1194 ± 64	
2.2	940	35	0.04	6.97	0.04662 ± 897	0.00531 ± 2953	0.14460 ± 783	0.02035 ± 11320	30 ± 540	
3.1	209	182	0.87	0.05	0.07732 ± 153	0.26490 ± 497	0.20419 ± 340	0.06223 ± 163	1130 ± 40	
4.1	79	91	1.15	0.12	0.16143 ± 321	0.31314 ± 971	0.50602 ± 1262	0.13819 ± 569	2471 ± 34	
5.1	219	79	0.36	0.03	0.07993 ± 176	0.10812 ± 488	0.22316 ± 477	0.06657 ± 340	1195 ± 44	
6.1	216	154	0.71	0.09	0.08040 ± 120	0.21105 ± 575	0.20084 ± 314	0.05948 ± 192	1207 ± 30	
6.2	369	248	0.67	-0.06	0.08214 ± 116	0.19111 ± 284	0.20655 ± 386	0.05868 ± 149	1249 ± 28	
7.1	368	214	0.58	0.19	0.07973 ± 127	0.16847 ± 394	0.20066 ± 336	0.05821 ± 175	1190 ± 32	
7.2	116	80	0.69	0.02	0.08192 ± 180	0.19992 ± 489	0.20263 ± 391	0.05855 ± 192	1244 ± 44	
7.3	227	278	1.22	0.21	0.07967 ± 98	0.37803 ± 534	0.19479 ± 398	0.06028 ± 163	1189 ± 25	
8.1	120	166	1.38	0.08	0.07730 ± 162	0.40605 ± 827	0.19236 ± 449	0.05666 ± 186	1129 ± 42	
9.1	568	236	0.42	0.07	0.10646 ± 123	0.10238 ± 156	0.27142 ± 365	0.06692 ± 141	1740 ± 21	

All the isotopic compositions were calculated by a combination of the  $^{207}\text{Pb}$  and  $^{204}\text{Pb}$  correction methods,  $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  ratios corrected

Table 2. (continued).

Grain.area	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Common					207Pb/206Pb	Ap
				206Pb(%)	207Pb*/206Pb	208Pb*/206Pb	206Pb*/238U	208Pb*/232Th		
10.1	77	114	1.47	0.05	0.08051 ± 320	0.43737 ± 1263	0.20403 ± 633	0.06053 ± 274	1210 ± 80	
10.2	68	75	1.11	0.40	0.07741 ± 380	0.30827 ± 1299	0.21544 ± 470	0.05984 ± 296	1132 ± 101	
11.1	153	126	0.82	0.06	0.09815 ± 171	0.22846 ± 681	0.28325 ± 769	0.07857 ± 341	1589 ± 33	
12.1	1139	650	0.57	0.02	0.08055 ± 72	0.16924 ± 144	0.21000 ± 304	0.06227 ± 114	1210 ± 18	
13.1	501	811	1.62	0.05	0.09352 ± 72	0.49384 ± 533	0.24737 ± 810	0.07542 ± 289	1498 ± 15	
13.2	179	72	0.40	1.12	0.07500 ± 163	0.14300 ± 540	0.13249 ± 307	0.04729 ± 219	1069 ± 44	
14.1	171	112	0.65	0.11	0.09687 ± 280	0.18843 ± 623	0.26744 ± 628	0.07713 ± 327	1565 ± 55	
14.2	219	109	0.50	-0.09	0.07494 ± 295	0.18835 ± 500	0.26994 ± 733	0.10155 ± 415	1067 ± 81	
15.1	576	175	0.30	0.17	0.07955 ± 690	0.08834 ± 204	0.19601 ± 307	0.05691 ± 166	1186 ± 17	
16.1	54	96	1.78	0.87	0.07933 ± 629	0.55307 ± 1988	0.19232 ± 807	0.05985 ± 352	1180 ± 165	
16.2	844	437	0.52	0.36	0.08047 ± 59	0.14801 ± 208	0.19340 ± 263	0.05531 ± 115	1209 ± 14	
Sample WT013A										
1.1	802	993	1.24	1.46	0.08396 ± 342	0.25229 ± 945	0.13533 ± 265	0.02757 ± 119	1292 ± 81	
2.1	576	108	0.19	0.85	0.07453 ± 494	0.05394 ± 440	0.17256 ± 318	0.04976 ± 420	1056 ± 140	
3.1	2542	282	0.11	0.50	0.05876 ± 145	0.03202 ± 196	0.08136 ± 106	0.2345 ± 148	558 ± 55	
4.1	1179	141	0.12	0.93	0.07018 ± 163	0.01836 ± 288	0.13696 ± 245	0.02106 ± 334	934 ± 49	
5.1	280	207	0.74	0.78	0.14458 ± 219	0.16001 ± 426	0.37294 ± 983	0.08084 ± 324	2283 ± 26	
6.1	322	447	1.39	0.65	0.08460 ± 474	0.42404 ± 1254	0.20698 ± 488	0.06314 ± 251	1306 ± 113	
7.1	207	138	0.67	2.17	0.07496 ± 720	0.19931 ± 1064	0.18759 ± 527	0.05593 ± 347	1067 ± 206	
8.1	83	23	0.27	2.38	0.09757 ± 1067	0.10645 ± 2506	0.13073 ± 1134	0.08970 ± 2172	1578 ± 220	
9.1	590	1005	1.70	0.94	0.07570 ± 263	0.50444 ± 533	0.17980 ± 421	0.05328 ± 150	1087 ± 71	
10.1	445	107	0.24	0.45	0.11157 ± 131	0.06907 ± 274	0.31803 ± 687	0.09113 ± 427	1825 ± 21	
11.1	519	86	0.17	0.44	0.10043 ± 173	0.04343 ± 260	0.28735 ± 684	0.07536 ± 497	1632 ± 32	

All the isotopic compositions were calculated by a combination of the  $^{207}\text{Pb}$  and  $^{204}\text{Pb}$  correction methods,  $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  ratios corrected

Table 2. (continued).

Grain.area	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Common					207Pb/206Pb	Ap
				206Pb(%)	207Pb*/206Pb	208Pb*/206Pb	206Pb*/238U	208Pb*/232Th		
12.1	233	77	0.33	3.63	0.06530 ± 867	0.09437 ± 913	0.11300 ± 287	0.03220 ± 325	784 ± 307	
13.1	260	353	1.36	3.91	0.06306 ± 693	0.43041 ± 1336	0.08061 ± 210	0.02558 ± 109	710 ± 253	
14.1	1202	470	0.39	1.85	0.07861 ± 194	0.09526 ± 390	0.14179 ± 223	0.03450 ± 154	1162 ± 50	
14.2	6016	864	0.14	8.02	0.06597 ± 438	-0.02574 ± 1336	0.03095 ± 56	-0.00555 ± 288	805 ± 146	
15.1	1401	235	0.17	0.82	0.07024 ± 136	0.05165 ± 288	0.14909 ± 197	0.04593 ± 267	935 ± 40	
16.1	34	66	1.92	5.79	0.09135 ± 1728	0.57556 ± 5716	0.20931 ± 2310	0.06267 ± 101	1454 ± 411	
17.1	1631	13	0.01	0.51	0.07284 ± 212	-0.00268 ± 525	0.15946 ± 349	-0.05304 ± 10402	1009 ± 60	
18.1	1726	259	0.15	1.24	0.05757 ± 171	0.03051 ± 351	0.05354 ± 67	0.01089 ± 126	513 ± 67	
19.1	1500	330	0.22	2.61	0.07178 ± 204	0.09505 ± 606	0.08148 ± 188	0.03514 ± 241	980 ± 59	
20.1	586	191	0.33	-0.15	0.07793 ± 109	0.10387 ± 320	0.20477 ± 355	0.06528 ± 239	1145 ± 28	
21.1	709	486	0.69	1.03	0.07452 ± 153	0.19813 ± 450	0.15598 ± 266	0.04505 ± 133	1056 ± 42	
22.1	913	77	0.08	1.20	0.07298 ± 191	0.00610 ± 499	0.17954 ± 294	0.01301 ± 1067	1013 ± 54	
23.1	882	237	0.27	0.06	0.07558 ± 96	0.08250 ± 265	0.18255 ± 241	0.05616 ± 198	1084 ± 26	
Sample WT008										
1.1	377	618	1.64	1.46	0.07360 ± 552	0.04416 ± 112	0.15542 ± 206	0.04416 ± 112	1030 ± 160	
1.2	218	394	1.80	0.71	0.07991 ± 210	0.04908 ± 106	0.17325 ± 270	0.04908 ± 106	1195 ± 53	
2.1	373	82	0.22	0.05	0.18682 ± 194	0.11755 ± 701	0.22350 ±	0.11755 ± 701	2714 ± 17	
2.2	803	177	0.22	0.55	0.12377 ± 325	0.07787 ± 819	0.11164 ± 83	0.07787 ± 819	2011 ± 47	
3.1	876	454	0.52	0.23	0.16557 ± 95	0.10070 ± 188	0.30555 ± 396	0.10070 ± 188	2513 ± 10	
4.1	203	332	1.64	0.06	0.14148 ± 226	0.11921 ± 325	0.42578 ± 743	0.11921 ± 325	2245 ± 28	
4.2	191	7	0.04	0.69	0.06008 ± 373	-0.01192 ± 1132	0.09906 ± 197	-0.01192 ± 1132	606 ± 140	
5.1	986	269	0.27	0.02	0.13962 ± 206	0.11543 ± 346	0.39851 ± 616	0.11543 ± 346	2222 ± 26	
6.1	1830	893	0.49	0.05	0.06013 ± 79	0.03022 ± 70	0.09970 ±	0.03022 ± 70	608 ± 29	

All the isotopic compositions were calculated by a combination of the <sup>207</sup>Pb and <sup>204</sup>Pb correction methods, <sup>207</sup>Pb\*/<sup>206</sup>Pb\* ratios corrected

Table 2. (continued).

Grain.area	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Common					207Pb/206Pb	Ap
				206Pb(%)	207Pb*/206Pb	208Pb*/206Pb	206Pb*/238U	208Pb*/232Th		
7.1	431	117	0.27	0.06	0.15667 ± 985	0.08715 ± 482	0.28302 ± 986	0.08715 ± 482	2420 ± 111	
7.2	1327	19	0.01	0.38	0.05902 ± 106	-0.02236 ± 1419	0.07772 ± 123	-0.02236 ± 1419	568 ± 40	
8.1	233	128	0.55	1.32	0.07178 ± 25	0.03647 ± 1419	0.11782 ± 383	0.03647 ± 244	980 ± 73	
8.2	262	284	1.09	0.06	0.07374 ± 99	0.05297 ± 106	0.17332 ± 249	0.05297 ± 106	1034 ± 27	
9.1	223	99	0.45	0.10	0.10558 ± 432	0.07658 ± 420	0.22417 ± 783	0.07658 ± 420	1724 ± 77	
9.2	607	33	0.05	0.49	0.09294 ± 817	0.01078 ± 1706	0.22871 ± 1209	0.1078 ± 1706	1487 ± 176	
10.1	120	106	0.88	0.27	0.07169 ± 205	0.05232 ± 188	0.17049 ± 325	0.05232 ± 188	977 ± 59	
10.2	777	272	0.35	2.63	0.06426 ± 194	0.00078 ± 55	0.05832 ± 207	0.00078 ± 55	750 ± 65	
11.1	679	363	0.53	2.29	0.07385 ± 221	0.04567 ± 131	0.13437 ± 189	0.04567 ± 131	1037 ± 62	

All the isotopic compositions were calculated by a combination of the  $^{207}\text{Pb}$  and  $^{204}\text{Pb}$  correction methods,  $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$  ratios corrected



## 제 4 절 연령 해석

호상 편마암 시료 WT001A에서 분석한 저어콘의 동위원소성분을 등시곡선(Concordia)상에 도시하였다(Fig. 25). 저어콘의 성분은 1.0–1.2 Ga와 500–700 Ma 사이에 집중되고, 한 점분석은 1.7 Ga에 해당하는 연령을 산출한다(Fig. 25a). 하지만 700–900 Ma과 1.2–1.6 Ga 사이에는 해당되는 점분석이 전무한 특징을 보인다. 500–700 Ma에 해당하는 연령들은 특정 성분을 중심으로 집중되어 있는 형태를 보이지 않고, 유사한 Th/U 비와 같은 지화학적 공통점을 발견할 수 없다. 따라서, 이 연령을 변성작용의 시기로 해석하기는 무리가 있다. 화강암 시료 WT001B에서 분석한 저어콘의 점분석 중 상속핵에 해당하는 부분만을 일치곡선상에 도시하였다(Fig. 25b). 화강암의 저어콘 상속핵의 연령분포는 호상 편마암 WT001A의 저어콘 연령 패턴과 매우 유사함을 알 수 있으며, 이 화강암의 기원이 호상 편마암과 같은 지각물질의 재용융 작용에 의한 것임을 추정할 수 있다. WT008 호상 편마암 시료에서 분석한 저어콘의 동위원소성분은 납 손실과 서로 다른 방사성기원 납의 혼합에 의해 불일치도가 높다(Table 2; Fig. 25c). 하지만 일부 일치도가 높은 점분석 성분들은 호상 편마암 시료 WT001A의 저어콘에서와 유사한 저어콘 연령 패턴을 나타낸다(Fig. 25a, c).

위의 두 가지 편마암에서 산출하는 저어콘의 우라늄-납 연령 분포는 규암 시료 WT009의 쇄설성 저어콘 연령에서 그대로 재현되고 있다(Fig. 25d). 이 규암 시료의 저어콘 점분석 동위원소성분은 600 Ma 젊은 연령, 0.9–1.2 Ga, 1.6 Ga 이상의 연령에서 네 가지 연령 인근에 도시된다. 이러한 쇄설성 저어콘의 우라늄-납 연령 분포를 통계적으로 이해하기 위하여 쇄설성 저어콘의 연령을 이용하여 밀도확률분포도를 작성하였다(Fig. 26a). 밀도확률분포도를 보면 가장 연령이 밀집해 있는 지점은 1.1 Ga부근으로 그린빌 연령에 해당하는 저어콘 결정들이다. 중간 연령이 579 Ma인 판아프리카-로스 조산대에 해당하는 연령이 그 다음을 차지하고, 남극 기반암에 해당하는 연령들의 분포를 볼 수 있다. 밀도확률분포도 상에서 나타나는 다른 큰 특징은 판아프리카-로스 연령과 그린빌 연령 사이와 그린빌 연령과 대륙 기반암 연령 사이에 연령 분포가 없는 영역이 존재하는 것이다.

장보고 기지 서쪽의 오케인 빙하(O'Kane glacier) 인근에서 산출하는 호상 편마암 시료 WT011과 압쇄화강암 시료 WT013A의 저어콘 우라늄-납 연령분포는 앞서 살펴본 호상 편마암과 규암의 패턴과는 차이를 보인다(Fig. 25). WT013A 시료의 저어콘 연령 분포는 약 2.5 Ga의 연령을 갖는 한 점을 제외하고는 쌍봉식의 특징을 갖는다(Fig. 25e).

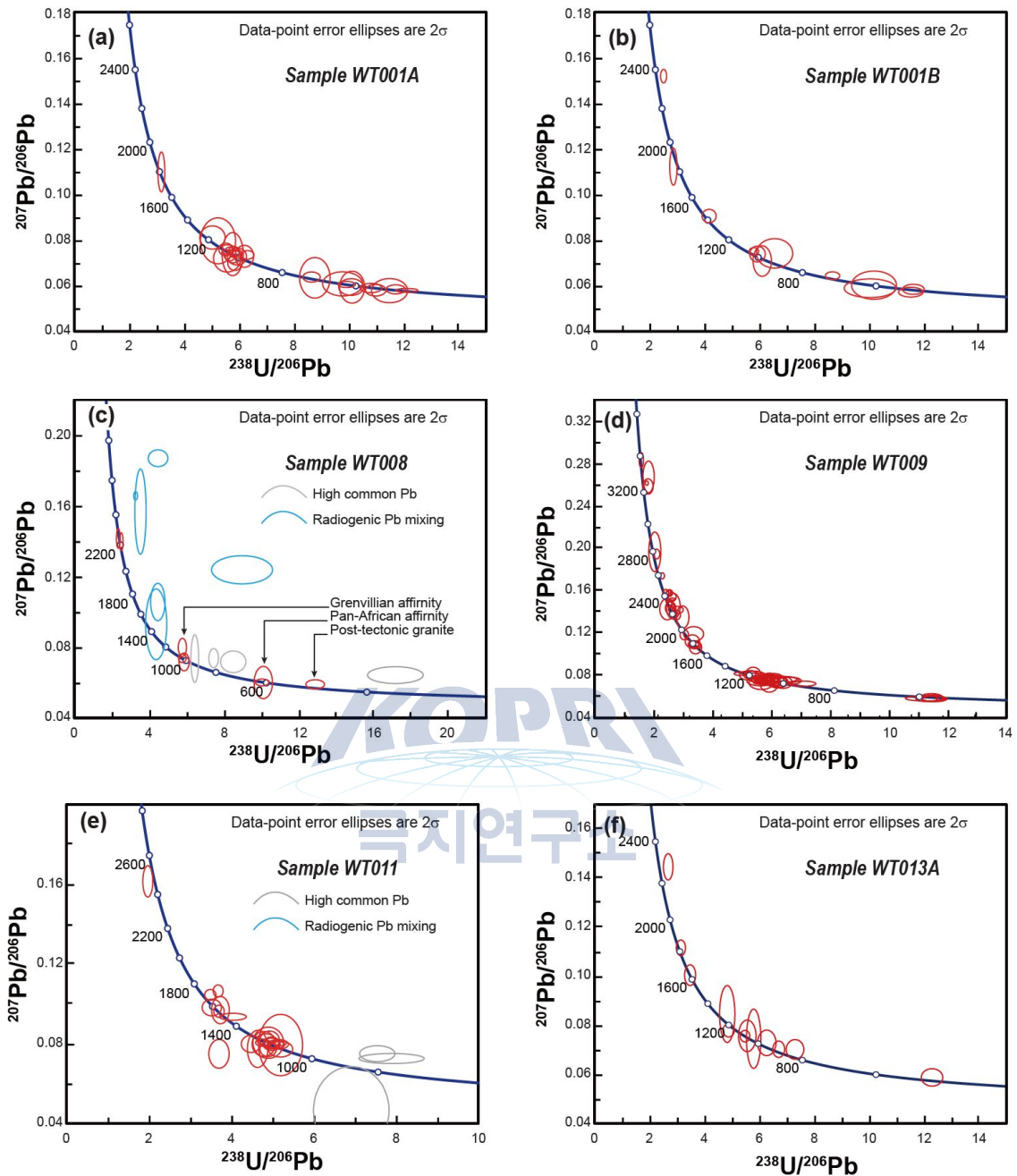


Fig. 25. 분석한 저어콘의 등시곡선 다이어그램

쌍봉식 분포는 1.2 Ga 부근에 가장 분포확률이 높고, 1.6 Ga 부근에도 높은 확률 분포를 나타내는 반면, 다른 호상 편마암과 규암 시료에서 분포확률이 높았던 500-700 Ma에 해당하는 저어콘 연령분포가 전무한 특징을 나타낸다. 또한, 규암 시료 WT009에서의 쇄설성 저어콘 연령과 비교해 보았을 때, 대륙 기반암에서 유래한 저어콘들의 확률분포가 매우 낮은 특징을 나타낸다. 따라서, 이와 같은 확률분포의 차이는 WT011시료의 모암이 다른 변성퇴적암들과 다르거나, 퇴적물의 공급 시기

혹은 공급지의 차이에 의한 것으로 해석할 수 있다. WT011시료와 비교적 인접한 지역에서 산출하는 압쇄화강암 시료 WT013A의 저어콘 분포도 이전 호상 편마암과 규암의 연령분포와는 다소 차이를 나타낸다. 이 시료의 저어콘들은 매우 높은 우라늄 함량과 보통 납 성분을 가지기 때문에 연령해석에 다소 어려움이 있다(Table 2). 비교적 일치도가 높은 점분석 성분만을 일치곡선상에 도시하였다(Fig. 25f). 저어콘 점분석 연령들은 주로 0.8-1.2 Ga 상에 흩어져서 분포하고, 세 점분석은 대륙 기반 암 연령을, 그리고 하나의 점분석(분석번호 3.1; 504 Ma)은 로스 조산운동의 연령을 나타낸다. 이 가장 젊은 연령이 압쇄화강암의 정치연령인지에 대해서도 보다 자세한 연구가 필요하다. 호상 화강암을 관입하고 있는 화강암 시료 WT001의 가장자리 과성장 띠에서부터 측정된 정치연령은  $483 \pm 5$  Ma ( $t_0$ )이다(Fig. 26b). 따라서, 주변의 변성퇴적암과 같이 변형받은 압쇄화강암의 정치시기는 483 Ma 이전이어야 한다. 하지만, 압쇄화강암에서 산출하는 모나자이트의 연령은 예비연구결과  $502 \pm 23$  ( $t_0$ )으로 압쇄화강암의 가장 젊은 저어콘 연령과 일치한다(Fig. 26c). 따라서, 이 연령은 변성작용의 시기로 해석할 수 있으나 이를 제한하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

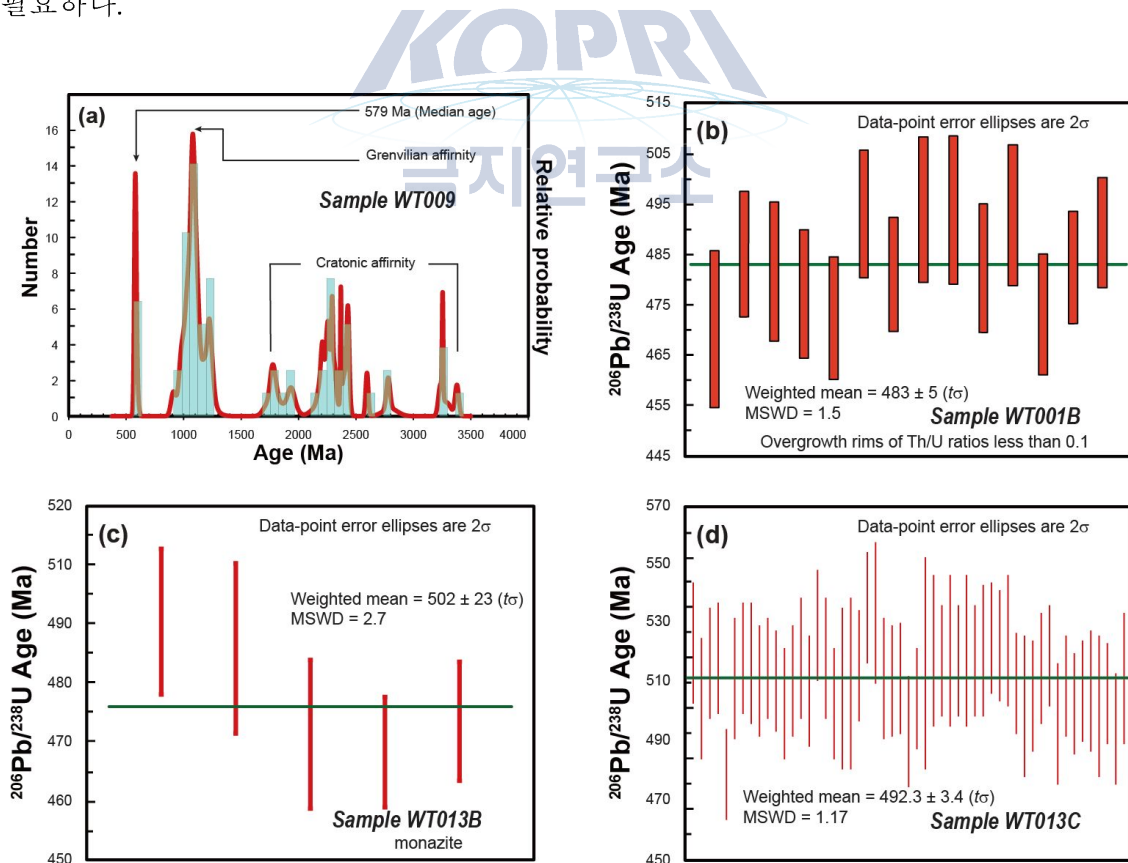


Fig. 26. 분석한 저어콘의 확률분포도 및 가중평균연령



지금까지 내용을 종합해 윌슨테레인을 구성하는 변성퇴적암의 모암을 만드는 과정이 동일한 기원지와 시기에 의한 것이 아닐 수 있다는 결론에 도달한다. 쇠철성 저어콘의 연령분포는 남극중단산맥의 퇴적암에서 분석한 분포와 동일한 분포를 나타내고 있다. 남극중단산맥에서 빅토리아랜드로 이어지는 지역에 그린빌 연령을 갖는 저어콘들을 공급할 수 있는 기원지는 아직 밝혀지고 있지 않다. 하지만, 이번 연구의 저어콘 연령의 밀도확률분포상에서 볼 수 있듯이 그린빌 연령에 해당하는 저어콘은 비중이 매우 높다. 따라서, 남극중단산맥-빅토리아랜드에 이르는 지역에서 그린빌 저어콘을 공급할 수 있는 기원지가 존재할 것으로 추정하고 있으며, 호상 편마암 WT011이 이에 해당할 가능성에 주목할 필요가 있다.

이 외에도 빅토리아랜드 윌슨테레인의 산출하는 다양한 화강암 중 운동 후(post-kinematic) 화강암의 관입시기는 약 483 Ma이며, 이보다 오래된 선캠브리아기의 화강암이 존재할 가능성도 존재한다. 호상 편마암과 규암의 저어콘 연령이 모두 쇠철성 저어콘 연령임을 가정하면 윌슨테레인의 주 변성시기는 약 5억년 전으로 해석할 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 중요한 역할을 할 수 있다. 이번 1차년도에는 쇄설성 저어콘의 연령 측정에 주안점을 두고 연구를 진행하였다. 야외 현장 지질조사를 통한 시료 확보 및 절대 연령 분석과 학회발표 등에서는 목표를 충분히 달성하였으나, 광물성분분석 및 전암분석에서는 일부 미흡한 측면이 있다. 남극 현장 조사 후 시료가 실험실에 도착하기까지 소모되는 시간과 이후 연구 종료까지의 기간이 촉박한 점을 고려한 연구계획의 재점검이 필요한 시점이다.

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 중요한 역할을 할 수 있다. 특히, 변성사 규명은 남극 대륙의 지체구조진화 해석에 있어 필수적인 요소이며, 곤드와나 초대륙의 형성과 분리 및 한반도의 형성과정의 이해에도 활용할 수 있다. 이번 1차년도 연구를 통해 빅토리아랜드 미노출지의 암석특성을 예측하는데 결과를 활용할 수 있다. 이는 5억년 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

- Claoué-Long, J.C., Compston, W., Roberts, J., and 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.
- Cumming, G.L. and Richards, J.R., 1975, Ore lead isotope ratios in a continuously changing earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 28, 155 - 171.
- Di Vincenzo, G., Palmeri, R., Talarico, F., Andriessen, P.A.M. and Ricci, C.A., 1997, Petrology and geochronology of eclogites from the Lanterman Range, Antarctica. *Journal of Petrology*, 38, 1391-1417.
- Fedo., C.M., Sircombe, K.N., and 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.
- Ferraccioli, F., Finn, C.A., Jordan, T.A., Bell, R.E., Anderson, L.M. and Damaske, D., East Antarctic rifting triggers uplift of the Gambursev Mountains. *Nature*, 479, 388-392.
- 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.
- Gibson, G.M., Morse, M.P., Ireland, T.R. and Nayak, G.K., 2011, Arc-continent collision and orogenesis in western Tasmania: insights from reactivated basement structures and formation of an ocean-continent transform boundary off western Tasmania. *Gondwana Research*, 19, 608-627.

- Goode, J.W., Myrow, P., Williams, I.S. and 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. and 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., 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. and 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. and 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.
- Gordard, G. and Palmeri, R., 2013, High-pressure metamorphism in Antarctica from the Proterozoic to the Cenozoic: A review and geodynamic implications. *Gondwana Research*, 23, B09103.
- 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.
- Kikuchi, M. and 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.
- 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*, v. 40, pp. 89–105.
- Ludwig, K.R., 2003, User's manual for Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for

- Mirosoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 47p.
- Myrow, P.M., Hughes, N.C., Goodge, J.W., Fanning, C.M., Williams, I.S., Peng, S., Bhargave, O.N., Parcha, S.K. and 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.
- Paces, J.B. and 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.
- 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. and 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. and 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., Ghmielowski, R., Sandroni, S., Talarico, F. and 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.
- 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.





#### 주 의

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