

BSPE17430-007-12

남극대륙에 기록된 지구진화 연구를
위한 기획 연구

Research planning for the study of Earth evolution
recorded in the Antarctic continent



한국해양과학기술원
부설극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극대륙에 기록된 지구진화 연구를 위한 기획 연구 (연구정책·지원 사업)”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2018년 3월 29일

연구책임자 : 우주선

참 여 연 구 원 : 홍종국, 이종익, 박태윤, 최문영, 이미정, 김대영
박창근, 진영근, 유인성, 백종민, 이주한, 박용철
정지웅, 서원상, 박상범, 오재룡, 강필모, 김지훈

보고서 초록

과제관리번호	PE17430	해당단계 연구기간	2017. 7. 1 - 2018. 3. 31 (9개월)	단계 구분	(1단계)
연구사업명	중 사업명	연구정책·지원사업			
	세부사업명	남극대륙에 기록된 지구진화 연구를 위한 기획 연구			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명				
연구책임자	우 주 선	해당단계 참여연구원수	총 : 18 명 내부 : 15 명 외부 : 3 명	해당단계 연구비	정부: 천원 기업: 천원 계: 75,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지지구시스템연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요 약					보고서 면수
232					
<p>남극종단산맥은 남극대륙을 가르는 총길이 3000 km의 산지로 남극대륙의 기반암 노출지 전체 면적의 70%를 차지하고 있다. 남극종단산맥에는 남극대륙을 형성한 다양한 지질현상의 기록이 남아있으며, 가장 강렬한 지질 현상인 활화산이 존재한다. 남극종단산맥이 남극빙원의 흐름을 막아 형성된 청빙지대에는 운석이 농집되어있다. 또한 로스해 해안에 인접한 곳에 발달하여 문명세계와의 접근성이 좋은 편이다.</p> <p>다양한 지질현상에 의해 형성된 암석과 광물, 그리고 운석은 지구의 형성과정과 남극의 과거환경을 밝히는데 활용되어왔다. 본 기획연구를 통해 남극종단산맥 탐사/연구를 통해 남극의 과거와, 현재를 이해하고자하며, 그 결과를 활용해 이를 통해 미래 남극대륙의 활용에 대비하고자한다. 남극의 과거와 현재에 대한 연구를 관통하는 축은 화산연구이다. 대륙이 충돌하여 남극대륙을 포함한 초대륙이 형성되고, 분리되어 지금과 같은 모습을 가지는 과정에 화산활동이 있었으며 그 기록들이 잘 남아있다. 또한 새로이 발견되고 있는 빙저화산에 대한 연구는 화산-빙권 상호작용과 그 환경영향을 파악하는데 중점을 두고 있다. 또한 운석과 지각물질을 이용한 지구 내부물질의 형성과 활동에 대한 연구는 화산활동의 기원이 되는 지구내부에 대한 연구로 연결된다.</p> <p>남극종단산맥 지질연구는 남극대륙에 분포하는 광물의 종류와 양을 파악하는데 가장 기초적인 자료가 된다. 과제를 통해 얻은 지질정보(암석시료, 암석분포, 거점 주변정보)와 원격탐사를 통한 광역 광물분포, 지질노두 3차원 모델 등을 종합적으로 관리하고 제공할 수 있는 지질정보 시스템 구축도 목표로 한다.</p> <p>남극대륙을 미래에 활용하고자 하는 전략적 움직임을 보이는 주요 선진국가는 남극대륙 지질자원에도 관심을 보이고 있다. 특히 장보고기지 인근에 새로운 기지가 건립될 경우 이에 대한 공격적인 투자가 예상된다. 어떤 연구보다도 지역기반의 연구를 수행해야하는 지질학의 특성상 이미 확보한 연구지역과 주제를 계속 확보하고, 수월성있는 연구결과가 예상되는 활화산/빙저화산 관련 연구지점도 선점할 필요가 있다. 남극종단산맥 지질연구에 대한 경제성 평가결과 일반인들의 남극대륙 지질연구에 대한 인식은 매우 높은 편이며, 비용대비 편익이 5이상으로 매우 높게 도출되었다.</p>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	남극대륙, 지질, 운석, 화산, 자원			
	영 어	Antarctica, Geology, Meteorites, Volcanoes, Resources			

요 약 문

I. 제 목

남극대륙에 기록된 지구진화 연구를 위한 기획연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 남극대륙 지질/운석 연구 마스터플랜 수립 및 활용방안 도출 기획
- 제3차 남극연구활동진흥기본계획(2017-2021) 기본전략 "대륙해안에서 내륙으로" 추진을 위한 새로운 연구과제 발굴 필요
- 극지연구소 연구부문 성과목표 "남극 내륙진출루트 개척과 대륙현장연구 체계 확립"과 연계된 대륙중심 연구과제 심화 필요
- 해수부 R&D 사업(2014-2018)을 통해 기확보한 빅토리아랜드 내륙 연구거점을 활용하여 지질 및 다학제 연구를 주도하기 위한 심화연구주제 선정
- 지구의 탄생과 진화, 남극대륙 형성과 분리 그리고 신생대 활화산 관측/연구 등 주요이슈 선점과 수월성 있는 연구를 위한 새로운 연구과제 도출 필요

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 선행 연구결과 분석 및 최신동향 파악
- 지질/운석 연구 선도를 위한 연구주제 발굴
- 국제공동 연구/탐사 전략 도출
- 경제성 분석

IV. 연구개발결과

- 남극대륙지질 연구 동향 및 신규과제 추진 전략 도출
- 남극대륙 지질연구 세부연구내용 계획 및 세부연구간 연계성 수립
- 국내외 연구기간사이의 공동연구 탐사 계획

V. 연구개발결과의 활용계획

- 2019년 신규 남극대륙 지질운석 사업 추진의 기초자료로 활용

SUMMARY

I. Title

Research planning for the study of Earth evolution recorded in the Antarctic continent

II. Purpose of Research and Development

- Elaborating master-plan and action-plan for geological researches in the Antarctic continent
- New research plan for fulfillment of basic strategy of “from the coastline to the inland Antarctica” (3rd Basic Planing of the Antarctic Research Activities, 2017-2021)
- Intensifying continent-based research in relation with the research outcome goal of KOPRI “Development of K-Route and Establishing Continent-Based Field Research System”
- Targeting research items out of those in ongoing R&D project (2014-2018) of Ministry of Oceans and Fisheries, Korea, in order to deepening intellectual merits
- Plans for pro-active research project with scientific excellency embracing birth and evolution of the earth, formation and break-up of super continents, Cenozoic (sub-glacial) volcanism

III. Contents and scope of research and development

- Analysis of outcome of the previous researches and other latest researches
- Developing research subjects to lead geological/meteoritical researches
- Plans for international cooperative research/expedition to the Antarctica
- Analysis for economical benefit derived from the outcome of the planned research

IV. Results of research and development

- Development of strategy for the new Antarctic geology/meteorite research project based on the state of art of the resaerch field
- Detailed plans for the specific research items and composing inter-relation among the items
- Building a framework for cooperation among national and international organizations

V. Application of the results from research and development

- Basic strategy paper for the new research project on the Antarctic geology/meteorite

남극대륙에 기록된 지구진화 연구를 위한 기획연구 보고서

제1장 남극대륙지질 연구 동향 및 신규과제 추진 전략

1. 서론	2
1.1. 남극대륙 연구 일반	2
1.2. 남극대륙 지하자원관련 동향	5
2. 장보고기지 기반 지질-운석 연구과제(2014-16)의 성과	10
2.1. 남극대륙 탐사시스템 구축	10
2.2. 남극빅토리아랜드 지질정보 수집과 지체구조 진화연구	11
2.3. 운석탐사 및 행성형성과정 연구	
2.4. 우주물질 및 지각물질 정밀분석기술	13
2.5. 종합	14
3. 주요 국가의 남극종단산맥 연구 현황	18
4. 남극 및 남극지질연구 관련 정책동향	20
4.1. 남극조약	20
4.2. 국내외 남극연구정책	25
4.3. 소결 및 기대효과	28
5. 신규연구과제 개발 전략	31
5.1. 남극대륙의 과거현재 미래를 아우르는 연구과제	31
5.2. 남극대륙의 과거	34
5.3. 남극대륙의 현재	35
5.4. 남극대륙의 미래	37
6. 연구개발추진체계	39
6.1. 국제협동연구 체계	39
6.2. 중장기 로드맵	40
7. 활용방안	41
8. 기대효과	41
9. 예산개요	42

제2장 세부 연구 내용

1. 남극의 과거

1.1. 거점확보	45
1.2. 지구 기원물질 연구	46
1.3. 극한환경 실험을 통한 지구내부 연구	56
1.4. 남극대륙 지체구조: 빅토리아랜드 기반암연구를 통한 남극대륙 형성 연구	68
1.5. 나이아가라 아이스폴(Niagara Icefalls) 지역의 전단대 연구	83
1.6. 북빅토리아랜드 염기성-초염기성 복합체를 통한 대륙지각의 형성과정 이해 ..	90
1.7. 남극 전기고생대 석회암 연구를 통한 생물초 진화사 규명	100
1.8. 중생대 화산암의 화산분출사 및 환경 복원	107

2. 남극대륙의 현재

2.1. 신생대 화산 지구화학연구	123
2.2. 빅토리아랜드 화산 관측	137
2.3. 멜버른 화산지대 화산 분화 특성 및 화산 물질 운반/퇴적 기작 연구	148

부 록 경제적 타당성 분석	154
----------------------	-----

KOPRI
극지연구소

제1장

남극대륙지질 연구 동향 및 신규과제 추진 전략



1. 서론

1.1. 남극대륙연구 일반

- 남극대륙은 남극조약 서명국들에 의해 기후변화대응, 미래자원확보 등 당면한 지구적 문제 해결을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있음
- 한편 남극 얼음 밑에 숨겨진 미지의 환경과 지질에 대한 순수한 지적 호기심을 기반으로한 연구도 선진국중심으로 수행중임
- 지금 남극에서 가장 영향력이 있고 각종 이슈에 대해 리더십을 발휘하고 큰 목소리를 내는 국가는 이와 같은 과학 활동, 특히 국제 공동연구, 을 활발하게 수행하거나 이를 지원하는 대규모 지원 시스템을 구축한 나라들임. 가히 과학활동만이 유일하게 남극에서의 발언권과 영향력을 확대하게 하는 수단이라 할 수 있음
- 과거 7개국(칠레, 아르헨티나, 영국, 노르웨이, 호주, 프랑스, 뉴질랜드)이 주장하던 남극대륙에 대한 영유권은 남극조약(1959)으로 유보된 상태임. 하지만 이들 국가들은 여전히 자신들의 영유권을 주장하는 지역에서 주로 활동하며 보이지 않게 존재감을 나타내고 있음



그림 1-1-1. (왼쪽) 남극조약서명국, 원으로 배열한 국기들 중 가장 안쪽의 12국가가 최초 서명국가임. (오른쪽) 남극영유권을 주장하는 7개 국가와 그 범위

- 위에서 언급한 당면한 지구적 문제 중 현재 관심이 집중되는 부분은 기후

변화대응이라고 할 수 있으며, 과거 기후변화에 따른 남극환경의 변화, 현재 기후변화가 남극 빙권에 끼치는 영향, 미래 빙권의 변화와 해수면 변동 예측을 위한 여러 국제협력 프로그램(ANDRILL, 각종 빙상시추 프로그램 등)이 진행 중

- 미래자원확보에 관한 연구는 두 가지 방향으로 이루어지고 있음. 먼저 비광물자원은 크릴, 메로 등이 한정적으로 개발되며 남극해양생물자원보존위원회(CCAMLR: Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources)에 의해 보존과 합리적 활용이 이루어지도록 관리되고 있으며, 회원국들의 남극 생태에 대한 과학적 조사가 관리의 기반이되는 데이터로 사용됨
- 해양과 육상의 탄화수소와 광물을 포함하는 남극 지하자원의 개발은 남극 환경보호의정서(1998-2048)로 전면 금지되어있으며, 기초과학연구(지질학)만 허용되고 있으며, 협정 이후 어떤 국가도 자원분포, 매장량 등을 파악하기 위한 연구를 노골적으로 수행하고 있지 않음
- 남극환경보호의정서 이전에 남극대륙의 자원에 가장 큰 관심을 가지고 조사를 수행한 국가는 미국임. 대규모 현장조사와 과거 자료 리뷰를 통해 남극해주변 석유자원, 남극대륙의 석탄, 남극대륙의 광물자원에 대한 보고서를 미국내무부 지질조사소 (US Geological Survey, Department of the Interior)에서 발간함
- 호주도 남극대륙의 석탄개발 가능성에 대한 보고서(1987년)를 발간한바 있음

남극대륙 자원에 대한 보고서 (출간순)

- Mineral Resources of Antarctica
(United States Geological Survey, 1974)
- Petroleum and Mineral Resources of Antarctica
(United States Geological Survey, 1983)
- Coal potential of Antarctica
(Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, Australia, 1987)
- Studies of the Geological and Mineral Resources of the Southern Antarctic Peninsula and Eastern Ellsworth Land, Antarctica
(United States Geological Survey, 1988)
- The Undiscovered Oil and Gas of Antarctica
(United States Geological Survey, 1991)
- Explanatory Notes for the Mineral-Resources Map of the Circum-Pacific Region Antarctic Sheet (United States Geological Survey, 1998)
- GIS Representation of Coal-Bearing Areas in Antarctica
(United States Geological Survey, 2016)

○ 이들 보고서는 남극해와 남극대륙 전역에 대한 기초조사와 과거 연결되어 있어 지질구조가 남극으로 연장되어 있으리라고 생각되는 남반구 주변 대륙들의 자원분포를 바탕으로 남극대륙의 자원분포를 파악하고자함



그림 1-1-2. 남극대륙과 주변대륙의 주요 자원 분포

- 하지만 모든 보고서에서 개발 가능성은 남극의 혹독한 환경과 인프라의 부족으로 당시에는 경제성이 없는 것으로 판단하고 있음

1.2. 남극대륙 지하자원관련 연구 동향

- 남극환경보호에 관한 의정서 이후 표면적으로 남극지하자원에 대한 조사를 실시하는 국가는 없지만, 일반지질학 및 개발 가능성을 포함한 특이한 광상의 보고 및 그 성인에 대한 기초 지질학적인 연구는 수행되고 있음

최근 발표된 남극대륙 특이광상에 대한 논문

- 다이아몬드: The discovery of kimberlites in Antarctica extends the vast Gondwanan Cretaceous province (Australia, Nature Communications, 2013)
- 금: The Dorn gold deposit in northern Victoria Land, Antarctica: Structure, hydrothermal alteration, and implications for the Gondwana Pacific margin (Italy, Gondwana Research, 2011)
- 붕소(prismatine): A treasure trove of mineral discovered in the Larsmann Hills (Australia, Australian Antarctic Magazine, 2007)

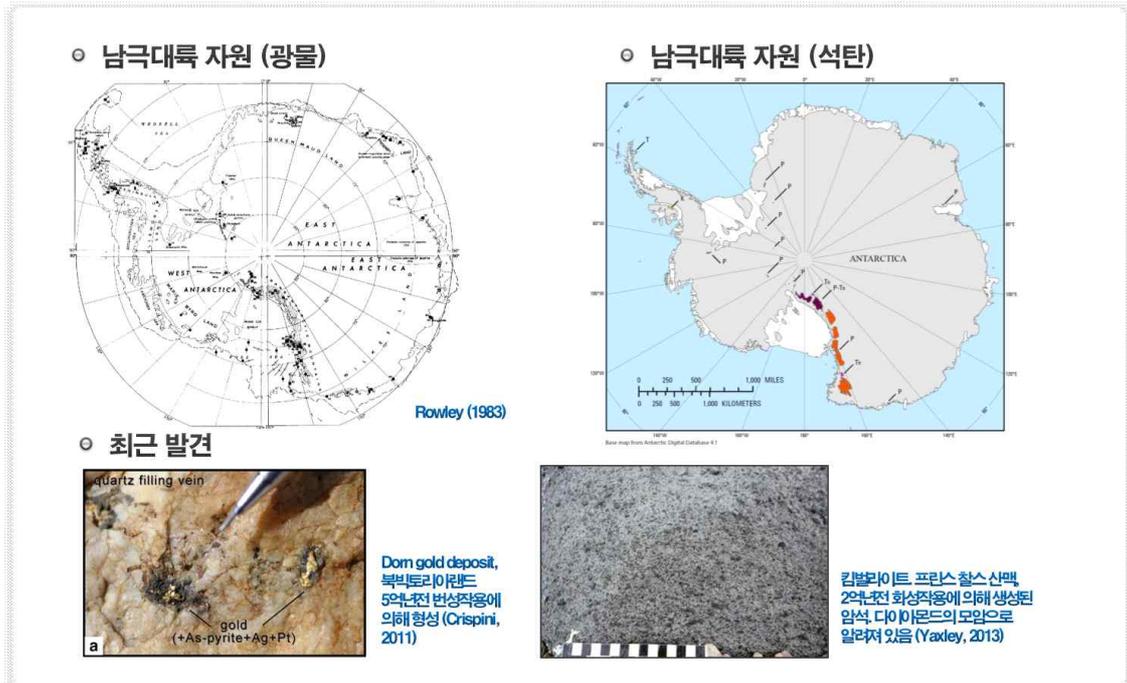


그림 1-1-3. (위쪽) 남극대륙자원관련 보고서를 종합한 광물자원 분포 및 석탄 분포. (아래쪽) 최근 발견된 금(빅토리아랜드)과 다이아몬드(동남극) 광상. 성인에 대한 과학적 연구가 출판됨

- 미국, 영국, 호주, 칠레 등 전통적인 남극연구 중심국가가 남극기지를 기반으로 조사 및 연구를 수행하고 있는 가운데 최근에는 중국의 부상이 눈에 띈다
- 2014년 장보고기지 남쪽 인익스프레서블 섬에 제 5기지 건설계획 발표함. 중국은 남극반도, 동남극, 남극고원, 남극내륙에 이어 남극종단산맥에 진출하게 됨으로 남극 전역에 거점을 확보. 이를 기반으로 독자적인 항공망 구축, 중국판 GPS시스템인 Bei Dou 위성 관제 시스템 구축 등 남극을 전략적으로 활용하기 위한 공격적인 투자를 시작함

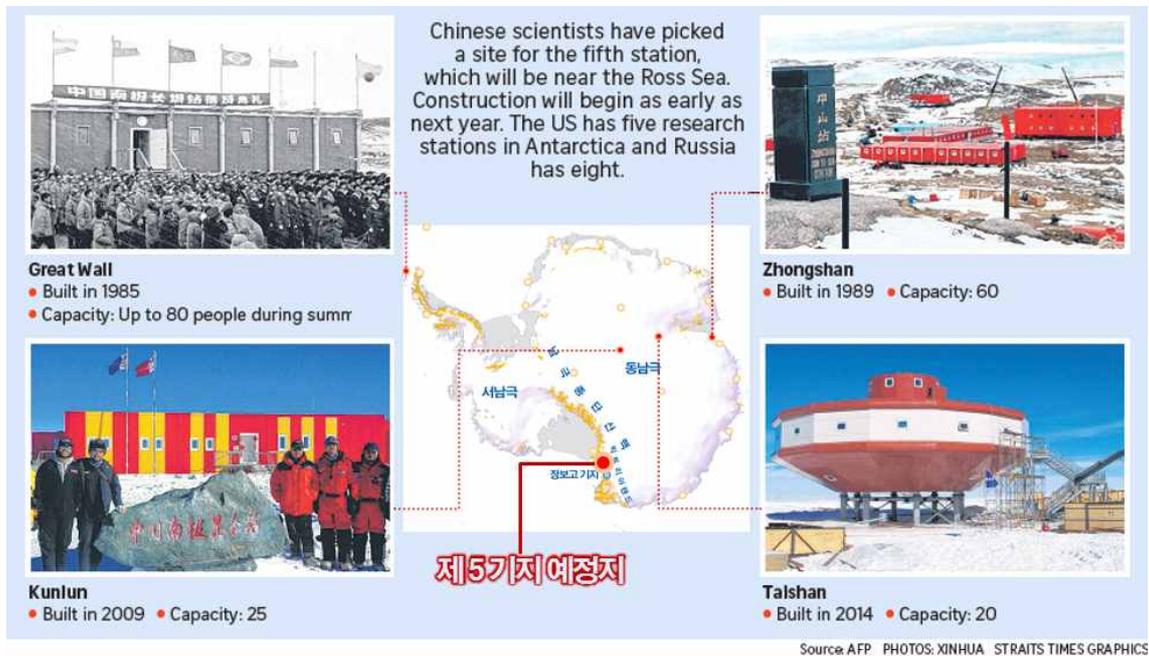


그림 1-1-4. 남극에 설치된 남극기지 위치와, 빅토리아랜드에 지어질 제5기지 예정지



그림 1-1-5. (왼쪽) 중국 제5기지의 위치. 장보고기지에서 남쪽으로 20 km 지점임. (오른쪽) 2017-18 남극하계에 진행된 중국의 남극기지 건설을 보도한 신화통신 사진

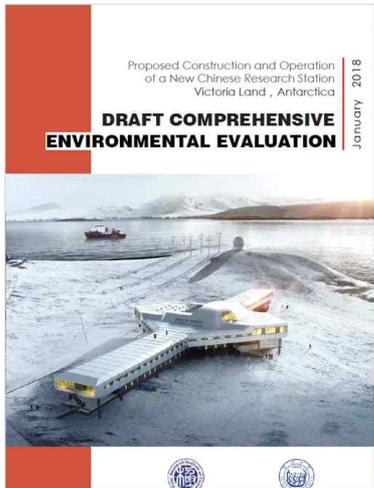
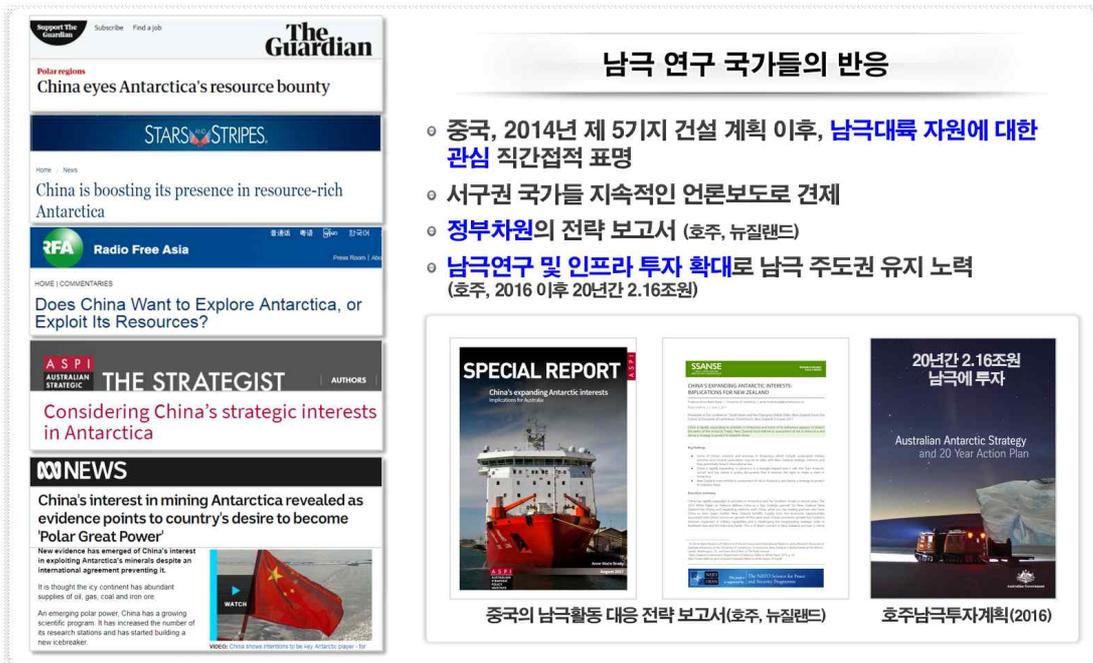


Table 1-1 A list of main research fields of new Chinese station on the Victoria Land, Antarctica

Subject	Content	Equipment	Region	Significance	How to connect with studies of other stations
Physical Oceanography	Observation of polynya	The research vessel, moorings, etc.	Terra Nova Bay	The Terra Nova Bay Polynya keeps open in winter and produces denser shelf water that is an important source of the Antarctic Bottom Water. Additionally, the polynya has essential influences on the local ocean-atmosphere exchange and the marine ecosystem in this region.	Most previous research of polynya was based on remote sensing data and <i>in situ</i> observations in summer. As a supplement, moorings will be deployed in the polynya by Chinese expeditions to collect hydrographic data in winter to deepen the understanding of processes in polynya and their contributions to modification of shelf water.
	Interaction between glacier tongue and ocean	The research vessel, CTD/LADCP, turbulence profiler, etc.	Drygalski Glacier Tongue and its surrounding sea waters	Although the Drygalski Glacier Tongue has been monitored and studied for decades, the interaction between the glacier tongue and its surrounding sea waters are still limited.	Measurements will be conducted in the ocean area surrounding the Drygalski Glacier Tongue. These data, as a supplement of remote sensing data, will be used to analyze the stability of the ice tongue and interactions between the ice tongue and the surrounding ocean, sea ice and icebergs.
	Observation in the outflow region of Ross Sea	The research vessel, CTD/LADCP, moorings, etc.	The northwest shelf region, including the Terra Nova Bay, Drygalski Basin, Nordenskjöld Basin, Czary Bank and Blarvorn Bank.	The major circulation in the Ross Sea is a clockwise gyre, the Ross Gyre. The ocean area near the new Chinese Station is the outflow region of the Ross Sea. The surface current in the region of Terra Nova Bay is prevalent northwest (Comandari and Pietroni, 1999; Flocco et al., 2003). However, the circulation patterns in the deeper layer and remote region are more complex. Studying the circulation in this region will help further understanding of the contributions of the Antarctic Ocean to the global ocean circulation.	A comprehensive observation and study have been conducted on the shelf slope exchange in the Ross Sea recently (Goudeau et al., 2009). The oceanographic survey on the shelf is still limited.
Geology	1) Accretionary orogenesis of the Pacific margin of Gondwana. 2) Tectonic and lithospheric structures of Pacific margin of Gondwana. 3) Comparative study of extension-type and collision-type ultrahigh-pressure metamorphism.	Broadband seismograph	Northern Victoria Land with an area of 400 × 500 km ²	The research program will reveal the structural style of Paleozoic Pacific margin of Gondwana and mechanism of subduction and exhumation of oceanic-type ultrahigh-pressure metamorphic rocks, and provide information for the tectonic model of the oceanic subduction zone.	With the support of Italian and German stations, basic geological investigations on (1) regional geology, Paleozoic metamorphic and igneous rocks, and (2) Mesozoic volcanic and strata have been done in Northern Victoria Land. On that basis, we will focus on the accretionary orogenesis of Paleozoic continental margin through combined observations of geology and seismology and study

그림 1-1-6. 2018년 2월 COMNAP 중국제5기지의 CEE. 주요연구 과제를 정리한 표. 지체구조를 포함한 지질연구가 계획되어있음

- 특히 2014년 제5기지 건설천명 이후에 국내적으로 남극대륙 지하자원에 대해서도 노골적인 관심을 보이고 있으며, 이를 견제하는 서구언론의 보도가 최근까지 지속적으로 이루어짐
- 2014년 11월에는 시진핑의 호주 방문시, 호바트를 방문하여 남극항해를 떠나는 설룡호를 격려방문하였고, 이때 시진핑은 “극지강국(極地強國)”이라는 표현을 사용했는데, 이를 호주 언론은 “China as a Polar Great Power”라고 번역하며, 견제차원에서 많은 관심을 보임
- 이에 대한 반응으로 뉴질랜드, 호주 등은 중국의 남극에 대한 전략적 접근을 분석하는 보고서를 발간한바 있음. 이들 보고서에서는 중국이 남극지원을 위해 인민해방군 자원(인력, 장비)를 일부 사용하는 것, 지하자원에 대한 노골적인 접근, 동남극 에머리빙봉에서 곤륜기지에 이르는 지역에 대한 영유권 관심에 대한 문제제기를 하고 이에 대응하기 위한 관련국들의 전략이 필요함을 역설
- 호주는 2016년 발표한 남극연구, 인프라 투자전략에서 20년간 2조원 이상의 투자를 결정하면서 남극대륙에서의 주도권과 존재감을 유지하려는 모습을 보임



남극 연구 국가들의 반응

- 중국, 2014년 제 5기지 건설 계획 이후, 남극대륙 자원에 대한 관심 직간접적 표명
- 서구권 국가들 지속적인 언론보도로 견제
- 정부차원의 전략 보고서 (호주, 뉴질랜드)
- 남극연구 및 인프라 투자 확대로 남극 주도권 유지 노력 (호주, 2016 이후 20년간 2.16조원)



중국의 남극활동 대응 전략 보고서(호주, 뉴질랜드)



호주남극투자계획(2016)

그림 1-1-7. 남극에서의 중국영향력 확대 및 중국의 남극 지하자원을 개발할지 모른다는 우려를 나타내는 언론 보도와, 이에 대한 주요 남극활동국들의 전략 보고서

- 현재 중국기지가 위치한 남극 반도와 동남극은 인근지역의 암석노출지가 제한적이어서 광역적인 지질연구는 어렵지만, 남극대륙에서 가장 넓은 암석노출지인 남극종단산맥에 대한 접근성이 좋은 제5기지를 기반으로 본격적인 광물자원에 대한 조사와 연구를 수행할 것으로 예상됨
- 중국 제5기지의 CEE에 제시된 기지기반 연구내용에는 남극종단산맥의 기반암의 지질학적 연구가 주요 주제로 나타나있음. 지질학적 연구부분에 있어 우리나라가 수행하고 있는 부분과 많은 부분 중복될 것으로 예상되나 이에 대한 협의 논의는 이루어지지 않고 있음
- 지역을 기반으로하는 지질연구의 경우 연구 장소와 거점을 먼저 선점하는 것이 연구 주도권을 확보하는 데에 매우 중요하므로, 중국이 기지를 완공하는 2022년까지 우리나라의 보다 공격적인 지질학 연구가 필요할 것으로 생각됨
- 중국, 인도 등 신흥 남극연구국들의 남극대륙 지질연구에 대해 우리나라가 대응하기위한 정책적 준비는, 제3차 남극연구활동진흥기본계획(2017-2022), 제4차 과학기술기본계획(2018-2022)을 통해 근거가 마련되

어있는 편이므로 이를 실천할 구체적인 전략과 과학적 연구 과제 도출로 남극대륙지질연구의 지속적 수행 및 지질학을 비롯한 다양한 연구분야의 활동영역확대 필요

○ 제4차 과학기술기본계획 (2018-2022):
**중점과학기술120, 해양·극한지-극한공간
인프라기술**

○ 제5차 해외자원개발기본계획 (2013-2022):
**핵심자원협력국가 중 극지 포함, 자원고갈을
극복하기 위해 비전통자원 개발과 더불어
극지 진출 추진**

○ 제3차 남극연구활동진흥기본계획:

비전	인류공동의 현안해결에 기여하는 남극연구 선도국
목표	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 기후변화, 생태계 보존 등 글로벌 이슈에 대응 ◆ 안전하고 지속가능한 남극연구활동 지원기반 구축·운영 ◆ 남극 과학연구 및 거버넌스에서 우리나라의 리더십 제고

○ 세종기지 준공 30주년 대통령 기념사



**“남극연구는 기후변화, 미래자원개발과 같은
인류과제를 해결” 하는 역할**

전략	추진 과제
남극연구 지평확대	<ul style="list-style-type: none"> ① 남극연구를 통한 글로벌 환경변화의 예측·대응 ② 남극 내륙진출과 미지·미답의 연구영역 개척 ③ 실용화·상용화 및 4차 산업혁명에 대응한 융·복합 연구 추진
	<ul style="list-style-type: none"> ④ 남극활동 안전시스템 및 연구인프라 고도화 ⑤ 남극연구 진흥을 위한 인적역량 강화 및 국민지원 확대
	<ul style="list-style-type: none"> ⑥ 남극 과학연구 분야의 국제협력을 통한 파트너십 강화 ⑦ 남극 환경보호 및 연구영역의제 발굴·선도

그림 1-1-8. 우리나라의 남극대륙 지질연구에 대한 정책적 기반

극지연구소

2. 장보고기지 기반 지질-운석 연구과제(2014-2016)의 성과

- 극지연구소는 2014년 장보고기지 완공 이후 해수부 연구개발사업 “남극 빅토리아랜드 지역 지각진화 및 행성형성과정연구”를 수행하고 있음
- 연구과제는 4개의 세부주제 (1) 남극대륙 탐사 시스템 구축, (2) 남극 빅토리아랜드 지질정보 수집과 지체구조 진화연구, (3) 운석탐사 및 행성형성과정 연구, (4) 우주물질 및 지각물질 정밀분석기술 개발을 통해 남극대륙 탐사 기반을 구축하고 남극대륙 빅토리아랜드의 지각진화 및 행성형성과정 규명을 목표로 수행되고 있음
- 각 연구 목표별 주요 성과는 다음과 같이 정리될 수 있음

2.1. 남극대륙 탐사시스템 구축

- 남극대륙 탐사시스템 구축의 일환으로, 장보고기지를 중심으로한 빅토리아랜드 4대 거점캠프를 확보하고 거점의 안전, 지원체계에 대한 정보를 획득하였으며, 지질-운석 탐사 수행
- 이를 통해 빅토리아랜드 전역에 대한 현장활동을 수행할 수 있는 능력을 확보하며 거점별로 탐사정보지도를 발간함



그림 1-2-1. 해수부 연구개발사업 수행으로 확보한 3개의 남극대륙 거점 (NVL1, NVL2, SVL1)과 이에 대한 정보를 종합해 발간한 남극탐사정보지도

2.2. 남극빅토리아랜드 지질정보 수집과 지체구조 진화연구

- 남극빅토리아랜드 지질정보 수집과 지체구조 진화연구의 일환으로 5억년전 로스 조산운동과 관련된 빅토리아랜드 기반암의 형성과 변성작용, 조산운동대 주변의 분지진화, 목재 화석을 이용한 2억년전 중생대 남극환경 연구, 신생대와 현재 남극화산활동에 대한 연구를 수행
- 특히 가스분출 탐사를 통해 멜버른화산의 활동을 15년만에 관측하였으며, 남극전역 얼음 코어에 나타나는 1254년 화산재층의 기원화산이 리트만 화산임을 규명하여, 남극화산 연구를 통해 중요한 결과를 도출할 수 있는 기반을 구축함
- 기초지질정보의 일환으로 광상에대한 별도의 조사와, 타 지질연구분야의 시료 협조를 통해 빅토리아랜드 전역의 광물 분포와 특성을 파악하고 이를 한눈에 보여주는 광물 핸드북을 2019년도 발간예정



그림 1-2-2. 지질관련 연구 주요 성과. 멜버른산의 화산활동이 새로 시작됨을 관측하였으며, 남극전역에서 나타나는 1254 화산재층의 기원지를 밝힘. 빅토리아랜드 광물핸드북 발간(예정)

- 장보고기지 주변지역 지질조사를 통해 장보고기지 주변 정밀 지질도를 최초로 발간하여, 남쪽의 이태리 기지 주변 지질도와 연결되는 정밀지질도 완성

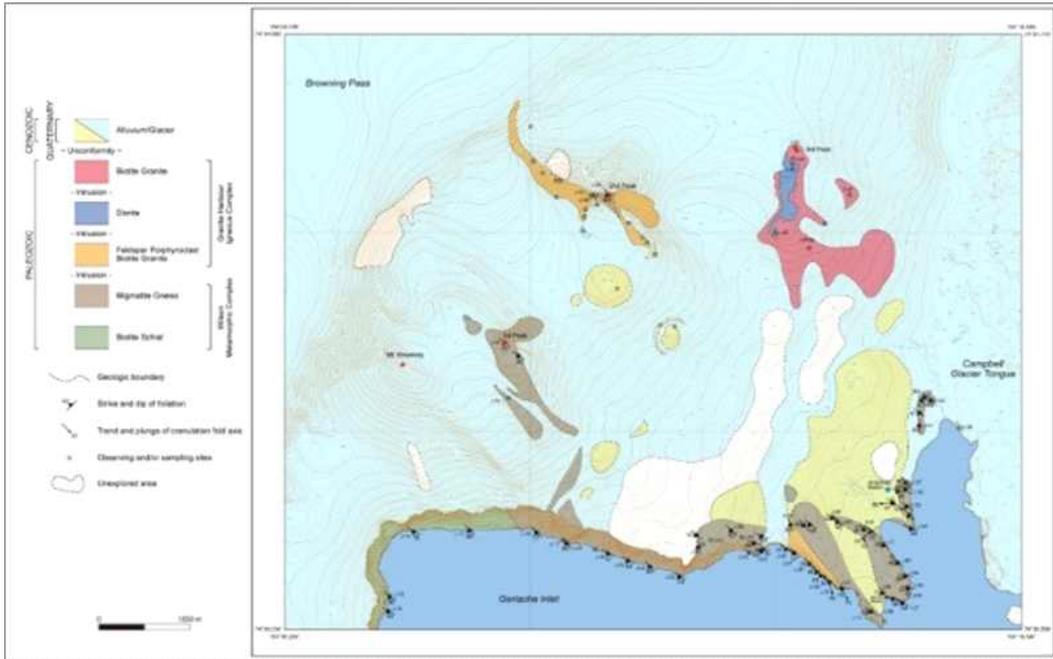


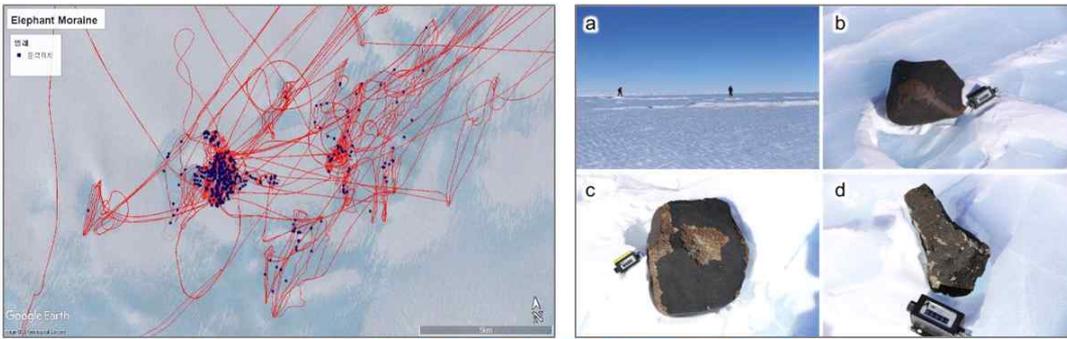
그림 1-2-3. 장보고기지 주변 정밀지질도.

극지연구소

2.3. 운석탐사 및 행성형성과정 연구

- 운석탐사 및 행성형성과정 연구의 일환으로 지속적인 운석탐사와 청정눈시료 회수를 실시해 1000개 이상의 다종 다량의 운석과 우주물질을 확보하였으며, 운석의 암석학적 연구, 동위원소 분석, 열역사 규명을 통해 태양계 초기물질의 특성과 소행성과 행성 형성과정을 규명함

○ 운석탐사



빅토리아랜드 청빙지대의 체계적인 탐사로 달운석을 포함한 1000여개의 운석 회수

그림 1-2-4. (좌) 과제수행을 통해 확보한 신규 청빙지대의 체계적인 탐사수행을 보여주는 GPS트랙. (우) 탐사 모습 및 회수한 주요 운석들. 현재 1000개 이상을 운석을 보유함

2.4. 우주물질 및 지각물질 정밀분석기술

- 우주물질 및 지각물질 정밀분석기술은 ICP-MS, 산소동위원소 분석장비, 불활성기체 분석장치, FE-SEM 등 첨단 분석장비를 도입하고 이를 활용한 분석기술을 개발하여 희소성있는 남극 시료 및 운석시료에 대한 극미량 정밀 분석기술을 확보함



LA-ICP-MS, MAT 253 plus, 불활성기체동위원소 산소동위원소 추출라인

그림 1-2-5. 과제수행을 통해 구축한 정밀 분석장비. (왼쪽 위부터 시계방향으로) LA-ICP-MS, MAT 253 plus, 산소동위원소 추출라인, 불활성기체동위원소분석기,

2.5. 종합

- 2014년부터 수행한 연구과제를 통해 남극대륙에서 활동할 수 있는 거점을 확보하여 현장조사기반을 구축했으며, 획득한 시료들의 정밀조사가 가능한 첨단 분석기술과 인력을 확보하였음
- 이를 바탕으로 2018년 4월 현재 지각진화분화 연구논문 20편, 행성형성과정 연구논문 9편, 분석기술 연구논문 8편을 출판함

구분	논문명	게재지	게재연도	비고
1	Oxygen isotopic fractionation of O ₂ during adsorption and desorption processes using molecular sieve at low temperature	Rapid Commun. Mass Spectrom (28, 1321-1328)	2014	SCI
2	Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization	SCIENCE (342, 6162-6169)	2013	NSC
3	Chemical and physical weathering in south Patagonian rivers: A combined Sr-U-Be	Geochim. Cosmochim. Acta	2013	SCI

	isotope approach	(101, 173-190)		
4	Melt inclusions in olivine and plagioclase phenocrysts from Antarctic-Phoenix Ridge basalts: Implications for origins of N- and E-type MORB parent magmas	J. Volcanol. Geotherm. Res. (253, 1, 75-86)	2013	SCI
6	남극 북빅토리아랜드의 지사와 층서	지질학회지 (49, 165-179))	2013	학진등재
7	Oxygen Isotopic Ratios for Ultramafic Xenoliths from the Korean Peninsula	한국지구과학회지 (34, 28-40)	2013	학진등재
8	Geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on the petrogenesis of Cenozoic lavas from the Pali Aike and Morro Chico area (52°S), southern Patagonia, South America	ISLAND ARC (21, 327-350)	2012	SCI
11	(U-Th)/He ages of phosphates from Zagami and ALHA77005 martian meteorites: Implications to shock temperatures	Geochimica et Cosmochimica Acta	2015	SCI
12	Calcium-aluminum-rich inclusions with fractionation and unidentified nuclear effects (FUN CAIs): II. Heterogeneities of magnesium isotopes and ²⁶ Al in the early solar system inferred from in situ high-precision magnesium-isotopic measurements	Geochimica et Cosmochimica Acta	2015	SCI
13	Recovery of pristine micrometeorites from Antarctic snow field at central Victoria Land	Planetary and Space Science	2015	SCI
14	Triassic <i>Kykloxylon</i> wood (Corystospermaceae, Gymnospermopsida) from Skinner Ridge (northern Victoria Land, East Antarctica)	Review of Palaeobotany and Palynology	2015	SCI
15	Complete genome sequence of <i>Psychrobacter alimentarius</i> PAMC 27889 isolated from Antarctic rock	Journal of Biotechnology	2015	SCI
16	(U-Th)/He ages of phosphates from Zagami and ALHA77005 Martian meteorites: Implications to shock temperatures	Geochimica et Cosmochimica Acta	2017-01-01	SCI
17	Mn-Cr ages and formation conditions of fayalite in CV3 carbonaceous chondrites: Constraints on the accretion ages of chondritic asteroids	Geochimica et Cosmochimica Acta	2017-02-15	SCI
18	Calcium-aluminum-rich inclusions with fractionation and unidentified nuclear effects (FUN CAIs): II. Heterogeneities of magnesium isotopes and ²⁶ Al in the early Solar System inferred from in situ high-precision magnesium-isotope measurements	Geochimica et Cosmochimica Acta	2017-03-15	SCI

19	A multielement isotopic study of refractory FUN and F CAIs: Mass-dependent and mass-independent isotope effects	Geochimica et Cosmochimica Acta	2017-04-18 (게재승인일)	SCI
20	Triassic Kykloxyton wood (umkomaslacaeae, Gymnospermopsida) from Skinner Ridge, northern Victoria Land, East Antarctica	Review of Palaeobotany and Palynology	2016-10-01	SCI
21	Complete genome sequence of <i>Psychrobacter alimentarius</i> PAMC 27889, a psychrophile isolated from an Antarctic rock sample	Genome Announcement	2016-07-01	비SCI
22	Complete genome sequence of <i>Cryobacterium arcticum</i> strain PAMC 27867, isolated from a sedimentary rock sample in Northern Victoria Land, Antarctica	Genome Announcement	2016-09-01	비SCI
23	Niche specialization of Bacteria in permanently ice-covered lakes of the McMurdo Dry Valleys, Antarctica	Environmental Microbiology	2017-03-02 (게재승인일)	SCI
24	Ontogeny of the Furongian (late Cambrian) trilobite <i>Proceratopyge</i> cf. <i>P. Lata Whitehouse</i> from northern Victoria Land, Antarctica, and the evolution of metamorphosis in trilobites	Paleontology (PM15030)	2016-09-30	SCI
25	Redistribution of Sr and rare earth elements in the matrices of CV3 carbonaceous chondrites during aqueous alteration in their parent body	Earth, Planets and Space	2018-03-12	SCI (2.243)
26	Groundwater oxygen isotope anomaly before the M6.6 Tottori earthquake in Southwest Japan	Scientific Reports	2018-03-19	SCI (4.259)
27	Sedimentary breccia and diamictite in the Cambrian Spurs Formation (Mariner Group), northern Victoria Land, Antarctica: two kinds of debris flows in a submarine channel system	Antarctic Science	2018.03.01	SCI (1.461)
28	Upper Paleozoic glacial deposits of Gondwana: Stratigraphy and paleoenvironmental significance of a tillite succession in Northern Victoria Land (Antarctica)	Sedimentary Geology	2017.08.01	SCI (2.373)
29	Multiple oxygen (¹⁶ O, ¹⁷ O and ¹⁸ O) and sulfur (³² S, ³³ S, ³⁴ S and ³⁶ S) isotope signatures of the dissolved sulfate from Deception Island, Antarctic Peninsula: Implications on sulfate formation, transportation and deposition in the Antarctic region	Chemical Geology	2017-09-05	SCI (3.347)
30	Latest Cambrian-earliest Ordovician	Palaeoworld	2018.03	비SCI

	conodonts and microbrachiopods from northern Victoria Land, Antarctica: Handler Ridge revisited		.29	(SCIE, 1.169)
31	Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern Victoria Land, Antarctica	Polar Science	2018.02.21	비SCI (SCIE, 1,118)
32	Evaluation of ICA and CEM algorithms with Landsat-8/ASTER data for geological mapping in inaccessible regions	Geocarto International	2018.02.09	비SCI (SCIE, 1,646)
33	남극 장보고기지 주변 북빅토리아랜드의 비콘누층군 층서와 산출 식물화석	지질학회지	2017.08.31	비SCI (KCI등재)
34	남극 탈로스 돔(Talos Dome) 얼음코어 테프라층에 기록된 홀로세 멜버른 화산 분출 기록	지질학회지	2017-08-30	비SCI (KCI등재)
35	남극 북빅토리아랜드 윌슨 암체 호상 편마암과 우백질 암맥의 저어콘 SHRIMP-U-Pb 연령	지질학회지	2017-06-30	비SCI (KCI등재)
36	남극 북빅토리아랜드의 광물 자원 존재 및 탐사 가능성 평가	지질학회지	2017-08-31	비SCI (KCI등재)
37	Sedimentary Facies and Architecture of a Gigantic Gravelly Submarine Channel System in a Cretaceous Foredeep Trough (the Magallanes Basin, Southern Chile)	Ocean and Polar Research	2017.06.30	비SCI (KCI등재)

- 또한 다양한 분야의 지질 운석 연구활동을 통해 분야별 연구현황과 현장조사 수행 가능성, 필요한 연구를 수행하는 데 필요한 수행기간 및 예산에 대한 경험을 축적하였음. 하지만 기반구축과 기초조사에 목적을 둔 과제의 특성상 세부연구주제들이 연계성을 가지고 문제해결을 위해 노력했다고 보기는 어려움
- 구축된 연구 및 현장연구 지원 시스템을 활용하여, 남극대륙 지질 운석 연구를 수행하되 각 연구주제들이 연계성을 가지고 큰 하나의 문제를 해결하는 형태의 연구과제 개발이 필요함. 남극대륙의 지질연구가 가진 함의를 고려해 연구지역 확장과 지질정보 획득도 계속적으로 이루어져야함

3. 주요 국가의 남극종단산맥 연구 현황

- 남극대륙의 면적은 약 14,000,000 km²로 한반도 면적의 약 62배에 달함. 이중 눈과 얼음으로 덮이지 않은 암석 노출지 비율은 2%(약 280,000 km²)에 지나지 않음. 이중 70%가 남극종단산맥에 집중적으로 분포함
- 남극종단산맥은 남극대륙을 남북으로 가로지르며 발달한 총 길이 3,000 km 의 산맥으로 대서양쪽 끝은 펜사콜라 산맥에 해당하며 태평양쪽 끝은 빅토리아랜드임
- 로스해에 인접한 해안지형, 험준한 산악지형, 드라이밸리와 같은 사막지대, 화산지대 등 다양한 지형을 보여줌
- 과거와 현재의 지질현상에 의해 다양한 암석(광상, 석탄 등 포함)이 노출되어 있어 남극대륙 지질연구의 최적지이며, 노출면적, 바다로부터의 접근성 등을 고려할 때 미래 남극자원개발의 중심지로서 중요함



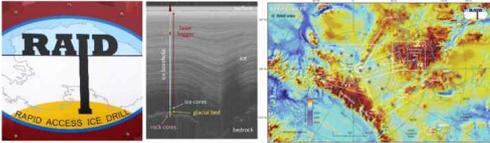
그림 1-3-1. 남극종단산맥의 지형적 특성과 지질학적 특징

- 남극종단산맥에는 맥머도(미국), 스콧(뉴질랜드), 마리오주젤리(이태리), 곤드와나(독일), 장보고(한국) 기지가 위치하고 있으며, 많은 부분이 뉴질랜드의 영유권 주장지역에 속함.

- 남극종단산맥주변에 대해 남극연구 주요 국가들은 지속적인 연구를 수행중임. 학술적인 연구이외에도 맵핑, 빙저 기반암 시료 확보등 기초적인 지질 연구도 진행 중. 이를 위한 인프라 투자도 병행해 이루어짐

국외 (지질정보)

- 이태리, 독일: 지질도 발간을 위한 광역 조사 이후 **지속적인 지질조사** 실시하고 있지만 위축된 상태
- 영국: 항공기 등을 이용한 **서남극권의 광역적 지질지구물리 탐사** 계속적 수행
- 뉴질랜드, 노르웨이: 기지가 위치한 지역의 **지질도 종합, 전산화 작업**
- 호주: 연안기지에 이어 **내륙기지 확보노력**
- 미국: 남극 **빙저 기반암 시료 확보 프로그램** 진행 중 (NSF RAID program, 4년간 100억원)



국외 (운석탐사)

- 미국, 일본
 - 40~50년간 남극 운석 회수(각 20,000여개 이상)
 - 남극운석 연구 기반으로 **우주물질 직접 회수 프로젝트** 수행(사업비 약 1조원)
- 중국
 - 1998년부터 글로브 산맥에서 남극운석탐사
 - 제5기지 완공 후 **빅토리아랜드에서도 운석탐사 가능성 높음**

구분	미국	일본	중국	대한민국
운석탐사 주관	NSF	극지연구소	극지연구소	극지연구소
데이터 시스템	NASA	극지연구소	현재 없음	극지연구소
탐사개시년도	1976	1969	1998	2006
남극운석 개수	>20,000	20,000	9,838(?)	1077
탐사지역	McMurdo	Shova	Zhong Shan	정보고기지
주 탐사지역	동남극 횡단산맥	동남극 이비도산맥	동남극 글로브산맥 빅토리아랜드(?)	동남극 빅토리아랜드

주요 남극운석 보유국의 운석탐사 및 큐레이션

그림 1-3-2. 남극종단산맥에 대한 국내외 운석/지질 연구 현황을 정리한 표

- 남극종단산맥 국제공동연구를 위해 미국연구자들 중심의 비공식적인 모임인 TAM Science가 운영되고 있음. 주요 연구책임자와 NSF Antarctic Program과의 협의를 통해 남극종단산맥 거점캠프를 정하고 항공기 헬기 등 대형 로지스틱스를 공동활용



그림 1-3-3. TAM Science 웹페이지. 2013년 공동 캠프 전경을 보여주고 있음.

4. 남극 및 남극지질연구 관련 정책동향

4.1. 남극조약

4.1.1. 남극조약 및 환경보호의정서의 배경

- 남극의 자유로운 과학연구활동은 남극조약, 남극조약환경보호의정서 및 부속서를 중심으로 하는 소위 남극조약체제(Antarctic Treaty System)에 근거함

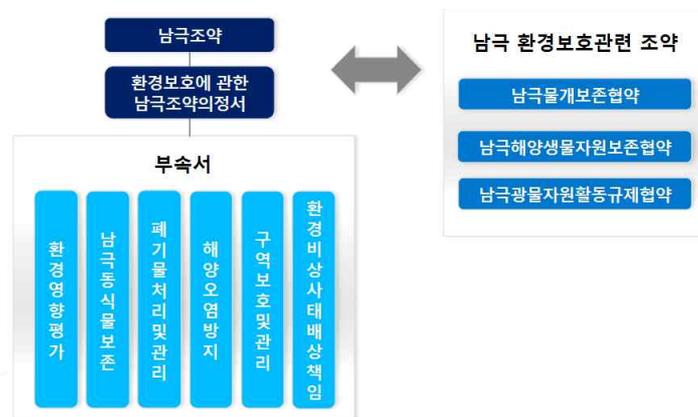


그림 1-4-1. 남극조약체제 개관

- 19세기의 남극탐험은 물개와 고래잡이의 근거지를 찾기 위한 것이었으나, 20세기 들어 영국, 프랑스, 노르웨이, 오스트레일리아, 뉴질랜드, 아르헨티나, 칠레 등 7개국은 자국의 탐험과 발견 등을 근거로 남극에 대한 영유권 주장함

각국의 영유권 주장 현황

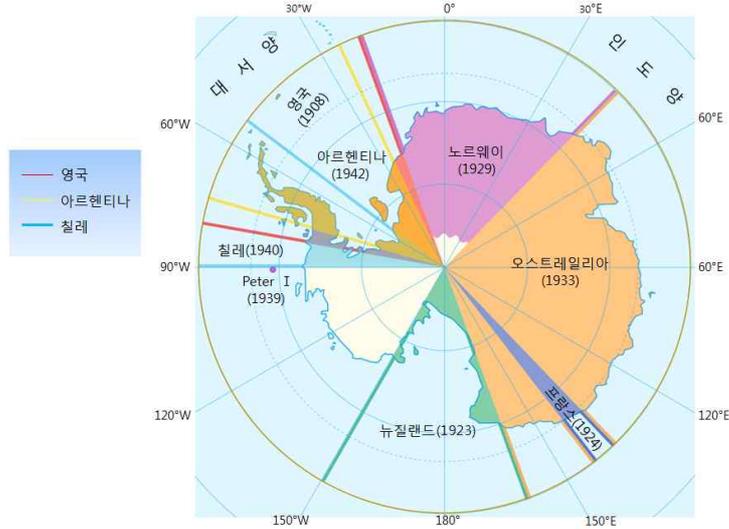


그림 1-4-2. 20C초 각국의 남극 영유권 주장

- 남극문제의 평화적 해결을 모색하던 국제사회는 1957-1958년의 국제지구 물리관측년(International Geophysical Year: IGY)의 성공적 과학활동을 계기로, 남극조약회의를 개최하여 1959년 남극조약(1961년 발효)을 채택함
- 남극조약을 계기로 영유권 문제를 동결하고 군사적 이용을 금지한 채 남극 대륙은 자유로운 과학연구 및 관측의 장으로 이용되고 있음
- 1970~80년대의 국제사회는 남극의 자원개발과 이용이 초래할 남극 환경의 악영향에 주목함
- 1991년 남극환경의 포괄적 보호를 규정하는 남극조약 환경보호의정서(1998년 발효)가 채택되어, 남극의 평화적·과학적·환경적 목적의 이용을 강화함과 동시에 시추와 채광을 포함한 남극 광물(개발)활동을 동결함

【남극조약 환경보호의정서 채택 배경】

- 환경보호의정서는 과학연구를 제외한 남극의 모든 광물 자원 활동을 금지하는 강력한 규정을 가지고 있음. 이런 강력한 규정에 대해 모든 남극조약 체결국이 동의할 수 있었던 이유는 무엇일까?
- 1960-70년대 남반구 해양에서 상업적인 목적을 가진 광물회사들에 의해 지구 물리 탐사가 이루어졌는데, 1970년 영국과 뉴질랜드에 의해 남극 조약 시스템 내에서 처음으로 문제가 제기됨

- 그 이후 광물 및 지하자원 개발과 관련된 활동 규제는 1980년대와 1990년대 초반 남극 외교/정치 분야에서 매우 논란이 되는 문제였음
- 이에 남극조약 체결국들은 예방적 접근을 결정하고 1976년 남극 광물의 탐사와 개발에 자발적인 유예를 부과함. 이것은 규제되지 않은 탐사와 광업이 심각한 환경 및 정치적 문제를 야기할 것으로 내다봤기 때문임.
- 1981년 남극조약 체결국들은 광물자원개발에 대한 문제를 포괄적으로 해결하는 방법에 대한 협상을 개시함. 이 협상은 조약 국가들이 1988년 "남극 광물 자원 활동 규제에 관한 협약(CRAMRA)"을 채택하기까지 매우 지난한 과정을 거쳤음. 그 토론의 결과로 부분적으로는 남극 대륙에 대한 국제적인 관심이 증대되었으며, 남극 조약 서명국 수는 이 기간 동안 25개에서 38개까지 급격히 증가함.
- CRAMRA는 광물 기초탐사, 탐사 및 개발 활동을 일정한 규제하에서 수행하도록 하지만, 지하자원의 채굴은 모든 당사국이 환경에 대한 위험이 없다고 동의 한 경우에만 허용하자는 입장.
- 그러나 CRAMRA가 1988년에 채택 될 즈음에는 Greenpeace 및 World Wide Fund for Nature와 같은 환경단체의 주도로 광물의 무분별한 채굴에 반대하는 국제 캠페인이 성행함. 그들은 남극에서 광업은 금지되어야하고 남극 대륙은 '세계 공원'으로 선언되고 관리되어야 한다는 입장 견지.
- 환경단체들의 큰 압력 때문에 1989년 호주와 프랑스는 CRAMRA를 비준하지 않음. CRAMRA는 모든 조약 체결국의 비준을 요구했기 때문에 협약이 효력을 발휘하지 못함. 1990년까지 뉴질랜드, 이탈리아, 벨기에가 이에 합류했으며, 남극 대륙에 대한 종합적인 환경 보호 협약을 제안함. 영국, 일본, 미국을 포함한 다른 국가들은 광업에 대한 영구적인 금지 조치에 반대함.
- CRAMRA의 붕괴는 남극조약 체계에 대한 최초의 주요한 위협이었음. 영국과 칠레는 남극대륙의 환경보호를 위한 포괄적인 방안을 논의하기 위해 특별 회의를 소집하고 함께 환경관리계획 초안을 도출함. CRAMRA가 붕괴된지 2년 만에 남극조약의 환경보호에 관한 의정서가 1991년에 서명됨. CRAMRA는 환경협약에 기초를 제공한 셈.
- CRAMRA의 서거는 남극조약 시스템 내에서의 합의 과정의 취약성을 보여줌. 또한 국제 환경 캠페인의 힘과 효과를 입증함. CRAMRA가 유발했던 분쟁이 없었다면, 모든 남극조약 체결국들이 현재 의정서에 포함된 환경 보호에 관한 엄격한 의무 규정에 동의하기 어려웠을 것임

(BAS 홈페이지 참조

<https://www.bas.ac.uk/about/antarctica/environmental-protection/mining>)

4.1.2. 남극조약의 주요 내용

- 남극조약은 전문을 포함하여 모두 14개 조문으로 구성되어 있으며, 남극의 평화적 이용과 남극 과학연구의 완전한 자유보장과, 남극에 대한 기존의 영유권 주장을 유예함
- 주요내용은 첫째 ‘남극의 평화적 이용’으로, △남극을 평화적 목적으로만 이용할 것, △군사시설·기지의 설치, 군사훈련 등 군사적 조치 및 핵폭발이나 방사성 폐기물 처분의 금지, △과학적 연구 및 기타 평화적 목적을 위한 군요원 및 장비 사용의 제한적 허용을 규정함
- 둘째, ‘남극에서의 과학적 조사의 자유 보장’으로, 과학조사를 위한 국제협력 증진을 위하여 조사계획 관련 정보와 참여 과학자, 조사결과 등의 상호 교환을 규정함
- 셋째, ‘남극에 대한 영유권 주장의 유보’로, △남극조약의 발효 중에는 새로운 관할권 주장을 할 수 없고, △남극조약에 따른 국가의 행위가 기존 관할권의 주장 및 그에 대한 근거의 포기를 의미하지 않으며, △타국의 관할권 주장에 대한 인정·불인정의 입장을 표명으로 해석되지 아니함을 규정함
- 넷째, ‘정부간 합의에 의한 남극관리’로, 남극에 관한 의사결정은 남극조약 협의당사국회의(ATCM)의 총의(Consensus)를 통해 이루어 짐

【남극조약 14개 조문의 주요 내용】

- 제1조 남극지역의 평화적 목적의 이용 및 과학 연구만 허용, 단 이를 위한 군사 지원 이외에 군사행위 금지
- 제2조 과학조사의 자유보장과 국제협력 지속
- 제3조 과학 활동의 정보교환과 과학자 교류와 과학 관측/ 결과의 교환과 자유로운 이용
- 제4조 남극지역의 영토주권 또는 영토에 관한 영유권 주장의 동결
- 제5조 핵폭발과 방사선 폐기물 처분 금지
- 제6조 조약 적용 지역(남위 60°이남의 모든 빙원을 포함한 지역) 명시
- 제7조 남극의 모든 지역과 타국 기지에 대한 완전한 자유 사찰 허용
- 제8조 사찰요원과 교류과학자에 대한 재판권소재 명시
- 제9조 협의당사국 권한과 남극조약협의당사국회의 설명
- 제10조 UN헌장 준수 의무 명기
- 제11조 체약국 간 분쟁해결의 평화스러운 협의
- 제12조 남극조약협의당사국이 조약을 수정하고 개정 가능성 명시
- 제13조 조약의 비준과 가입절차
- 제14조 조약의 정문(영, 불, 노, 스페인어) 작성

4.1.3. 남극조약 환경보호의정서의 주요 내용

가. 환경보호의정서 개요

- 남극을 ‘평화·과학에 공헌하는 자연보호구역(a natural reserve devoted to peace and science)’으로 정의하고, 남극환경과 생태계의 포괄적 보호는 인류전체의 이익에 비례함을 선언
- 남극조약체제의 일부로서, ‘평화와 과학’을 언급하면서 남극조약에 기초한 남극질서의 정치적 안정의 필요성을 확인하고, ‘남극해양생물자원보존협약의 보존에 관한 원칙’을 재확인 함
- 협의당사국회의(ATCM)과 별도로 환경감시를 통한 ATCM 보조 및 자문기능을 수행하는 환경보호위원회(Committee for Environment Protection: CEP)를 설치

나. 광물자원개발 금지

- 의정서는 그 어떤 남극관련 조약보다 환경보호에 엄격하여, 과학조사를 제외한 광물자원활동은 원칙적으로 금지함(환경보호의정서 제7조)
- 다만, 의정서 제25조 제1항이 “의정서 발효 50년 경과 후 몇몇 협의당사국의 요청으로도 검토회의 소집이 가능하다”고 함으로써, 일각에서는 2048년 이후에는 의정서 개정을 통한 광물개발의 가능성을 기대하기도 함
- 그러나 의정서 제25조 제5항 (a)호는 “제7조와 관련, 남극광물자원활동이 허용될 수 있는지의 여부 및 허용될 수 있다면 어떠한 조건하에서 허용될 것인지를 결정하기 위하여 합의된 수단을 포함하여 남극광물자원활동에 관한 구속력 있는 법체제가 발효하지 않는 한, 제7조에 규정된 남극광물자원활동의 금지는 지속된다.”고 함으로써 남극에서의 광물활동금지를 못 박고 있음
- 또한, 제7조의 개정이 논의된다 할지라도, “의정서의 수정 및 개정은 협의당사국 4분의 3을 포함한 회원국 과반수로 채택”되어야 하며, “채택된 수정 또는 개정안이 발효되기 위해서는 의정서 채택 시의 모든 협의당사국을 포함하는 협의당사국의 4분의 3의 비준”이 필요함
- 제39차 ATCM은 미국 등 다수국(우리나라 포함)이 WP38을 통해 제안한 남극 광물자원활동 금지 원칙을 재확인하는 결의안을 채택하였음

【ATCMXXXIII WP38 주요내용】

- 환경보호의정서 제7조는 광물자원활동 금지를 규정하나, 의정서 제25조는 발효 후 50 경과 후(2048년) 당사국이 의정서 운영의 재검토를 요청할 수 있도록 규정하고 있는 바, 동 조항으로 인하여 언젠가는 남극조약지역 내에서 광물자원활동 등 경제활동이 허용될 것이라는 오해 발생
- 그러나, 동 의정서 제25조 제5항은 남극광물자원활동에 관한 구속력 있는 법체제가 발효하지 않는 한 제7조에 규정된 남극광물자원활동의 금지는 지속된다고 규정
- 이러한 오해를 불식시키기 위한 ATCM의 적극적인 조치가 필요하며 다음 내용을 당사국들에 권고
 - △ 남극환경 및 관련 생태계 보호가 환경보호의정서 제7조상 광물자원활동 금지로부터 기인한 것임을 인정
 - △ 환경보호의정서 제7조상의 의무를 재확인
 - △ 남극환경 및 관련 생태계 보호를 위하여 제7조 이행을 최우선순위로 두겠다는 확고한 당사국들의 의지를 선언

4.2. 국내외 남극연구정책

- 칠레, 아르헨티나, 영국(식민지포함) 등 남극영유권 주장국들이 ‘지질학적 연계성’ 또는 ‘지리적 근접성’을 영유권의 법적 근거로 제시하였듯이, 남극지질연구는 매우 중요한 외교적 함의를 담고 있음
- 다만 현대국제법 이론과 판례는 지질학적 연계성과 지리적 근접성이 아닌 ‘실효적 지배’에 초점을 두어 영유권의 법적 권원(Title)을 판단하고 있음
- 그러나 (있을지도 모르는) 영토 및 영유권 문제를 대비하는 차원에서, 또는 ATCM 등의 남극관련 다자간 정부협의체에서의 외교력 증진을 위해서, 과학연구 특히 지질연구가 가지는 정책적 함의에 주목할 필요가 있음

4.2.1. SCAR Horizon Scan (2014)

- 남극과학위원회(SCAR)는 2014년 남극 및 남빙양 과학 호라이즌 스캔을 실시하여 남극에서 다루어져야 할 가장 중요한 과학적 질문들을 발표함

구 분	주요 내용
1. 남극의 대기·해양이 지구 전체에 미치는 영향	· 대기와 해양, 빙권의 상호작용 · 대기 중 오존층 회복과 온실기체 농도의 전 지구적 영향 · 남극해 열순환과 기후변화의 영향
2. 남극 빙하와 해수면 높이	· 급격한 남극해 빙상의 해빙 원인 · 빙상 기저층의 상태와 빙상의 이동·형성과의 관계
3. 남극얼음 아래 지각의 변동	· 빙상에 대한 지각의 반응 · 남극대륙의 지각과 맨틀의 구조 · 대륙판의 생성과 균열 역사 규명
4. 남극 생물의 진화와 생태	· 남극 생물의 진화 과정 규명 · 변화하는 남극 생태계 관찰 및 변화 원인규명 · 환경변화에 민감한 생물종 규명
5. 남극에서의 우주관측	· 태양풍 발생에 따라 유입되는 고에너지 입자에 대한 이해 · 빙저호 연구를 통한 목성, 토성의 위성 환경 추측
6. 남극에서의 인간 영향 및 저감 방안	· 현재 남극 출입 규제의 효과 · 국제정책이 남극 방문 동기형성에 미치는 영향 · 남극생태계의 현재와 미래 가치 및 보존방안

표 1-4-1, Horizon Scan 6대 분야 및 주요 내용

- 남극 지질연구는 남극얼음 아래 지각의 변동의 분석은 물론, 여타 항목의 연계적 측면에서도 매우 중요한 가치를 담고 있음

4.2.2. 해외 남극과학연구 정책

- 주요 남극연구 국가들은 각국의 정부계획을 수립하여 남극연구를 수행하고 있으며, 남극의 지질 및 관련 연구를 주요 연구분야로 선정하고 있음

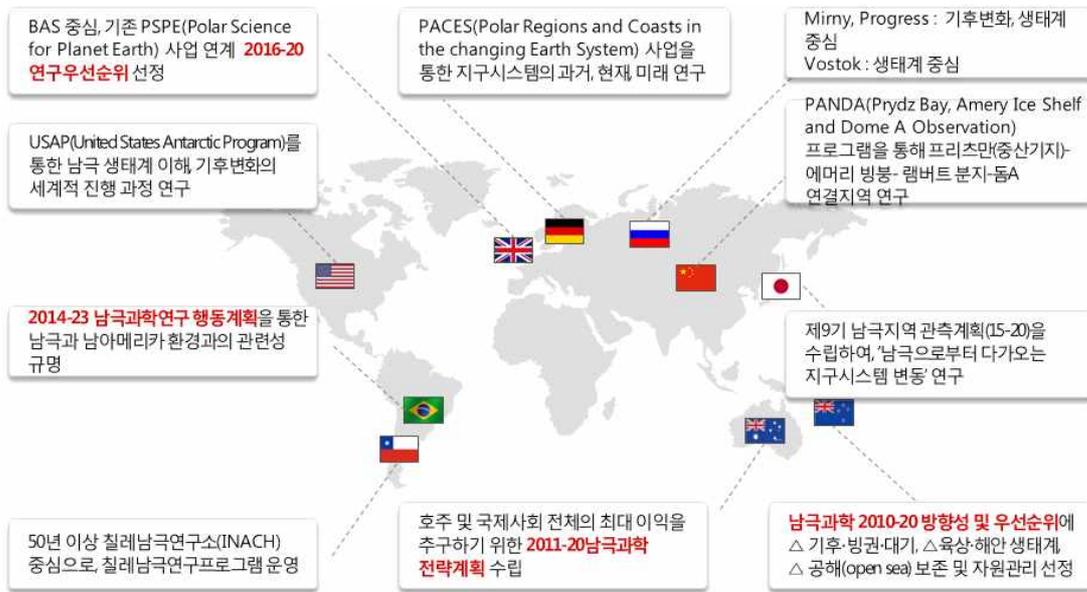


그림 1-4-3. 해외 남극연구 정책동향

- 미국은 방대한 규모의 연구인프라를 기반으로 전방위적인 남극 영향력 확대를 추구하기 위해 해양학, 해양생물학, 천문학, 대기과학, 빙하학과 함께 지구과학 및 지질학 등 다양한 분야에서 연구를 수행하고 있음
- 영국의 남극연구를 주도하는 BAS(영국남극조사소)는 2016-2020년 연구우선순위를 ‘지구를 위한 극지 과학’(Polar Science for Planet Earth)이라는 연구프로그램에 두고, 지질학 분야의 핵심 과제로 “고체 지구의 구조는 극지 환경 및 빙하 형성에 어떤 영향을 미치는가?”를 선정함
- 칠레의 남극연구를 주도하는 INACH(칠레남극기구)는 칠레남극과학프로그램(Chilean Antarctic Science Program: PROCIENT)의 6대 연구분야로서 ‘물리 및 지구과학’을 선정하고 있음
- 브라질은 남극과학연구 행동계획(201-2023)을 통해 남극과 남아메리카 환경간의 연결성에 대한 다섯 가지 테마의 프로그램을 제시하였는데, 그 하나로 ‘남극의 지구 역학 및 지질학적 역사 및 남아메리카와의 관계’를 채택함
- 뉴질랜드의 ‘2010-2020년 방향성 및 우선순위’와 호주의 ‘남극과학 전략계획’(2011-2020)은 주로 남빙양 연구에 우선 순위를 부여하고 있으나, 양국 모두 남극과 글로벌 환경간의 상호관계의 규명을 위하여 대륙의 지질연구를 병행하고 있음
- 일본은 제9기 남극지역 관측계획(2015-2020)을 통하여 ‘남극으로부터 다가

오는 지구시스템의 변동'을 메인테마로 설정하고, 남극내륙으로부터 연안부
근까지의 설빙학·지질학을 중심으로 남극 고환경 복원을 추진함

4.2.3. 우리나라 남극과학연구 정책

- 우리 정부는 제3차 남극연구활동진흥기본계획을 통해, 2017-2022년의 5개년
을 남극연구활동의 도약기로 명명함과 동시에, 과학연구의 주요 추진목표로
대륙해안에서 내륙으로 연구영역을 확대함에 가치를 부여함

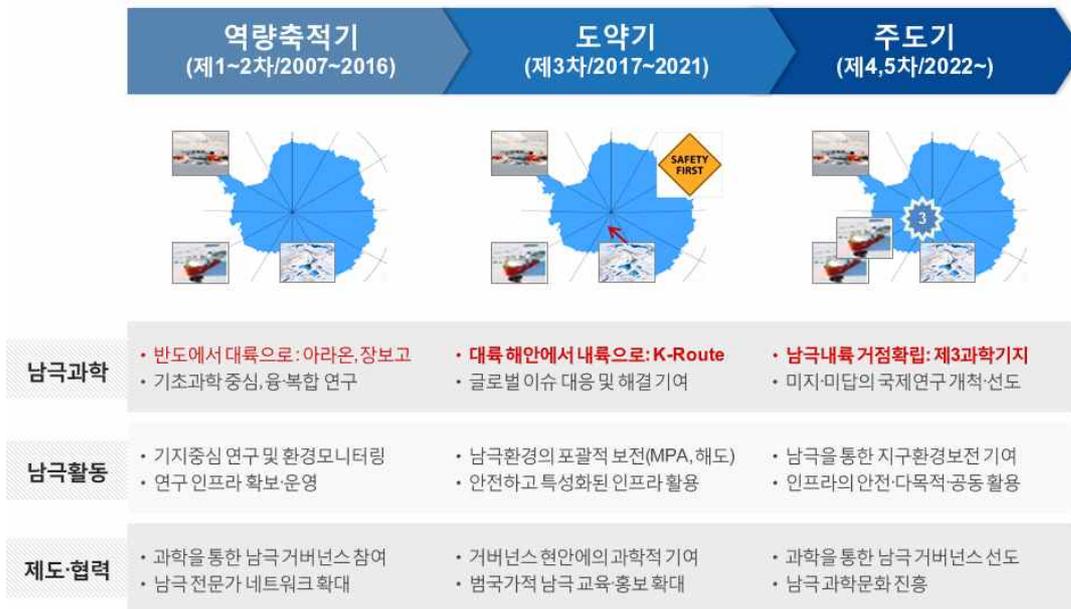


그림 1-4-4. '제3차 남극연구활동진흥기본계획'의 중장기 추진전략

- 제3차 기본계획은 추진과제 2-2(남극 내륙진출과 미지·미답의 연구영역 개척)의
목표로서 “남극 내륙 진출로(코리안루트)를 개척하여 선도적인 대륙 연구에 착
수”를 채택하고 있는바, 새로운 미답지 탐험과 지질연구는 불가분의 관계임

4.3. 소결 및 기대효과

- 남극지역은 국제법상 영유권주장이 동결된 공동관리 구역으로, 지질연구(코
리안 루트 개척, 연구거점 설치, 제3과학기지 건립을 위한 연구 포함)는 남
극조약체제에서의 우리나라 국력(외교력·과학력) 증진에 기여할 것임

- 해외 주요 남극연구국가들은 남극과 전지구적 상호관련성을 중심으로 지구시스템을 이해하고자 과학역량을 집중하고 있으며, 지질연구를 매우 중요한 테마 또는 연구분야로 다루고 있음
- 우리나라 제3차 남극연구활동진흥기본계획의 충실한 이행을 위하여, 남극의 지질연구는 그 고유한 연구영역뿐만 아니라 관련 연구분야와의 협력분야로도 매우 중요함

참고문헌

- 강량, “국제환경레짐에 관한 소고 -남극조약체제를 중심으로-”, 『Ocean and Polar Research』 제28권 제2호, 2006.
- 극지연구소, 「제3차 남극연구활동진흥기본계획 수립에 관한 연구」, 해수부 용역과제, 2016
- 김기순, “남극 환경보호의정서 책임부속서에 대한 연구”, 『안암법학』 제27권, 2008.
- 김기순, “남극과 북극의 법제도에 대한 비교법적 고찰”, 『국제법학회논총』 제55권 1호, 2010.
- 서원상, “제39차 남극조약협의당사국회의 논의동향 및 시사점”, 『Polar Brief』 제14호, 2016.
- 서원상·신형철, “남극조약협의당사국회의의 주요 이슈 및 동향”, 『Polar Brief』 제3호, 2015.
- 서원상·진동민, “극지법(Polar Law)의 동향과 이슈”, 『국제법 동향과 실무』 제15권 1호, 2016.
- 이용희, “남극조약체제상 환경보호제도에 관한 고찰”, 『해사법연구』 제24권 제3호, 2012.
- ATCM XXXVII IP-9, Brizil, *An action plan for the Brazilian Antarctic science over the next 10 years*, (2014).
- ATCM XXXVII BP-12, New Zealand, *New Zealand Antarctic and Southern Ocean Science: Directions and Priorities 2010-2020*, (2014).

ATCM XXXVII IP-33, Australia, *Australia's Antarctic Strategic Science Priorities*, (2014).

ATCM XXXVIII IP-79, Chile, *Chilean Antarctic Science Program: Evolution and challenges*, (2015).

ATCM XXXVIII IP-40, UK, United Kingdom's Antarctic Science: Summary of British Antarctic Survey Science Priorities 2016-20, (2016).

남극조약(1959)

남극조약 환경보호의정서(1991)

남극활동 및 환경보호에 관한 법률(2004)

제3차 남극연구활동진흥기본계획(2017-2022)



5. 신규연구과제 개발 전략

5.1. 남극대륙의 과거현재 미래를 아우르는 연구과제

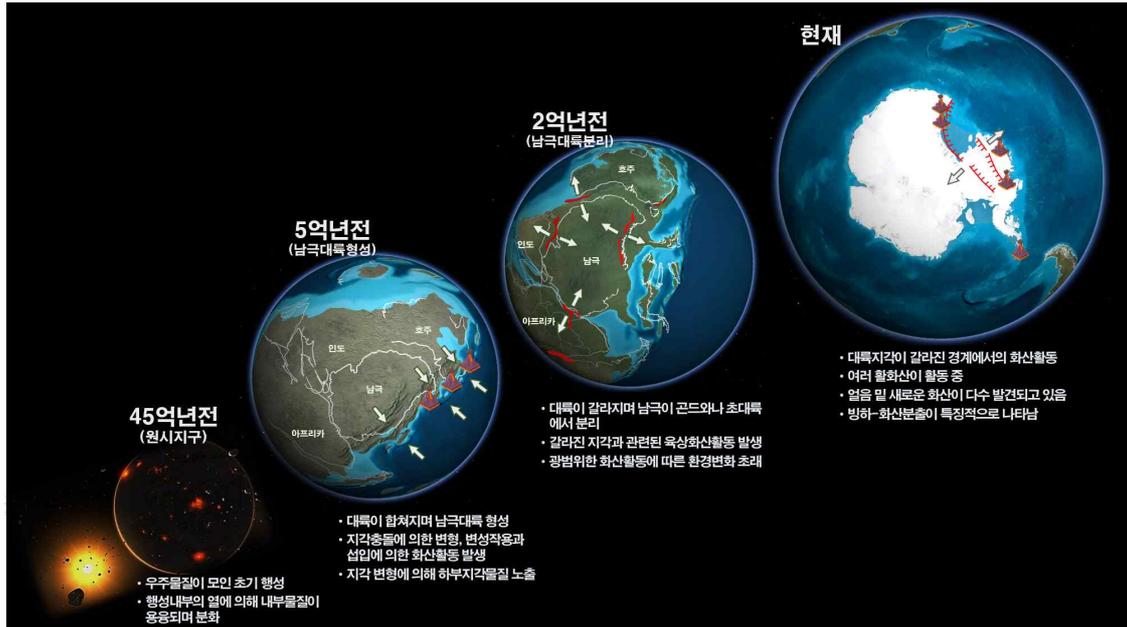


그림 1-5-1. 남극에 기록된 지구나 남극대륙의 역사. 남극대륙 운석은 태양계와 지구의 초기 조건을 기록하고 있음. 남극종단산맥의 여러 암석은 남극대륙의 형성에 대한 기록을 가지고 있음. 그 중심에는 지질시대에 걸친 화산활동기록이 있음. 현재 남극은 활발한 화산활동이 일어나는 지역 중 하나임.

- 앞에서 살펴본 바와 같이 남극대륙 지질학 연구는 그 활동영역과 결과를 통해 미래 남극대륙에 대한 발언권을 확보케 하는 국가적으로 중요한 과제 임
- 이전 과제에서 다양한 지질학분야의 기초 연구를 통해 남극대륙 지질연구의 가능성을 타진해 봤다면, 그 다음 단계에서는 다양한 연구주제들을 하나의 줄기로 엮는 것이 필요함
- 남극대륙이 겪어온 과거 지질현상에 대한 연구로 남극대륙에 발달하는 지질구조와 암석의 형성과정을 밝히는 것은 남극대륙 땅덩어리를 이해하는 가장 밑거름이 됨
- 현재 남극에서 일어나고 있는 가장 눈에 띄는 지질현상은 화산활동이며, 눈, 얼음, 빙상 등 빙권과의 상호작용은 초미의 관심사인 남극 빙상의 거동과 해수면변동에 영향을 끼치는 주요 요소 중 하나로서 중요함

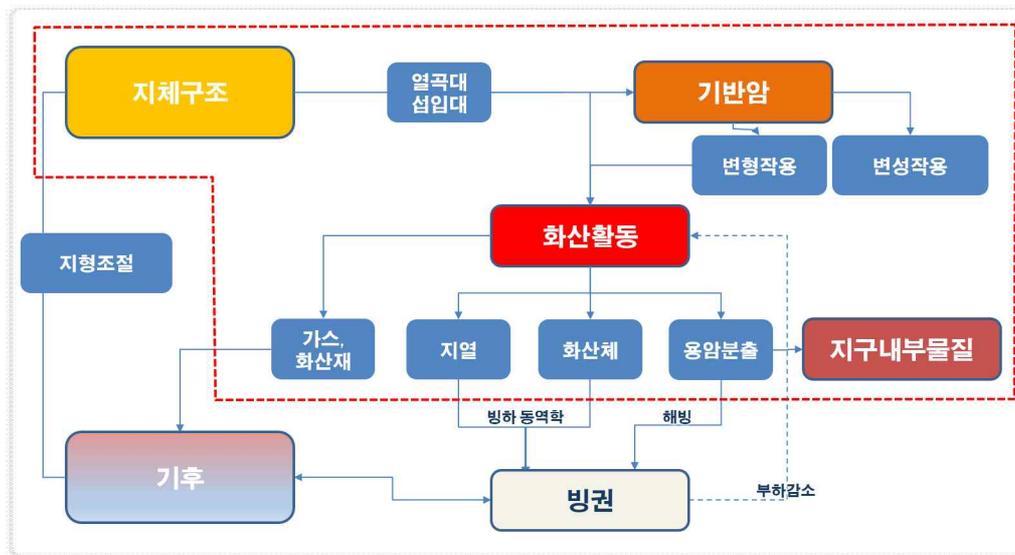


그림 1-5-2. 화산활동이 지체구조, 지구내부물질, 기후, 빙권과의 상호작용을 매개하는 역할을 보여주는 모식도. 붉은 점선이 이 과제에서 수행하고자 하는 연구 범위임.

- 미래 남극대륙에서 가장 큰 이슈는 남극대륙에 존재하는 자원을 개발할지에 대한 논의라고 여겨짐. 자원을 개발한다면 천연의 남극자연환경을 어떻게 보존하면서 지속가능한 개발을 할 것인지가 가장 큰 논점이 될 것임. 그 이후에 이루어질 어떤 자원을 누가 어떻게 개발할 것인지에 대비하는 가치있는 지질정보 확보와 이를 활용할 수 있는 시스템구축이 필요함
- 이와 같이 남극대륙의 미래를 대비하기 위한 정보를 수집하는 데에는 남극의 과거와 현재 지질현상에 대한 이해가 필수적으로 이루어져야함

남극대륙의 과거: 남극종단산맥 지질운석 탐사/연구

남극대륙 거점 확보
장보고기지 남쪽 1000 km
남극종단산맥까지 거점을 확보하여
활동영역 확장 및 지질/운석 탐사

남극운석 활용연구
이미 확보한 다양한 운석을 이용한
태양계와 행성지구 연구 및 지속적인
운석회수와 신규 운석탐사지 진출

남극대륙 진화 연구
남극대륙에 형성된 퇴적층의 층상과
고생물 연구를 통한 남극대륙환경의
변화와 조짐요인 추적

지체구조연구
남극종단산맥에 노출된 지질현상을
비밀로 산맥과 산맥을 구성하고 있는
암석이 형성된 지체구조적 과정을 규명



활화산 모니터링

장보고기 지주변 활화산에 대한 GPS,
지진계, 인공위성, 화산가스 센서를
이동한 뒤, 무인으로 활화산과 나부
를 직접 활동을 감시

신생대 화산 분출사

화산분출물의 퇴적학적 특성, 공극적 분포,
연대지료를 통해 신생대 화산의
분출특성과 규모 환경에 대한 영향을 규명

화산암 지화학, 연대 규명

화산암의 지화학 분석으로 화산
기원물질의 특성과 분화규정
화산암 형성시기 및 노출 연대 측정

빙저화산 탐사

장보고기 지주변 빙저화산의
빙저구조와 분출특성 규명 및 신규
빙저화산 탐색

남극대륙의 현재: 활화산 모니터링

남극대륙의 미래: 남극 지질정보시스템 구축

지질정보 수집

인공위성, 드론, 헬기 등을 활용하여
남극대륙의 광역적 지질정보 자료를 분포,
3D지형, 지질경계 등을 수집

지질정보시스템

디지털 지질도, 광물분포지도, 3D 지질노두,
4차원 노두, 3D 지질도, 암석운석시료 큐레이션을
관련 정보 디지털화 및 통합 관리

그림 1-5-3. 남극종단산맥 주변에서의 연구활동을 표시한 모식도

5.2. 남극대륙의 과거 연구: 남극종단산맥 탐사/연구

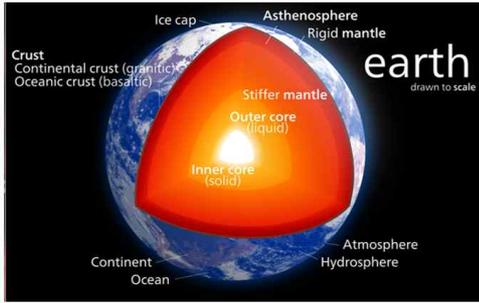
1. 남극 대륙의 과거: 종단산맥 탐사/연구



광역적 지질탐사

- 연구영역확대: 남빅토리아랜드와 중부 남극 종단산맥
- 남극종단산맥 국제공동 캠프 TAM deep-field camp
- 남극종단산맥 분지진화 및 환경변화 연구
- 남극대륙 지체구조 운동기록 추적
- 신규 운석회수지 탐사: 남빅토리아랜드 Allan Hills, Griffin Nunatak 등





지구내부물질과 태양계 진화 연구

- 하부지각 노출지 탐사 및 하부지각특성 연구
- 남극운석을 이용, 46억년에 걸친 태양계의 진화, 행성의 형성과정 연구

시료기반 국내외 협력연구



- 지질자원연구원: 운석의 물성연구
- 기초과학연구원: 운석과 지구물질의 안정/방사성 동위원소 연구

그림 1-5-4. 남극대륙의 과거에 대한 연구내용. 남극대륙 운석과 암석을 바탕으로 지구의 역사, 지구내부물질 분화, 지질시대 남극화산활동 연구의 내용을 담고 있음. 또한 연구지역 확장을 위한 남빅토리아랜드와 중부남극종단산맥 원거리 거점캠프 기반 연구도 포함함

- 연구목표: 남극대륙 뿐 아니라 지구의 형성을 포함하는 지구 초기진화에서부터 시작되는 다양한 지질현상과 남극대륙의 형성 분리, 진화사 규명
- 연구지역: 빅토리아랜드를 중심으로 하되 중부남부 종단산맥으로 연구 범위 확대
- 연구방법: 현장조사거점 활용 광역적 지질탐사 및 신규 거점 확보. 현장조사와 기 확보한 첨단 분석기술을 활용
- 세부주제1: 지구내부물질과 태양계 진화 연구
 - 지구기원물질연구: 운석탐사, 지구 기원물질의 형성과 진화, 분화운석 연구를 통한 원시 지구의 형성과 분화 과정 해석, 모천체에서 지구까지: 운석에 기록된 우주환경 연구, 운석의 대기권 돌입과 낙하 과정 시뮬레이션
 - 극한환경 실험을 통한 지구내부 연구: 운석 광물 결정 연구, 운석 광물 극한환경 실험, 운석을 통한 핵과 맨틀의 분화 연구, 레이저를 활용한 고압

실험

- 하부지각물질 연구: 북빅토리아랜드 염기성-초염기성 복합체를 통한 대륙 지각의 형성과정 이해

○ 세부주제2: 남극종단산맥 지체구조운동 추적

- 기반암 변성작용과 변성시기 규명
- 나이아가라 아이스폴(Niagara Icefalls) 지역의 전단대 연구

○ 세부주제3: 남극종단산맥 분지진화 규명

- 남극대륙 전기고생대 석회암연구를 통한 생물초 진화사 규명 (남극대륙 캄브리아기 고환경복원, 남극대륙 캄브리아기 탄산염 대지와 생물초, 빅토리아랜드 남극중부종단산맥 비교)
- 중생대화산암의 화산분출사 및 환경복원 (북빅토리아랜드 커크패트릭 현무암의 물리적 분출작용 규명, 3D맵핑, 쥐라기환경변화연구)

5.3. 남극대륙의 현재: 활화산 모니터링

2. 남극대륙의 현재: 활화산 모니터링

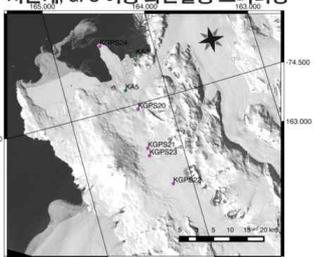
활화산 모니터링

- 화산가스 모니터링



멜버른 화산 얼음굴뚝

- 지진계, GPS 이용 화산활동 모니터링



화산분화 가능성 예측 및 재난 방재 기초자료 확보

빙저화산 탐사



리트만 화산과 약 4km 반경의 칼데라 구조 (Google Earth)

- 항공기를 이용한 빙저기반암 구조 탐사
- 빙저화산의 형태, 분출 역사 규명



빙저화산 탐사 및 분화 역사 규명



아이슬란드 빙저화산 분출 (2010년)

- 남극에서 새로 발견된 91개의 빙저화산
- 지구환경과 문명에 미치는 파괴력으로 극지빙저화산에 관심이 집중되고 있음

그림 1-5-5. 남극대륙에서 현재 가장 극적인 지질현상인 활화산 모니터링과 빙저화산 탐사를 포함하는 연구내용

- 연구목표: 남극대륙 활화산에 대한 모니터링과 빙저화산 활동 연구
- 연구지역: 멜버른 화산, 리트만 화산 및 신규 빙저화산 탐사지역
- 연구방법: 활화산 모니터링 장비 구축, 장보고기지 기반 지질/지구물리 현장조사, 시료정밀분석

○ 세부주제1: 빅토리아랜드 활화산 모니터링과 빙저화산 탐사

- 연속 지진자료를 이용한 지체구조 연구
- 연속 지진자료와 인프라 사운드 자료를 이용한 화산 활동도 연구
- RES를 이용한 빙하 하부 화산 지형 규명

○ 세부주제2: 신생대 화산 지구화학연구

- 빅토리아랜드 신생대 화산분출 기록 복원: 젊은 화산암류 ^3He , ^{36}Cl 우주방사선 기원 노출연대 획득(정밀 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정 기술개발, 조면암내 저콘 산소동위원소와 ^{230}Th - ^{238}U disequilibrium 동위원소 시스템을 이용한 마그마 분화 과정 추적, 남극 심부빙하 얼음코어 테프라와 멜버른, 리트만, 플리아이디 테프라 비교연구)
- 리트만 화산 분화 가능성 예측(지구물리 탐사를 통한 칼데라 지하구조 탐사 및 지각/맨틀 속도구조 규명, 리트만 화산암 지구화학 특성연구를 통한 마그마 분화과정 연구, 리트만 화산가스 연구(영국 캠브리지 대학과 공동연구 추진))

○ 세부주제3: 신생대 화산층서 규명

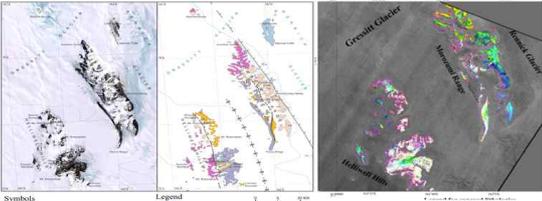
- 소형(단성) 화산 분화 특성 및 화산 물질 운반/퇴적 기작 연구
- 멜버른 화산 분화 층서 및 부석 조직 연구

5.4. 남극대륙의 미래

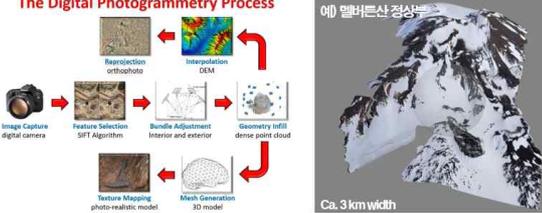
3. 남극대륙의 미래: 남극지질정보시스템 구축

남극 지질정보 수집

- 광물분포 원격탐사
- 남극지질 3D 모델
- 지질·운석 시료 큐레이션



The Digital Photogrammetry Process



예) 멜버른산 정상
Ca. 3 km width

남극 지질정보시스템

- 디지털 지질도 제공
- 지질 주제도(광물지도, 3D 노두, 연대지도, 원격탐사정보 등)
- 시료-공간정보 제공




노르웨이 극지연구소 구축 북극스발베르 지질정보시스템 (Svalbard Kartet) | 지질지원연구원 구축 국내지질정보시스템

그림 1-5-6. 남극대륙의 미래 활용을 위한 정보 획득 및 정보시스템 구축. 지질정보통합 관리를 위한 플랫폼을 구축하여, 지질·운석정보와 시료를 기반으로한 국제 공동연구에 활용

- 연구목표: 남극대륙활용을 위한 정보 축적 및 활용 시스템 구축
- 연구지역: 빅토리아랜드를 비롯한 남극 종단산맥
- 연구방법: 원격탐사, 현장조사를 통한 3D지형 모델 작성, 기확보시료의 체계적 관리 및 분석, 정보관리시스템구축
- 세부주제1: 원격탐사를 활용한 광역적 지질정보 수집
 - 빅토리아랜드 주요 지질노두를 대상으로 지질노두 3D모델을 작성, 불량한 접근성으로인한 현장조사 한계를 극복. 3차원 구조연구, 지질학 교육, 일반인 대상 홍보 등으로 활용
 - 1단계에서는 조사정점에서의 시료를 확보하여 빅토리아랜드 암석 및 광물의 분포를 파악. 2단계에서는 위성자료 원격탐사자료를 이용해 보다 광역적인 정보를 구축하고, 1단계 획득시료를 활용해 정밀도를 높일 계획
- 세부주제2: 남극대륙 시료큐레이션
 - 암석 운석의 경우 국제수준에 부합하는 수준의 큐레이션을 진행중. 남극 암

석에 대해서도 이와 걸맞는 큐레이션 시스템 운영을 목표

- 장보고기지 주변 지질도 작성과정에서, 암체별 정밀 연대를 분석하고 제공한 것과 같이, 빅토리아랜드 주요 암체에 대한 정밀 연대 측정으로 빅토리아랜드 연대지도 작성. 이탈리아, 독일 등 관련 암석을 보유하고 있는 국가와 협력하여, 효율적인 추진. 기존 지질모델에 정밀한 시간정보를 제공하여 보완

○ 세부주제3: 남극지질정보시스템구축

- 장보고기지 주변, 주요 거점 상세 디지털 지질도를 제공. SCAR GEOMAP 과제와 연계하여 국제적 활용도 제고
- 1단계 발간예정인 광물핸드북과, 원격탐사자료를 활용하여 빅토리아랜드 광물정보지도 등 남극빅토리아랜드 지질주제도 제공



6. 연구개발추진체계 및 로드맵



그림 1-6-1. 연구개발 추진체계

6.1. 국제협동연구 체계

- 남극대륙 과학 연구는 협동연구가 기본임. 남극 과학활동으로 획득한 각종 데이터 및 시료를 모든 국가의 연구자 및 일반에 공유하는 플랫폼을 구축하고, 과거 자료들을 비롯해 모든 시료를 공개. 데이터 및 시료 기반 연구를 수행하는 추세임
- 본 과제는 연구분야별 국제협력이외에 남극과학위원회(SCAR)산하의 전문 기구에서 북빅토리아랜드 유일한 월동기지인 장보고기지 기반 현장연구와 모니터링의 강점을 살려 주도적으로 해당지역 현장연구를 수행하고 그 결과를 공유할 예정임
- 모든 정보를 공개하는 것을 원칙으로 하지만 독자연구 수행을 통해 기득권을 확보할 필요가 있는 정보에 대해서는 전략적인 판단을 통해 순차적으로 공개

협력
남극과학위원회(SCAR)에서 가장 강조하는 부분:
협력과 데이터/시료 공개

대응
남극과학위원회 산하 워킹그룹 GeoMap, AntVolc에
참여 및 정보공유

경쟁
지역 내 주도권 및 기득권 확보는 협력만으로는
현실화하기 어려움
주변기지 운영국가(이태리, 독일, 중국)와의 경쟁

대응
국제 화산관측망에 멜버른산 관측소 한국관할로 등재
최소한의 지질정보(지질도, 시료정보)이외는 독자 구축

그림 1-6-3. 본 과제 결과를 공유하고 공동연구를 추진하는 기반이 될 SCAR산하 전문가 그룹인 GEOMAP과 ANTVOLC



6.2. 중장기 로드맵

○ 1단계 남극 빅토리아랜드 연구 기반확보에 이어 2단계에서는 빅토리아랜드에 대한 심화연구와 남극종단산맥으로의 연구지역 확장을 병행

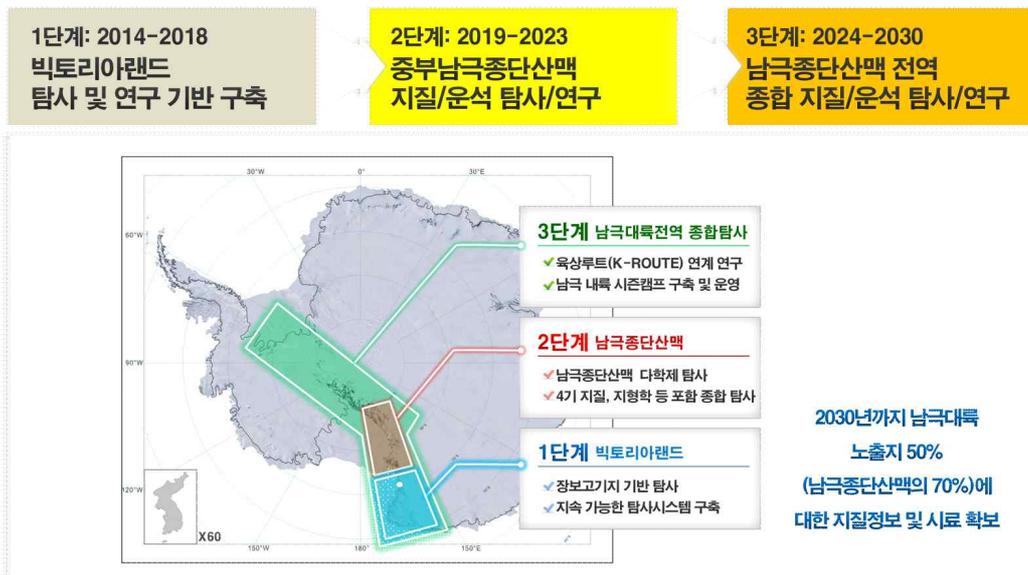


그림 1-6-4. 남극대륙 지질운석 연구 중장기 로드맵

7. 활용방안

- 향후 남극대륙내 기득권 확보를 위한 종합 지질정보(자원분포, 잠재 자원량)확보 및 국가 자원전략수립 기초자료 제공
- 남극대륙 거점 확보로 다학제 국제 공동연구 주도
- 장보고기지 주변 화산분화 예측 및 방재 매뉴얼의 기초자료로 활용

8. 기대효과

- 종합지질탐사를 통한 남극지질정보의 지속적인 확보로 미래자원개발 대비
- 남극대륙 활동영역 확대를 통해 남극대륙 이슈(의정서 재논의 등)에 대한 발언권 확대
- 남극지질정보 시스템구축과 정보공개로 국제전문기구(GeoMap, AntVolc) 리딩
- 멜버른화산 관측시스템 활용 국제 공동연구로 장보고기지 주변 지역 주도권 확보

9. 예산개요

○ 2019-2023 5년간 총액 136억원

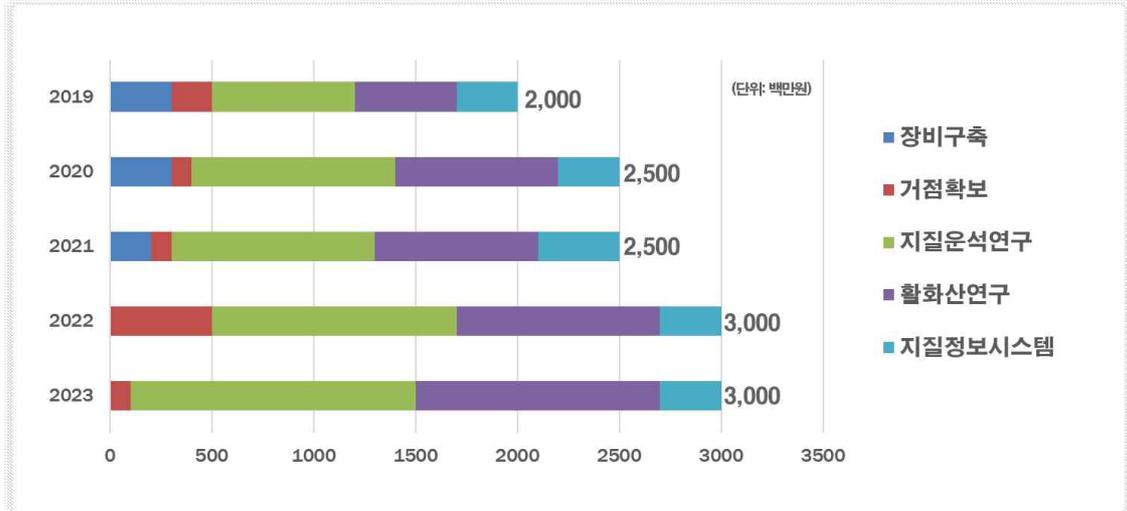


그림 1-9-1. 연구기간 5년간 예산 추이

○ 1차년도(2019) 예산 개요

① 남극종단산맥 지질·운석 탐사·연구 : 1,100백만원

- 지질운석 현장조사 : 350백만원
- 지체구조연구 : 400백만원
- 지구내부물질 및 분화연구 : 200백만원
- 지구기원물질연구 : 150백만원

② 활화산 모니터링 : 700백만원

- 모니터링장비 : 200백만원
- 현장조사 : 200백만원
- 빙저화산 탐사 : 100백만원
- 연대측정 및 화산층서 : 200백만원

③ 지질정보시스템 구축 : 300백만원

- 인공위성 탐사 및 맵핑 : 100백만원
- 지질노두 3D 모델 : 150백만원
- 암석시료관리 시스템 : 50백만원

○ 1차년도(2019) 상세예산

구분	내 용	예산	
남극종단산맥 지질 탐사/연구	<ul style="list-style-type: none"> ■ 현장조사(거점 구축) <ul style="list-style-type: none"> - 남빅토리아랜드 거점캠프 기반 탐사용 헬기 사용료: 100백만원 - 거점캠프 지원 안전요원: 50백만원 - 장보고기지 기반 북빅토리아랜드 현장조사: 100백만원 	250	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 현장조사(운석탐사) <ul style="list-style-type: none"> - 남빅토리아랜드 신규 운석회수지 탐사: 100백만원 	100	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 지체구조연구 <ul style="list-style-type: none"> - 분지진화연구: 100백만원 - 빅토리아랜드 터레인 경계부 기반암 변형작용 연구: 100백만원 - 장보고기지 주변 기반암 변형작용연구: 100백만원 - EBSD (Electron Backscatter Diffraction, 전자후방산란회절기)* 도입: 100백만원 	400	
	* 암석과 광물의 미세구조 연구를 위한 장비, 광물의 결정배열을 정량적으로 파악해 지체구조운동의 방향을 규명		
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 지구내부물질 및 분화 연구 <ul style="list-style-type: none"> - 분화운석을 이용한 고온고압 실험: 100백만원 - 분화운석과 핵, 맨틀의 물성 비교연구: 100백만원 	200	
<ul style="list-style-type: none"> ■ 지구기원물질연구 <ul style="list-style-type: none"> - 미분화 운석의 동위원소 연구: 150백만원 	150		
소 계		1,100	
남극 활화산 모니터링	<ul style="list-style-type: none"> ■ 활화산(멜버른화산)모니터링 장비 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 멀티가스 측정기: 50백만원 - 적외선 카메라: 50백만원 - 지진계(3개): 50백만원 - GPS(3개): 50백만원 	200	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 현장조사 <ul style="list-style-type: none"> - 장보고기지 기반 현장조사: 100백만원 - 멜버른화산 모니터링 장비 현장구축: 100백만원 	200	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 빙저화산탐사 <ul style="list-style-type: none"> - 항공기를 이용한 리트만 화산 얼음 및 기반암 구조 탐사: 100백만원 	100	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 연대측정 및 화산층서 <ul style="list-style-type: none"> - 암석시료의 Kr-Kr, Kr-Ar 동위원소 연대 측정: 100백만원 - 신생대 화산암체의 퇴적상과 분포 분석: 100백만원 	200	
소 계		700	
남극지질 정보시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> ■ 인공위성 탐사 및 맵핑 <ul style="list-style-type: none"> - ASTER자료, 위성사진 등 위성데이터 구매: 50백만원 - 원격탐사 영상 밴드별 분석 및 암석시료 스펙트럼 실험: 50백만원 	100	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 지질노두 3D 모델 제작 <ul style="list-style-type: none"> - 현장 자료 획득 : 100백만원 - 3D모델 작성 소프트웨어 구입 및 고성능 컴퓨팅 사용료: 20백만원 - 지질구조의 3차원 분석 및 입력: 30백만원 	150	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 암석시료관리 시스템 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 암석시료 데이터 전산화 : 50백만원 	50	
소 계		300	
합계		2,100	

2장



1. 남극의 과거

1.1. 거점확보

- 1단계 사업으로 총 4개의 빅토리아랜드 거점을 확보했음. 이를 활용해 내륙 연구를 수행하고 있으며, 2단계 사업에서도 지속적으로 활용할 예정임
- 1단계 사업에서는 연구지역 확대와 내륙연구 노하우를 확보하는 것이 중요한 연구 목표였기 때문에 매년 거점지역을 설정하여 캠프를 구축함. 2단계 사업은 이미 확보한 거점을 기반으로 남극 대륙의 지질연구를 심화하는 단계임
- 하지만 남극 내륙에서 우리나라의 연구 영역을 넓힌다는 의미에서 연구지역 확장도 중요한 의미를 지니고 있음. 이를 위해 본 연구 5개년 중 2개년도는 장보고기지에서 400km(남빅토리아랜드 Dry Valleys 지역) 1000 km (중부 남극종단산맥 지역) 거리에 있는 원거리 거점을 확보하고자 함
- 남빅토리아랜드의 Dry Valley 주변에는 중생대 화산암(Kirkpatrick Basalt)와 퇴적암(Beacon Supergroup)이 넓게 분포하고 있음. 중생대 화산활동 연구(연구주제 2장 1.8절), 운석탐사와 연계하여 캠프지역을 선정하고 소규모 도보위주의 현장조사를 실시할 예정
- 중부 남극종단산맥의 전기고생대 지사는 빅토리아랜드와 다른 면이 있음. 전기고생대 지체구조 터레인이 부가접합한 빅토리아랜드와 달리, 대륙연변부에 발달한 탄산염 퇴적분지가 비교적 잘 보존되어있음. 전기고생대 분지진화 연구(연구주제 2장 1.7절)의 일환으로 Holyoake Range 지역의 탄산염 현장조사 추진



그림 2-1-1. 드라이밸리(DV)와 중부 남극 종단 산맥(CTAM)의 거점 위치. 거점 주변에서 수행한 타 연구팀들의 원거리 캠프

1.2. 지구 기원물질 연구

1.2.1. 연구개발의 필요성

가. 지구의 기원물질, 운석

- 운석은 우주 공간으로부터 지구에 진입한 암석이 지구 대기와의 마찰에 의해 타고 남아 지표면에서 발견된 것으로 지금까지 약 5만개의 운석 발견되었음. 대부분은 화성과 목성 사이의 소행성대 기원이나, 200여 개 내외가 달(Moon)이나 화성(Mars)에서 유래한 것으로 알려져 있음
- 운석 이외의 우주기원 물질(extraterrestrial materials)로는 마이크로미터 크기의 우주먼지(행성간 먼지(interplanetary dust particles: IDPs) 또는 미운석(micrometeorites))가 있으며, 일부 행성간 먼지는 혜성 기원으로 알려져 있음
- 2017년 11월 현재 약 57,105 개의 운석이 정식으로 등록되어 있으며, 그 중 42,400 여개가 남극 운석임. 남극에서 1969년 일본 탐사대에 의해 우연히 처음으로 운석이 발견된 이래, 세계 여러나라의 남극운석탐사대에 의해 매년 남극의 청빙지대에서 운석이 수백에서 수천개씩 발견되고 있음. 우리나라는 2006년 처음으로 남위 85도의 티엘산맥에서 남극운석 탐사를 시작하였으며, 현재까지 총 10회의 운석탐사를 수행하여 950여개의 남극운석을 확보하고 있음
- 지구에 떨어지는 운석 뿐만 아니라 인류는 직접 지구 밖에서 태양계 물질을 가져오고 있음. 1969년에서 1972년 사이 미국의 아폴로 미션에 의해 약 381kg의 월석을 지구로 가지고 왔으며, 1999년에 발사된 스타더스트 탐사선은 소행성 빌트2(Wild 2)에서 직접 먼지를 채집하여 2006년 무사히 지구로 귀환하였음. 최근에는 일본과 미국에서 소행성으로 직접 탐사선을 보내 소행성 표면의 물질을 가지고 오는 샘플리턴(sample return) 프로젝트를 경쟁적으로 수행하고 있음
- 이러한 경쟁은 우주물질 시료를 연구함으로써, 지구의 기원물질이 무엇이며, 또한 지구의 물과 유기물이 어디서 유래한 것인지에 대한 해답을 얻을 수 있을 것으로 기대하기 때문임. 이러한 연구 경쟁에서 뒤처지지 않고 선

도적 연구를 하기 위해서는 남극에서 운석과 우주먼지를 지속적으로 회수하고 연구해야 함

나. 지구의 형성과 진화

- 약 45억 6천 7백만년 전 태양계가 시작된 이후, 먼지가 합쳐져서 작은 암석이 되고, 작은 암석이 모여 미소행성이 되고, 미소행성이 모여 소행성이 되고, 소행성이 모여 지구와 같은 행성이 되었음
- 소행성이 충분히 크지 못하면, 자체 열원(단반감기 동위원소가 붕괴할 때 발생하는 열)이 적기 때문에 분화가 일어나지 못하고, 소행성을 이루는 물질들이 태양계 초기 생성 당시 그대로 보존될 수 있음
- 일부 소행성은 아주 낮은 온도에서 수성 변질(aqueous alteration)을 경험하거나, 수 백도의 온도에서 열 변성(thermal metamorphism)을 경험함. 따라서 이러한 소행성에서 기원한 운석들은 초기 태양계의 물의 조성과 물의 작용에 대한 정보를 갖고 있기 때문에 혜성과 함께 지구의 물과 생명의 기원지로 큰 관심을 받고 있음
- 반면에 소행성이 충분히 크면, 자체 열원에 의해 분화가 일어나게 되며, 지구와 같이 핵, 맨틀, 지각이 형성되고, 마그마에 의한 화성 활동이 일어나게 됨. 분화된 소행성이나 달, 화성에서 기원한 운석들은 지구에서는 연구하지 못하는 행성의 진화 단계를 기록하고 있음
- 철운석은 분화된 소행성의 핵에서 기원한 것으로 여겨지는데, 철운석을 통해 우리는 직접 가보지 못하는 지구의 핵이 언제, 어떻게 만들어졌으며, 어떤 성분으로 이루어져 있는지 연구할 수 있음
- 석철질 운석의 하나인 팔라사이트는 분화된 소행성의 핵과 맨틀의 경계에서 기원한 것으로, 지구의 핵과 맨틀의 분화가 어떻게 일어났는지 유추할 수 있음
- 분화된 소행성의 하부 지각에서 기원하거나 화산 활동에 의해 만들어진 운석들은 지구 형성 초기 화산 활동에 대한 정보를 줄 수 있음



그림 2-2-1. 남극에서 2015-16시즌 발견된 철운석 EET 15060의 (a) 표면 사진과 (b) 단면 사진. 지구의 핵에 접근할 수 없기 때문에 철운석은 지구를 포함한 행성의 핵을 직접 연구할 수 있는 유일한 시료임.

1.2.2. 연구 목표 및 방법

가. 지구 기원물질의 형성과 진화

(1) 태양계 최초 물질, 칼슘-알루미늄 부화물(CAI)의 형성과정 연구

- 초고정밀 이차이온질량분석기로 CAI 구성광물의 Ca, Ti 안정동위원소를 분석하여 원시 태양계 성운에서 고체 물질들이 생성될 때 동위원소 조성 변화를 일으키는 메커니즘 규명
- CAI 기원물질이 녹은 액에서 광물이 정출되는 과정에서 액과 광물, 액과

가스의 동위원소 교환 및 확산 모델링

○ CAI의 단반감기 동위원소를 이용하여 형성 과정과 시기 규명

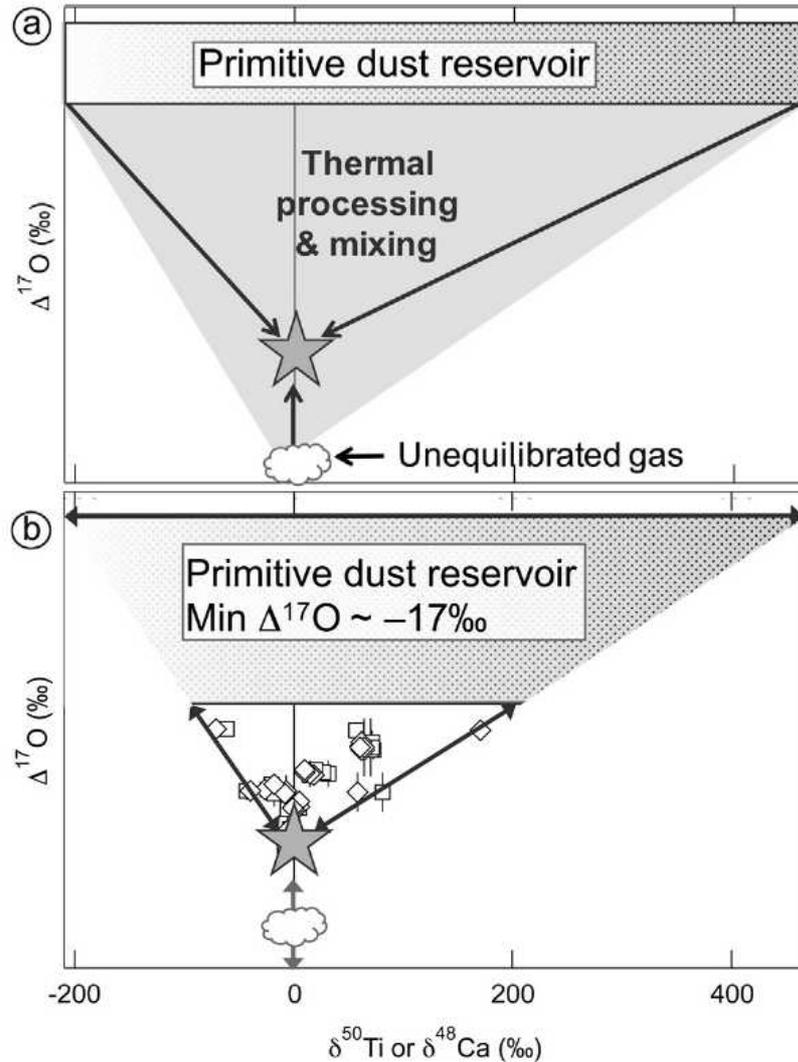


그림 2-2-2. 태양계 원시 물질이 열처리를 받고 서로 섞임에 따라 칼륨-타이타늄과 산소동위원소 조성이 변화하는 양상 (Koop et al. 2016)

(2) 콘드룰의 생성 기작 연구

- 콘드룰의 벌크 조성과 구성광물 상관관계 규명
- 콘드룰의 조직 및 구성광물 조성으로부터 냉각속도 계산
- 라만 분석을 통한 콘드룰 구성광물의 결정 구조 규명
- 사상석이 정출된 콘드룰과 그렇지 않은 콘드룰의 비교 연구를 통해 콘드룰의 냉각속도와 주변 가스의 dust/gas 비율과 관련성 규명

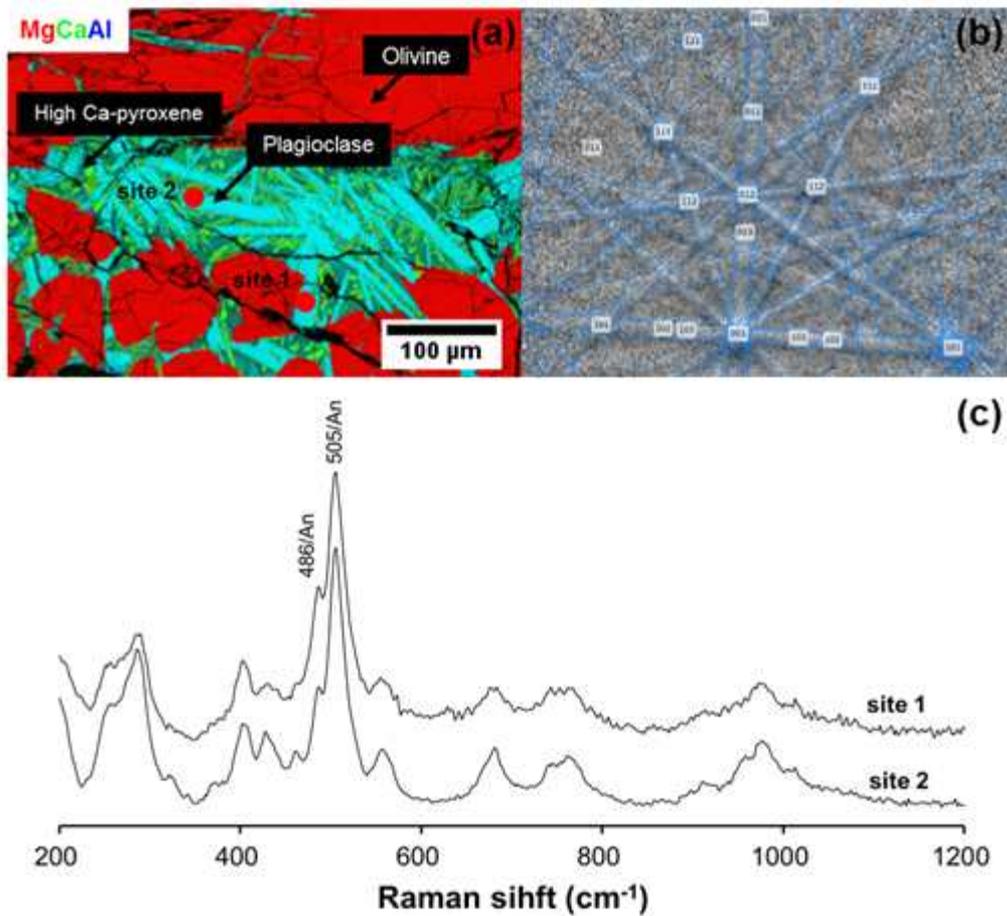


그림 2-2-3. 남극운석 EET 14017의 일부 콘드롤에서 드물게 나타나는 사장석(plagioclase) 결정. (a) Mg, Ca, Al X-ray 원소 맵핑의 합성 이미지, (b) 사장석의 EBSD 패턴, (c) 사장석의 라만 스펙트럼. 사장석이 결정화되기 위해서는 냉각속도가 5~10 K/hr로 일반적으로 알려진 콘드롤의 냉각속도(100~1000 K/hr)보다 훨씬 느려야 한다.

(3) 소행성에서 일어난 수성 변질과 열변성 연구

- CAI와 콘드롤 구성광물에 대해 수성변질실험 수행
- 소행성에서 수성변질과 열변성이 일어날 때 광물상의 변화를 단계적으로 규명
- 수성변질과 열변성으로 인한 동위원소의 변화를 실험과 분석을 통해 규명

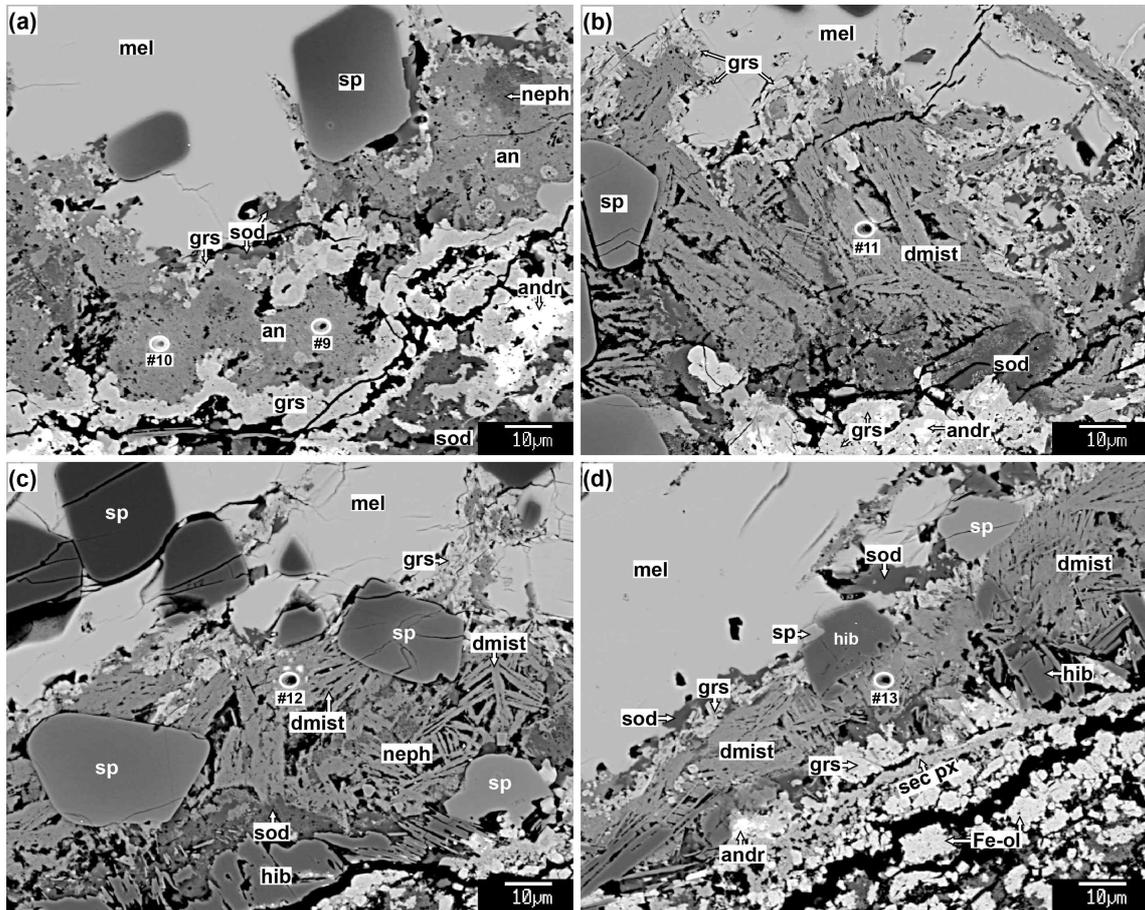


그림 2-2-4. CV3 콘드라이트 Allende에서 나온 CAI에서 관찰되는 변질 광물들. 멜릴라이트 (mel)를 치환한 것으로 보이는 anorthite와 dmisteinbergite는 동질이상(polymorph)이로, dmisteinbergite가 metastable하기 때문에 anorthite와 동시 산출되는 특수한 환경(특정 온도와 fluid의 조성 등)을 지시할 것으로 보인다.

나. 분화운석 연구를 통한 원시 지구의 형성과 분화 과정 해석

(1) 철운석과 팔라싸이트의 미량원소 조성 and 핵의 생성 과정 연구

- 철운석은 지구를 포함한 행성의 핵을 직접 연구할 수 있는 유일한 자연 시료
- 팔라싸이트는 분화된 행성의 핵과 맨틀 경계에서 기원한 것으로 알려져 있어, 핵과 맨틀의 형성과 분화를 직접 연구할 수 있는 시료
- 유도결합플라즈마 질량분석법으로 간편하고 정확하게 철운석과 팔라싸이트의 미량원소를 분석할 수 있는 기술 개발
- 철운석의 미량원소 조성 and 핵이 생성될 때 원소의 분별이 일어나는 모델링 결과 비교

- 팔라싸이트의 철과 감람석 경계의 미량원소 분석을 통한 원소 분별 메커니즘 연구

(2) 분화운석에 기록된 소행성과 달의 화산 활동

- 분화운석인 유크라이트, 디오제나이트의 전암 조성 and 미량원소 분석을 통해 태양계 초기 소행성의 분화와 화산활동 규명
- 달 표토에서 기원한 남극 달운석의 동위원소 연구를 통해 달의 화산활동의 메커니즘과 시기 규명

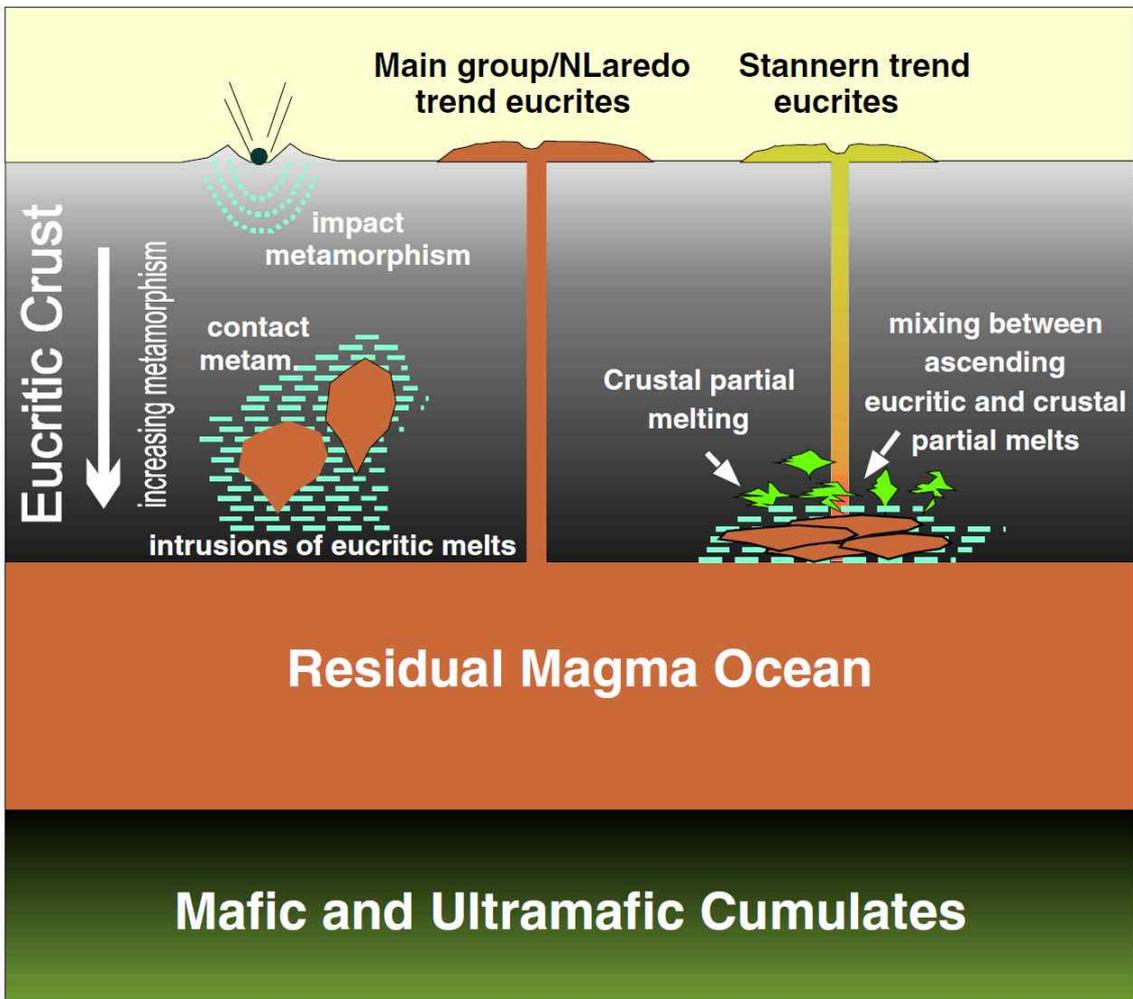


그림 2-2-5. 현무암질 운석인 유크라이트의 모천체(parent body) 모식도(Barrat et al. 2007). 다양한 종류의 유크라이트의 전암 조성 및 미량원소 분석으로 태양계 초기 소행성의 맨틀, 지각의 분화와 화산활동을 재현할 수 있다.

다. 모천체에서 지구까지: 운석에 기록된 우주환경 연구

(1) 모천체에서의 열역사 연구

- 극지연구소에 설치/운영중인 국내 유일 불활성기체 동위원소 분석시스템을 이용하여 불활성기체 동위원소를 측정할 수 있으며, 레이저를 이용한 극미량 시료 분석기술 개발을 수행중
- 소행성에서 충격변성이나 열변성에 따라 일어나는 불활성기체 분별 작용을 이용하여 모천체에서의 열역사 규명
- 수성변질에 의해서도 불활성기체 분별이 일어날 수 있기 때문에 소행성에서 물의 작용에 대한 연구도 가능

(2) 우주선 노출 연대 (cosmic-ray exposure age)

- 운석이 모천체에서 떨어져 나오게 되면 우주공간에서 우주선에 직접 노출되기 시작
- 태양 고에너지 입자나 우주선에 의해 운석 표면에서 불활성기체의 단반감기 동위원소가 생성되며, 이 동위원소들의 반감기를 이용해서 우주선 노출 연대 측정

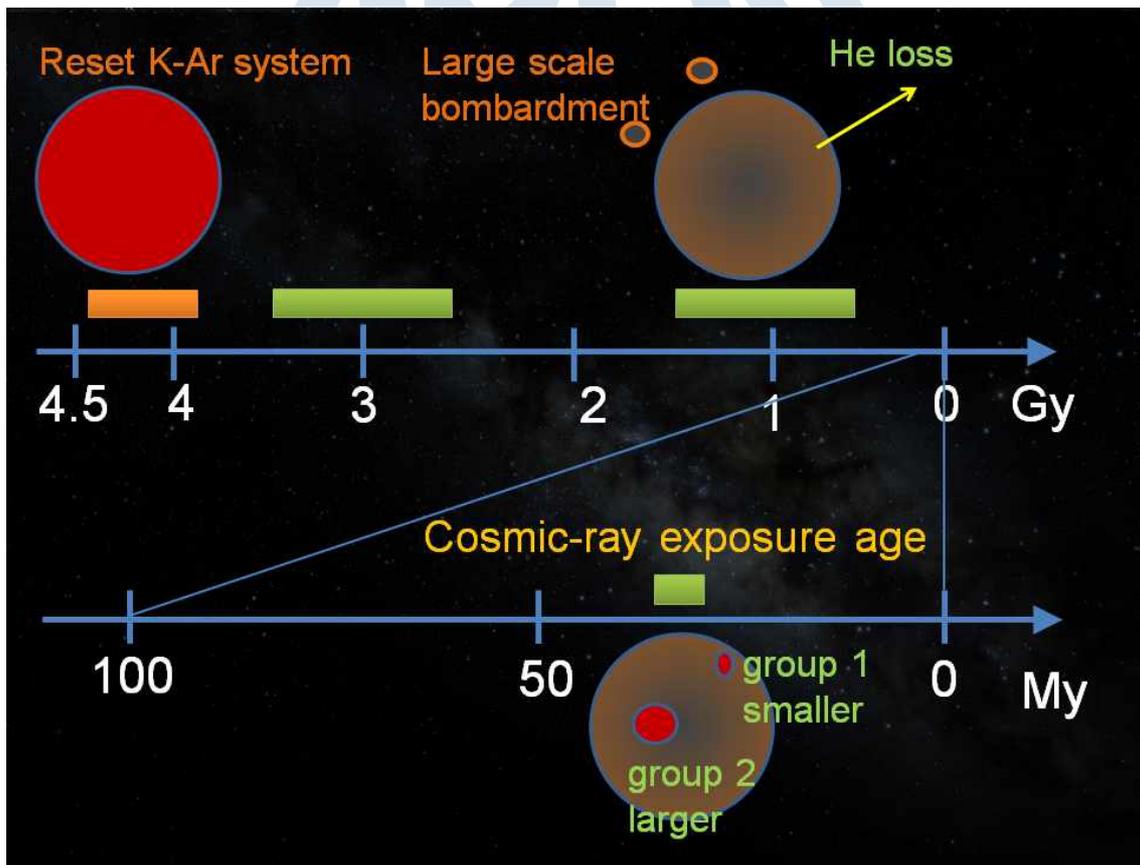


그림 2-2-6. 불활성기체 동위원소를 이용한 운석의 열역사 연구. 운석이 모천체에 떨어져 나

와 우주공간에서 우주선에 노출되었을 때 생성되는 동위원소를 이용한 노출연대 연구와 운석의 모천체에서 받은 충격변성 및 열변성에 의한 동위원소 분별을 이용해 열역사 규명이 가능하다.

라. 운석의 대기권 돌입과 낙하 과정 시뮬레이션

(1) 운석의 고온 열물성 측정 및 운석이 낙하하는 동안 받는 내외부의 열적 영향에 대한 수치 모델링

- 운석의 정확한 열적 특성을 규명하기 위해 온도에 따라 변화하는 열물성(열전도도, 열확산율, 체적열용량)이 필요하며 기존의 연구에서는 열물성을 온도에 따라 변화하지 않는 상수 값을 사용하는 한계
- 측정된 열물성을 입력변수로 사용하여 운석의 낙하 동안 받는 열적인 영향을 수치모델링
- 수치모델링에서 운석 내부의 온도 변화(온도 구배 분포)와 ablation velocity 계산
- 운석의 전면부, 측면부, 후면부에서의 ablation velocity, 내부 온도 구배 모델링
- 용융각에 대한 광학 및 전자 현미경 관찰 : 용융각을 구성하는 layers의 조직 특성을 관찰하고 layers 구성 물질(광물) 동정 및 원소분석

(2) 수치 모델링과 용융각에 대한 TL 분석, 현미경 관찰 결과들을 이용해 산출된 ablation velocity와 운석 내부 온도 구배 비교 분석 연구

- 기존 운석 내부 온도 변화 및 온도 구배 분포 연구 결과와 시뮬레이션의 ablation velocity 결과와 비교
- 연구결과를 이용한 운석의 내부 온도 변화 및 분포와 지구 표면에 낙하시 충돌에 따른 영향 규명

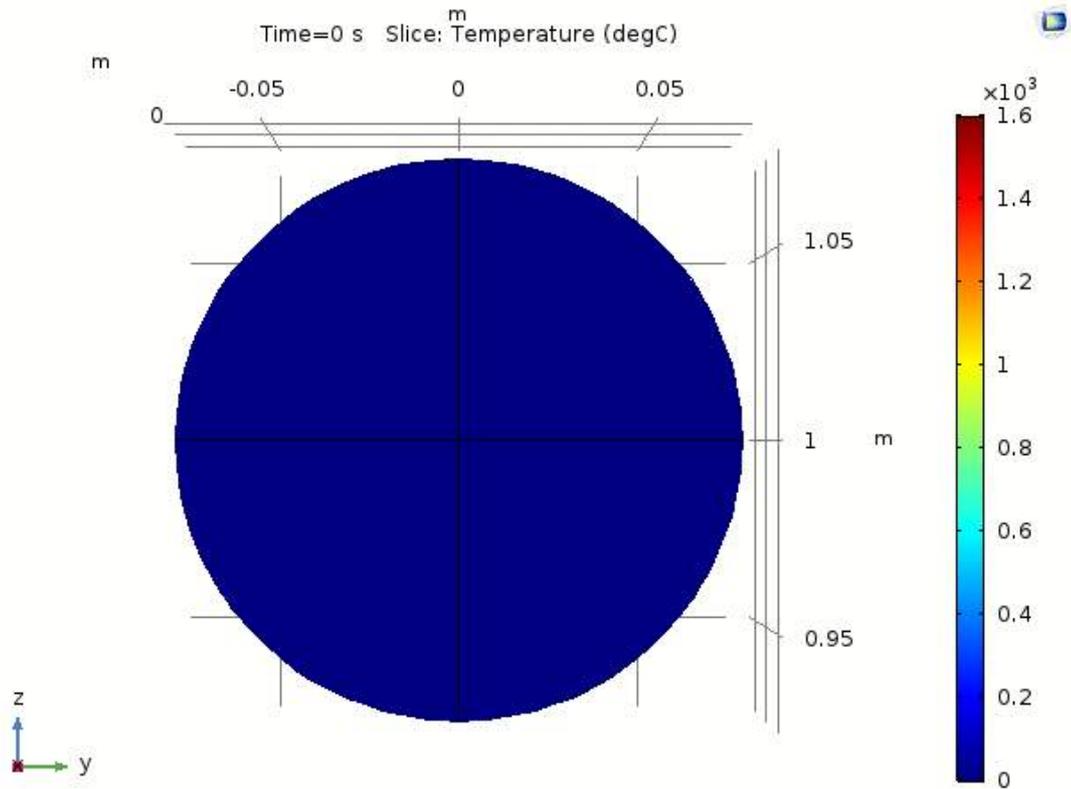


그림 2-2-7. 운석이 대기권을 통과할 때 마찰열에 따른 ablation 모델링 기초 결과. 온도에 따른 운석의 물성 측정이 이루어지면 보다 정확한 시뮬레이션이 가능하다.

1.2.3. 기대성과

- 지구기원물질이 태양계 성운에서 지구에 낙하할 때까지 전 과정에 대한 총체적 이해
- 국내외 산학연 협동 연구를 통한 지구기원물질 연구의 저변 확대 및 연구 경쟁력 확보
- 철운석과 팔라싸이트를 통해 시료 확보가 불가능한 지구내부물질(핵, 하부 맨틀 등)의 보다 직접적인 이해 가능
- 분화운석을 통해 태양계 초기의 화산활동 연구로 원시지구 화산활동에 대한 심층적 이해

1.3. 극한환경 실험을 통한 지구내부 연구

1.3.1. 연구개발의 필요성

- 행성계 사이의 충돌은 planetesimal (초기 kilometer-scale bodies) 형성 이후 태양계의 지질학적 진화에 중요한 역할을 해왔음
- 이러한 충돌에 의해 지상까지 낙하 된 운석은 원시 태양계에서 최초 물질들이 서로 뭉치고 충돌하는 과정을 거쳐 최초의 물질이 용해되고 새로운 물질과 구조로 진화해 가는 과정과 지구와 같은 행성의 내부에 대한 단서를 알 수 있음
- 극한 환경 모사 실험을 위해서는 1차적으로 광물학적-분광학적 분석 기술을 적용한 체계적인 데이터베이스 구축을 진행해야 함
- 이를 통해 아직 확인되지 않은 새로운 광물 종에 대한 발견과 물성 연구를 기대할 수 있음
- 선별된 운석 시료들에 대한 첨단 가속기 시설과 고온-고압 극한 환경에서의 실시간 분석 기술을 접목함으로써 운석 형성시의 물성 및 변화 과정을 연구함으로써 행성 형성과 진화 과정에 대한 새로운 정보를 제공
- 또한 운석 충돌시의 동적 극한 환경 연구도 시도함으로써 지구와 행성의 진화 과정에 대한 이해도 확장

1.3.2. 운석 광물 결정 연구

가. 대만 방사광가속기 (TPS, Taiwan Photon Source) 1차 실험

- 본 연구에서 이용한 대만 방사광가속기 (NSRRC)의 TPS (Taiwan Photon Source) 21A 빔라인은 X-선 나노 회절 빔라인이며, 미세구조 분석을 위한 X선 (FORMOSA, FOCUS x-Ray for Micro-Structure Analysis) end station을 가지고 있음
- End station은 2D/3D X-ray Laue 회절, 나노 X-ray mapping, X-ray fluorescence/mapping, X-ray absorption spectroscopy 등이 가능함
- 본 연구에서는 Laue 회절과 X-ray fluorescence를 이용
- 시료는 가로 5 mm, 세로 5 mm 크기의 박편을 준비하였으며, Laue 회절은 white beam을 이용하였고 에너지 범위는 2-26KeV이며 Pilatus 6M

detector를 사용

- Beam size는 toroidal focus 미러와 한 쌍의 K-B 미러가 2단계 focusing 시스템으로 구성되어 있어 100nm에서 측정
- X-선 형광 분석은 Burker SDD를 이용하였고 step size는 5 μm 이고, 노출 시간은 0.2초로 측정(Fig. 1-3-1)
- 본 연구에서는 2014년도에 남극 레클링 피크(Reckling Peak) 지역에서 발견된 콘드라이트를 조사하였고 콘드라이트 그룹은 CM2로 추정되며 수성변질을 받았음
- RKP 14005 콘드라이트 내 광물조성을 알아보기 위해 대만 방사광가속기(NSRRC)와 연세대학교 실험실의 라만을 이용하였고, 극지연구소에서 제작한 박편으로 분석(Fig. 1-3-2).

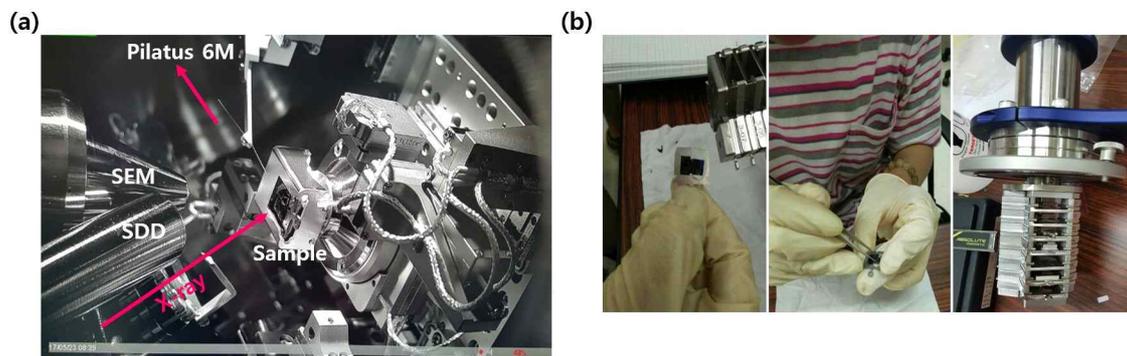


그림 2-3-1. (a) 대만 방사광가속기 TPS 21A 빔라인 FORMOSA end station과 (b) 샘플 준비

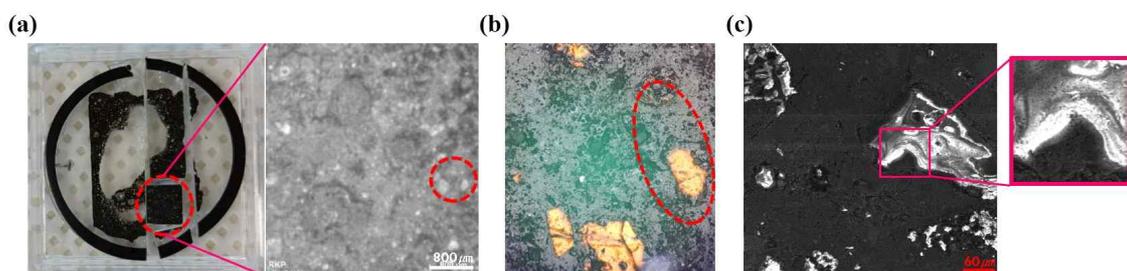


그림 2-3-2. RKP 14005 콘드라이트의 (a) 박편 (b) 현미경 이미지와 (c) SEM 이미지

나. 시료SEM 및 XRF를 이용한 주요 구성 원소 확인

- RKP 14005 콘드라이트 내 광물과 광물 주변의 boundary 부분을 대만 방사광가속기 주사전자현미경(SEM)으로 이미지를 획득하고(Fig. 1-3-2c), Laue 회절 분석과 X선 형광분석을 실시

- 광물과 광물 주변의 boundary 부분의 가로 200 μm , 세로 200 μm 영역을 측정하였으며 측정 순서는 그림 9c의 네모박스 왼편 상단 꼭지점을 측정 시작점으로 하여 오른편 상단 꼭지점 방향으로 측정하고 한 줄의 측정이 끝나면 다음 줄의 왼쪽에서 오른쪽 방향으로 측정함
- 광물과 광물 주변의 boundary 부분을 X선 형광 분석한 결과, 구성 원소는 Fe, Cr, Ca, Si, Mg, O, Kr, Rb, Ni, Ti가 존재하는 것으로 나타남 (Fig. 1-3-3)
- 스펙트럼에서 발견된 Kr은 행성 원시 가스로 RKP 14005 콘드라이트 내 trap 되어 있는 것으로 생각되며, 관찰된 Rb 피크는 태양 성운의 상대적 연대기를 결정할 때 이용되는 원소로 Rb의 존재비를 통해 RKP 14005 콘드라이트의 age를 유추하는 지시자로 이용할 수 있을 것으로 보임
- 또한, Fe/Cr/O로 구성된 스펙트럼, Ca/Mg/Fe/Cr/Ti/Si/O 혹은 Ca/Mg/Fe/Cr/Si/O로 구성된 스펙트럼, Ca/Fe/Cr/Si/O가 나타나는 스펙트럼, Fe/Cr/Si/O로 구성된 스펙트럼이 존재하며, 이는 광물과 광물 주변 boundary에 존재하는 광물이 4종류임을 알 수 있음

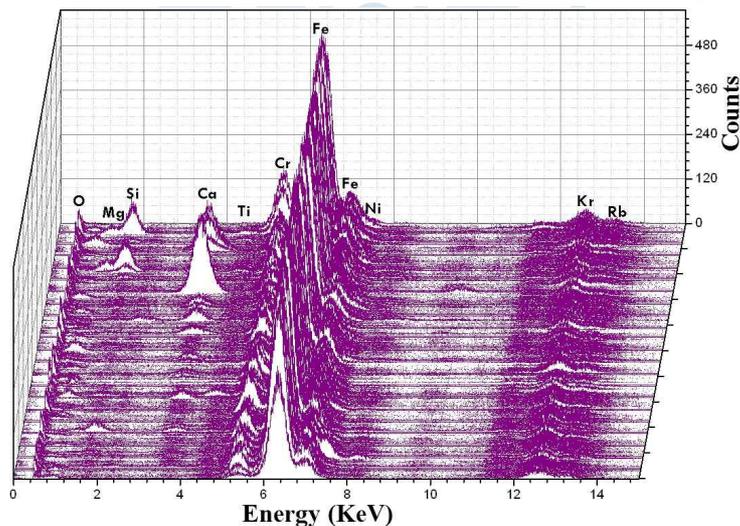


그림 2-3-3. RKP 14005 콘드라이트 내 광물과 광물 주변 boundary 부분의 방사광가속기 X선 형광분석

다. Laue 회절을 이용한 주요 광물상 확인

- RKP 14005 콘드라이트 내 광물과 광물 주변 boundary를 Laue 회절 분

석한 결과, olivine, fayalite, orthopyroxene, opaque grain은 chromite, 총 4가지의 광물이 존재함을 확인

○ Olivine ((Ca,(Mg,Fe))₂SiO₄)

- 첫 번째 광물은 olivine ((Ca,(Mg,Fe))₂SiO₄)으로, forsterite와 fayalite가 섞여있는 형태임
- 광물과 광물 주변 boundary 영역에서 광물 부분에 해당되는 곳이며 olivine이 multi grain으로 존재하는 것으로 나타남
- 첫 번째 olivine grain의 격자상수 (lattice parameter)는 $a=4.796 \text{ \AA}$, $b=10.298 \text{ \AA}$, $c=6.038 \text{ \AA}$ 로 기존에 알려진 olivine의 격자상수와 오차값이 0.01-0.04 \AA 로 큰 차이는 없는 것으로 보임
- 오일러 각 (Euler angle)은 $\psi= -27.511^\circ$, $\theta= -37.869^\circ$, $\phi= 32.704^\circ$ 로 rotation angle이 59도인 것으로 나타남
- 두 번째 olivine grain의 격자상수는 $a=4.802 \text{ \AA}$, $b=10.289 \text{ \AA}$, $c=6.037 \text{ \AA}$ 로 나타났으며 오일러 각은 $\psi= -9.097^\circ$, $\theta= -12.290^\circ$, $\phi= -50.990^\circ$ 로 rotation angle이 54인 상태로 존재
- 세 번째 olivine grain의 격자상수는 $a=4.814 \text{ \AA}$, $b=10.294 \text{ \AA}$, $c=6.018 \text{ \AA}$ 오일러 각은 $\psi= 42.010^\circ$, $\theta= 14.853^\circ$, $\phi= 84.205^\circ$ 로 rotation angle이 88도로 존재하는 것으로 나타남(Fig. 1-3-4a)
- Olivine 내 2개의 금속 사이트 (M1, M2)가 존재하는데 이 자리에 Mg, Fe, Ca가 공존하며 존재(Fig. 1-3-4b)
- 이와 동시에 X선 형광분석도 진행한 결과, 구성 원소는 Ca, Mg, Fe, Si, O, Cr, Ti로 확인되었다(Fig. 1-3-4c)
- 달, 화성, 소행성의 운석에서 발견된 olivine은 초기 태양계로부터의 파편들의 수집물과 혼합물을 포함하는데, 본 연구에서 측정된 olivine은 기본적으로 산소, 실리콘, 마그네슘, 철 이외의 원소도 포함하고 있음을 알 수 있음

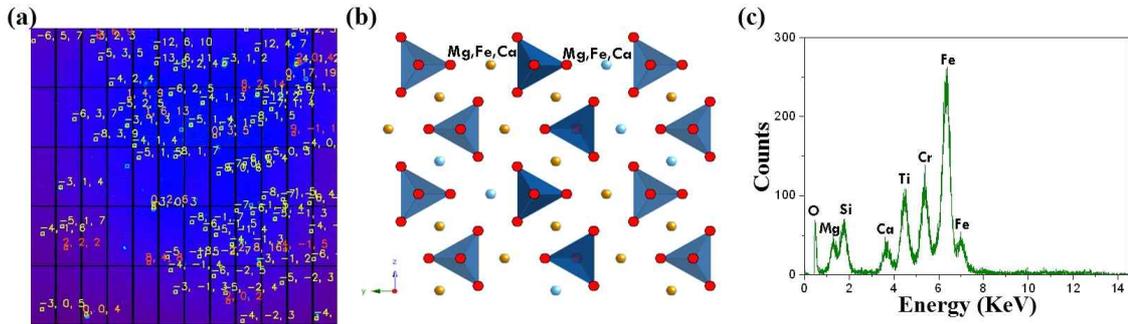


그림 2-3-4. Olivine의 (a) Laue 회절 분석과 (b) 구조 모델, (c) X선 형광 분석

○ Fayalite (Fe_2SiO_4)

- 두 번째 광물은 fayalite (Fe_2SiO_4)로, 위의 olivine이 존재하는 곳의 북동편에서 발견되었고 multi grain으로 존재하는 것으로 나타남
- 첫 번째 fayalite grain의 격자상수 (lattice parameter)는 $a=4.798 \text{ \AA}$, $b=10.504 \text{ \AA}$, $c=6.095 \text{ \AA}$ 로 기존에 알려진 fayalite의 격자상수와 오차값이 $0.01\text{-}0.02 \text{ \AA}$ 로 큰 차이는 없는 것으로 보이며, 오일러 각 (Euler angle)은 $\psi = -49.680^\circ$, $\theta = 38.568^\circ$, $\phi = 41.743^\circ$ 로 rotation angle이 69도로 존재하는 것으로 나타남
- 두 번째 fayalite grain의 격자상수 (lattice parameter)는 $a=4.831 \text{ \AA}$, $b=10.416 \text{ \AA}$, $c=6.102 \text{ \AA}$ 로 나타났으며, 오일러 각 (Euler angle)은 $\psi = -30.137^\circ$, $\theta = 43.962^\circ$, $\phi = 84.957^\circ$ 로 rotation angle이 101도로 존재
- 세 번째 fayalite grain의 격자상수 (lattice parameter)는 $a=4.800 \text{ \AA}$, $b=10.625 \text{ \AA}$, $c=6.037 \text{ \AA}$ 이며, 오일러 각은 $\psi = 10.928^\circ$, $\theta = 10.424^\circ$, $\phi = 0.524^\circ$ 로 rotation angle이 15도로 존재하는 것으로 나타남(Fig. 1-3-5a)
- Fayalite 내 2개의 금속 사이트 (M1, M2)가 존재하는데 위의 olivine과 다르게 이 자리에는 Fe만 존재한다(Fig. 1-3-5b)
- X선 형광분석으로 확인된 주요 구성 원소는 Fe, Si, O, Cr이며, Kr과 Rb도 나타남(Fig. 1-3-5c)
- Olivine과 마찬가지로 fayalite 내에 Cr이 존재하고 있는 것을 알 수 있고 반면에, olivine에서는 발견되지 않았던 Kr과 Rb가 스펙트럼에 나타남

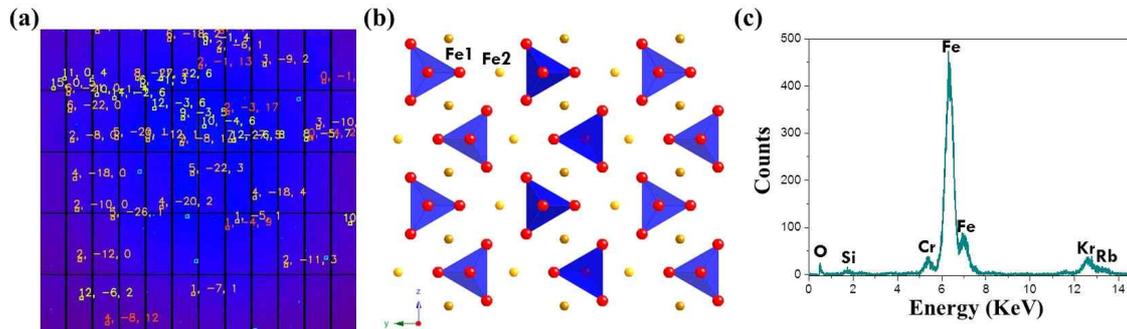


Figure 1-3-5. Fayalite의 (a) Laue 회절 분석과 (b) 구조 모델, (c) X선 형광 분석

○ Orthopyroxene ($\text{Ca}(\text{Fe,Cr})\text{Si}_2\text{O}_6$)

- 첫 번째 orthopyroxene grain의 격자상수 (lattice parameter)는 $a=18.402 \text{ \AA}$, $b=8.923 \text{ \AA}$, $c=5.285 \text{ \AA}$ 로 기존에 알려진 orthopyroxene의 격자상수와 오차값이 $0.0-0.09 \text{ \AA}$ 로 큰 차이는 없는 것으로 보임
- 오일러 각 (Euler angle)은 $\psi = -6.726^\circ$, $\theta = -22.861^\circ$, $\phi = -78.339^\circ$ 로 rotation angle이 83도로 존재하는 것으로 나타남
- 두 번째 orthopyroxene grain의 격자상수는 $a=18.406 \text{ \AA}$, $b=8.968 \text{ \AA}$, $c=5.257 \text{ \AA}$ 로 나타났으며, 오일러 각은 $\psi = -7.499^\circ$, $\theta = -22.799^\circ$, $\phi = -76.386^\circ$ 로 rotation angle이 81도로 존재하는 것으로 나타남
- 세 번째 orthopyroxene grain의 격자상수는 $a=18.460 \text{ \AA}$, $b=8.992 \text{ \AA}$, $c=5.227 \text{ \AA}$ 이며, 오일러 각은 $\psi = 19.058^\circ$, $\theta = -38.744^\circ$, $\phi = -27.800^\circ$ 로 rotation angle이 58도로 존재하는 것으로 나타남(그림 1-3-6a)
- Orthopyroxene 내 M2자리에 Ca, Na, Fe^{2+} , Mg 혹은 드물게 Zn, Mn, Li이 치환되는데 본 시편을 구성하고 있는 orthopyroxene은 Ca와 Fe가 존재
- M1 자리는 M2보다 이온의 크기가 작은 Cr, Al, Fe^{3+} , Mg, Co, Mn, Ti, Sc, V가 자리할 수 있으며 본 시편에는 Cr이 존재함을 알 수 있음(Fig. 1-3-6b)
- X선 형광분석으로 확인된 주요 구성 원소는 Ca, Fe, Cr, Si, O이며, 행정 원시 가스인 Kr이 trap되어 존재하는 것을 알 수 있음(Fig. 1-3-6c)

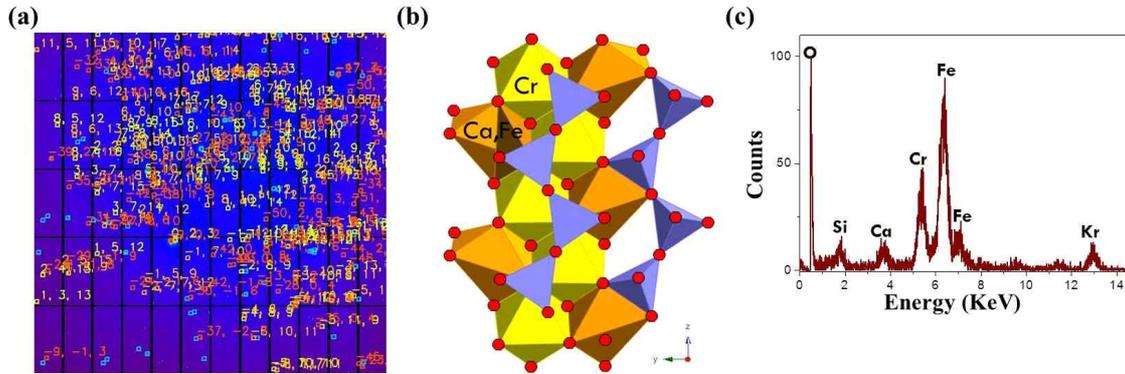


그림 2-3-6. Pyroxene의 Laue (a) Laue 회절 분석과 (b) 구조 모델, (c) X선 형광 분석

○ Chromite (FeCr_2O_4)

- 공간군 (space group)은 $Fd\bar{3}m$ 이며, 첫 번째 chromite grain의 격자상수 (lattice parameter)는 $a=8.322 \text{ \AA}$, 두 번째 grain의 격자상수는 $a=8.432 \text{ \AA}$, 세 번째 grain의 격자상수는 $a=8.255 \text{ \AA}$ 로 나타남(Fig. 1-3-7a)
- 본 시편에 존재하는 Chromite는 Cr이 산소와 팔면체를 이루고 Fe가 산소와 사면체를 이루어 layered 형태의 구조를 가짐(Fig. 1-3-7b)
- X선 형광분석을 통해 확인한 주요 구성 원소는 Fe, Cr, O이며, Kr이 trap되어 있고 Rb도 존재하며(Fig. 1-3-7c), chromite가 존재하는 것은 RKP 14005 콘드라이트가 산화환경에서 형성됐음을 지시

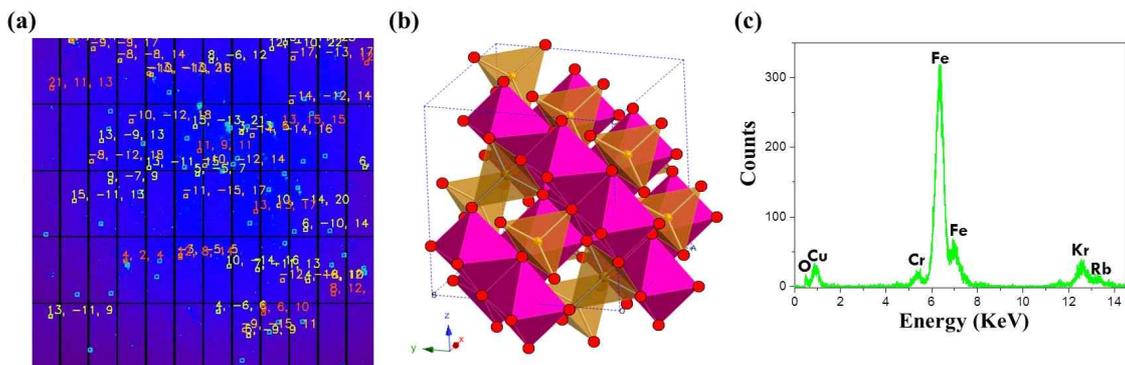


그림 2-3-7. Chromite의 (a) Laue 회절 분석과 (b) 구조 모델, (c) X선 형광 분석

라. Micro-Raman을 이용한 주요 광물상 확인

- Laue 회절 결과를 바탕으로 연세대학교 결정학연구실의 라만을 이용하여 RKP 14005 콘드라이트 박편을 측정

- 라만은 Horiba사의 532 nm 파장을 사용하여 1800 grating에서 180초 측정
- Olivine은 Mg와 Fe 존재비에 따라 라만 피크가 다르게 나타나는데, Mg의 함량이 높은 olivine은 826 cm^{-1} 과 858 cm^{-1} 근처에서 나타나고, Fe의 함량이 높은 olivine은 815 cm^{-1} 과 836 cm^{-1} 근처에서 나타남
- 본 시편에서 나타난 823, 826 cm^{-1} 와 854, 859 cm^{-1} 라만피크는 Mg 함량이 많은 olivine일 것으로 판단됨(Fig. 1-3-8)
- Pyroxene은 type에 따라 라만 피크가 조금 다르게 나타나는데 triclinic pyroxene은 655 cm^{-1} 근처와 990 cm^{-1} 근처에서 관찰되며, monoclinic pyroxene은 라만 피크가 660 cm^{-1} 근처와 1000 cm^{-1} 근처에서 관찰됨
- Orthorhombic pyroxene은 660-677 cm^{-1} 합쳐져서 broad하게 나타나며, 1004-1010 cm^{-1} 근처에서 broad하게 나타남
- 본 시편을 측정한 결과, 667 cm^{-1} 과 1011 cm^{-1} 의 라만 피크가 broad하게 관찰되어 orthopyroxene인 것으로 판단됨(Fig. 1-3-8)

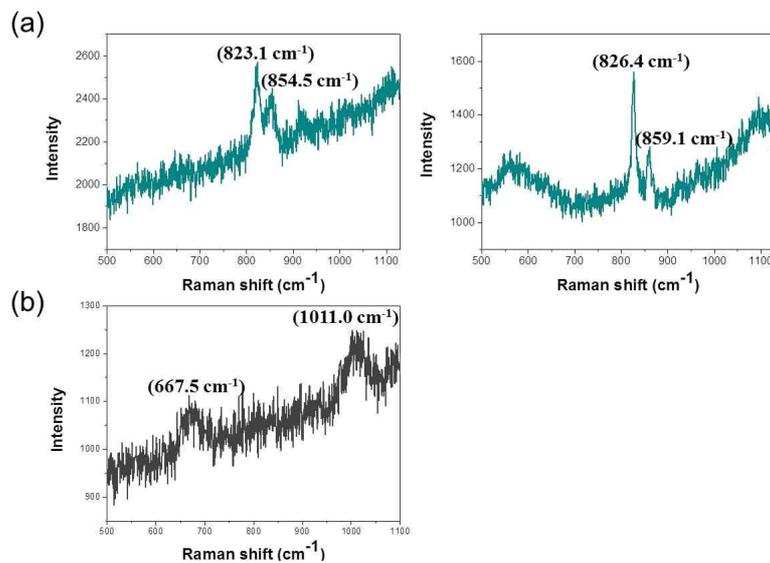


그림 2-3-8. RKP 14005 콘드라이트 박편의 Raman 분석

1.3.3. 운석 광물 극한환경 실험

가. 운석을 통한 핵과 맨틀의 분화 연구

- 지구 기원물질에 대한 고온, 고압 실험을 통해서 초기 지구의 분화를 연구할 수 있음

- 지구의 핵과 맨틀의 시료를 직접 획득할 방법은 없기 때문에 초기 지구의 핵과 맨틀의 분화 과정을 이해하기 위해서는 운석을 이용할 수 밖에 없음
- 팔라사이트는 철과 감람석으로 이루어진 운석으로, 분화된 소행성의 핵과 맨틀의 경계에서 기원한 것으로 여겨지고 있음
- 따라서 팔라사이트를 이용해 고온, 고압하에서 변화를 연구함으로써 초기 지구의 핵과 맨틀의 분화를 규명할 수 있을 것으로 기대함

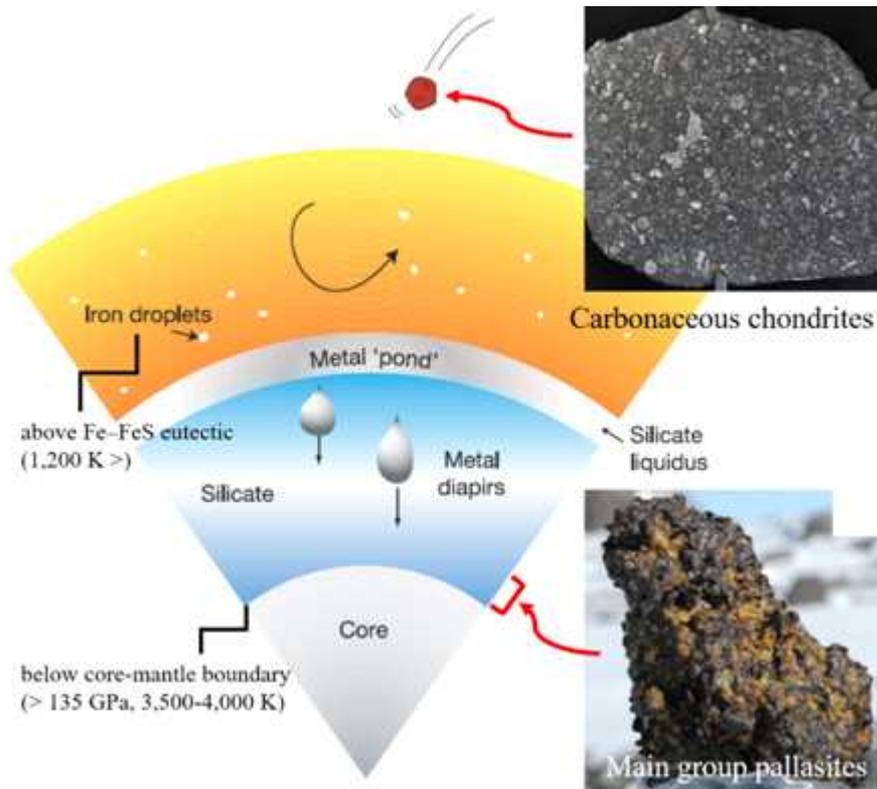


그림 2-3-9. 초기 지구 마그마 바다를 보여주는 모식도. 콘드라이트는 지구 기원 물질은, 팔라사이트는 핵과 맨틀의 분화를 대표한다

나. 레이저를 활용한 고압 실험

- 포항 4세대 가속기(PAL-XFEL)에서 레이저와 X-ray 소스를 이용하여 팔라사이트 메탈과 감람석을 대상으로 고압 실험 수행하여 지구 내부 철과 맨틀의 분화 기작 연구
- 레이저에 의한 고압 시뮬레이션 결과(Fig. 1-3-10), 지구 내부를 연구할 수 있을 정도의 고압 실험이 가능함

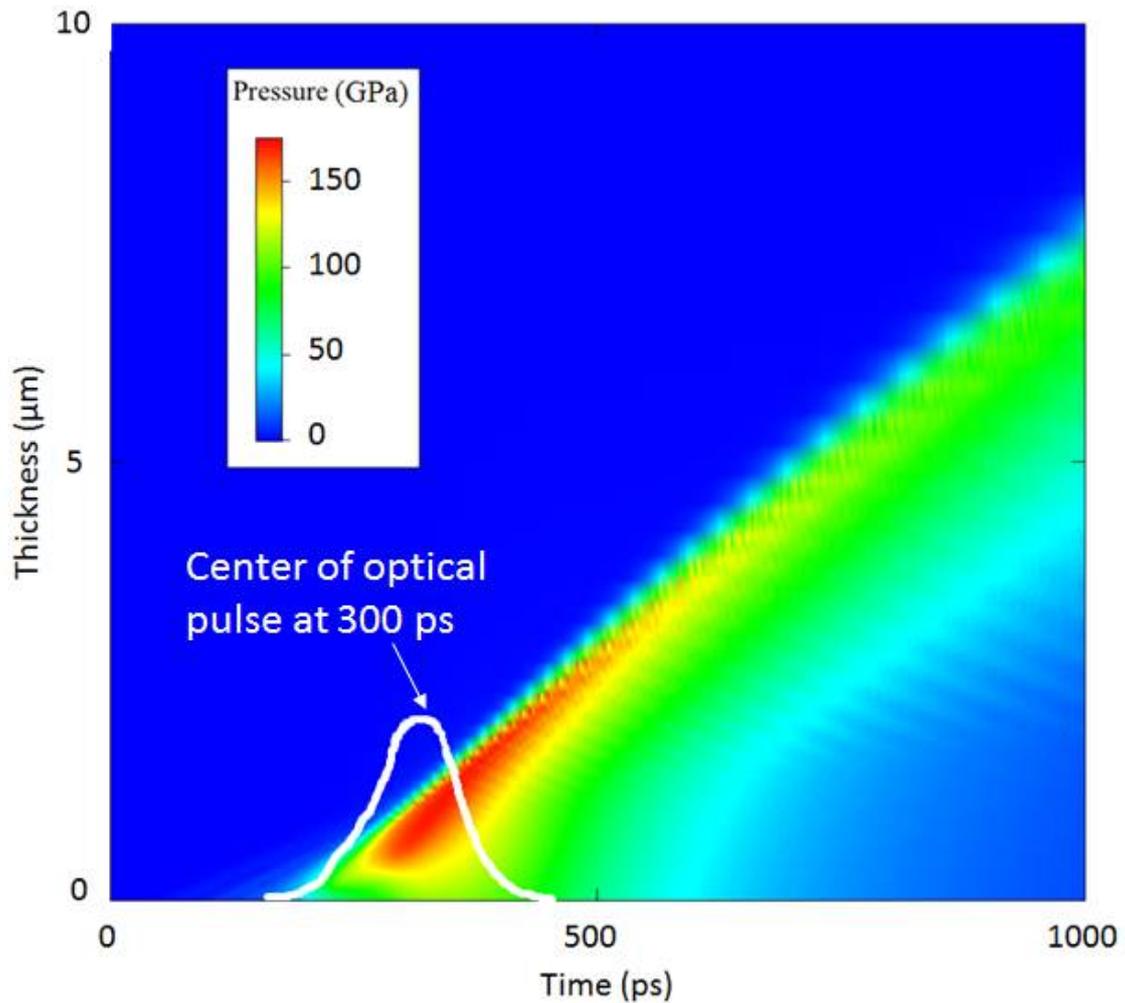


그림 2-3-10. 1-D Hellios hydrocode simulation for 10 shock

1.3.4. 기대성과

- 남극 운석 탐사 결과물에 대한 광물학적-분광학적 데이터베이스 구축
- 마이크론 스케일 분석장비 활용을 통한 운석내 미확인된 광물상 발견 가능
- 운석에 대한 극한 환경 모사 실험을 통해 행성의 형성 및 진화 과정에 대한 모델 제시
- 방사광가속기 첨단 분석기법의 접목을 통한 운석 연구의 새로운 모델 제시

참고문헌

- N.G. Lunning, C.M. Corrigan, 2017, Carbonaceous chondrite impact melts, *Elements*, 13, 68-69.
- A.E. Rubin, J.N. Grossman, 2010, Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteoritics and Planetary Science*, 45, 114-122.
- 최변각, 2009, 운석의 분류와 암석학적, 지구화학적 특징, *지질학회지*, 45, 173-186.
- A.N. Krot, K. Keil, E.R.D. Scott, C.A. Goodrich, M.K. Weisberg, 2014, Classification of meteorites and their genetic relationships, Reference module in Earth Systems and Environmental Sciences, 1, 1-63.
- M.K. Weisberg, T.J. McCoy, A.N. Krot, 2006, Systematics and evaluation of meteorite classification, *Meteorites and the Early Solar System II*, 19-52.
- W.R. Van Schmus, J.A. Wood, 1967, A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31, 747-765.
- E.R.D. Scott, K. Keil, D. Stoffler, 1992, Shock metamorphism of carbonaceous chondrites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 4281-4293.
- D. Stoffler, K. Keil, E.R.D. Scott, 1991, Shock metamorphism in ordinary chondrites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 3845-3867.
- J.A. Barrat, B. Zanda, F. Moynier, C. Bollinger, C. Liozou, G. Bayon, 2012, Geochemistry of CI chondrites: Major and trace elements, and Cu and Zn isotopes, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 83, 79-92.
- M. Endress, A. Bischoff, 1993, Mineralogy, degree of brecciation, and aqueous alteration of CI chondrites Orgueil, Ivuna, and Alais,

- Meteoritics, 28, 345-346.
- M. Endress, E.K. Zinner, A. Bischoff, 1996, Early aqueous activity on primitive meteorite parent bodies, *Nature*, 379, 701-703.
- H.Y. McSween, 1979, Are carbonaceous chondrites primitive or processed? A review, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 17, 1059-1078. 1980, *Antarctic Meteorite Newsletter* 3, JSC, Houston.
- B. French, G. NacPherson, R. Clarke, 1990, Antarctic meteorite teaching collection : Educational meteorite thin sections.
- J.N. Grossman, 1994, *Meteoritical Bulletin*, no.76, 1994 January: The U.S. Antarctic meteorite collection, *Meteoritics* 29, 100-143.
- Meyer, C, 2003, Mare Basalt Volcanism, NASA Lunar Petrographic Educational Thin Section Set.
- I. Hutcheon, A.N. Krot, K. Keil, D.L. Phinney, E.R.D. scott, 1998, ^{53}Mn - ^{53}Cr dating of fayalite formation in the CV3 chondrite mokoia: evidence for asteroidal alteration, *Science*, 282, 1865-1867.

KOPRI
극지연구소

1.4. 남극대륙 지체구조: 빅토리아랜드 기반암연구를 통한 남극대륙 형성 연구

1.4.1. 학술적 배경 및 기존연구 내용

가. 캄브리아기 고태평양해 섭입대의 발달

- 북빅토리아랜드는 초기 고생대 시기 고태평양해(palaeo-Pacific ocean)에 인접한 곤드와나 대륙의 연변부로 로스(Ross) 조산대가 발달함(Palmeri et al., 2009; Gibson et al., 2011; Godard and Palmeri, 2013).
- 로스 조산대는 남극종단산맥(Transantarctic Mountains)을 따라 남극 대륙을 관통하여 그 흔적을 찾을 수 있으며, 남극해를 지나 타즈마니아를 거쳐 호주 남부의 데라메리안 조산대로 연장됨(Fig. 1a; Boger and Miller, 2004; Goodge, 2007; Fergusson et al., 2009, 2013; Palmeri et al., 2009)
- 북빅토리아랜드는 서에서 동으로 세 개의 지구조체인 윌슨(Wilson), 바우어스(Bowers), 로버트슨 베이(Robertson Bay) 암체(terrane)로 구성되어 있으며(Fig. 1b), 윌슨 암체는 대륙기원의 변성퇴적암으로 구성되어 있는 반면, 바우어스와 로버트슨베이 암체는 해양기원의 (저변성)퇴적암으로 구성됨(Kleinschmidt and Tessensohn, 1987).
- 윌슨 암체와 바우어스 암체 사이의 경계인 렌터만 단층대를 따라 남정석-십자석편암과 에클로자이트 등 중-고압 변성암이 산출함(Fig. 1b; Capponi et al., 1999; Kleinschmidt et al., 1984).

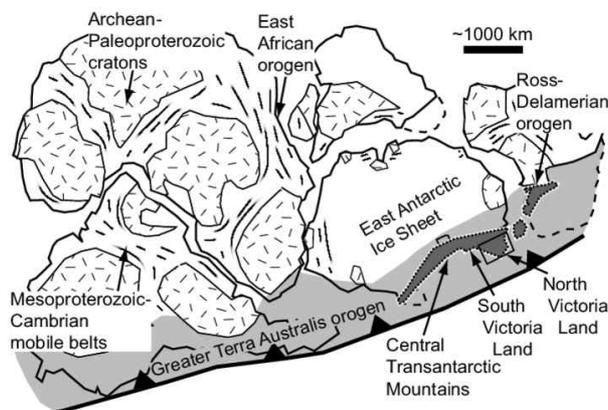


그림 2-4-1. (a) 곤드와나 초대륙의 분리전 남극과 호주 대륙에 걸쳐 발달한 로스-델라메리안 조산대. 오렌지 색 테두리는 북빅토리아랜드의 위치. (b) 북빅토리아랜드의 지체구조도. 검은 박스는 렌터만 산맥의 위치.

나. 고태평양해 섭입대 변성작용

- 렌터만 산맥에서 산출하는 에크로자이트는 중립질의 약한 선구조와 함께 엽리가 발달해 있으며, 주요 구성 광물조합은 석류석 + 녹휘석 + 나트륨-칼슘 각섬석 + 녹염석 + 펜자이트 + 금홍석 + 석영으로 구성됨.
- 에크로자이트에는 세 가지 형태의 석류석이 존재함. 첫 번째 형태의 석류석은 다량의 포유물로 구성된 중심부와 포유물이 희박한 외연부로 구성되어 있음(Fig. 2a, c). 두 번째 형태의 석류석은 환형의 중심부에 녹휘석, 나트륨-칼슘 각섬석, 녹염석 등의 포유물을 포함(Fig. 2b, d). 마지막 형태의 석류석은 세립질의 포유물이 희박함(Fig. 2a, c).

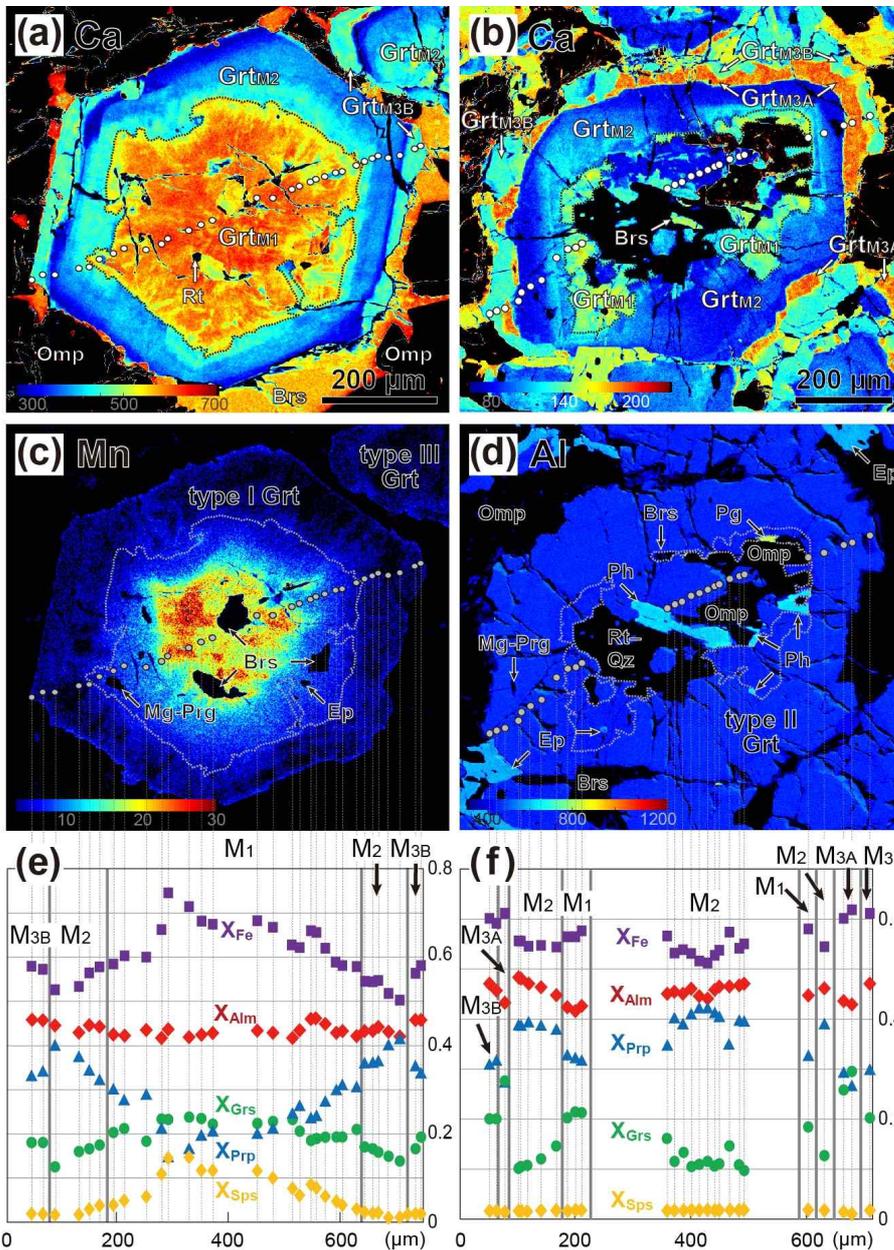


그림 2-4-2. 석류석 반상변정의 X-선 성분 지도(a-d) 및 성분 프로파일(e, f). 자형의 1번 형태의 석류석이 다른 형태의 석류석과 달리 M_{3A} 영역이 존재하는 않으며, 3번 형태의 석류석이 M₁ 영역이 존재하지 않는 특징을 나타낸다.

- 석류석 내부의 원소분포도도 각 형태별로 서로 다른 형태를 나타냄(Fig. 2). 1번 형태의 석류석은 중심부에 종 모양의 Mn 프로파일을 나타내며(Grt_{M1}), 외연부에서는 Mg 함량의 증가와 Ca 함량의 감소가 나타남(Grt_{M2}). 2번 형태의 석류석은 1번 형태의 석류석 중심부가 결여된 반면 외연부는 1번 형태의 석류석 외연부와 유사한 성분을 나타냄(Grt_{M2}). 3번 형태의 석류석의 중심부는 Grt_{M2} 성분으로 대비됨.
- 2, 3번 형태의 석류석은 Ca 함량이 큰 폭으로 증가하는 최외연부(Grt_{M3A} 와 Grt_{M3B})가 존재함(Fig. 2b). 큰 폭의 Ca 함량의 증가로 특히 Grt_{M3A} 에서 두드러짐. 하지만, Grt_{M3A} 가 모든 석류석 결정에서 나타나는 것이 아니며(Fig. 2a), 이런 현상이 나타나는 결정에서도 불규칙적임(Fig. 2b). 따라서, Grt_{M3A} 의 형성은 온도-압력의 변화를 반영하기 보다는 급작스러운 석류석 성장 중에 Ca의 상대적으로 느린 확산속도에 의한 비평형조직으로 해석됨(e.g., Chernoff and Carlson, 1997; Kim and Cho, 2008).
- 석류석-단사휘석-펜자이트 지온지압계를 이용하여 Grt_{M2} 와 평형을 이루는 성분으로부터 추정된 온도-압력 조건은 660 ± 100 °C, 25 ± 3 kbar(M_2)로 금홍석 내 Zr 함량으로부터 추정된 온도 조건과 일치함(Fig. 3). 석류석-단사휘석-펜자이트 지온지압계를 이용하여 Grt_{M3B} 와 평형을 이루는 성분들로부터 추정된 온도-압력 조건은 720 ± 80 °C, 26 ± 3 kbar(M_3)로 M_2 보다 조금 높은 온도-압력 조건을 나타냄.
- 열역학 모델링을 실시하여 추정된 M_1 에 해당하는 온도-압력 조건은 530~570 °C, ~15~20 kbar이며, M_2 온도-압력 조건은 630~680 °C, 22~25 kbar에 해당함(Fig. 4). 열역학 모델링에서 추정된 M_2 온도-압력 조건은 석류석-단사휘석-펜자이트 지온지압계와 금홍석 내 Zr 함량으로 추정된 온도-압력 범위와 일치함(Figs. 3 and 4).
- 이러한 결과를 종합하면 렌터만 산맥의 에클로자이트는 $M_1\sim M_2$ 와 M_3 두 번에 걸친 에클로자이트 상의 변성작용을 경험함. 첫 번째 변성작용에 의해 약 80~85 km 깊이까지 섭입되었고, 두 번째 변성작용에 의해 약 85~100 km 깊이까지 매몰 작용이 일어난 것으로 해석됨.

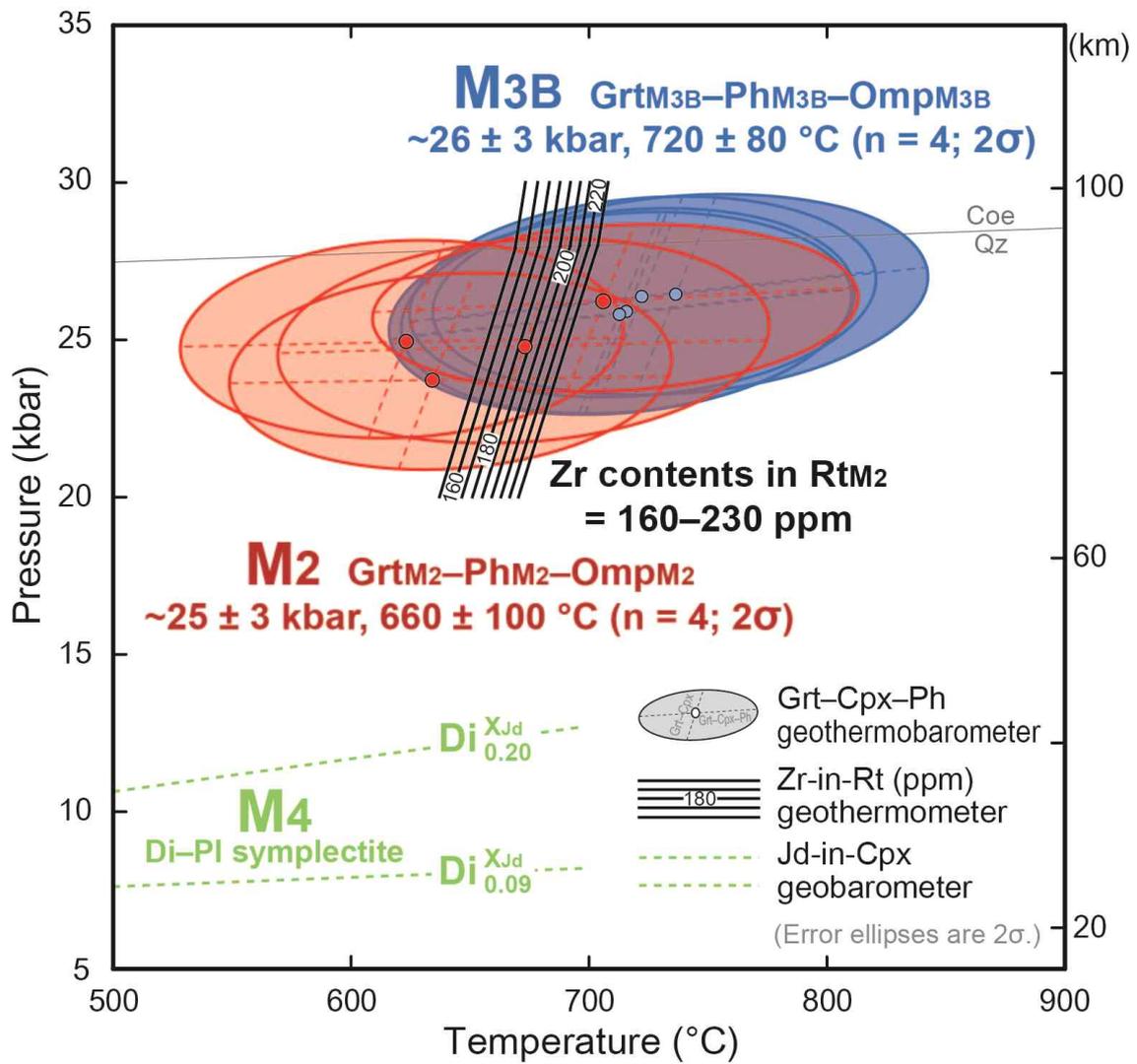


그림 2-4-3. 지온-지압계 결과. 석류석-단사휘석-펜자이트 지온지압계(Ravna and Terry, 2004), 금홍석 내 Zr 함량 지온계(Tomkins et al., 2007), 단사휘석 내 경옥 함량 지압계 (Holland, 1980, 1983)를 사용함.

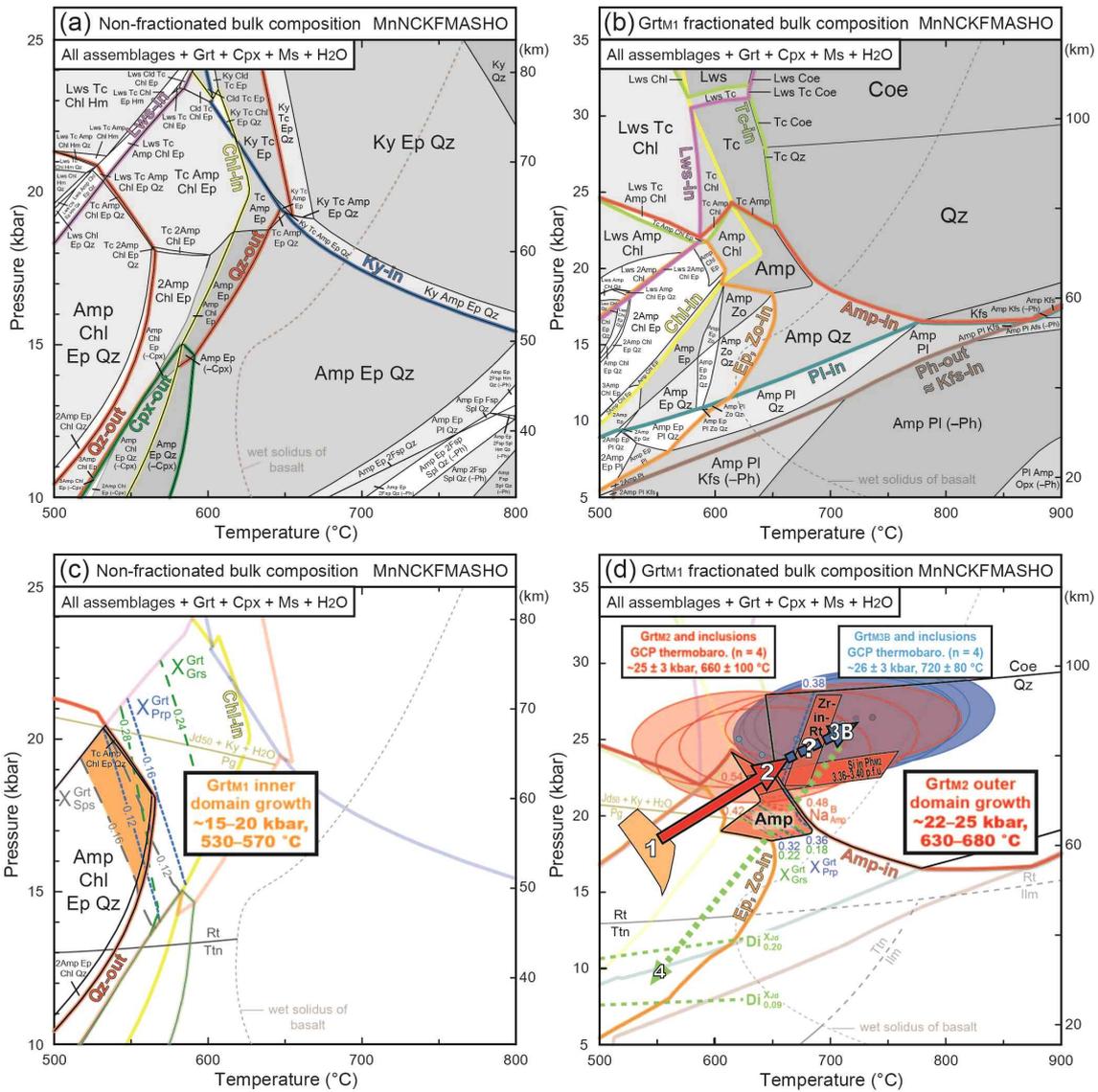


그림 2-4-4. 렌터만 산맥 에클로자이트에서 계산한 온도-압력 상평형도. (a, c) 광물 조합이 유사한 두 개의 에클로자이트 시료의 전암성분치의 평균을 이용해서 계산함. (b, d) Mn 함량이 높은 석류석을 제외한 전암성분치를 재계산해 구한 상평형도. (a)와 (b) 상평형도에서 음영은 평형 조합의 자유도를 나타냄. 모든 온도-압력 조건에서 석류석, 단사휘석, 펜자이트, 물은 존재함.

○ 렌터만 산맥에서 산출하는 에클로자이트 시료에서 추출한 저어콘 결정은 반자형-타형의 결정형과 핵-맨틀-과성장 띠의 조직을 나타냄. 저어콘 결정에서 관찰되는 핵은 자형-반자형, 약한 진동누대구조를 나타내며 매우 낮은 Th, U 함량을 나타냄. 이들 저어콘 결정의 맨틀은 자형-반자형, 어두운 음극선발광영상으로 정의되며 특이한 조직이 나타나지 않는 과성장 띠는 매우 밝은 음극선발광영상으로 구별됨.

○ 이들 저어콘 결정의 핵-맨틀-과성장 띠에서 분석한 우라늄-납 가중평균연령은 각각 597 ± 11 Ma ($t\sigma$; MSWD=1.17), 514 ± 7 Ma ($t\sigma$; MSWD=0.29), 499 ± 9 Ma ($t\sigma$; MSWD=0.12)임(Fig. 5). 렌터만 산맥 에클로자이트 저어콘 결정들의 겉보기 우라늄-납 연령은 기존 연구의 고압 저어콘의 우라늄-납 결과와 유사한 범위를 나타냄(cf., Di Vincenzo et al., 2016).

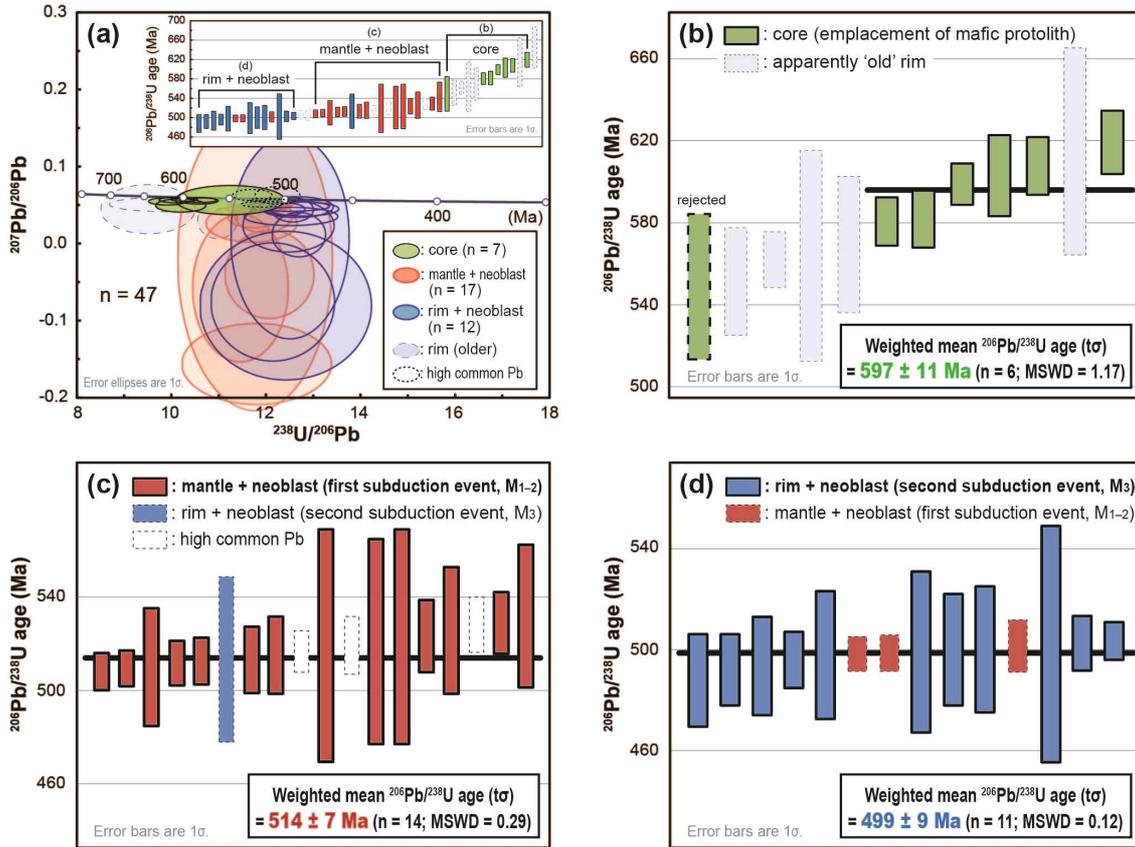


그림 2-4-5. 렌터만 산맥 에클로자이트 시료의 저어콘 우라늄-납 연령. (a) Tera-Wasserburg 콘코디아 도표. (b) 저어콘 결정의 핵에서 측정된 우라늄-납 가중평균연령. (c) 저어콘 결정의 맨틀에서 측정된 우라늄-납 가중평균연령. (d) 저어콘 결정의 과성장 띠에서 측정된 우라늄-납 가중평균연령.

○ 지금까지의 결과를 종합하면 저어콘의 맨틀과 과성장 띠가 자라는 약 15 Ma 동안 계산한 평균 수직 매몰 깊이는 연간 약 2 mm임. 이는 차가운 섭입이 일어나는 환경과 배치됨. 따라서, 약 15 Ma의 간격을 두고 두 번의 섭입-용기 작용이 반복된 것으로 해석됨(e.g., Stöckhert and Gerya, 2005; Kabir and Takasu, 2010; Li and Gerya, 2011; Rubatto et al., 2011; Liati et al., 2016).

다. 쇄설성 저어콘의 기원

- 월슨 암체의 저변성 퇴적암에서 산출하는 쇄설성 저어콘 연령은 로스, 팬-아프리카, 그렌빌 조산운동의 시기를 지시하는 다양한 연령과 1.6 Ga 이상의 기반암에 해당하는 연령까지 매우 다양한 분포를 보임(Adams et al., 2014; Estrada et al., 2016; Paulsen et al., 2016).
- 이러한 분포 형태는 저변성 퇴적암에서 뿐만 아니라 화강암에서 산출하는 저어콘의 상속핵의 연령분포에서도 동일한 분포를 보임(Kim et al., 2017). 따라서, 월슨 암체 변성퇴적암 모암의 퇴적물은 다양한 기원의 공급지로부터 유래함.

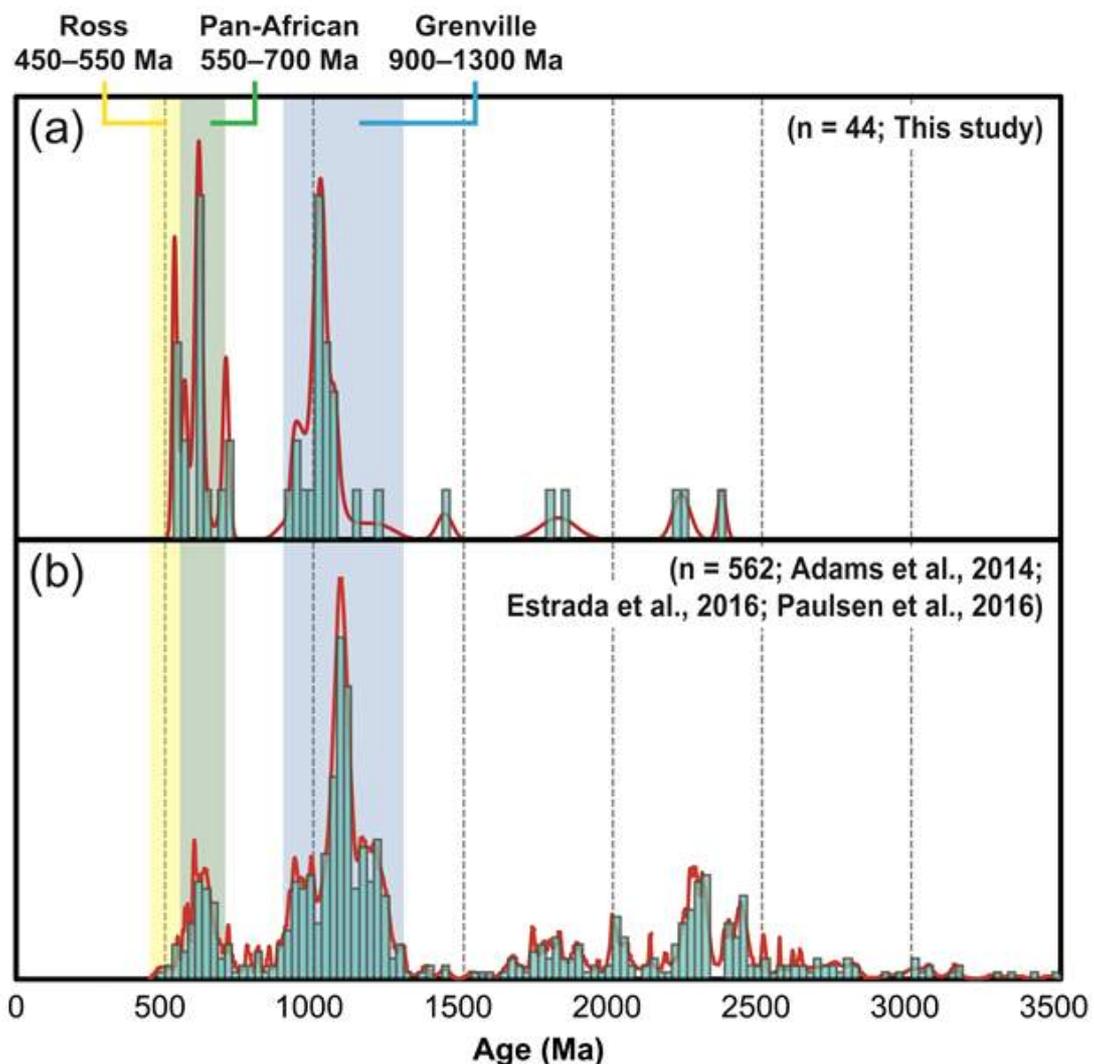


그림 2-4-6. 월슨 암체의 변성퇴적암의 우라늄-납 연령 확률밀도분포도. (a) Kim et al. (2017)의 연령 자료. (b) Adams et al. (2014), Estrada et al. (2016), Paulsen et al. (2016)의 자료를 종합함.

함되어 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 제기됨.

- 남빅토리아랜드 후기 신원생대 및 캄브로오르도비스기 퇴적암 층서 및 쇄설성 저어콘 연구를 통해 북빅토리아랜드 변성이질암에서의 쇄설성 저어콘의 연령분포와 유사한 결과를 보고함(e.g., Goodge and Fanning, 2010; Goodge and Finn, 2010). 또한, 비활동성 경계에서 활동성 경계로의 변화를 보임(Fig. 7; Goodge et al., 2004)

1.4.2. 연구목표 및 방법

가. 로디니아 초대륙의 분열과 고태평양해 섭입대의 발달

- 신원생대 로디니아 분열의 증거는 델라머리안(Delamerian) 조산운동의 영향을 받았지만, 타스마니아와 호주에는 열곡대- 및 수동형-경계부의 화성활동과 퇴적작용이 각각 고철질 화산암류와 쇄설성 퇴적암류 등의 형태로 보존되어 그 지구조층서가 비교적 잘 알려져 있음(Cawood, 2005; Berry et al., 2008; Ferguson et al., 2009).
- 남극종단산맥의 로스 조산대에서는 퇴적작용 외에 신원생대 화성활동은 거의 보고된 바 없어 동곤드와나 경계부 내 신원생대 지질정보의 불균형이 존재하며, 이로 인한 초대륙 분열사건의 시공간적 대비의 어려움이 존재함.
- 조산대 내에서 이전 단계인 수동형 경계부의 지질은 신장력 이후 압축력으로 지구조응력이 변하는 과정에서 매몰 등의 이유로 그 보존이 어려울 수 있기 때문에 북빅토리아랜드 로스 조산대의 주요 터레인 봉합대인 렌터만 산맥의 고철질 변성아으로부터 그 증거를 찾기 위한 조사가 필요함.
- 렌터만 산맥 에클로자이트 시료에서 분리한 저어콘 결정들의 음극선발광(CL) 영상으로부터 중심부와 과성장 영역들인 외연부 및 최외부 등 세 영역으로 구성된 뚜렷한 누대구조를 발견함. Th/U 비가 높고(0.38-0.60), CL 세기와 대조가 낮으며 약한 진동누대구조를 갖는 저어콘의 중심부로부터 고분해능이차이온질량분석기(SHRIMP)를 이용한 우라늄-납 성분 분석을 통해 $597 \pm 11 \text{Ma}$ (n=6, MSWD=1.17)의 가중평균연령을 도출함(Fig. 5b).
- 이는 신원생대 후기 반려암의 결정화 연령으로 해석되며, 남극종단산맥에서 처음으로 보고된 믿을 만한 고철질 화성암의 신원생대 연령자료임. 약 600Ma의 고철

질 화성활동 시기는 타스마니아 북서부, 호주 동부 등에서 확인된 고철질 화성암류의 정치 연령(약 600-580Ma) 및 열곡대 환경을 지시하는 전암 조성과 잘 일치함(Cawood, 2005; Berry et al., 2008; Ferguson et al., 2009).

- 또한 실리카 불포화상태, 저어콘의 매우 낮은 U 및 Th 함량, 외래성 저어콘의 부재 등은 에클로자이트의 모암인 반려암이 마그마 정치과정 중에 지각오염의 영향으로부터 상대적으로 자유로웠고, 신장력으로 인해 얇아진 대륙지각에 정치하였음을 뒷받침함.
- 종합하면, 북빅토리아랜드 월슨 암체와 바우어스 암체의 경계에서 폭넓게 산출하는 고철질 암석들은 로디니아 분열사건에 대비되는 열곡대 현무암질 화성활동의 산물을 가능성이 존재함.
- 로디니아 초대륙의 분열과 곤드와나 초대륙 동쪽 해안으로 고태평양해의 섭입으로 이어지는 환 오스트리아 조산대의 형성 및 진화 메카니즘을 이해하기 위해서 북빅토리아랜드의 지리상 위치가 매우 중요함. 특히, 비교적 로디니아 초대륙의 분열 과정이 잘 보존되어 있는 호주 대륙과의 대비 연구가 필수적임.
- 호주 대륙과의 대비를 위해서는 곤드와나 초대륙 고지리상 인접한 위치에 있던 북빅토리아랜드 북쪽에 대해 정밀한 야외 지질조사의 수행이 필요함. 이미 미국 연구진에 의한 이러한 연구가 시도됨(Goodge and Fanning, 2010; Goodge and Finn, 2010). 국내 연구진에게 장보고 기지를 기반으로한 연구환경이 보다 우수함.

나. 쇄설성 퇴적물의 기원지 추적

- 비행체를 이용한 자력탐사에 의해 남극 대륙의 빙하 밑에 산맥과 빙저호 및 다양한 지질학적 구조가 존재한다는 사실이 밝혀진 이후 이에 대한 연구가 남극 대륙 연구에서 뜨거운 주제로 도약함(e.g., Ferraccioli et al., 2011).
- 이러한 관심에 따라 미국 연구진에 의해 'Rapid Access Ice Drill (RAID)' 프로젝트가 진행되고 있음(Fig. 8). 이 프로젝트의 주요 테마 중 하나가 남극점 하부의 존재하는 암석의 코어링에 있음.
- 북빅토리아랜드 월슨 암체의 쇄설성 저어콘 연령 분포와 렌터만 산맥의 에클로자이트 모암의 판-아프리카 연령 등은 이 지역의 미노출지에 다양한 암상이 존재할 가능성을 제기함.
- 현재 대한민국 극지연구소는 'K-Route'사업을 통해 북빅토리아랜드 및 남극 대륙 기반의 육상 통행로 확보를 진행 중에 있음. 이 사업과 더불어 빙저호 및 빙저에 대한 탐사를 계획 중.

- 따라서, 연구소 내에 기존 사업과 함께 빙저 기반암 시료 확보 및 이를 통한 로디니아 및 곤드와나 초대륙의 진화와 관련한 지체구조 대비 사업의 효율성이 점증함.

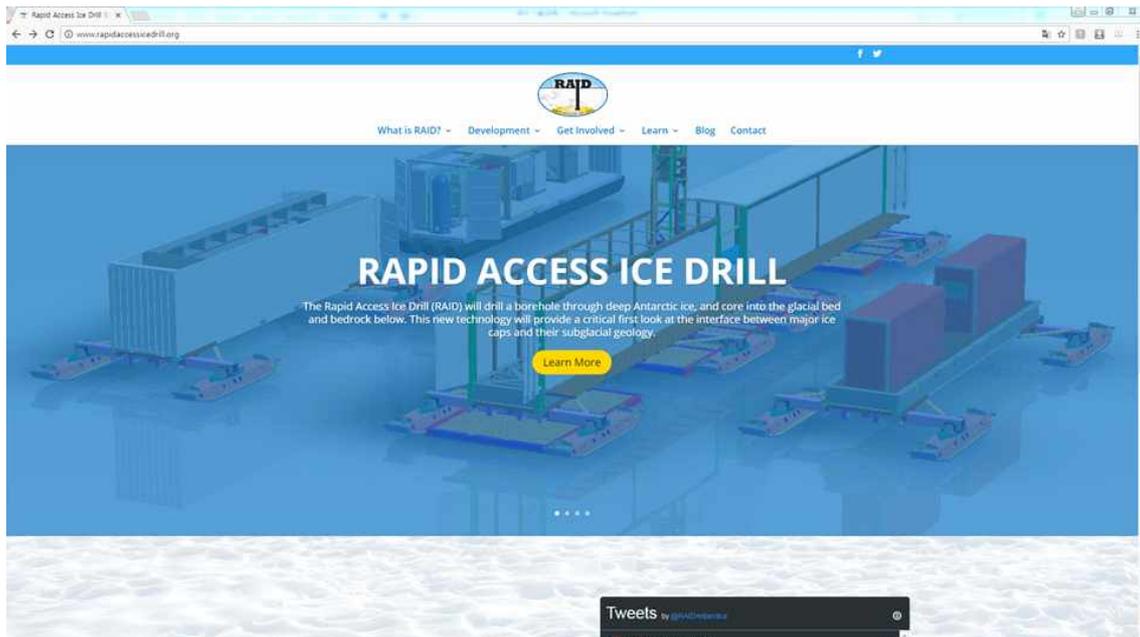


그림 2-4-8. 미국 연구진에 의해 수행되고 있는 ‘Rapid Access Ice Drill’ 프로젝트의 홈페이지 메인 화면(<http://www.rapidaccessicedrill.org>).

극지연구소

참고문헌

- Adams, C.J., Bradshaw, J.D. and 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.
- Berry, R.F., Steele, D.A. and Meffre, S., 2008, Proterozoic metamorphism in Tasmania: Implications for tectonic reconstructions. *Precambrian Research*, 166, 387-96.
- Boger, S.D. and 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.
- Capponi, G., Crispini, L. and Meccheri, M., 1999, Structural history and tectonic evolution of the boundary between the Wilson and Bowers

- terrane, Lanterman Range, northern Victoria Land, Antarctica. *Tectonophysics*, 312, 249-266.
- 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.
- Chernoff, C. B. and Carlson, W. D., 1997, Disequilibrium for Ca during growth of pelitic garnet. *Journal of Metamorphic Geology*, 15, 421-438.
- Di Vincenzo, G., Horton, F. and 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.
- Estrada, S., Läufer, A., Eckelmann, K., Hofmann, M., Gärtner, A. and 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.
- Fergusson, C.L., Offler, R. and 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. and 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.
- Ferraccioli, F., Finn, C.A., Jordan, T.A., Bell, R.E., Anderson, L.M. and Damaske, D., 2011, East Antarctic rifting triggers uplift of the Gamburzev 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: Evidence 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 Tasmansides: insights from reactivated basement structures and formation of an ocean-continent transform boundary off western Tasmania. *Gondwana Research*, 19, 608-627.
- 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.
- Holland, T.J.B., 1980, The reaction albite = jadeite + quartz determined experimentally in the range 600-1200 °C. *American Mineralogist*, 65, 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, 214-220.
- Kabir, M.F. and 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, 873-893.
- Kim, Y. and 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, 385-399.
- Kim, Y., Kim, T., Lee, J.I. and 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, 489-507, (in Korean with English abstract).
- Kleinschmidt, G., Roland, N. W. and 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.
- Kleinschmidt, G. and Tessensohn, F., 1987, Early Paleozoic westward directed subduction at the Pacific margin of Antarctica. In G. D. McKenzie (Ed.), *Gondwana six: Structure, tectonics and geophysics*. American Geophysical Union (AGU) Geophysical Monograph Series (vol. 40, pp. 89-105). Washington, DC: AGU.
- Li, Z. and 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.
- Liati, A., Theye, T., Fanning, C.M., Gebauer, D. and Rayner, N., 2016, Multiple subduction cycles in the Alpine orogeny, as recorded in single zircon crystals (Rhodope zone, Greece). *Gondwana Research*, 29, 199-207.

- 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.
- 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.
- Ravna, E.J.K. and 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, 579-592.
- Rubatto, D., Regis, D., Hermann, J., Boston, K., Engi, M., Beltrando, M. and McAlpine, S.R.B., 2011, Yo-yo subduction recorded by accessory minerals in the Italian Western Alps. *Nature Geoscience*, 4, 338-342.
- Stöckhert, B. and Gerya, T.V., 2005, Pre-collisional high pressure metamorphism and nappe tectonics at active continental margins: A numerical simulation. *Terra Nova*, 17, 102-110.
- Tomkins, H.S., Powell, R. and Ellis, D.J., 2007, The pressure dependence of the zirconium-in-rutile thermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 25, 703-713.

1.5. 나이아가라 아이스폴(Niagara Icefalls) 지역의 전단대 연구

1.5.1. 학술적 배경 및 기존연구 내용

가. 학술적 배경

- 전단대(shear zone)는 암석의 물리적 특성 차에 의해서 변형(strain)이 특정한 면(plane)에 집중되는 현상(strain partitioning)을 일컫는 말로써, 이때의 전단대 내부의 광물들은 취성(brittle), 취성-연성(brittle-ductile), 또는 연성변형행동(ductile deformation behavior)을 보임(Passchier and Trouw, 2005)
- 전단대는 높은 변형률(strain rate)에 의해서 지질학적 관점에서 굉장히 짧은 시간에 높은 변형의 결과를 보여주므로, 광물 및 암석의 변형행동에 관한 연구를 수행하기에는 최적인 장소임
- 전단대는 응력(stress)의 방향을 유추할 수 있는 단서(shear sense)를 제공함으로써, 판(plate)의 경계부에서 산출하는 전단대는 판의 이동을 규명하는데 적극적으로 활용될 수 있음
- 남극 장보고기지 주변의 북빅토리아랜드는 지구조적 판인 로버트슨베이터레인(Robertson Bay Terrane), 바워스터레인(Bowers Terrane), 윌슨터레인(Wilson Terrane)으로 이루어져 있으며, 북동쪽(로버트슨베이터레인)에서 남서쪽(윌슨터레인)으로 갈수록 변성도(metamorphism)가 증가함
- 특히, 바워스터레인과 윌슨터레인 사이에는 고철질암석 및 고압암석이 산출하고 있고 이와 관련된 내용이 기술된 적이 있지만(Tribuzio et al., 2008), 구조지질학적으로 수행된 기존연구가 전무한 상황임

나. 기존 연구내용

- 현전단대에서 관찰할 수 있는 광물들의 변형행동에 대한 논문은 구조지질학적으로 상당히 중요하므로 이미 수회에 걸친 리뷰 논문들이 존재함(Ramsey, 1980; Means, 1995; Xypolias, 2010; Fossen and Cavalcante, 2017)
- 북빅토리아랜드에서는 이탈리아그룹에 의해서 프리슬리단층(Priestley

Fault), 랜터만단층 (Lanterman Fault)의 특성이 연구된 적이 있으나, 취성변형에만 집중하였고 광물의 변형행동 특성이 전혀 공부되지 않음(Storti et al., 2001; Rossetti et al., 2002)

- 본 과제의 소주제인 나이아가라 아이스폴(Niagara Icefalls) 지역의 전단대는 백립암상 또는 저변위의 변성진화가 기록되어 있으며, 이와 관련된 두개의 연성전단대(ductile shear zone), 광범위한 단층(fault)이 관찰됨
- 특히 더나이트 / 하쯔버가이트(dunite / harzburgite)와 사방휘석암 / 반려암질암(orthopyroxenite / gabbroonorite)에서 관찰되는 단층은 사문석(serpentine)과 각섬석(amphibole)으로 각각 채워져 있으며, 이렇게 고철질암상에서 산출하는 광범위한 단층은 기존연구가 드문 상황임

1.5.2. 연구목표 및 방법

가. 연구목표

- 나이아가라 아이스폴 지역의 전단대 연구는 광물들간의 위상관계(topotactic relation), 변형행동(deformation behavior), 단층(fault) 세가지 주제에 대하여 실시할 예정
- 감람석의 강한 결정방향성이 기존의 사문석으로부터 유래된다는 연구결과로 상대적으로 강한 맨틀의 지진파 이등방성(seismic anisotropy)의 원인이 될 수 있는 가능성을 밝힌 논문결과가 있음(Nagaya et al., 2014)
- 나이아가라 아이스폴 지역에서 발견되는 단층 내 감람석-사문석, 휘석-각섬석 간의 위상관계에 대해서 연구

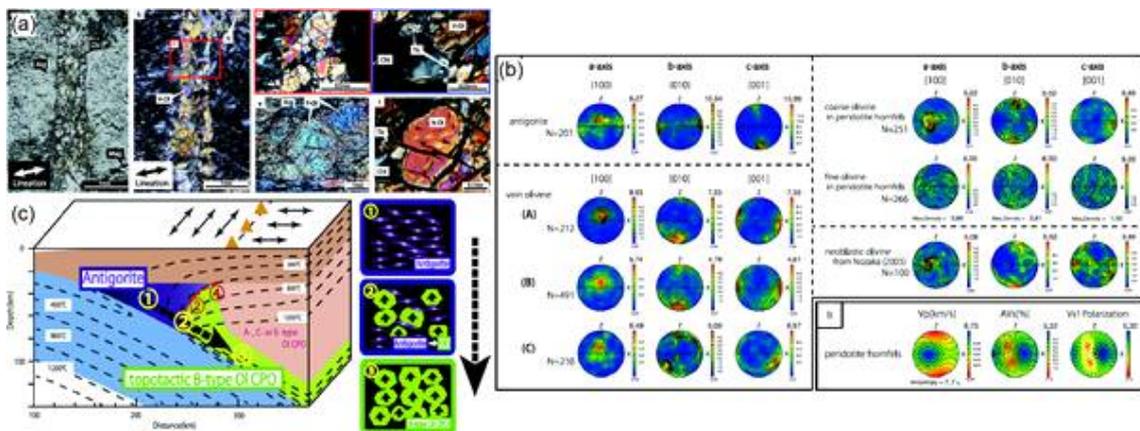


그림 2-5-1. 감람석과 사문석의 위상관계 연구로 섭입대에서 관찰할 수 있는 섭입대와 평행

또는 수직한 지진파 이등방성을 설명한 논문(Nagaya et al., 2014)

- 광물들의 취성, 연성 변형행동(deformation behavior)은 암석의 레올로지(rheology)를 유추하는데 결정적인 역할을 함으로 기존의 연구결과가 상당히 많음(e.g., Sullivan and Law, 2007)
- 나이아가라 아이스폴은 지표상에서 희귀한 맨틀 또는 하부지각 암석이 특징적으로 산출하는 지역이므로, 고철질광물의 변형행동에 대해서 연구하러 함

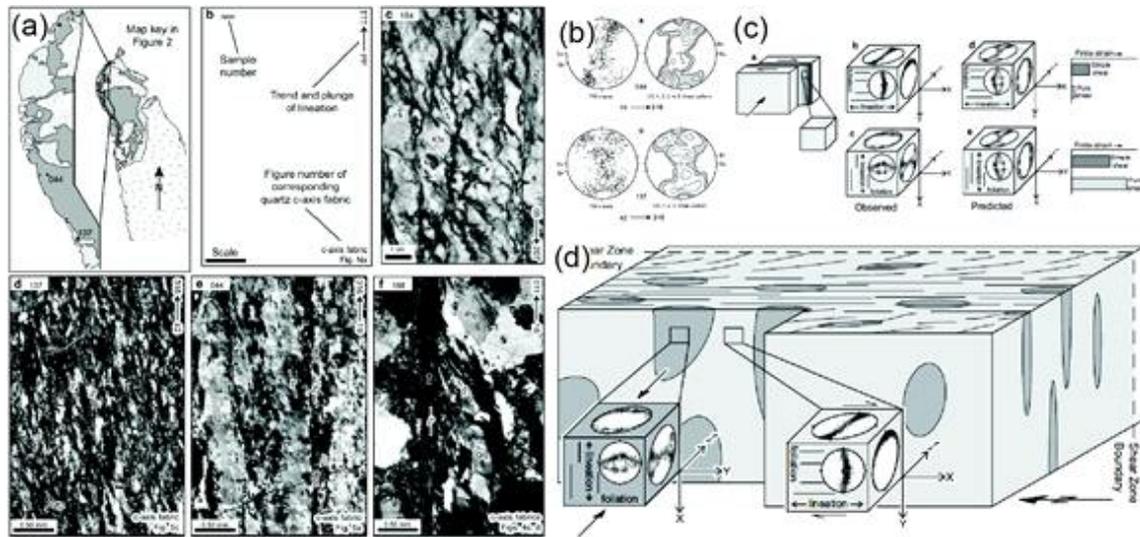


그림 2-5-2. 석영의 변형행동 연구결과와 3-D 상에서의 구조적 해석(Sullivan and Law, 2007)

- 단층은 지진이 일어나는 주요 메커니즘으로, 슬립약화현상(slip weakening)을 일으키는 요인에 대한 실험이 한창 진행중임(after Han et al., 2007)
- 나이아가라 아이스폴에서 발견되는 취성변형 단층(brittle fault)에서 샘플을 채취하고, 슬립면을 관찰할 예정
- 전단감각 지표(shear sense indicator)를 이용해 슬립이 일어난 방향을 유추해 충돌대가 형성되었을 시기의 조구조적 의미를 밝혀낼 예정
- 전단대가 형성된 시기에 대한 연대측정 실시

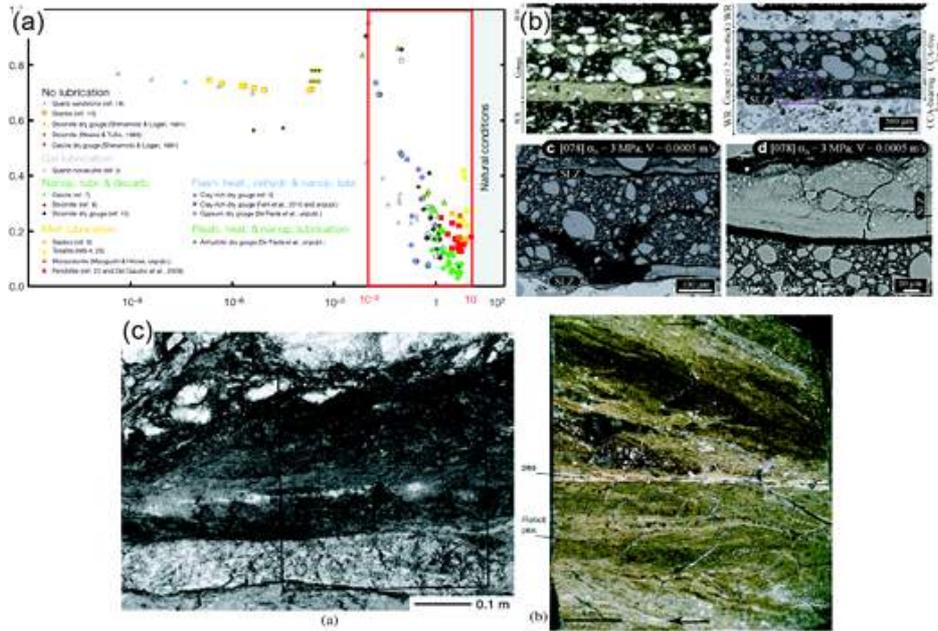


그림 2-5-3. 단층 발생 메커니즘에 대한 연구결과(a, b)와 야외에서 산출하는 단층의 모습(c) (Rice, 2006; Di Toro et al., 2011; Han and Hirose, 2012에서 발취)

나. 연구방법

○ 야외답사

- 나이아가라 아이스폴 지역의 야외답사를 통해 취성, 연성전단대의 방향을 기재한 샘플(oriented sample)을 채취
- 고변형(high strain)에서 저변형에 이르는 다양한 변형도를 가진, 다양한 종류의 암석을 채취할 예정

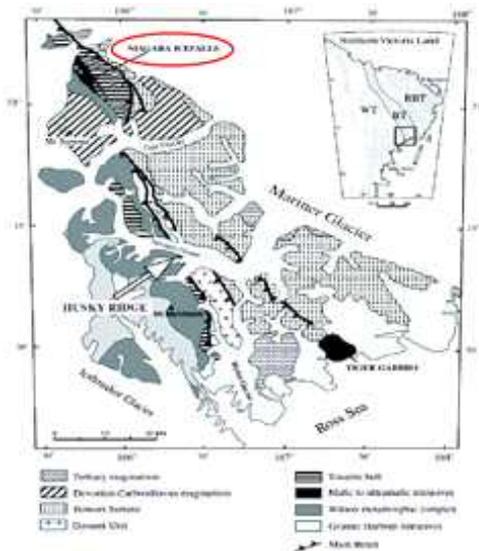


그림 2-5-4. 연구지역의 지질도 모습(Tiepolo and Tribuzio, 2008).

○ 미구조 분석

- 미구조 분석은 2018년 상반기 연구소에 설치될 후방산란전자회절장치 (Electron Backscatter Diffraction, EBSD)를 이용해 실시할 예정임
- 위 장비는 2017년 하반기에 설치예정인 전계방출형 주사전자현미경(Field Emission-Scanning Electron Microscopy, FE-SEM)에 부착될 예정이며, 전계방출형 건(Field Emission gun)이 장착된 장치이므로 많은 분석시간을 요구하는 암석의 방향성지도(orientation map)를 분석하기에 적합함
- 특히 위 장비는 다양한 진공상태의 모드가 있으므로, 저진공 모드에서 분석 시 샘플에 손상을 줄 수 있는 표면 코팅(coating)을 할 필요가 없음
- 결정방향성 지도 제작으로 광물크기, 입자모양방향성(shape preferred orientation, SPO), 결정 내 결정방위차(misorientation), 아입자경계 (subgrain boundary) 등의 자료를 획득할 수 있음



그림 2-5-5. 뉴질랜드 오타고대학교에 설치된 FE-SEM-EBSD system.

1.5.3. 예상결과

○ 미구조적 의미

- 사문석//감람석, 휘석//각섬석 간의 위상관계
- 광물의 변형행동 및 변형시 온도압력 조건
- 단층점토(fault gouge)의 주요 구성성분 및 광물 동정

○ 조구조적 의미

- 맨틀 또는 하부지각에서 일어나는 광물의 변성과정 중 생기는 의미
- 변형작용시 암석의 레올러지(rheology) 이해
- 전단대 내 응력분석을 통해서 판의 이동방향을 유추

참고문헌

- Di Toro, G., Han, R., Hirose, T., De Paola, N., Nielsen, S., Mizoguchi, K., Ferri, F., Cocco, M., Shimamoto, T., 2011. Fault lubrication during earthquakes. *Nature* 471, 494-498.
- Fossen, H., Cavalcante, G.C.G., 2017. Shear zones - A review. *Earth-Science Reviews* 171, 434-455.
- Han, R., Shimamoto, T., Hirose, T., Ree, J.-H., Ando, J.-I., 2007. Ultralow friction of carbonate faults caused by thermal decomposition. *Science* 316, 878-881.
- Han, R., Hirose, T., 2012. Clay-clast aggregates in fault gouge: An unequivocal indicator of seismic faulting at shallow depths? *Journal of Structural Geology* 43, 92-99.
- Means, W.D., 1995. Shear zones and rock history. *Tectonophysics* 247, 157-160.
- Nagaya, T., Wallis, S.R., Kobayashi, H., Michibayashi, K., Mizukami, T., Seto, Y., Miyake, A., Matsumoto, M., 2014. Dehydration breakdown of antigorite and the formation of B-type olivine CPO. *Earth and Planetary Science Letters* 387, 67-76.
- Passchier, C.W., Trouw, R.A.J., 2005. *Microtectonics*. Springer Berlin Heidelberg New York, p.111-158.
- Ramsey, J.G., 1980. Shear zone geometry: a review. *Journal of Structural Geology* 2, 83-99.
- Rice, J.R., 2006. Heating and weakening of faults during earthquake slip. *Journal of Geophysical Research* 111, B05311.

- Rossetti, F., Storti, F., Läufer, A.L., 2002. Brittle architecture of the Lanterman Fault and its impact on the final terrane assembly in north Victoria Land, Antarctica. *Journal of the Geological Society, London* 159, 159-173.
- Storti, F., Rossetti, F., Salvini, F., 2001. Structural architecture and displacement accommodation mechanisms at the termination of the Priestley Fault, northern Victoria Land, Antarctica. *Tectonophysics* 341, 141-161.
- Sullivan, W.A., Law, R.D., 2007. Deformation path partitioning within the transpressional White Mountain shear zone, California and Nevada. *Journal of Structural Geology* 29, 583-598.
- Tiepolo, M., Tribuzio, R., 2008. Petrology and U-Pb zircon geochronology of amphibole-rich cumulates with sanukitic affinity from Husky Ridge (Northern Victoria Land, Antarctica): Implications into the role of amphibole in the petrogenesis of subduction-related magmas. *Journal of Petrology* 49, 937-970.
- Tribuzio, R., Tiepolo, M., Fiameni, S., 2008. A mafic-ultramafic cumulate sequence derived from boninite-type melts (Niagara Icefalls, northern Victoria Land, Antarctica). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 155, 619-633.
- Xypolias, P., 2010. Vorticity analysis in shear zones: a review of methods and applications. *Journal of Structural Geology* 48, 72-84.

1.6. 북빅토리아랜드 염기성-초염기성 복합체를 통한 대륙지각의 형성과정 이해

1.6.1. 연구의 필요성

- 섭입대에서 산출하는 화성암과 대륙지각의 지화학적 유사성은 섭입대 화성 활동이 대륙지각을 형성하는데 매우 중요한 역할을 한다는 사실을 지시함. 하지만 최근의 연구결과에 의하면 섭입대 하부지각(arc lower crust)이 대륙지각의 하부지각(lower continental crust)에 비하여 비호정성원소 함량이 크게 결핍된 사실이 보고되었음(Figure 1; Kelemen and Behn, 2016).
- 이 같은 성분 차이를 설명하기 위해서는 섭입대 화성활동에 의한 대륙지각의 성장 이후에 밀도분급(density sorting)과정에 의하여 무겁고 비호정성 원소가 결핍된 물질이 맨틀로 빠져나가고 가볍고 비호정성 원소가 풍부한 물질이 섭입판으로부터 공급되어야 한다는 주장이 제기됨(Hacker et al., 2011; Kelemen and Behn, 2016).
- 이러한 밀도분급의 대표적인 기작은 섭입대하부지각의 delamination과 섭입하는 물질의 relamination(Figure 2). Delamination은 지각의 하부를 구성하고 있는 고철질 암석의 압력이 석류석의 안정영역에 해당할 때, 암석을 구성하는 광물상 중 밀도가 무거운 석류석의 함량이 증가하면서 암석의 밀도가 상부맨틀에 비하여 높아지기 때문에 발생함.
- 밀도가 높아진 섭입대하부지각 물질은 지각에서 분리되어 맨틀로 유입됨. Relamination은 섭입하는 판의 상부에 위치한 퇴적물이나 섭입침식(subduction erosion)으로 섭입채널(subduction channel)에 축적된 물질이 에클로자이트(eclogite) 안정영역에서 밀도차이에 의한 분급이 발생하며 밀도가 낮은 퇴적물 또는 섭입침식 물질이 섭입대하부지각으로 점착되는 과정임.
- 두 모델 모두 현재 보고된 대륙지각과 섭입대하부지각의 화학적 조성차이와 지구물리 데이터를 잘 설명하지만, 두 모델을 뒷받침 하는데 결정적인 증거로 활용되는 자료가 섭입대하부지각의 조성이라는 점을 감안할 때 제시된 모델들의 타당성을 검증하기 위해서 섭입대하부지각의 조성에 대한 심도 있는 연구가 필요함. 검토가 필요한 부분은 다음과 같음
- (1) 현재까지 섭입대하부지각의 조성에 관한 연구는 알래스카의 쥬라기 텔

- 키트나(Talkeetna) 섭입대와 파키스탄의 백악기 코히스탄(Kohistan) 섭입대 섹션을 중심으로 제한된 지역에 드러난 섭입대 섹션(arc section)을 통하여 수행되었음. 시기와 지역을 달리하는 섭입대하부지각에 대한 연구를 통해 두 섭입대 섹션의 대표성을 검증할 필요가 있음.
- (2) 이 두 지역은 모두 과거 도호(island arc)의 지각이 드러난 곳으로 대륙지각이 형성되는 대륙호(continental arc)와 차이가 있을 것임. 대륙호의 섭입대하부지각의 연구가 필요함.
 - (3) 현재까지는 대부분의 연구가 비호정성 친석원소(lithophile element)를 중심으로 수행되었음. 지각에서 호정성원소로 작용하는 친동성원소(chalcophile element) 및 친철성원소(siderophile element)를 이용하여 제시된 모델을 다른 각도에서 테스트할 필요가 있음.
- 극지연구소의 남극 장보고기지가 위치한 북빅토리아랜드는 크게 로버트슨 베이(Robertson bay), 보워스(Bowers) 및 월슨(Wilson)의 세 개의 지질지괴(terrane)로 구성됨. 각 지괴의 경계부는 로스(Ross)조산운동 중 형성된 스러스트(thrust) 단층으로 이루어져있음(Bracciali et al, 2009).
 - 보워스지괴와 월슨지괴의 남동쪽 경계부를 따라서 일련의 염기성-초염기성 복합암체가 산출하는데 북쪽에서부터 나이아가라아이스폴(Niagara Icefalls), 허스키릿지(Husky Ridge), 타이거개브로(Tiger Gabbro)임(Figure 3). 기존에 이탈리아 연구진에 의하여 수행된 암석학적 지구화학적 연구결과(Tribuzio et al., 2008; Tiepolo and Tribuzio 2008; Bracciali et al, 2009)에 따르면 이 세 암체는 모두 로스조산운동의 과정에서 곤드와나 대륙의 연변부에 위치했던 월슨섭입대와 타이거 섭입대의 하부지각이 곤드와나 대륙에 점착(accretion)되어 융기된 부분으로 생각됨.
 - 특히 나이아가라아이스폴과 허스키릿지는 과거 곤드와나 대륙을 구성하는 동남극판(East-Antarctic plate)하부로 섭입하는 로버트슨베이판에 의한 대륙호의 하부지각으로 추정됨.
 - 나이아가라아이스폴, 허스키릿지, 타이거개브로 지역에서 산출하는 암석은 더나이트, 하즈버가이트 등 상부맨틀암석에서 사방휘석암, 반려암질 노라이트 등의 하부지각암석, 석영섬록암, 토날라이트 등의 상부지각암석까지 기

존의 섭입대 섹션에서 관찰되는 다양한 암상이 산출되기 때문에 기존에 집중된 쥬라기 탭키트나 섭입대와 파키스탄의 백악기 코히스탄 섭입대 섹션의 연구결과와 체계적인 비교연구가 가능함(Figure 4).

- 따라서 본 연구에서는 고생대 섭입대하부지각인 북빅토리아랜드의 염기성-초염기성암 복합체를 활용하여 위에서 언급된 세 가지 질문을 중심으로 기존에 제시된 대륙지각의 형성모델을 검토하고 보완할 것임.

1.6.2. 개괄적 연구방법

- 나이아가라아이스폴 및 허스키릿지 염기성-초염기성암으로 구성된 섭입대하부지각 섹션에 대한 자세한 지질도 작성 및 체계적인 시료채취
- 광물학, 암석학, 지구화학적 연구를 통하여 기존에 제시된 북빅토리아랜드 염기성-초염기성암 복합체의 형성과정에 대한 점검 및 검증
- 쥬라기 탭키트나 섭입대 및 파키스탄의 백악기 코히스탄 섭입대 섹션과 체계적인 비교연구 (도호 섭입대 vs. 대륙호 섭입대)
- 북빅토리아랜드 섭입대하부지각 섹션의 화학적 조성을 이용하여 기존에 제시된 delamination 및 relamination 등의 대륙지각 형성모델 검증 및 보완

1.6.3. 최근 연구결과

가. 하부대륙지각 및 섭입대하부지각의 화학적 조성 차이

- 대륙지각의 평균 두께는 약 40 km이며, 상부 및 하부지각이 유사한 비율로 대륙지각을 구성함. 상부지각은 시료 채취 및 접근성의 용이함으로 안정 지괴에서의 대규모 시료채취 및 풍화퇴적물(Loess) 등을 이용한 다양한 방법으로 조성이 연구되었음.
- 하부대륙지각은 크게 두 종류의 시료에 의존하여 연구되고 있음. 광역변성 지괴(regional metamorphic massif)에서 하부지각의 압력(0.5 ~ 1.5GPa)을 기록하고 있는 변성암과 대륙의 화산암에 산출하는 변성암 포획암임.
- Rudnick and Gao (2014)는 변성 포획암의 평균 조성이 현무암질(SiO_2

~52 wt%)로 안산암질의 광역변성암에 비해 더 지진파나 열유량 등의 지구 물리 데이터와 잘 일치하는 것으로 주장함. 하지만 다양한 광역변성암자료에 기반한 최근의 연구결과(Hacker et al., 2015)는 광역변성암도 하부대륙지각의 지구물리 자료를 잘 설명할 수 있는 것으로 보고함.

- 현재까지 발표된 하부대륙지각의 미량원소 함량을 비교하면 하부대륙지각의 조성은 대륙지각 전체의 조성과 매우 유사하거나 일부 비호정성 원소가 약 30-50% 결핍되어 있는 수준임. 결핍의 정도는 광역변성암보다 변성암 포획암에서 더 크게 나타남(Kelemen and Behn, 2016).
- 섭입대하부지각의 조성에 관한 연구는 제한된 지역에 드러난 섭입대 섹션(arc section)을 통하여 수행됨.
- 알래스카의 쥬라기 Talkeetna 섭입대와 파키스탄의 백악기 Kohistan 섭입대 섹션이 상부맨틀에서 초염기성-염기성 심성암으로 구성된 하부지각, 상부지각의 화산암까지 연결성이 좋고 넓은 지역에 대규모로 분포하고 있어서 가장 많은 연구가 이루어졌음.
- 섭입대의 안산암질 화산암 또는 심성암과는 다르게 섭입대하부지각은 대륙지각 또는 하부대륙지각에 비하여 Ta, K, La, Ce, Hf과 같은 비호정성 원소의 함량이 결핍되어 있음(Figure 1; Kelemen and Behn, 2016).

나. 대륙지각의 형성

- 대륙지각의 화학적 조성은 섭입대에 국한되어 산출하는 높은 Mg#(0.43~0.55) 안산암(54~65 wt% SiO₂)과 유사하기 때문에 섭입대 화성활동이 대륙지각의 형성에 큰 영향을 끼쳤을 것으로 생각됨.
- 섭입대 맨틀에서 지각으로 공급되는 마그마는 일부 대륙기원의 해양퇴적물이 관여된 것을 제외하고 대부분 동위원소적으로 매우 방사성원소가 결핍된 맨틀기원의 물질을 근원암으로 함.
- 따라서 섭입대 화성활동으로 대륙지각의 형성을 설명하기 위해서 높은 Mg# 안산암의 형성과정에 주목했음. 제시된 형성과정은 다음과 같음(Kelemen and Behn, 2016).
- (1) 현무암질 마그마에서 상대적으로 낮은 Si, 높은 Fe를 함유하는 광물의 분별정출(철-티탄 산화물, 고알루미나 각섬석 등)

- (2) 맨틀기원의 안산암의 분별정출
- (3) 현무암질 마그마와 화강암질 마그마($\text{SiO}_2 > 70\text{wt}\%$, $\text{Mg}\# < 0.3$)의 혼합
- 제시된 과정들을 통해서 안산암질의 대륙지각 및 하부대륙지각을 형성하기 위해서는 공통적으로 규산염 및 비호정성 원소의 함량이 결핍된 큐물레이트(cumulate)가 제거되고 규산염 및 비호정성 원소가 풍부한 물질이 공급되어야 함.

다. 섭입대의 밀도분급 과정

- 위에 설명된 하부대륙지각과 섭입대하부지각의 조성차이를 설명하기 위해서 delamination과 relamination으로 대표되는 섭입대의 밀도분급 모델이 제시되었음.
- Delamination은 지각의 하부를 구성하고 있는 고철질 암석의 압력이 석류석의 안정영역에 해당할 때 암석을 구성하는 광물상 중 밀도가 무거운 석류석의 함량이 증가하면서 암석의 밀도가 상부맨틀에 비하여 높아지기 때문에 발생하는 기작으로서 밀도가 높아진 섭입대하부지각 물질은 지각에서 분리되어 맨틀로 유입됨.
- Relamination은 섭입하는 판의 상부에 위치한 퇴적물이나 섭입침식(subduction erosion)으로 섭입채널(subduction channel)에 축적된 물질이 에클로자이트 안정영역에서 밀도차이에 의한 분급이 발생하며 밀도가 낮은 퇴적물 또는 섭입침식 물질이 섭입대하부지각으로 점착되는 과정임 (Kelemen and Behn, 2016).
- Delamination이 원활하게 발생하려면 고철질 또는 초고철질 암석이 0.8GPa이상의 압력 및 높은 온도조건(800~1000°C)에 있어야 하는데 섭입대하부지각이 해당 조건과 잘 일치함(Jull and Kelemen, 2001).
- 특히 섭입대하부에서 형성되는 큐물레이트(cumulate) 암석은 다른 지구조 환경에 비하여 Fe/Mg 및 Al함량이 높은 감람석 휘암(pyroxenenite) 또는 반려암질 노라이트(norite)로 구성되기 때문에 해당 온도 압력조건에서 상부맨틀과의 밀도차가 다른 고철질 암석에 비하여 매우 커서 밀도분급에 의한 delamination이 효과적으로 발생할 수 있음(Jull and Kelemen, 2001).

- 섭입대 화성활동을 통하여 안산암질 대륙지각을 형성한다면 섭입대하부지각은 맨틀기원의 현무암질 마그마가 하부지각으로 상승한 후 분별결정 작용을 통하여 정출한 높은 Mg#(>0.9)의 광물로 구성된 암석이 30-60% 이상을 차지하고 있어야 함(Kelemen and Behn, 2016).
- 하지만, 지표면에서 관찰되는 섭입대하부지각 섹션에는 이러한 초고철질 휘석암 또는 가넷 함유 고철질암석의 산출이 매우 제한적임. 실제로 미국 Sierra Nevada 지역에 대한 P파 연구결과에 의하면 P파의 속도가 느린 화강암질 암석에서 매우 빠른 맨틀 페리도타이트로 이어지는데 이는 대부분의 지각이 화강암질 암석으로 구성되고 하부지각에 존재해야 할 고철질-초고철질의 규물레이트 암석이 결핍되었음을 지시함(Wernicke et al. 1996).
- 이 지역에서 분출한 화산암 중 마이오세 시기에 분출한 것은 다량의 석류석 휘석암이 포획물로 산출하지만 최근에 분출한 화산암은 전혀 이러한 포획물이 관찰되지 않는다는 사실은 과거에 이 지역의 하부에 존재하던 휘석암질 하부지각이 delamination에 의해 분리되었음을 지시함(Wernicke et al. 1996).
- Relamination의 증거는 융기 전에 섭입대하부지각의 깊이인 약 30~40 km에 존재했던 고압/초고압 변성암에서 찾을 수 있음.
- 최근 이러한 고압/초고압 변성암의 근원암이 섭입대 채널에서 유래했을 것으로 추정되는 연구결과가 많음. 하부대륙지각에는 알루미늄이 풍부한 변성 퇴적암이 매우 흔하게 산출하는데 이 또한 relamination에 의하여 접착된 것일 수 있음(Kelemen and Behn, 2016).

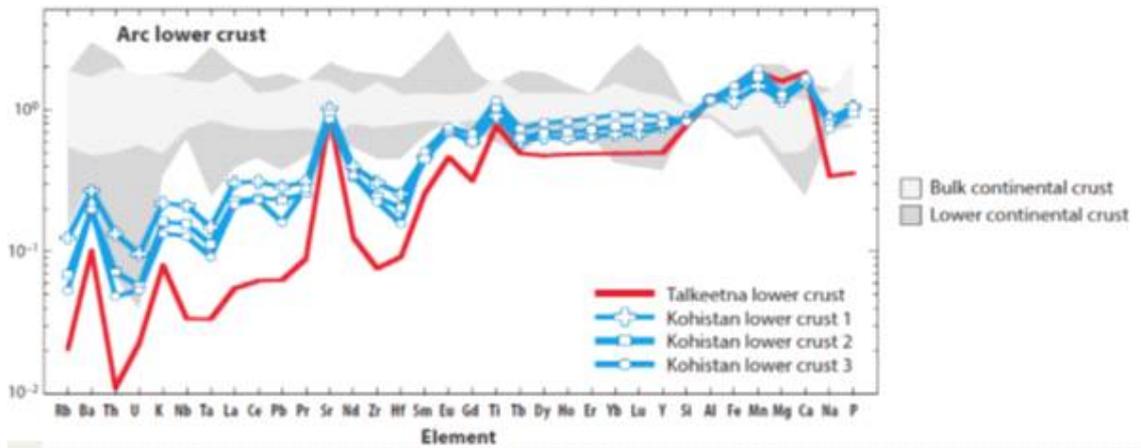


그림 2-6-1. 대륙지각의 평균성분으로 표준화된 쥬라기 텔키투나(Talkeetna) 섭입대하부지각 및 파키스탄의 백악기 코히스탄(Kohistan) 섭입대하부지각의 미량원소 조성 (Figure 3b from Hacker et al. (2015)).

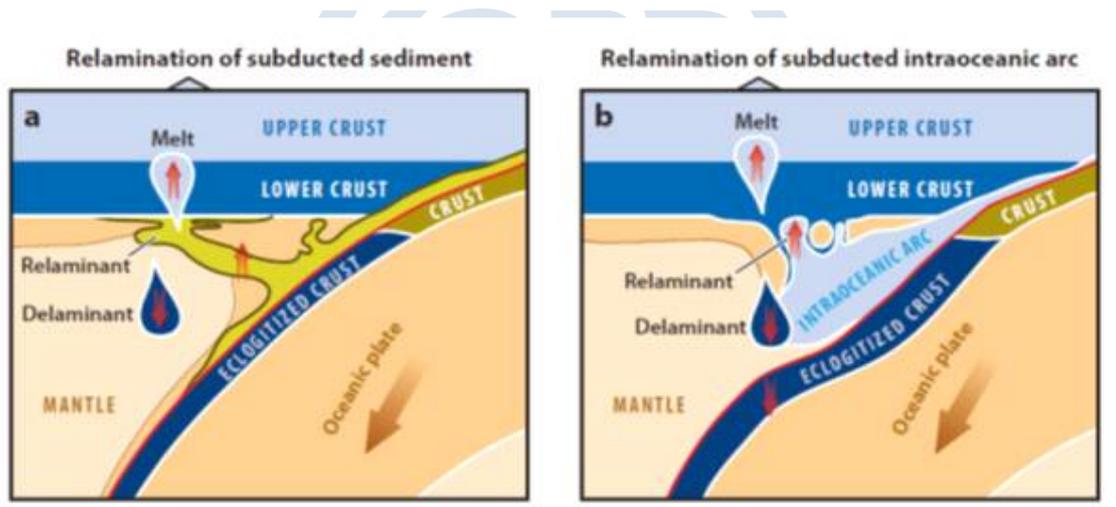


그림 2-6-2 하부대륙지각에서 발생하는 밀도분급과정을 설명하는 모식도 (Figure 15a and b from Hacker et al. (2015)). (a) 맨틀웨지(wedge)에 비하여 밀도가 상대적으로 낮은 퇴적물이 섭입판에서 분리되어 섭입대하부지각에 relamination되고, 섭입대하부지각의 석류석 휘석 암질 물질은 맨틀에 비해 밀도가 높아지며 가라앉음. (b) 섭입하는 해양지각이 밀도분급에 의하여 분리되며, 밀도가 높은 하부지각은 에클로자이트로 상변이(phase transformation) 되고 계속 섭입하고 밀도가 낮은 상부지각은 상승하여 상반의 하부지각에 relamination됨.

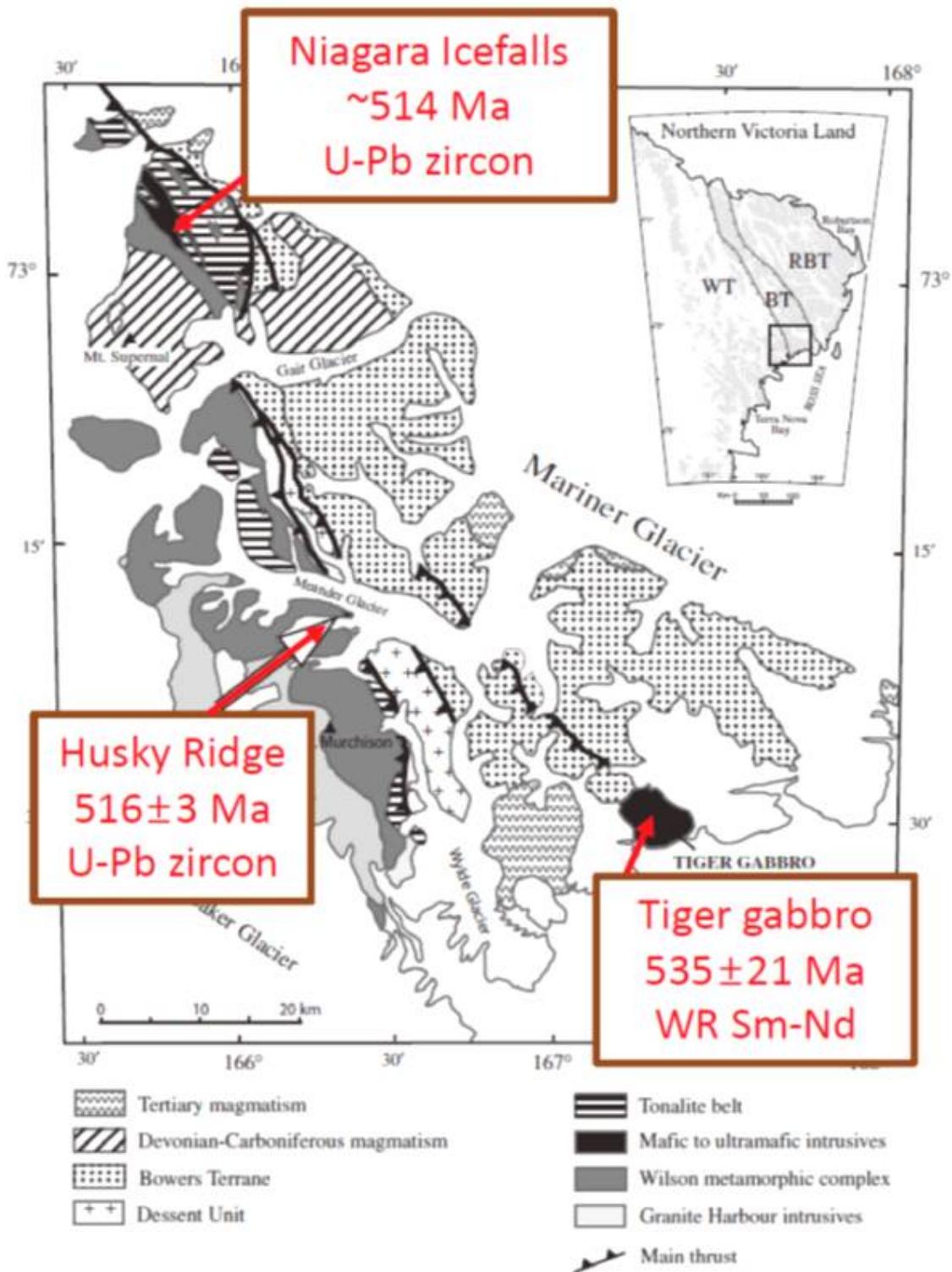


그림 2-6-3 북빅토리아랜드의 윌슨지괴(Wilson terrane)와 보워스지괴(Bowers terrane)의 남쪽 경계부의 지질도(modified from Figure 1 in Massimo et al. (2008)).

Comparison with Talkeetna arc lower crust

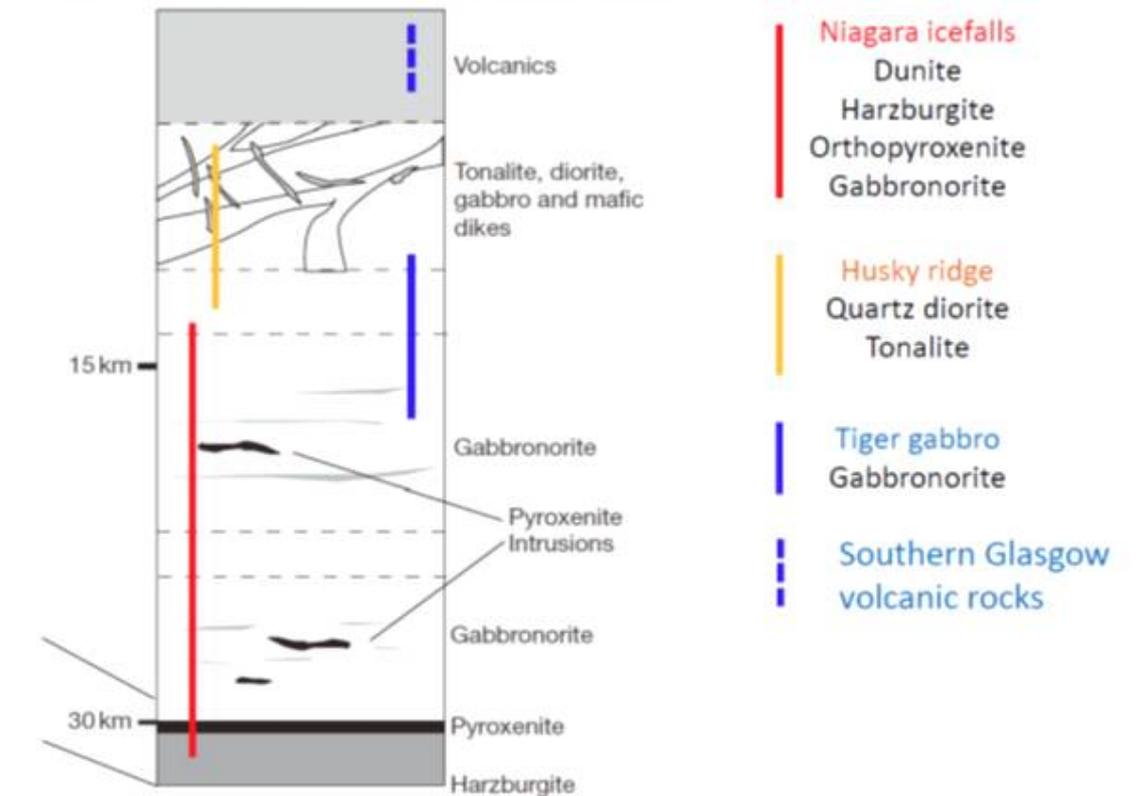


그림 2-6-4. 알래스카 쥬라기 Talkeetna 섹션의 단면도(Figure 17 in Kelemen et al. (2014))와 북빅토리아랜드에서 산출하는 고생대 염기성-초염기성암 복합체의 산출 암석 비교. 나이아가라 아이스폴(Niagara icefalls) 지역과 허스키릿지(Husky Ridge) 지역에는 대표적인 섭입대지각 암석이 산출하며 맨틀에서 상부지각까지 연속성이 있음.

참고문헌

- Bracciali, L., Di Vincenzo, G., Rocchi, S., and Ghezzo, C., 2009, The Tiger Gabbro from northern Victoria Land, Antarctica: the roots of an island arc within the early Palaeozoic margin of Gondwana: Journal of the Geological Society, v. 166, p. 711-724.
- Hacker, B. R., Kelemen, P. B., and Behn, M. D., 2011, Differentiation of the continental crust by relamination: Earth and Planetary Science Letters, v. 307, no. 3-4, p. 501-516.
- Jull, M., and Kelemen, P. B., 2001, On the conditions for lower crustal convective instability: Journal of Geophysical

- Research-Solid Earth, v. 106, no. B4, p. 6423-6446.
- Kelemen, P. B., and Behn, M. D., 2016, Formation of lower continental crust by relamination of buoyant arc lavas and plutons: *Nature Geoscience*, v. 9, no. 3, p. 197-205.
- Kelemen, P. B., Hanghøj, K., and Greene, A. R., 2014, 4.21 - One View of the Geochemistry of Subduction-Related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust A2 - Holland, Heinrich D, in Turekian, K. K., ed., *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*: Oxford, Elsevier, p. 749-806.
- Rudnick, R. L., and Gao, S., 2014, 4.1 - Composition of the Continental Crust A2 - Holland, Heinrich D, in Turekian, K. K., ed., *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*: Oxford, Elsevier, p. 1-51.
- Tiepolo, M., and Tribuzio, R., 2008, Petrology and U-Pb zircon geochronology of amphibole-rich cumulates with sanukitic affinity from Husky Ridge (Northern Victoria Land, Antarctica): Insights into the role of amphibole in the petrogenesis of subduction-related magmas: *Journal of Petrology*, v. 49, no. 5, p. 937-970.
- Tribuzio, R., Tiepolo, M., and Fiameni, S., 2008, A mafic-ultramafic cumulate sequence derived from boninite-type melts (Niagara Icefalls, northern Victoria Land, Antarctica): *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 155, no. 5, p. 619-633.
- Wernicke, B., Clayton, R., Ducea, M., Jones, C. H., Park, S., Ruppert, S., Saleeby, J., Snow, J. K., Squires, L., Flidner, M., Jiracek, G., Keller, R., Klemperer, S., Luetgert, J., Malin, P., Miller, K., Mooney, W., Oliver, H., and Phinney, R., 1996, Origin of High Mountains in the Continents: The Southern Sierra Nevada: *Science*, v. 271, no. 5246, p. 190.

1.7. 남극 전기고생대 석회암 연구를 통한 생물초 진화사 규명

1.7.1. 학술적 배경 및 기존 연구내용

가. 캄브리아기 생물초 진화

- 생물초는 미생물, 고착성동물, 퇴적물, 교질물이 복합적으로 형성한 퇴적체로, 현재 바다에서는 산호초로 대표되지만, 시대에 따라 주요 생성 생물이 매우 다양하게 변화함(James and Walker, 2004)
- 최초의 생물초는 미생물에 의한 스트로마톨라이트로 지구상 최초 생명의 흔적으로 인정받고 있으며 그 최초기록은 34억년전으로 보고되어있음(Nutman, 2016). 동물에 의한 생물초는 후기 선캄브리아기에 나타났으며 자포동물의 일종으로 생각되는 Claudina와 미생물이 조합되어 만들어진 작은 생물초임(Pratt et al., 2001)
- 이후 전기 캄브리아기에 초기해면동물의 일종인 고배류(archaeocyath)와 미생물의 조합으로 의한 생물초가 다양한 형태로 번성하여 한때 극상을 이루지만, 전기 캄브리아기말에 대량멸종으로 절멸함(Pratt et al., 2001)
- 오르도비스기 해면동물-미생물(lithistid-calcimicrobe) 생물초가 다시 번성하기 까지 약 2천4백만년 동안은 오랫동안 생물초가 부재한 시기로 알려져 있었음(James and Walker, 2004). 하지만 최근 연구를 통해 대멸종 이전의 생물초가 차지했던 니치가 해면동물-미생물 생물초에 의해 빠르게 점유되었으며 많은 지역에서 유사한 예가 보고되어있어(Lee et al., 2015; Hong et al., 2016), 기존 생각과는 다르게 캄브리아기에도 생물초의 진화가 꾸준히 이루어져 있음이 밝혀지고 있음
- 이에 따라, 기존 간과되었던 중기, 후기 캄브리아기 탄산염 퇴적체가 새로운 시각으로 연구되어야할 필요성이 제기되고 있음

나. 남극대륙 캄브리아기 탄산염 대지와 생물초

- 남극종단산맥에 분포하는 캄브리아기 퇴적체는 주로 규산염 쇄설성퇴적물로 이루어져 있지만, 북빅토리아랜드(Woo et al., 2014), 중부 남극종단산맥(Rees et al., 1989; Myrow et al., 2002), 엘스웁스산맥(Debrenne et

al., 1984; Webers et al., 1992), 펜사콜라산맥(Debrenne and Kruse, 1989; Wood et al., 1992; Evans et al., 1995)에 크고 작은 탄산염 퇴적체가 존재함

- 북빅토리아랜드에는 넓은 탄산염 대지가 발달하지 않은 대신, 제한된지역 (Edlin Neve, Eureka Spurs, Reilly Ridge)에 수미터에서 수십미터 두께의 중기 캄브리아기 탄산염 퇴적체가 분포함(Cooper et al., 1996). 변질이 많이 되었지만, 원래 퇴적상은 생물파편 석회암, 우이드 입자암, 미생물 퇴적체 등으로 추정됨
- 북빅토리아랜드의 캄브리아기 해저 퇴적체에는 특징적으로 다량의 석회암 거력이 포함된 구간이 있음. Reilly Ridge의 Spurs 층과 South End Conglomerate에는 수 미터에 이르는 석회암 역이 이질 암석위주의 퇴적상에 포함되어있음. Handler Ridge의 Handler층도 주로 이암과 사암의 교호로 이루어져 있지만, 중간에 석회암 역들이 포함되어있음. 이들은 석회이암, 입자암, 생물초 등의 다양한 구조를 가지고 있음
- 중부남극 종단산맥에는 전기 캄브리아기에 발달한 소규모 탄산염 대지기원의 석회암이 잘 발달함(Rees et al., 1989; Myrow et al., 2002). Shackleton Limestone은 석회입자암과 생물초 석회암으로 주로 구성되어 있으며, 생물초는 전기캄브리아기에 변성한 고배류와 미생물의 조합으로 이루어져있음 (Rees et al., 1989)

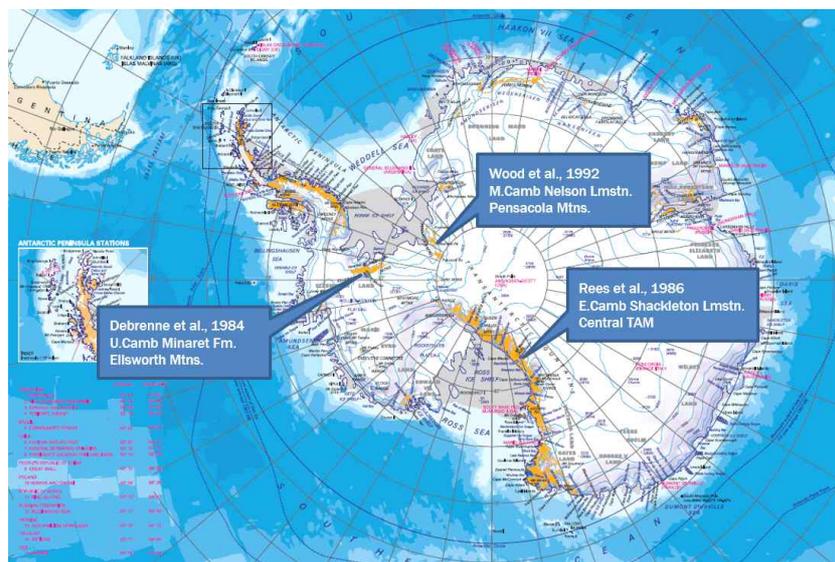


그림 2-7-1. 남극종단산맥에 분포하는 캄브리아기 생물초 노두

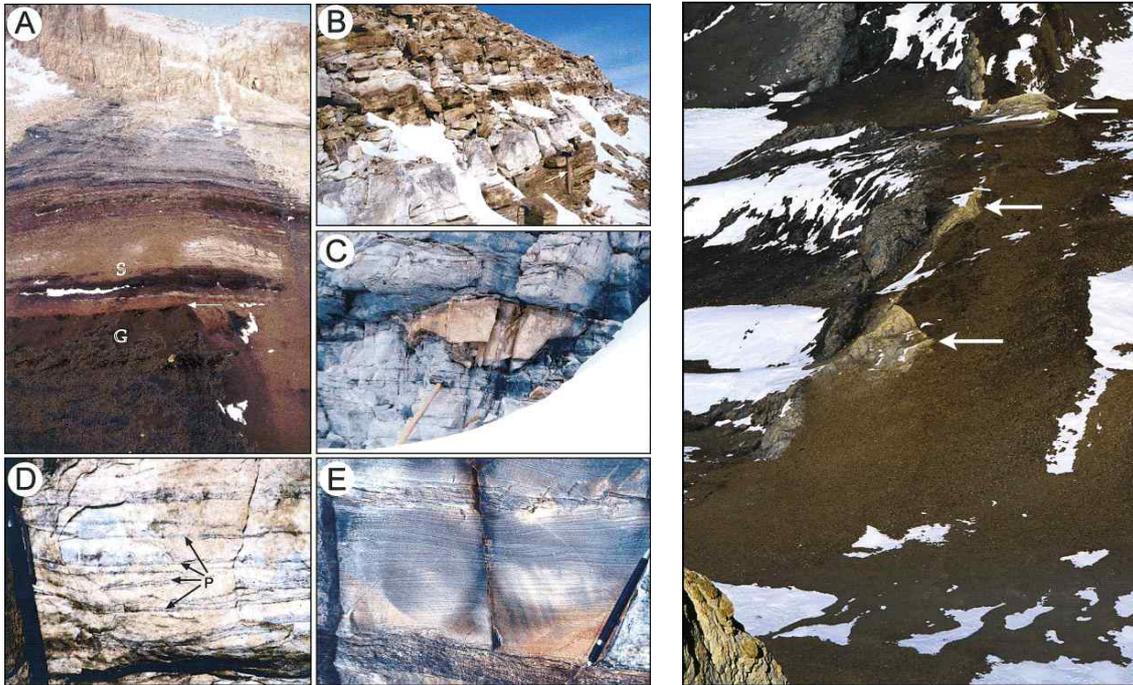


그림 2-7-2. 남극종단산맥(Holyoake Ridge)의 전기 캄브리아기 석회암 퇴적상(좌)과 생물초 노두(우) (Myrow et al., 2002)

○ 엘스워스 산맥의 후기 캄브리아기 미나렛 층에서 발견된 고배류는 전기 캄브리아기 말에 멸종된 것으로 알려진 고배류가 후기 캄브리아기로 기록된 지층에서 발견된 것으로 많은 관심을 끄(Debrenne et al., 1984). 하지만 그 내부구조 보존이 불량해 이들이 정말 고배류인지 아니면 비슷한 외관을 가지는 해면동물의 일종인지 판단할 여지가 있음



Figure 4. Polished section of a typical limestone showing archaeocyathan cups, with broken shells of trilobites and brachiopods. USNM no. 333902, x2. Spring Peak.

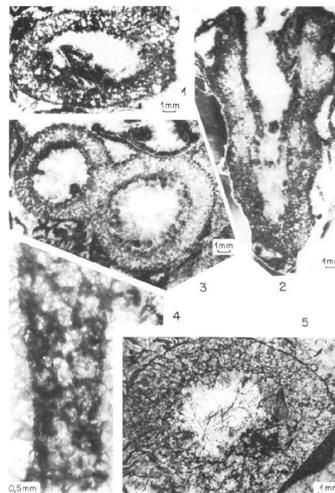


Figure 5. *Amerostrocyathus websteri*, gen. & sp. nov. (Springer Peak). Part 1: Transverse polished section of the holotype, USNM no. 333901, x2. Part 2: Longitudinal polished section of the holotype, USNM no. 333901, x5, showing the empty central cavity and external corrugations of cup. Part 3: Colonial form with two laterally linked cups, USNM no. 333903, x5. Part 4: Detail of longitudinal thin section, with skeletal elements of the pseudostrobular mesh, USNM no. 333904, x20. Part 5: Transverse thin section. The skeletal elements of the intervalum correspond to the dark material, surrounding alveolar pattern of lighter material, USNM no. 333905, x10.

그림 2-7-3. 엘스워스 산맥에서 산출되는 고배류 화석 (Debrenne et al., 1984). 보존상태가 불량함.

- 펜사콜라 산맥의 중기 캄브리아기 넬슨 석회암에서 산출되는 고배류 역시 전기 캄브리아기 멸종 이후의 산출로서 관심을 받음(Wood et al., 1992). 하지만 이들이 생지상태(in-situ)로 발견되지 않았고 유사한 내부구조를 가진 해면동물이 있음을 감안하면 재고할 필요가 있음

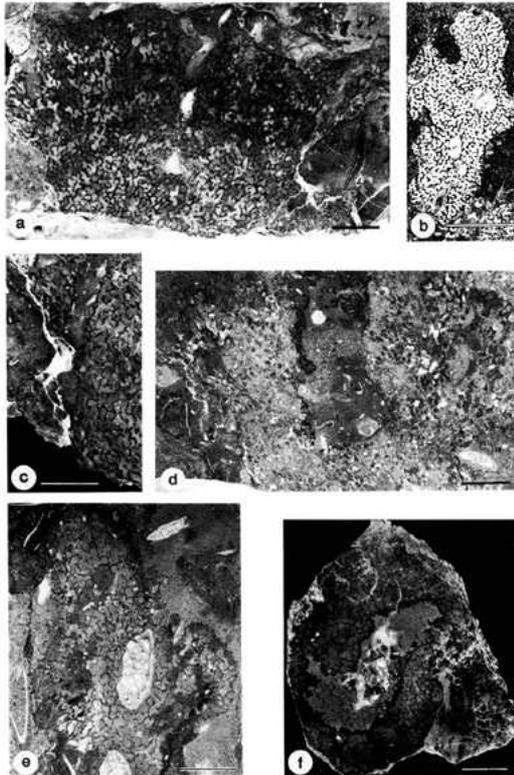


그림 2-7-4. 펜사콜라산맥 넬슨석회암에서 산출되는 고배류 화석 (Wood et al., 1992).

1.7.2. 연구 목표 및 방법

가. 빅토리아랜드 캄브리아기 탄산염 대지 연구

- 석회암 역에 나타나는 생물초 구조가 기원한 탄산염 대지를 특정하기 위한 현장조사가 필요함. 기존 석회암 산출지에 대한 상세 조사를 선행하여 변질되지 않은 구간을 찾아야함. 또한 석회암층이 연장된다고 예상되는 지역에 대한 상세조사 실시로 북빅토리아랜드 캄브리아기 고환경 복원에 중요한 역할을 하는 석회암 대지를 재구성
- 석회암층이 다수 나타나는 북부지역(Reilly Ridge, Edlin Neve)에 대한 현장조사를 위해 헬기를 동반하는 소형 캠프 기반 연구가 필요.

나. 중부 남극종단산맥과의 비교연구

- 중부 남극종단산맥 Holyoake Ridge의 원거리 캠프를 기반으로 생물초에 대한 현장조사와 미국 극지 암석 보관소와 Prof. M. Rees 등이 주장하고 있는 석회암 시료에 대한 확보를 통해, 문제가 되고 있는 고배류 시료에 대한 추가연구 추진
- 생물초의 역사에서 고배류는 동물의 형태와 양이 증가하던 전기 캄브리아기의 생물초를 지배한 고착동물로서 중요한 의미를 가짐. 고배류는 전기 캄브리아기 말 대멸종으로 절멸한 것으로 알려져 있으나 남극 중기, 후기 고생대층에서 산출되는 것이 거의 유일한 예외로서 보고됨. 생물초 역사 복원에 중요하지만 남극이라는 지역적 특성상 재현이 매우 어려움. 이를 해결하면 파급력있는 연구결과 도출이 예상됨

1.7.3. 예상결과

가. 남극대륙 캄브리아기 고환경복원

- 호주 남미 인도 대륙을 연결하는 지역에 존재하던 남극대륙의 고환경 규명으로 고지리 및 고생물의 진화와 지역적 확산 이해에 기여

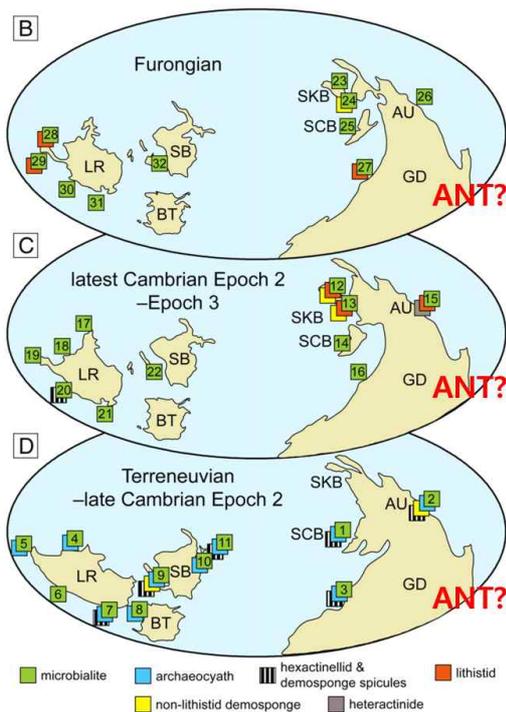


그림 2-7-5. 남극 주변 곤드와 나초대륙과 로렌시아의 캄브리아기 고지리와 이에 분포하는 생물초의 종류 및 출현 시기 (Hong et al., 2016)

- 남극대륙 캄브리아기 생물초의 진화과정을 규명하여, 동시대 생물초 진화의 지역적인 특성을 규명
- 활동성 경계부에 발달하는 탄산염 대지의 퇴적상 모델 및 지체구조 운동에 따른 발달과정 규명

참고문헌

- Cooper, R. A. , Jago, J. B., Begg, J. G., 1996. Cambrian trilobites from Northern Victoria Land, Antarctica, and their stratigraphic implications, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 39: 3, 363 – 387
- Debrenne F., Kruse, P.D., 1989. Cambrian Antarctic archaeocyath. in Crame, J.A., (ed), *Origins and Evolution of the Antarctic Biota*, GSA special publication 47, 15-28
- Debrenne, F., Rozanov, A.Y., Webers, G.F., 1984. Upper Cambrian Archaeocyatha from Antarctica. *Geol. Mag.* 121, 291-299
- Evans, K.R., Rowell, A.J., Rees, M.N., 1995, Sea-level changes and stratigraphy of the Nelson Limestone (Middle Cambrian), Neptune Range, Antarctica. *Journal of Sedimentary Research* 65, 32-43.
- Hong, J., Lee, J.-H., Choh, S.-J., Lee, D.-J., 2016. Cambrian Series 3 carbonate platform of Korea dominated by microbial-sponge reefs. *Sediment. Geol.* 341, 58-69.
- Lee, J.-H., Chen, J., Chough, S.K., 2015a. The middle-late Cambrian reef transition and related geological events: a review and new view. *Earth Sci. Rev.* 145, 66-84.
- Myrow, P.M., Pope, M.C., Goodge, J.W., Fischer, W., Palmer, A.R., 2002. Depositional history of pre-Devonian strata and timing of Ross orogenic tectonism in the central Transantarctic Mountains, Antarctica, *GSA Bulletin* 114, 1070-1088
- Nutman, A.P., Bennett, V.C., Friend, C.R., Van Kranendonk, M.J.,

- Chivas, A.R., 2016. Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures, *Nature* 537, 535-538.
- Pratt, B.R., Spincer, B.R., Wood, R.A., Zhuravlev, A.Yu., 2001, Ecology and evolution of Cambrian reefs. in Zhuravlev, A.Yu. Riding, R. (eds) *Ecology of the Cambrian Radiation*, 224-274.
- Rees M.N., Pratt, B.R., Rowell, A.J., 1989. Early Cambrian reef complexes, and associated lithofacies of the Shackleton Limestone, Transantarctic Mountains, *Sedimentology* 36, 341-361
- Webers, G.F., Craddock, C., Splettstoesser, J.F., 1992. Geology and Paleontology of the Ellsworth Mountains, west Antarctica. *GSA Memoir* 170, 459 pp
- Wood, R.A., Evans, K.R., Zhuravlev, A.Y., 1992. A new post-early Cambrian archaeocyath from Antarctica. *Geol. Mag.* 129, 491-495.



1.8. 중생대 화산암의 화산분출사 및 환경 복원

1.8.1. 학술적 배경 및 기존연구 내용

가. Large Igneous Province and continental flood basalt

- Large Igneous Province(LIP)는 매우 많은 양(100,000 km³ 이상)의 화산암이 비교적 짧은(수백만년 이내) 기간 동안에 형성된 것을 가리키며 (Coffin and Eldholm, 1992), 중앙해령 등 일반적인 지체구조 환경에서 만들어진 화산암과는 구분함

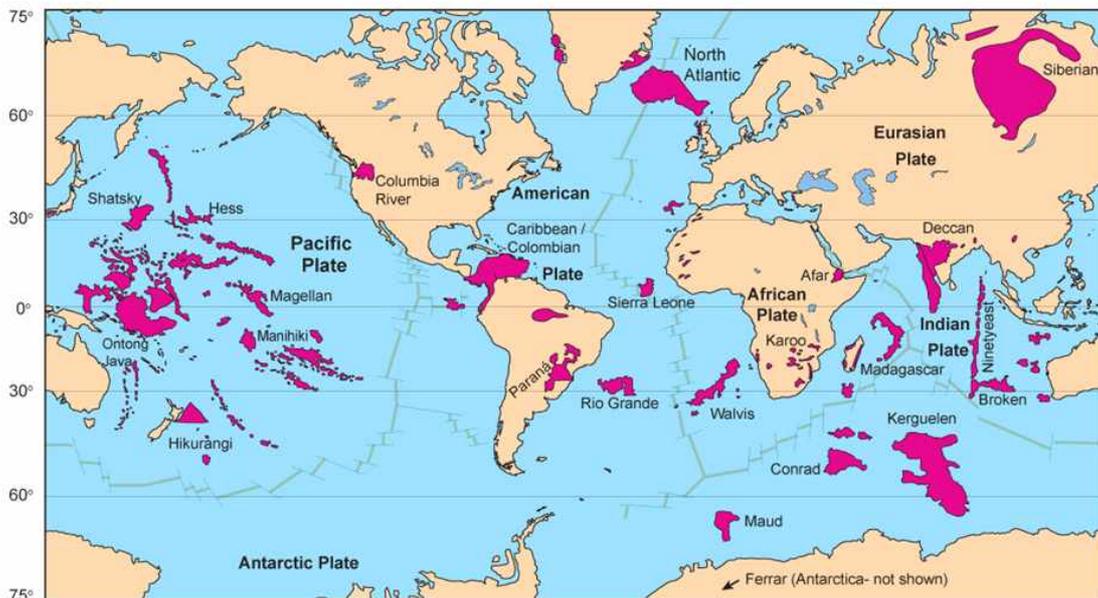


그림 2-8-1. Map of the major large igneous provinces (LIPs) on Earth, including continental flood basalt provinces, volcanic passive margins, oceanic plateaus, aseismic submarine ridges, ocean basin flood basalts, and seamount groups. After Saunders et al. (1992)

- LIP는 해양환경과 육상환경 모두에서 정치되거나 분출하며 현무암에서 유문암에 이르는 다양한 화학적 특성을 가지고 있음. 이중 육상 플러드 바살트 (flood basalt) 종류가 가장 잘 연구되어있음. 이들은 지각의 관입 시스템, 분출한 플러드 바살트 시스템과 화산쇄설성 퇴적물로 이루어짐(White et al., 2009)

Province	Region	Age (Ma)	Area (10 ⁶ km ²)	Volume (10 ⁶ km ³)	Also known as or includes
Ontong-Java Plateau	Pacific Ocean	~122	1.86	8.4	Manihiki Plateau and Hikurangi Plateau
Madagascar		88			
Deccan Traps	India southern Pakistan	66	0.5-0.8	0.5-1.0	
North Atlantic Igneous Province	Northern Canada, Greenland, the Faeroe Islands, Norway, Ireland, and Scotland	62-55	1.3	6.6	High Arctic Large Igneous Province
Ethiopia-Yemen Flood Basalts	Yemen-Ethiopia	31-25	0.6	0.35	Ethiopia
Emeishan Traps	Southwestern China	253-250	0.25	~0.3	
Siberian Traps	Russia	250	1.5-3.9	0.9-2.0	
Central Atlantic magmatic province	Northern South America, Northwest Africa, Iberia, Eastern North America	199-197	11	2.5 (2.0 - 3.0)	
Karoo-Ferrar Province	South Africa, Antarctica, Australia, and New Zealand	183-180	0.15-2	0.3	
Columbia River Basalt	Northwestern US	17-6	0.16	0.175	
Agulhas Plateau	Southwest Indian Ocean, South Atlantic Ocean, Southern Ocean	140-95	0.3	1.2	Southeast African LIP, Mozambique Ridge, Northeast Georgia Rise, Maud Rise, Astrid Ridge
Paraná and Etendeka traps	Brazil-Namibia	134-129	1.5	>1	Equatorial Atlantic Magmatic Province
Rajmahal Traps		116			
Warakurna large igneous province	Australia	1078-1073	1.5		Eastern Pilbara

표 2-8-1. 지구상에 존재하는 주요 LIP의 특성을 정리한 표

○ LIP는 짧은 시간동안 막대한 양의 마그마가 분출되는 사건이기 때문에 전 지구적인 대기권과 수권에 영향을 끼치며 큰 환경변화를 유발함. 여러 LIP들의 연대가 대량멸종시기와 일치하는 것이 이러한 극단적인 환경변화를 지시함(Bryan and Ernst, 2007). 이와 연관지어 미래의 LIP 이벤트가 가

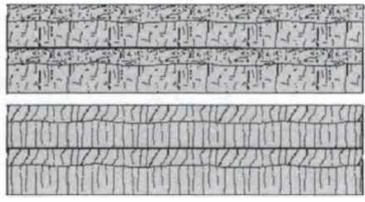
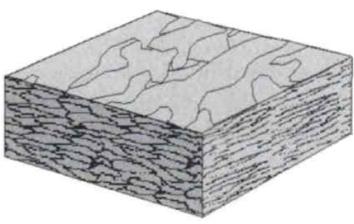
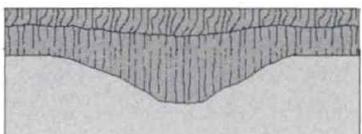
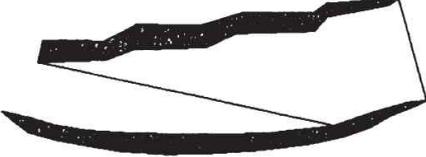
저울 환경변화와 인간문명에 끼칠 영향에 대한 평가도 시도되고 있음.

- 다양한 LIP에 대해 연구가 이루어져 왔지만 많은 부분이 지화학적 연구와 맨틀 플룸과의 관계에 부분적으로 치우쳐 있으며, 실제 용암이 분출되어 어떻게 대지를 이루며 그 표면에서 일어나는 현상은 어떠한지를 다루는 물리적 화산학 분야 연구는 매우 미진함(Jerram, 2002)

나. Physical volcanology of continental flood basalt

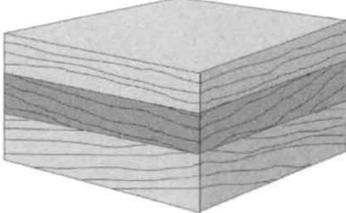
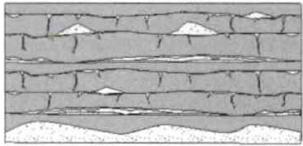
- Jerram(2002)은 Basal Etendeka flood basalt (Namibia)와 Columbia River flood basalt (USA)등의 대륙분출 현무암의 대상으로 물리화산학적 연구 체계를 제시함. 퇴적학의 퇴적상분석에서 차용한 facies와 facies association을 통해 용암류를 기재하고 해석하는 방법으로 각각 개별 flow unit의 형태와, 불연속면으로 경계지어지는 facies의 모임을 나타냄
- 이 분야에서 앞으로 진행해야할 연구 주제를 제안 함. (1) 다양한 지역에서의 더 많은 데이터, (2) 실리식 화산활동의 기여도, (3) 화산재층, (4) 화학 조성과의 물리적 구조와의 관계, (5) 마그마와 CFB사이의 배관 시스템, (6) 유체포유물 등을 이용한 화산가스 성분 연구, (7) 3차원 형태 연구, (8) offshore 분화와의 비교연구

TABLE 2. FACIES TYPES FOUND IN CONTINENTAL FLOOD BASALTS

Facies type	Schematic appearance
<p>Tabular-classic flow facies</p> <p>Tabular laterally extensive thick flows (~50 m) several kilometers to tens of kilometers in lateral extent with some examples traveling hundreds of kilometers. The flows, where erupted in wet environments, have classic, well-developed columnar jointing patterns (Lyle, 2000). In arid environments e.g., Etendeka, columnar joints are poorly developed.</p> <p>Examples: Columbia River Basalts, where flows were erupted into arid environments the columnar joints are not very well developed or absent. Examples include Karoo, Paraná-Etendeka.</p>	<p>Tabular-classic facies</p> 
<p>Compound-braided flow facies</p> <p>Thin anastomosing pahoehoe flow sheets and lobes up to several meters in thickness. Often associated with early low volume, low viscosity eruptions early in the formation of continental flood basalts (CFBs).</p> <p>Examples: British Tertiary (NAIP), Etendeka, Greenland (NAIP), Columbia River Basalts.</p>	<p>Compound-braided facies</p> 
<p>Dipping hyaloclastites</p> <p>Dipping prograding foresets, several meters to tens of thousands of meters thick, of volcanoclastic hyaloclastites. These signify eruption into lakes and seawater.</p> <p>Examples: commonly found in Greenland (NAIP) (e.g. Pedersen et al., 1998) with some examples in the British Tertiary (NAIP).</p>	<p>Hyaloclastites</p> 
<p>Ponded flows</p> <p>Ponded units are quite common in CFBs where eruptions fill preexisting topography. Units can be >100 m thick, and may internally differentiate during cooling and crystallization.</p> <p>Examples: Etendeka, British Tertiary (e.g., Preshal More, Skye) (Williamson and Bell, 1994).</p>	<p>Ponded flows</p> 
<p>Sill facies</p> <p>Large sills and sill complexes tend to intrude around the base of CFB where the lava pile is in contact with the sediments it erupted onto. Sills often have a classic step like geometry (Francis, 1982) on a large scale making them "bowl" as in 3-D.</p> <p>Examples are found in the Paraná-Etendeka, Karoo-Ferrar, Greenland (NAIP)—British Tertiary (NAIP).</p>	<p>Sill facies</p> 
<p>Sheeted dikes</p> <p>Often associated with igneous centers in CFBs. Concentrations of thin dikes cutting up through preexisting lava stratigraphy.</p> <p>Examples: Karoo, Paraná-Etendeka, British Tertiary (NAIP), Greenland (NAIP).</p>	<p>Sheeted dike</p> 

Note: Early volcanoclastic and/or flood lahars from the basal Karoo (Skilling, 2001) may be another facies type.

TABLE 3. FACIES ASSOCIATIONS FOUND IN CONTINENTAL FLOOD BASALTS

Facies association	Schematic appearance
<p>Low-angle downlap and/or toplap</p> <p>Packages of lavas from different eruption sites, possibly along fissure. Each stacking pattern building up from a different direction. These may highlight significant eruption events.</p> <p>Examples: Ethiopian Traps (see Fig. 4), Deccan Traps, NAIP.</p>	<p>Downlap/toplap</p> 
<p>Volcanic disconformity</p> <p>Onlapping relationships between batches of tabular-classic flow facies resulting in disconformable relationships. These represent flows from different eruptive centers onlapping previous flows that have been eroded. Often very difficult to map, because the scale of the disconformities can be >50 km, and the two flow type facies are identical.</p> <p>Example: Etendeka (Jerram et al., 1999b). In many cases on a broader scale these disconformities must exist based on the distribution of different geochemical magma types: e.g., Paraná-Etendeka (Peate, 1997), Yemen (Menzies et al., 1997), Karoo (Marsh et al., 1997).</p>	<p>Volcanic disconformity</p> 
<p>Onlap and/or burial—disconformity</p> <p>Onlapping relationships between batches of tabular-classic flow facies and compound-braided flow facies, representing shield volcanoes, resulting in disconformable relationships.</p> <p>Examples: Etendeka, Greenland (NAIP).</p>	<p>Onlap and/or burial—disconformity</p> 
<p>Shield volcanoes</p> <p>Usually associated with compound-braided flow facies, representing shield volcanoes preserved in the continental flood basalts (CFB). These tend to be restricted toward the base and the tops of the CFB as the flood volcanism starts up and shuts down.</p> <p>Examples: Etendeka, Greenland (NAIP), Ethiopian Traps.</p>	<p>Shield volcano</p> 
<p>Sediment interlayers</p> <p>Sediments interbedded with volcanics. These are found mainly toward the base of the CFB system where there is some overlap between the active volcanic and active sedimentary systems.</p> <p>Examples: Etendeka, Greenland (NAIP), Ethiopian Traps, Deccan Traps.</p>	<p>Sediment interlayer</p> 

Note: Other examples include syn-volcanic rifting folded/faulted disconformities—Etendeka, Ethiopia.

그림 2-8-2. 대륙 분출 현무암의 퇴적상 (Self et al., 1997, Jerram et al., 1999a, Jerram, 2002)

○ 이 모델은 영국 제 3기 Igneous Province에 적용되었으며, 해저에 존재하는 화성암체의 탄성과 단면을 해석하는 모델로 발전함(Single and

Jerram, 2004). 육상 플러드 현무암에 전반적으로 적용하기위한 방법으로도 발전함(Jerram and Widdowson, 2005)

다. Jurassic volcanic rocks in the Antarctica

- 남극종단산맥 3500 km 전역에 걸쳐 형성된 후기 고생대-전기 쥐라기 하성퇴적층(비콘누층군)은 하부의 실리식 응회암질 화산쇄설성 퇴적암과 상부의 슐레아이트 현무암질 암석으로 이루어진 쥐라기 화산암(페라르 층군)에 의해 피복됨 (Elliot, 2000). 이는 남극대륙이 배호분지와 같은 압축성 활동 경계에서 확장성경계부로 진화함을 지시함. 이들을 집합적으로 페라르 대형 화성암 지대(Ferrar Large Igneous Province, FLIP)라고 칭함

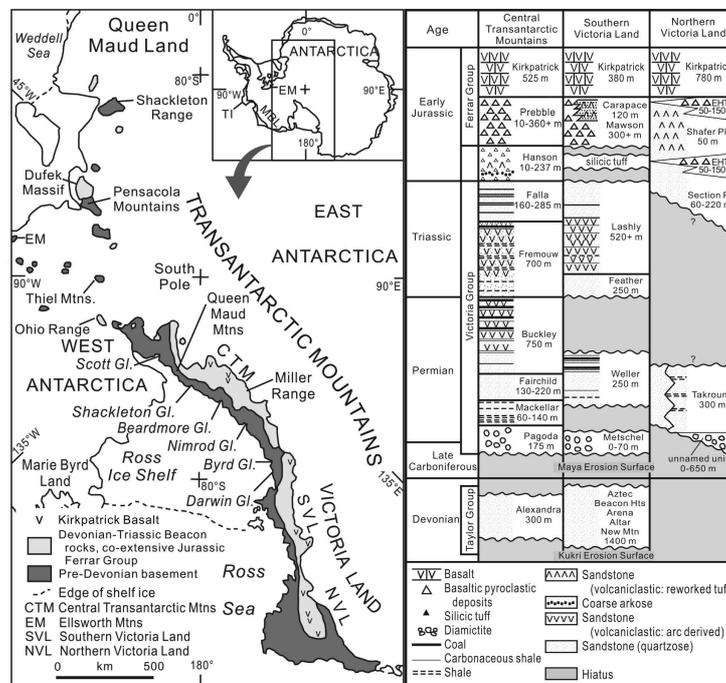


그림 2-8-3. Ferrar Large Igneous Province의 분포와 층서적 위치

- 페라르층군 하부 층서단위는 중부남극종단산맥에선, 한슨층, 프레블층으로 나타나며, 남빅토리아랜드에서는 모슨층과 카라파스 사암, 북빅토리아랜드에서는 익스포저힐 타입 이벤트로 대표됨(Elliot, 2000; Elliot and Fleming, 2008). 익스포저힐 타입 이벤트는 Shoener에 의해 하부의 비콘누층군으로 편입됨

- 페라르층군 상부의 현무암질 암석은 커크패트릭 현무암으로 통칭되며, 매우 두꺼운 현무암류와 현무암질 화산쇄설물, 협재하는 퇴적암으로 구성되어있음(Elliot and Fleming, 2008)
- 페라르층군에는 상당량의 관입암(Dufek Intrusion, Ferrar Dolerite)이 포함되어있음. 듀팩 관입암은 남극종단산맥의 웨델해쪽 끝에 발달하는 층상구조를 가지는 염기성암석이며, 페라르 돌레라이트는 중부남극종단산맥에서 북빅토리아랜드에 걸쳐 주로 비콘누층군에 침투한 수직, 수평 관입암임.
- 페라르 돌레라이트와 듀팩 관입암에서 분리한 저어콘과 baddeleyite U/Pb 연대는 모두 183 ± 1.8 Ma이며(Encarnación et al., 1996; Minor and Mukasa, 1997), 페라르 돌레라이트, 커크패트릭 현무암, 현무암질 역에서 분리한 장석의 $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ 연대는 180 ± 1.8 Ma로 보고됨(Heimann et al., 1994; Fleming et al., 1997). 쿤모드랜드에서도 유사한 연대(184 - 182 Ma)의 쏘레아이트가 보고됨(Zhang et al., 2003). 하부의 화산쇄설성 퇴적암인 헨슨층에서 분리한 저어콘 연대(182.7 ± 1.8 Ma) (Elliot et al., 2007)는 다른 페라르 암석과 구별되지 않음
- Elliot (2000)은 쥬라기 화산쇄설성 퇴적암의 층서연구를 통해 배호분지에서의 하성퇴적작용이 곤드와나의 분리와 연계된 확장성 분지에서의 화산 퇴적작용으로 진화한 과정을 밝혔음.
- Elliot and Fleming (2008)은 FLIP에 대한 물리적 화산학 연구를 수행하여, 하부의 응회구 및 관련 퇴적체 그리고 표면에 가까운 벤트구조가 초기 수성화산활동에 의한 것이며, 이후 더 조용한 상태의 현무암질 용암분출이 지속되었음을 보임.
- Elliot and Fleming (2000, 2004)은 페라르 돌레라이트의 관입양상, 지화학 특성을 바탕으로 FLIP 마그마의 기원지로 생각되는 웨델해 부근 삼중점에서 남극종단산맥을 까지 마그마의 이동 기작 모델을 제시함

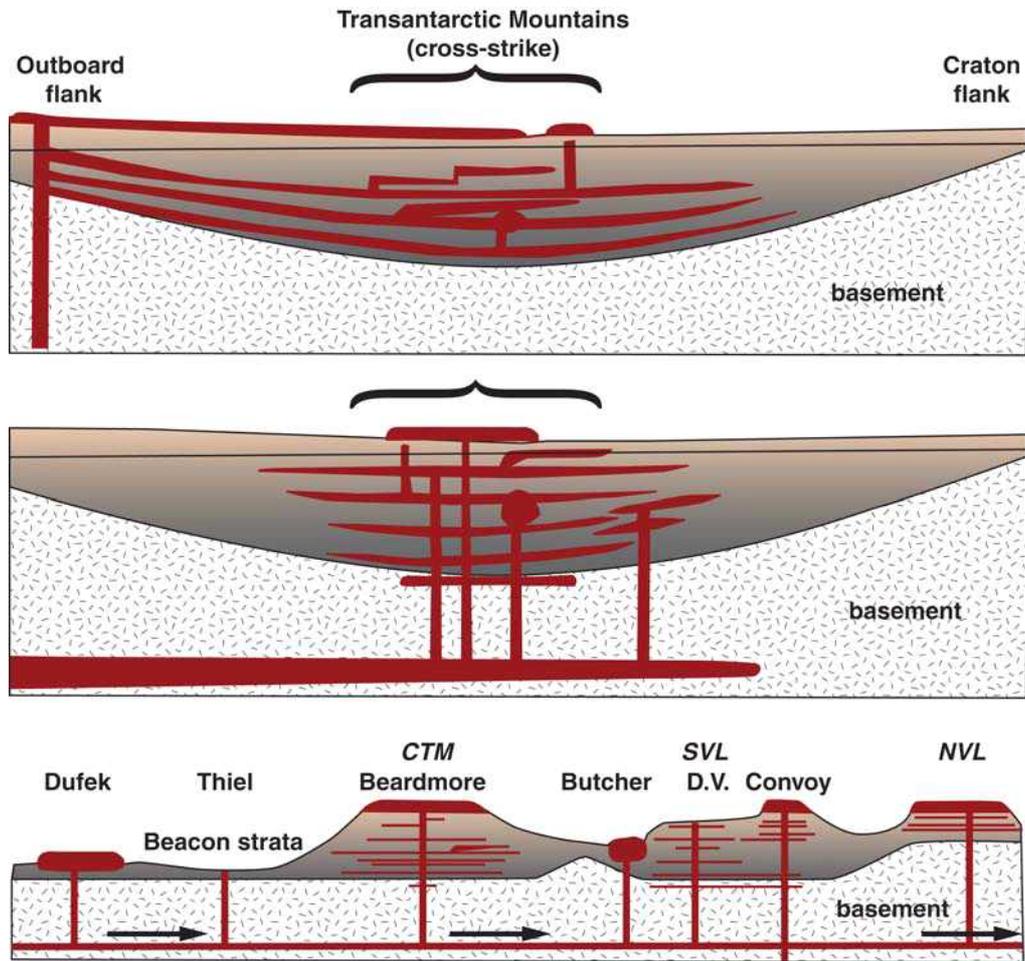


그림 2-8-4. Different styles of long-distance magma transport considered by Elliot and Fleming (2004) for the distribution of Weddell Sea-derived magmas throughout the Ferrar LIP. In the top two cartoons, magma feeding the Ferrar Dolerite, exposed in the Transantarctic Mountains, is provided by sills extending cratonward from a megadyke farther toward an outboard convergent margin, whereas in the lower cartoon the main transport is in a megadyke or dyke complex beneath the current outcrop belt, with delivery toward the surface by vertical dyking.

라. Ferrar Group in northern Victoria Land

- 전술한 바와 같이 북빅토리아랜드의 페라르 층군은 커크패트릭 현무암으로 이루어져 있으며, 이보다 앞선 시기에 일어난 화산활동은 익스포저힐 타입 이벤트로서 인지되고 있음(Elliot, 2000; Schoener, 2007). 이들은 대부분 메사레인지 주변에 집중적으로 노출되어있으며, 남쪽 프린스 알버트 산맥과

북쪽 리텔 암반에도 노출되어있음.

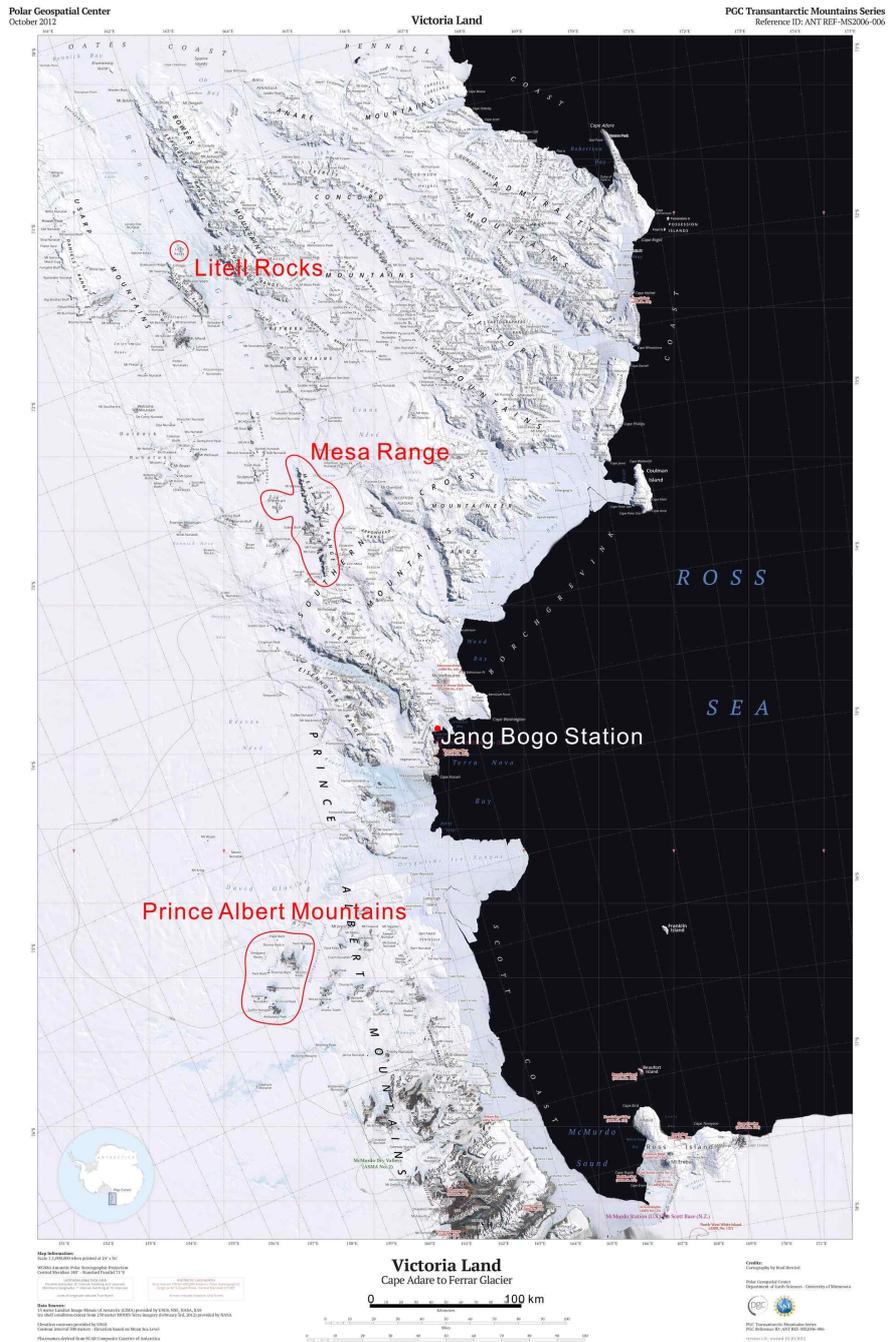


그림 2-8-5. 빅토리아랜드의 주요 커크패트릭 현무암 노출지

- Elliot et al. (1986a)은 메사레인지 게어 메사의 남쪽 끝에 노출된 익스포져 힐 층을 층서학적으로 기재하였음. 두께 약 수십 미터 가량의 6개 단면에서 주로 응회암과, 각력암으로 이루어진 층을 기재함.

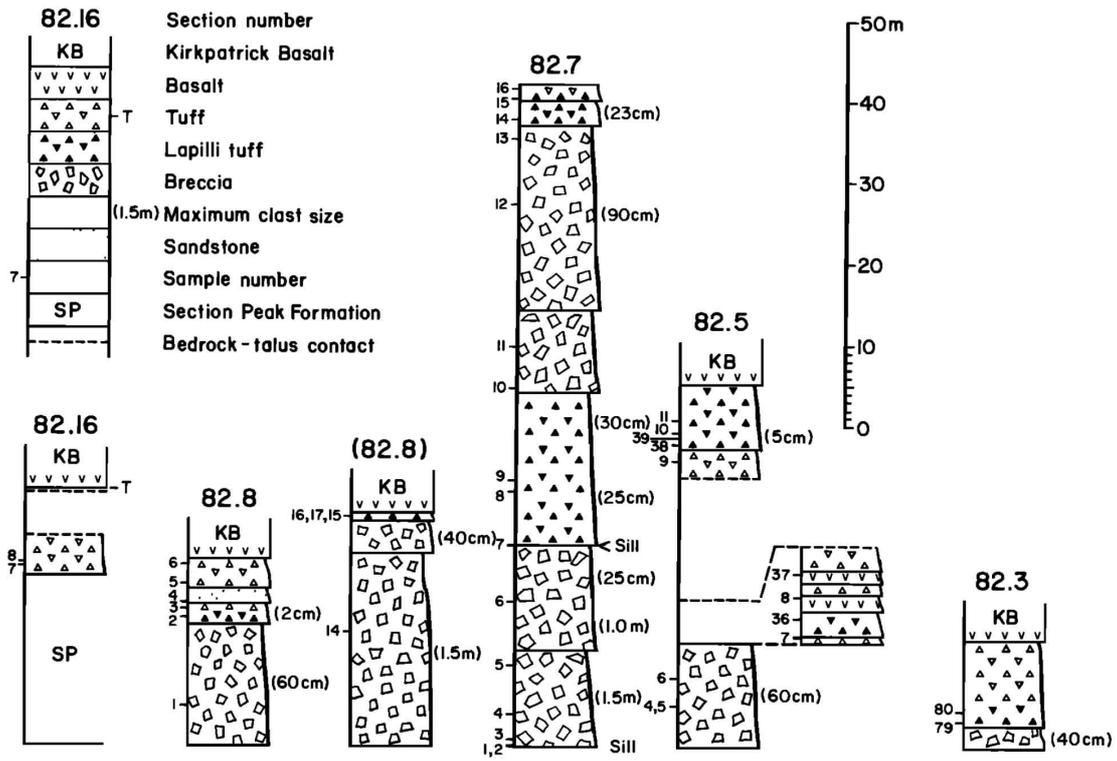


그림 2-8-6. 메사레인지에 노출된 익스포저힐 층의 주상도

○ Elliot et al. (1986b)은 북빅토리아랜드 레닉빙하 주변의 커크패트릭 현무암을 층서학적으로 기재하였음. 메사레인지 16개 섹션에서 플로우 유닛을 정의하고 주상도를 작성함. 현무암은 조인트의 특성을 비롯, 필로우의 유무, 기공의 특성을 기록하였으며, 현무암층 사이에 발달하는 퇴적암과 화석에 대해서도 기재하였음.

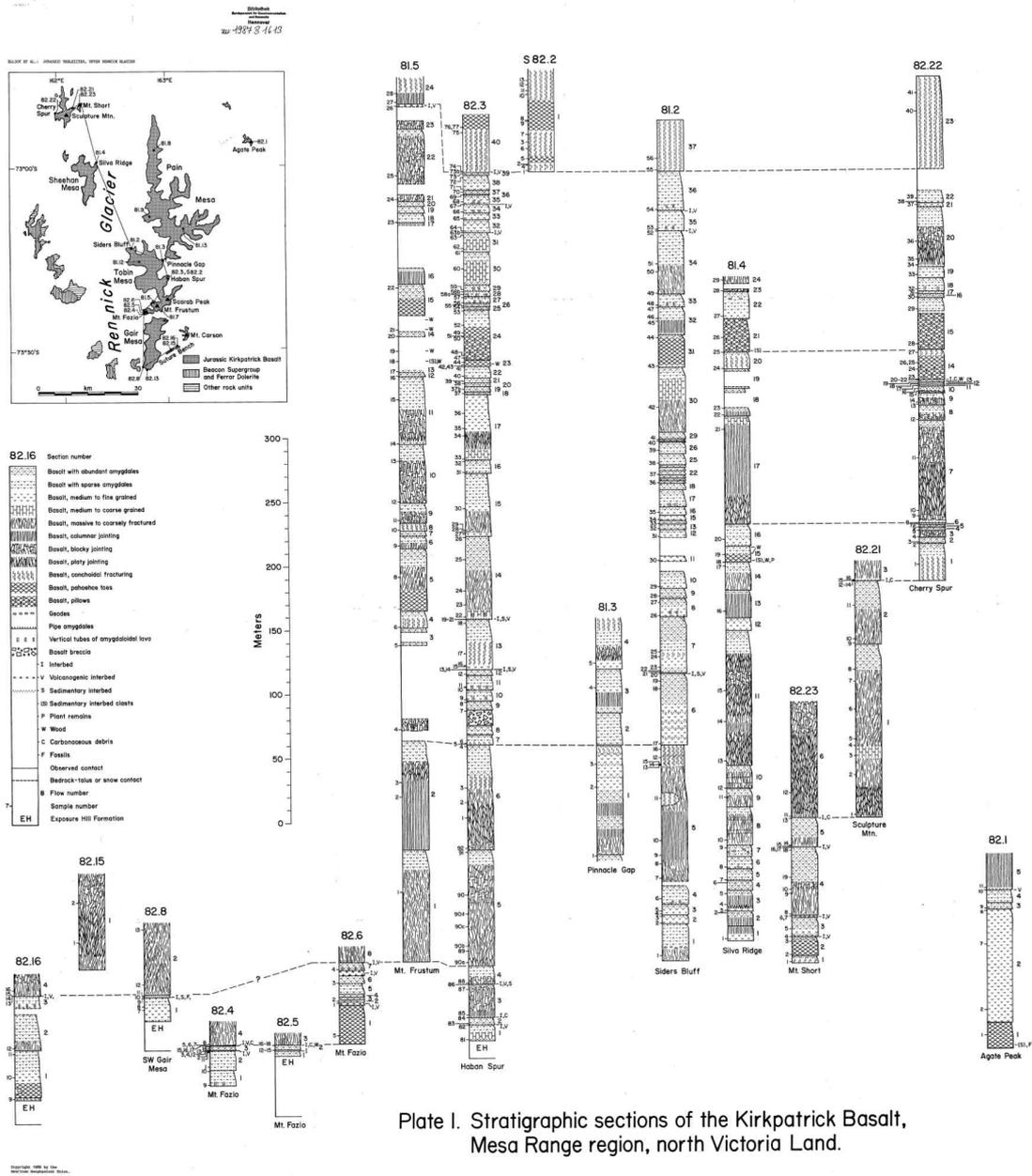


Plate I. Stratigraphic sections of the Kirkpatrick Basalt, Mesa Range region, north Victoria Land.

그림 2-8-7. 메사레인지에 대규모로 노출된 커크패트릭 현무암의 주상도. 키베드의 물리적인 연결이 확실치 않으며, 횡적 퇴적상변화가 잘 인지 되지 않음

○ Elliot and Foland (1986)은 K-Ar 전암분석으로 메사레인지의 커크패트릭 현무암 최상부 층의 연대를 178 Ma로 측정함. McIntosh et al. (1986)은 커크패트릭 현무암의 고지자기 연구를 수행하면서 $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ 방법으로 174 ± 1.0 Ma의 연대를 도출.

- Elliot(2000)에서 프린스 알버트 산지 Thomas Rock의 비콘누층군위에 놓이는 모슨층(약 50 m)과, 메사레인지 남부의 익스포져 힐에 노출된 익스포져힐 타입 이벤트(약 80 m)를 기재함

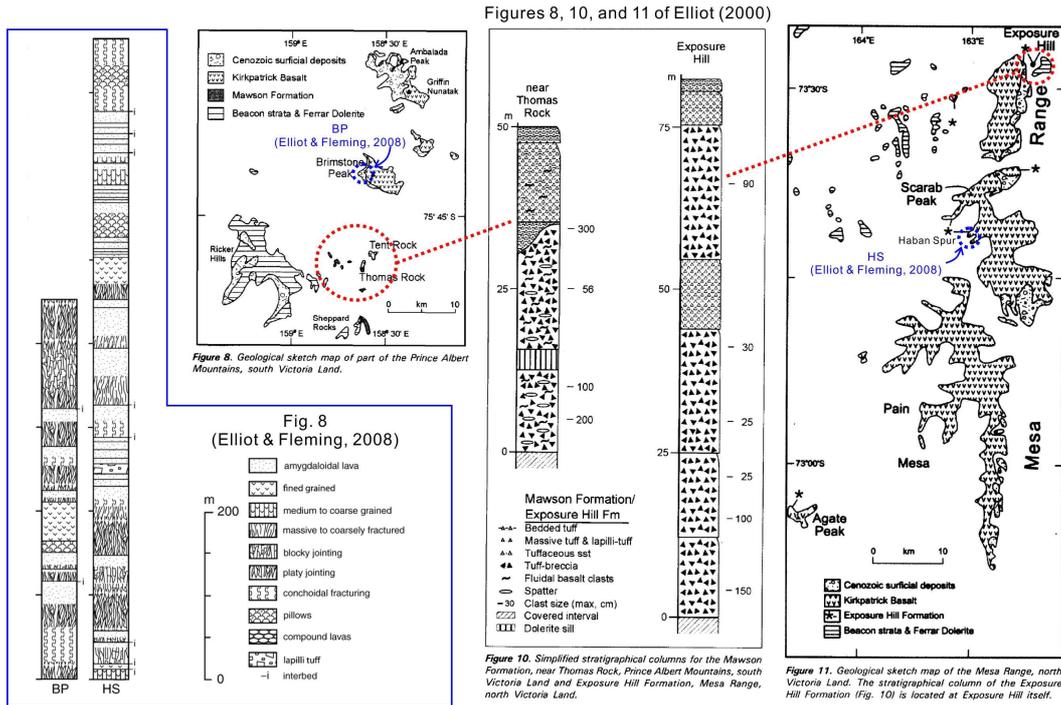


그림 2-8-8. 북빅토리아랜드 커크패트릭 현무암 상부에 놓인 익스포져힐 타입 퇴적체의 주상도

- Elliot and Fleming (2008)에서는 Jerram(2002)의 개념을 이용하여 화산 쇄설물과 현무암류를 기재하였음. 남극종단산맥 전반을 다룬 논문에서 북빅토리아랜드의 경우 프린스 알버트 산지(브림스톤 피크)와 메사레인지(하반스퍼)의 커크패트릭 현무암을 각각 두께 기준 450 m, 800 m 씩 기재하였음.
- 종합하면, 1986년 Geological Investigations in Northern Victoria Land에 실린 일련의 논문들 이후에 북빅토리아랜드에서의 중생대 암석에 대한 본격적인 연구는 미진하였음. 이후 약간의 추가 현장조사와 남극종단산맥 동시대 암석 데이터를 종합하여 Elliot (2000), Elliot (2002), Elliot and Fleming (2008) 등 물리적 화산학연구 결과가 도출되었지만 북빅토리아랜드에 대한 집중적인 연구는 이루어지지 않았음. CFB에 대한 3차원 형태분석 등 현대적인 접근 방법을 적용한 연구가 필요한 상황

1.8.2. 연구목표 및 방법

가. 북빅토리아랜드 커크패트릭 현무암의 물리적 분출 작용 규명

(1) 북빅토리아랜드 커크패트릭 현무암 노두의 3D 맵핑

- 현무암질 용암이 흐르면서 만든 물리적구조(lava architectures: lava sheets, lava lobes, ponded lava, lava delta, sedimentary interbeds)의 분포와 발달방향을 3차원적으로 기재하기위해 헬기, 드론, 장대촬영을 이용해 빅토리아랜드 주요 커크패트릭 현무암 노두를 3차원적으로 맵핑
-

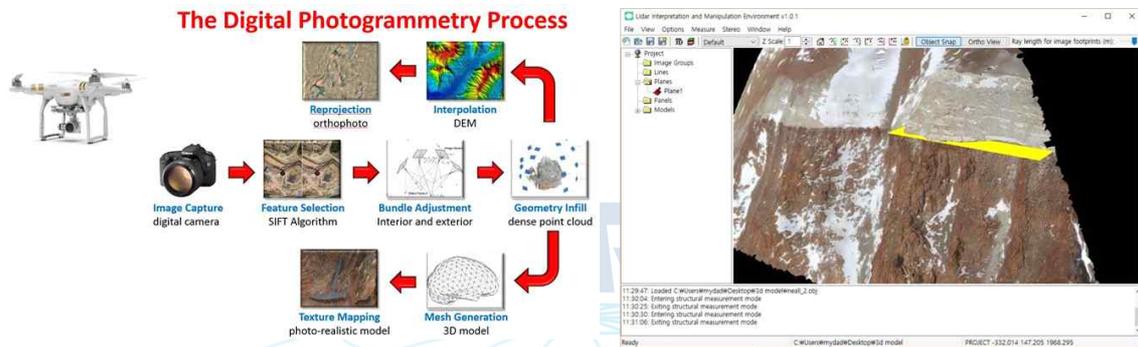


그림 2-8-9. 사진을 이용한 3차원 지형모델제작의 개념도와 실제 활용 예

- 높이 약 700 m 노두를 두 세장의 사진으로 커버하여 공간해상도 5 cm 삼차원 모델을 작성, 모든 미터 스케일 구조를 인지하는 것 목표로함
- 북빅토리아랜드에 커크패트릭 현무암이 노출된 지역은 북쪽으로부터 리텔 암반, 메사 산맥, 프린스 앨버트 산지 주변 세 곳임. 이중 높이 500-700 m의 절벽에 큰규모의 노출지가 존재하는 메사산맥을 대상으로 맵핑 실시. 기복이 작은 리텔 암반은 위성자료를 바탕으로 암상구분과 분포 파악 시도. 남북빅토리아랜드의 경계부에 위치하는 프린스 앨버트 산지는 후순위로 두어 현장 로지스틱스 사정을 감안하여 조사 실시

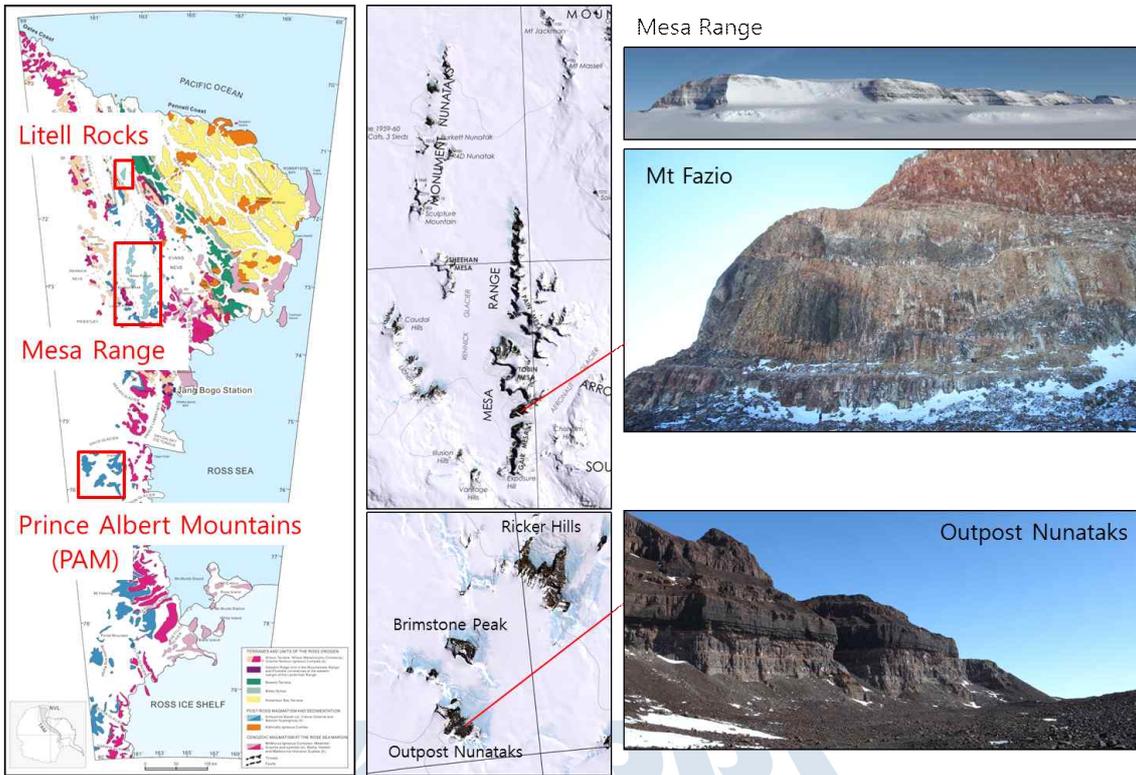


그림 2-8-10. 커크패트릭 현무암이 대규모로 노출된 대표적인 지역의 노두사진. 메사레인지, 프린스 앨버트 산지

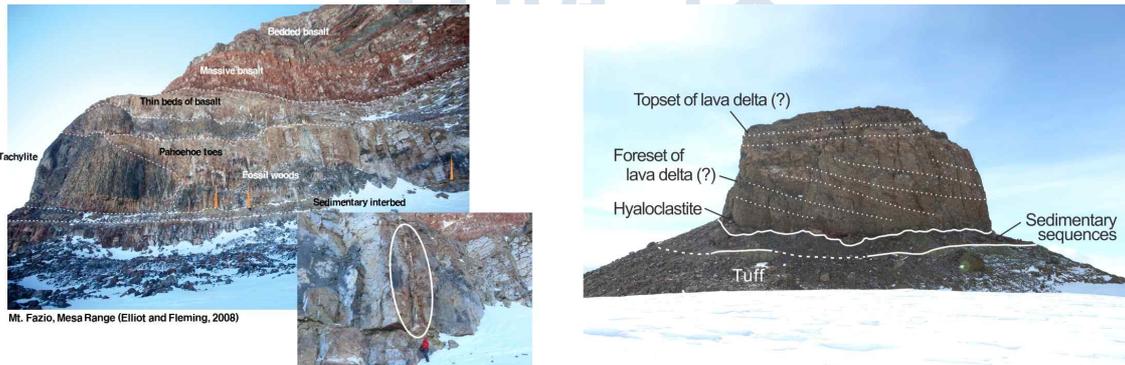


그림 2-8-11. 프린스 앨버트 산맥에 발달하는 용암-물 반응구조와 나무화석

- 메사 산맥은 북빅토리아랜드를 남북으로 가르는 레닉 그라벤을 따라 같은 방향으로 길게 발달한 평정산(메사)의 연속으로 게어 메사, 토빈 메사, 페인 메사, 시한 메사로 이루어져 있으며, 총 길이는 약 70 km, 전체 둘레는 420 km 에 이릅니다.

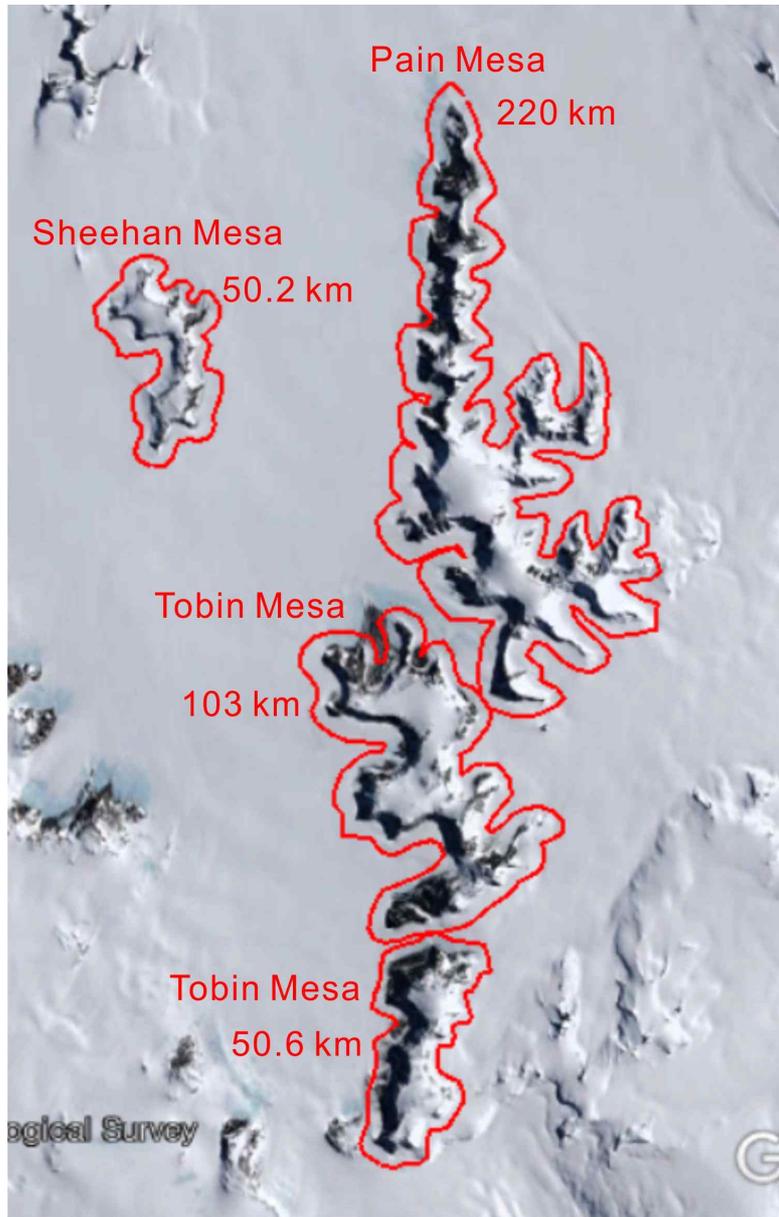


그림 2-8-12. 메사레인지 전체를 대상으로 3차원 모델을 작성하기 위한 헬기 루트 계획

- 노두 표면의 구조를 3차원적으로 기재하여 용암류 단위의 수평적인 연장과 발달 방향을 종합적으로 기재

나. 북빅토리아랜드 쥐라기 환경 변화 연구

- 기존연구에서 현무암의 수직적인 변화 기록을 통해 구분한 주요 층서 경계면과 연대 정보 대비 및 신규 경계면 정의로 층서 재구성

- 용암사이에 발달한 퇴적물 층의 대비를 통해 화산활동의 휴지기 인지 및 주요 분출 이벤트 정의. 퇴적물층, 라바 델타, 하이알로클라스타이트 등 수괴의 존재를 지시하는 층서단위 및 화석 분포 규명
- 나무, 곤충 화석 등을 이용한 중생대 남극대륙 생태계연구 및 화산 지대에서의 화석화 작용 연구
- 용암류의 화학적 특성과 물리적 구조와의 상관관계 규명

1.8.3. 예상결과

- 1억8천만년 전 남극대륙 지표면환경 재구성
- 곤드와나대륙 분리과정에서 기인한 남극의 환경변화 규명
- 대륙분리과정에서 형성된 대규모 화산분출의 물리적 특성 규명



2. 남극대륙의 현재

2.1. 신생대 화산 지구화학연구

2.1.1. 연구개발의 필요성

가. 빅토리아랜드 신생대 화산분출 기록 복원

- 지금까지 북빅토리아랜드 케이프 아데어(Cape Adare) 지역부터 로스해를 지나 남극반도까지 길이 약 3500 km까지 연장되는 서남극 열개구조 주변에서 열개구조의 확장과 관련된 신장응력 지구조 환경에서 분출한 약 47개의 신생대 화산이 존재한다고 알려져 있었음
- 최근 영국 에딘버러 연구팀에 의해서 빙하를 관통하는 레이더 항공탐사와 육상에서의 지하 레이더 탐사(GPR, Ground Penetrating radar)를 통해 남극 빙봉 아래에 존재하는 새로운 화산 91개가 발견됨(Fig. 2-1-1)



그림 2-9-1. Sites of some of the 91 volcanoes discovered. volcanic eruptions may not reach the surface but could melt the ice from beneath and drastically destabilise it.

- 현존하는 최고의 화산분포지역인 동아프리카 열곡대의 신생대 화산대(60여 개의 활화산과 아프리카 대륙내에 40여개의 화산 분포)보다 남극의 서남극 열개구조대에 더 많은 화산이 분포함. 이들 빙봉 아래 화산 중 몇몇 활화산이 분화할 경우 서남극 대륙의 빙상을 불안정하게 만들고 빙봉의 붕괴 속도를 가속화 시킬 수 있기 때문에 결과적으로 해수면 상승을 초래할 것으로 예상됨
- 지구에서 최근 화산활동이 활발한 지역 중 많은 곳이 마지막 빙하기 이후 덮여 있던 빙하가 점차 녹으면서 지표면의 압력이 낮아진 지역이라는 학설이 남극에 적용될 경우 이들 화산의 미래 분화 가능성은 매우 높을 것으로 예상됨
- 전 지구적 기후변화, 이에 연동되는 해수면 변동 그리고 이러한 순환 시스템에 남극 빙봉 아래 존재하는 화산의 분화 가능성이 또 하나의 중요한 변수로 부각됨
- 따라서, 이러한 화산의 과거분출 기록을 복원하고 화산들의 미래 분화가능성을 예측하는 연구가 매우 중요

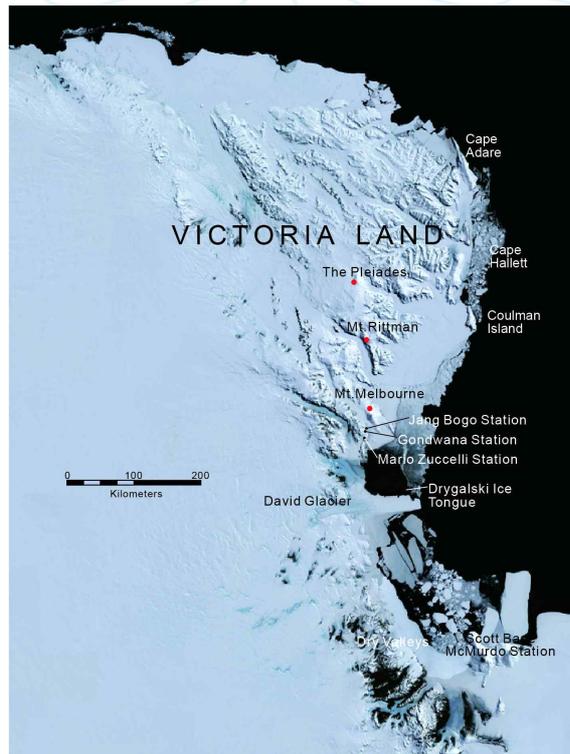


그림 2-9-2. Map of Victoria Land (Antarctica) showing the location of Jang Bogo Station and active volcanoes referred to in the text

- 남극의 화산은 많은 부분이 눈과 얼음에 덮여 있어서 화산분출 역사 복원에 필요한 수차례 분화를 통해 만들어진 다양한 시기의 암상을 찾아내는데 많은 어려움이 따름. 뿐만 아니라 만년 이내의 젊은 화산활동의 경우 방사성 동위원소시스템을 이용한 절대연령 측정실험의 오차가 시료별 특성과 각 동위원소시스템의 특성에 따라 매우 다양하게 나타나므로 정밀한 분화 시기 복원을 위해서는 다양한 방법의 절대연령 측정 실험을 통한 종합적인 해석이 매우 중요함
- 남극 장보고기지에서 반경 300 km 이내의 거리에 최근 만년 이내의 분화를 기록하고 있는 3개의 활화산 즉, 멜버른, 리트만 그리고 플리아이디 화산이 분포함(Kyle, 1990, Fig. 2-1-2)
- 지금까지 멜버른, 리트만 그리고 플리아이디 화산대 화산암류들의 분출 역사 정립을 위한 몇몇 선행 연구들이 수행되었지만(Armiienti et al., 1991; Esser et al., 2002; Giordano et al., 2012), 지표에 노출된 일부 암상에 대한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정 결과만을 보고하였음
- 지금까지 보고된 멜버른 화산의 가장 젊은 암상에 대한 절대 연대측정 결과는 0.01 ± 0.02 Ma(K/Ar dating, Amstronng, 1978)과 35 ± 22 ka(Ar-Ar dating, Giordano et al., 2012)로 두 자료 모두 화산분출 당시 초과 ^{40}Ar 의 존재 가능성으로 인해 오차가 매우 큰 결과를 보여줌
- Lyon(1986)은 멜버른 동쪽 사면부에서 관찰되는 테프라(Fig. 2-1-3a)와 테프라를 덮고 있는 수 센티미터의 얇은 얼음 층(Fig. 2-1-3b)을 바탕으로 마지막 분출이 1862년과 1922년 사이에 있었을 것이라 추정하였음



그림 2-9-3. Tephra layer in the eastern flank of Mt. Melbourne. (a) thick tephra layer composed of pumice and crystals, (b) yellowish grey trachytic, pumice lapilli embedded up to 20 cm in ice.

- 또한, Esser et al. (2002)는 플리아이디 화산체의 가장 젊은 암상에 대해 6 ± 6 ka의 연대를 그리고 Armienti et al. (1991)은 리트만화산대 일부 암상에 대해 8 Ma와 3.5 Ma의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정결과를 보고함
- 남극 화산분출의 기록은 화산암에 대한 절대연령 측정으로부터 직접 복원할 수도 있지만, 남극빙하에 기록된 테프라를 분석함으로써 간접적인 방법으로도 유추할 수 있음. 연대가 잘 복원된 얼음코어 층에서 테프라가 발견될 경우 지구화학 조성 비교를 통해 테프라의 기원화산을 유추하고 화산분출 시기를 정확하게 복원할 수 있음(Dunbar et al., 2003; Dunbar et al., 2008; Dunbar et al., 2010; Narcisi et al., 2010a and b; Narcisi et al., 2012; Narcisi et al., 2016; Narcisi et al., 2017; Lee & Lee, 2017).
- 최근 남극의 수만년 동안의 기후변화연구를 위해 시추된 여러 심부 빙하 코어나 해저 퇴적물 코어에서 빅토리아 화산활동의 분화산물인 테프라 층들이 많이 발견되었음. 이러한 테프라의 기원 화산 추적연구를 통해 밝혀진 결과에 따르면 멜버른, 리트만 화산의 마지막 분화시기는 천년 이내 그리고 플리아이디 화산의 마지막 분화시기도 만년 이내의 결과를 보고함(Narcisi et al., 2010a and b; Narcisi et al., 2012; Narcisi et al., 2016; Lee and Lee 2017)
- 따라서 남극 장보고기지과 비교적 가까운 곳에 위치한 활화산으로 분류되는 멜버른, 리트만 그리고 플리아이디 화산에 대해 논란이 되고 있는 최근 분출 기록에 대한 정밀한 복원과 이를 바탕으로 향후 분화가능성 예측연구가 시급한 실정임. 이를 위해서 북빅토리아랜드 블루아이스 테프라와 얼음코어 테프라 연구를 통해 보다 많은 화산분출 연대 기록을 수집하고 이와 더불어 젊은 화산에 대한 다양한 방법의 정밀연대 측정 기술개발이 필요함

나. 리트만 화산 분화 가능성 예측

- 남극 빙하 시추지역 6곳에서 (Talos Dome TD87a, Taylor 79.155, Siple B 79.2, Siple B 79.42, WAIS core, Styx Ice core 99.18) AD 1254년에 해당하는 동일한 연령의 얼음 층 테프라 시료들이('1254 테프라') 회수되었음(Fig. 2-1-4). 이 테프라들의 화학조성 (Table. 1)은 오차범위를 고려했

을 때 거의 일치하는 특성을 보임. 따라서 이들은 모두 동일한 화산분출 사건으로부터 유래된 테프라로 해석됨

- 서남극 전역의 광범위한 지역에서 발견되는 1254 테프라를 분출시킨 화산 폭발은 화산폭발지수(Volcanic Explosive Index, VEI)가 매우 큰(VEI 4이상) 화산분출 사건이었을 것으로 추정되며, 미래 폭발성 분화 잠재력을 지니고 있는 1254 테프라의 기원화산을 규명하는 것은 지난 10년간 남극 빅토리아랜드 신생대 화산활동 연구의 중요한 이슈중의 하나로 많은 연구가 진행 중임
- 최근까지 1254 테프라의 기원화산은 멜버른 프로빈스 활화산들(멜버른, 리트만, 플리아이디) 중의 하나로 해석되었고, 많은 연구자들은 플리아이디 화산을 기원화산으로 해석하였음(Dunbar et al., 2003; Narcisi et al., 2012)
- 그러나, 2016/17 시즌 극지연구소 연구팀의 리트만 화산탐사를 통해 새로운 사실이 발견됨. 리트만 화산의 분기공 가스분출 활동이 활발한 지역 가까운 곳에서 채취한 폭발성 분화의 결과물로 해석될 수 있는 부석과 유리질 응결응회암(ignimbrite, Fig. 2-1-5)의 조성이 1254 테프라와 거의 일치하는 특성을 보여줌(표 1, Fig. 2-1-6)

Table 1. Electron microprobe analyses of the Rittmann 1252 tephra and possible correlatives.

Sample	1		2		3		4		5		6		7		8		9	
N		10		6		8		6		6				10		7		8
SiO ₂	62.34	0.31	61.38	0.75	61.91	0.70	61.82	0.75	61.58	0.37	61.89	61.53	0.13	65.49	0.11	64.22	0.59	
TiO ₂	0.39	0.03	0.45	0.03	0.43	0.05	0.42	0.03	0.43	0.06	0.38	0.38	0.04	0.47	0.01	0.34	0.07	
Al ₂ O ₃	16.86	0.17	16.68	0.29	16.59	0.62	16.44	0.32	16.74	0.35	16.89	16.44	0.11	15.76	0.05	17.53	0.16	
FeO	6.23	0.18	6.56	0.42	6.25	0.27	6.38	0.18	6.54	0.15	6.46	6.49	0.11	5.34	0.05	4.37	0.22	
MnO	0.24	0.03	0.27	0.04	0.27	0.05	0.24	0.05	0.28	0.05	0.28	0.23	0.03	0.15	0.01	0.17	0.01	
MgO	0.13	0.02	0.15	0.02	0.14	0.03	0.15	0.02	0.15	0.02	0.12	0.10	0.01	0.19	0.01	0.26	0.06	
CaO	1.17	0.07	1.20	0.07	1.14	0.28	1.18	0.08	1.18	0.05	1.13	1.02	0.03	1.82	0.03	1.36	0.18	
Na ₂ O	7.19	0.29	7.41	0.43	8.18	0.00	7.01	0.46	7.92	0.40	6.96	8.06	0.11	5.36	0.13	5.67	0.32	
K ₂ O	5.27	0.18	5.38	0.12	4.57	0.70	5.37	0.19	5.17	0.28	5.34	5.27	0.10	5.25	0.06	5.78	0.09	
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.08	0.03	0.10	0.01	0.05	0.03			0.06	0.05	0.03			0.08	0.03	
SO ₂	0.04	0.03	0.03	0.02	0.05	0.02	0.06	0.02			0.04	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	
F			0.20		0.19		0.58				0.29	0.11	0.03			0.20	0.03	
Cl	0.16	0.03	0.23	0.04	0.28	0.08	0.29	0.05			0.16	0.27	0.02	0.14	0.01			
Total	100.03		100.02		100.10		99.99		99.99		100.00	99.99		99.99		99.99		99.99

N=number of analyses and 1 sigma

1. Styx Ice Core ((Mi Jung Lee, personal communication)
2. Siple B 79.2 (Dunbar et al., 2003)
3. Siple B 79.45 (Dunbar et al., 2003)
4. Taylor 79.155 (Dunbar et al., 2003)
5. Talos Dome TD87a (Narcisi et al., 2012)
6. WAIS core (Iverson, 2017)
7. Rittmann glass (fiamme) (Mi Jung Lee, personal communication)
8. Glass composition for tephra from Mt Melbourne (this study)
9. Average composition of 8 pumice from The Pleiades (this study)

국시인T조

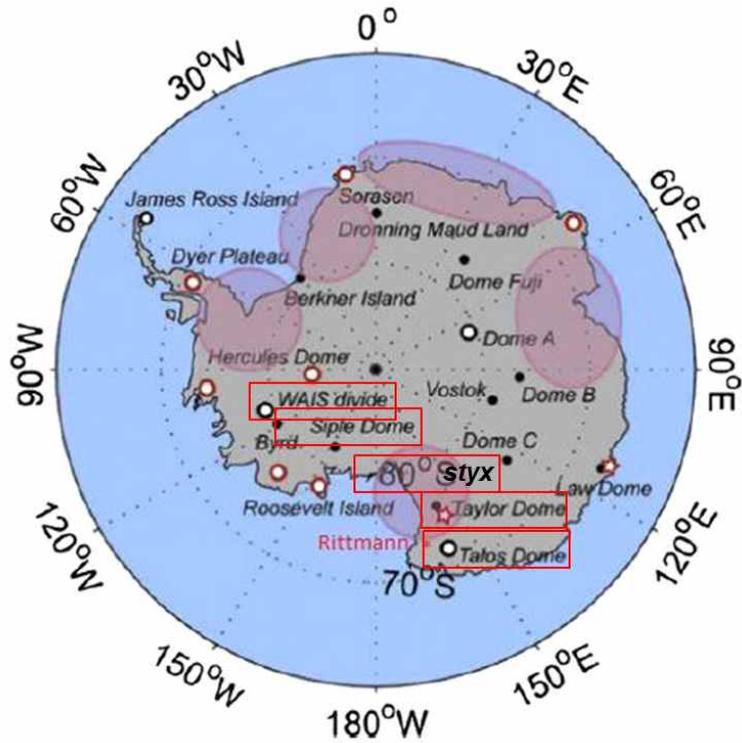


그림 2-9-4. Location of Rittman volcano relative to major deep ice cores. The 1254 tephra has been identified in ice cores from WAIS Divide, Siple Dome, Roosevelt Island, Taylor Dome and Talos Dome. The Styx Glacier ice core near Rittman also contains the tephra. Figure after Jouzel (2010).



그림 2-9-5. Pyroclastic deposit on Mt. Rittman. The deposit resembles an ignimbrite product of a highly explosive eruption

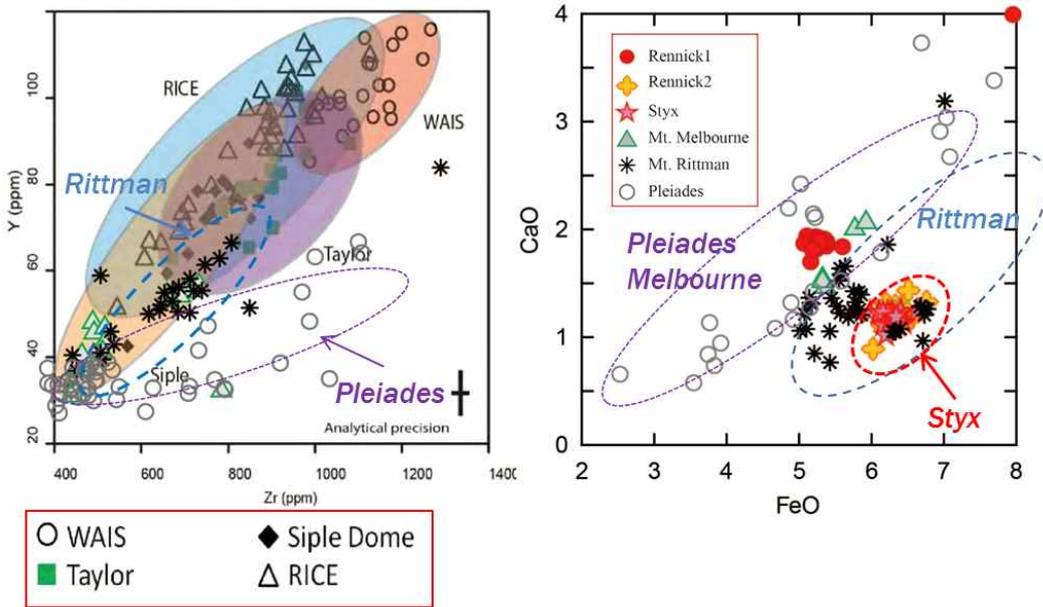


그림 2-9-6. Geochemical compositions of 1254 tephras from ice cores and volcanic rocks from possible source volcanoes in Melbourne province of the Northern Victoria Land, Antarctica.

- 리트만화산은 직경 약 4km의 커다란 칼데라구조를 지니고 있으며(Fig. 2-1-7), 최근에도 분기공 가스분출 활동이 꾸준히 관찰되는 커다란 폭발 분화 잠재력을 지니고 있는 화산임. 그러나, 1986년 이탈리아 연구팀에 의해 처음 발견된 이후 전암 지구화학특성에 대한 Armienti et al. (1991)의 보고 이외의 후속 연구가 전무한 실정임
- 따라서 리트만 화산 형성과정 복원과 분출역사 정립을 위한 후속 연구가 시급한 실정임



그림 2-9-7. Aerial view of Rittman volcano looking northward. Mt. Rittmann is a small outcrop (peak) that has steaming ground. The circular structure defined by the outcroppings labelled Caldera Rim, Mt Rittmann and outcrops on the right, in association with the flat topography is speculated to be a ~4km wide caldera.

2.1.2. 연구목표 및 방법

가. 빅토리아랜드 신생대 화산분출 기록 복원

(1) 젊은 화산암류 ^3He , ^{36}Cl 우주방사선 기원 노출연대 획득(미국 우주홀 연구소, NMT(New Mexico Tech)와 국제 공동연구추진)

- 신생대화산 분출 역사정립을 위해서 젊은 화산에 대한 정밀 연대측정이 필수적임. 앞서 설명한 멜버른과 플리아이디 화산 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정 결과에서 보여주듯 매우 젊은 화산분출기록에 대해서는 분석시료 자체의 초과 ^{40}Ar 존재 가능성 때문에 오차 범위가 매우 크게 나타남. 반면에 우주선 기원 방사성동위원소인 ^3He , ^{36}Cl 를 이용한 지표 노출연대(exposure ages)는 매우 젊은 화산분출 연대를 측정하는 데 보다 적합한 연대측정법으로 알려져 있음(Parmelee et al., 2015)
- 미국 우주홀 연구소와 NMT 연구그룹과의 국제 공동 연구를 통해 화산암과 테프라시료에서 감람석과 휘석 광물을 통해 cosmogenic ^3He 노출연대를, 전암과 장석으로부터 cosmogenic ^{36}Cl 노출연대를 획득하여 신뢰할 수 있는 분출연대 자료 획득

(2) 정밀 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정 기술개발(KBSI와의 공동연구 추진)

- 한국기초과학지원 연구원(KBSI)와의 공동연구를 통해 정밀 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 분석기술 개발
- 멜버른, 리트만, 플리아이디 화산의 분출기록 복원을 위해서 화산암시료의 전암 및 광물의 정밀 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 획득

(3) 조면암내 저콘 산소동위원소와 ^{230}Th - ^{238}U disequilibrium 동위원소 시스템을 이용한 마그마 분화 과정 추적 (KBSI와의 공동연구 추진)

- 멜버른, 리트만, 플리아이디 화산암대에서 공통적으로 산출되는 마지막 분화암상인 조면암의 지구화학 특성비교를 통해 각각 화산암대 마그마 분화 과정의 물리 화학적 환경 특성연구
- 화성기원 저콘의 ^{230}Th - ^{238}U disequilibrium 동위원소 시스템과 산소동위

원소 조성을 이용하여 여러 단계 마그마 프로세스의 시기를 규정하고 소스 물질의 지구화학적 특성 추적

(4) 남극 심부빙하 얼음코어 테프라와 멜버른, 리트만, 플리아이디 테프라 비교 연구

- 기존에 발표된 심부빙하 얼음코어 테프라 기록들의 지구화학조성에 대한 면밀한 재검토와 멜버른, 리트만, 플리아이디 화산암류의 지구화학조성과의 대비를 통해 새로운 분화시기를 규정할 수 있는 연대 기록 복원

나. 리트만 화산 분화 가능성 예측

(1) 지구물리 탐사를 통한 칼데라 지하구조 탐사 및 지각/맨틀 속도구조 규명

- 항공 중·자력 탐사와 GPR 탐사를 이용한 칼데라 지하구조 복원
- 얼음아래에서 확인되는 분화구와 화산암분포 양상 파악
- GPR 탐사를 통해 리트만화산 주변 테프라 층 추적
- 칼데라 구조 하부의 지각/맨틀 속도구조 연구를 통한 천부 마그마방 존재 가능성 탐사

(2) 리트만 화산암 지구화학 특성연구를 통한 마그마 분화과정 연구

- 리트만 화산과 주변 화산암체에 대한 체계적인 현장조사를 통해 분화과정 추적을 위한 충분한 시료 확보
- 화산암 시료에 대한 전암 및 동위원소 지구화학특성 연구를 통한 성인 및 근원맨틀 특성 규명
- 멜버른, 리트만, 플리아이디 화산대 화산암류의 정밀 연대측정과 지구화학 특성 연구·비교를 통한 마그마 분출 역사 및 마그마 분화과정 특성 규명

(3) 리트만 화산가스 연구(영국 캠브리지 대학과 공동연구추진)

- 영국 캠브리지 대학의 화산가스 연구그룹(Prof. Clive Oppenheimer)과 공동 연구추진
- 분기공 가스 분출활동이 활발한 분화구 주변의 화산가스 성분 채집과 분석

및 성분변화 모니터링

- 분화구 주변 화산가스 분출활동으로 생성된 얼음 동굴 탐사와 얼음 동굴내 눈시료의 지구화학 조성의 주기적 변화 추적연구를 통한 마그마 분화가능성 모니터링

2.1.3. 기대성과

- 남극 화산활동 연구그룹인 Antvolc 연구자들에게 멜버른 프로빈스 활화산에 대한 정밀한 암석 지구화학적 자료를 제공함으로써 남극 빙하 얼음코어 테프라 기원화산 추적과 연대 대비 연구에 기여
- 빅토리아랜드 신생대 화산활동 특성이해와 분출역사 복원을 통해 향후 멜버른, 리트만, 플리아이디 화산분화 가능성 예측에 기여
- 남극 활화산 분화와 남극 빙붕 소멸속도 가속화, 기후변화, 해수면 변동 상관성에 대한 이해 증진

참고문헌

- Armstrong, R.L., 1978, K-Ar dating: Late Cenozoic McMurdo Volcanic Group and dry valley glacial history, Victoria Land, Antarctica: New Zealand. *Journal of Geology & Geophysics*, 21, 685-698.
- Armienti, P. and Tripodo, A., 1991, Petrography and chemistry of lavas and comagmatic xenoliths of Mount Rittmann, a volcano discovered during the IV Italian expedition in northern Victoria Land (Antarctica). *Memorie Della Società Geologica Italiana*, 46, 427-451.
- Dunbar, N.W., Zielinski, G.A., Voisins, D.T., 2003, Tephra layers in the Siple Dome and Taylor Dome ice cores, Antarctica: Sources and correlations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8), 2374, doi:10.1029/2002JB002056.
- Dunbar, N.W., McIntosh, W.C. and Esser, R.P., 2008, Physical setting and tephrochronology of the summit caldera ice record at Mount

- Moulton, West Antarctica. Geological Society of America Bulletin, 120, 796-812, doi: 10.1130/B26140.1.
- Dunbar, N.W., Kurbartov, A., Koffmann, B.G., Kreutz, K.J., 2010, Tephra record of local and distal volcanism in the WAIS Divide ice core. 2010 WAIS Divide Science Meeting, Sept 30-Oct 1, La Jolla, CA.
- Esser, R.P. and Kyle, P.R., 2002, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology of the McMurdo Volcanic Group at The Pleiades, northern Victoria Land, Antarctica. In Antarctica at the close of a Millenium (ed D. Skinner) Proceedings of the 8th International Symposium on Antarctic Earth Sciences. Royal Society of New Zealand Bulletin, 35, Wellington, 415-418.
- Giordano, G., Lucci, F., Phillips, D., Cozzupoli, D. and Runci, V., 2012, Stratigraphy, Geochronology and evolution of the Mt. Melbourne volcanic field (North Victoria Land, Antarctica). Bulletin of Volcanology, 74, 1985-2005, doi: 10.1007/s00445-012-0643-8.
- Jouzel, J. and Masson-Delmotte, V., 2010, Deep ice cores: the need for going back in time. Quaternary Science Reviews, 29, 3683-3689.
- Kyle, P.R., 1990, Melbourne Volcanic Province, *in*: LeMasurier, W. and Thomson, J. *ed.* Volcanoes of the Antarctic Plate and Southern Oceans. Antarctic Research Series, 48, American Geophysical Union, 18-145.
- Lee, M.J. and Lee, J.I., 2017, Holocene eruptive history of Mt. Melbourne volcano, Antarctica: insights from tephra layers recorded from Talos Dome ice core. Journal of the geological society of Korea, 53, 509-519 (in Korean with English abstract).
- Lyon, G.L., 1986, Stable isotope stratigraphy of ice cores and the age of the last eruption at Mt. Melbourne, Antarctica. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 29(1), 135-138.

- Narcisi, B., Petit, J.R. and Delmonte, B., 2010a, Extended East Antarctic ice-core tephrostratigraphy. *Quaternary Science Reviews*, 29(1-2), 21-27. doi: 10.1016/j.quascirev.2009.07.009.
- Narcisi, B., Petit, J.R. and Chappellaz, J., 2010b, A 70 ka record of explosive eruptions from the TALDICE ice core (Talos Dome, East Antarctic plateau). *Quaternary Science Reviews*, 25, 844-849. doi: 10.1002/jqs.1427.
- Narcisi, B., Petit, J.R., Delmonte, B., Scarchilli, C. and Stenni, B., 2012, A 16,000-yr tephra framework for the Antarctic ice sheet: a contribution from the new Talos Dome core. *Quaternary Science Reviews*, 49, 52-63.
- Narcisi, B., Petit, J.R., Langone, A. and Stenni, B., 2016. A new Eemian record of Antarctic tephra layers retrieved from the Talos Dome ice core (Northern Victoria Land). *Global and Planetary Change*, 137, 69-78.
- Narcisi, B., Petit, J.R. and Langone, A., 2017, Last glacial tephra layers in the Talos Dome ice core (peripheral East Antarctic Plateau), with implications for chronostratigraphic correlations and regional volcanic history. *Quaternary Science Reviews*, 165, 111-126, doi: 10.1016/j.quascirev.2017.04.025.
- Parmelee, D.E.F., Kyle, P.R., Kurz, M.D., Marrero, S.M., Phillips, F.M., 2015, A new Holocene eruptive history of Erebus volcano, Antarctica using cosmogenic ^3He and ^{36}Cl exposure ages. *Quaternary Geochronology*, 30, 114-131.

2.2. 빅토리아랜드 화산 관측

2.2.1. 연구개발의 필요성

- 남극의 화산활동은 빙하 역학에 영향을 미치고 있고, 과거 남극에서의 화산

의 형성과 시기는 암석권(lithosphere)과 빙하 (ice sheets), 그리고 기후 변화의 이해를 위해서 반드시 연구되어야 함

- 남극 빙하 아래에서 현재 진행되고 있는 마그마활동(magmatism)은 지표에서 발생하는 긴급한 지반 융기의 형태로 보여지고 있음
- 화산 지역에서의 정확한 지각과 맨틀의 특성을 연구하여 지구의 변형 (Earth deformation)과 화산활동, 그리고 미래의 빙하의 변화 예측을 위한 기초 자료를 제공할 수 있음

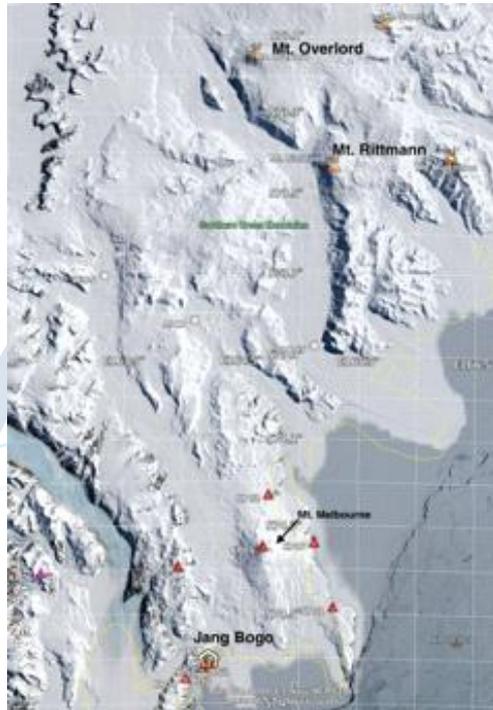


그림 2-10-1. The locations of Mt. Rittman and KPSN@TNB (red triangles). A yellow house symbol indicates Jang Bogo station.

- 장보고 기지가 위치한 북빅토리아 랜드는 Melbourne Volcanic Province 에속하며 장보고기지에서 북북동 방향으로 멜번화산과 리트만 화산 그리고 오버로드 화산이 존재하고 있음
- 장보고기지 북쪽 30km 지점에 위치한 멜번화산(2,712m)은 남극 3대 활화산 중의 하나임. 2014년 11월 25년 만에 가스 분출이 재개되어 활동성 여부가 다시 주목받고 있음 (2015년 1월 16일 KBS, MBC 보도)
- 멜번화산 북쪽에 위치한 리트만 화산은 최근 남극 하계 현장조사 기간중에 분화구 주변에서 수증기가 관측되었으며, 이는 리트만 화산이 현재까지 활

동 중임

- 2010년 Iceland의 에이야 쉘라외 쿨(Eyjafjallajökull) 화산 폭발로 인한 화산재에 의하여 4월 15일부터 20일까지 전 유럽을 포함하여 세계 각국의 항공기 운항이 마비되고 이로 인한 경제적 손실이 U\$20억 이상으로 집계 됨
- 화산 폭발시 예상되는 경제적 손실을 줄이기 위한 연구가 세계 각국에서 진행 중임



그림 2-10-2. The eruption of the Eyjafjallajökull in Iceland

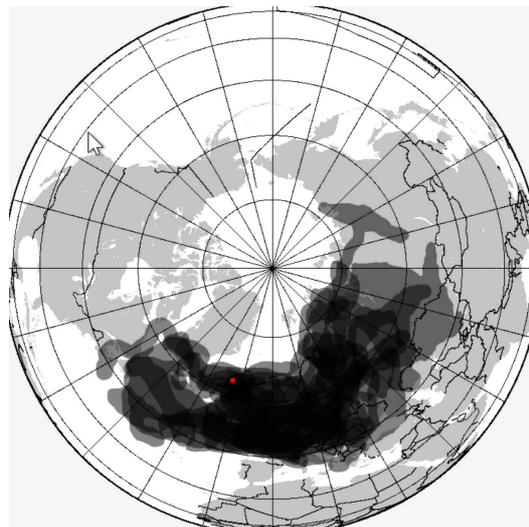


그림 2-10-3. The distributions of the volcanic ashes on May 2010 due to the eruption of the Eyjafjallajökull in Iceland

- 이와 같이 빙하 화산이 분화할 경우 대량의 가스 분출로 인한 인명피해와 경제적 손실이 막대함
- 장보고 기지 주변의 화산 활동과 화산 지진의 장기 모니터링 시스템을 구축하고 체계적인 연구를 통한 장보고 기지의 지진/화산 안전성 연구가 절실함

리트만 화산 지구물리 모니터링

- 리트만 화산은 고도 2600m에 이르는 산악지역에 위치하고 있으며 위성사진으로 보여지는 원형의 화산분화구의 지름은 약 1.6km(Fig. 2-2-4)이고, 약 4Ma 리트만 화산의 용암의 알칼리도(alkalinity)는 오버로드 화산과 멜번화산에서 관측된 알칼리도의 중간 정도로 알려져있음 [Armienti and Tripodo, 1991]
- 얼음과 눈기둥의 분화구와 높은 지열은 리트만 화산의 칼데라는 리트만 화산 하부에서 측정된 용암의 생성연대(4Ma)보다는 훨씬 최근에 형성된 것으로 추정되고, 수증기와 가스의 분기공은 10cm 깊이에서 50-63C로 측정됨 [Bargagli et al., 1996].
- 리트만 화산의 활동도 감시를 위한 지구물리관측망은 아직까지 수행되어진 바가 없으나, 현재까지 보고된 리트만 화산은 2011년부터 광대역 관측망 [Park et al., 2014]을 구축하여 관측한 멜번화산과 비슷한 활동성을 보일 것을 예측됨

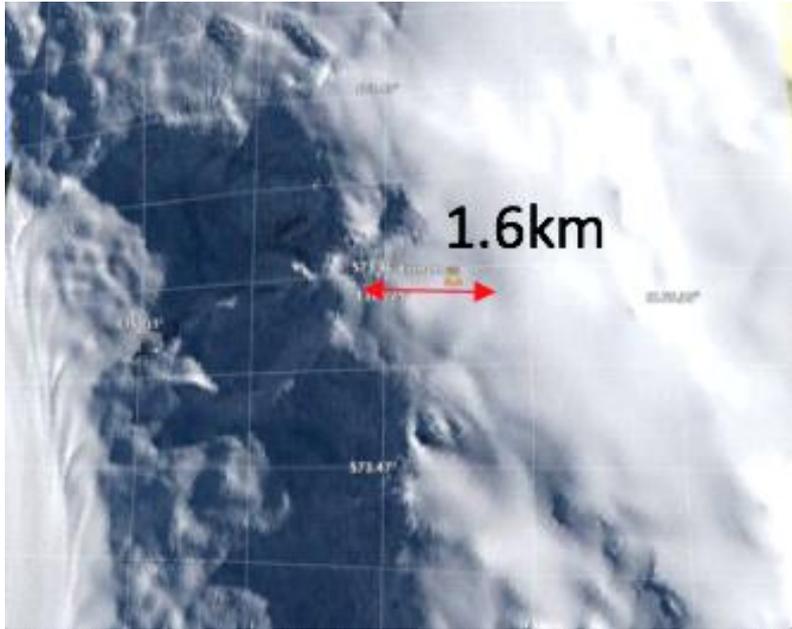


그림 2-10-4. Magnified map on the summit of Mt. Rittmann. The diameter of the rim of caldera is ~1.6 km.

2.2.2. 연구목표 및 방법

가. 지진과 인프라 사운드 관측

- 화산의 형성과 활동성은 지각과 상부맨틀의 열역학적 구조에 의해서 결정됨
- 심부에 존재하는 마그마 챔버는 지각의 압력과 마그마의 부력에 의하여 지각의 연역한 부분을 통하여 천부 지각에 이동하고 천부지각으로 이동한 마그마는 또다시 천부층의 마그마 챔버의 형태로 존재함
- 천부의 마그마는 또다시 지표로 이동하여 화산분화의 형태로 분출되는데, 이러한 마그마의 이동이 지진파와 음파를 발생함
- 마그마의 이동으로 발생한 지진파와 음파는 지구물리학적 관측장비를 이용하여 관측할 수 있고, 그 활동도에 따라 관측망의 디자인이 결정됨 (Fig. 2-2-5.)

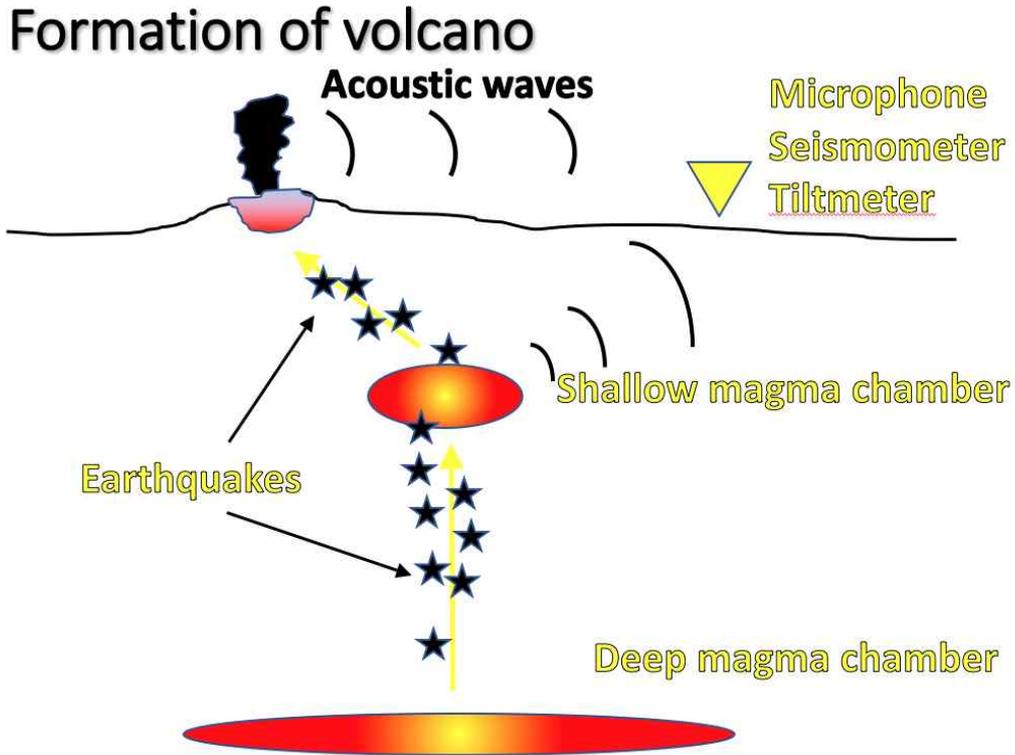


그림 2-10-5. A cartoon of formation of volcano. Stars represent locations of earthquakes induced by movements of magma, and yellow arrows indicate directions of magma movements.

- 화산 활동에 의한 지진파는 가스 분출이 있을 경우 지진동과 초음파에 의한 대기압 변화의 형태로 관측됨
- 그림 16은 에콰도르에 위치한 툰구라후아(Tungurahua) 화산에서 관측된 자료로 같은 관측소에 위치한 지진계와 인프라스운드 센서에서 기록된 시계열 자료를 보여줌 (Fig. 2-2-6.)
- 지진계 자료를 보면 속도가 빠른 P파가 먼저 도착하고 이후에 인프라스운드 신호가 관측되고 있고, 상시 미동 자료(Fig. 2-2-6.)를 보면 마그마의 움직임으로 발생하는 장주기(2s - 0.5s) 신호의 화산 떨림(volcanic tremor)이 관측됨
- 이러한 화산 신호는 굉장히 운동성이 활발한 화산에서 관측되고 있는 현상이지만, 리트만 화산의 활동도는 이와 같이 크지는 않을 것으로 사료됨
- 정밀한 화산 활동도를 관측하기 위해서는 분화구 주변에 관측소가 거리가 5km 이하의 굉장히 조밀한 형태의 지진/음파 관측망이 필요하지만, 이러

- 한 관측망은 관측소가 최소한 10개 이상이고 눈과 얼음으로 덮여있는 남극의 리트만 화산의 경우에는 관측소 부지를 찾기도 어려운 실정임
- 또 다른 형태의 관측망은 리트만 화산을 중심으로 분화구 부근에 관측소를 설치하고 그 주변으로 암반이 노출된 지역 혹은 단단한 얼음위에 지진계 센서를 고정하여 설치하는 방법임 (Fig. 2-2-7.)
 - 이러한 형태의 지진관측망은 화산의 활동도가 매우 약할 경우 화산에 의한 지진파가 멀리 떨어져 있는 관측소에 관측이 되지 않아 위치 파악의 어려움이 있음
 - 리트만 화산의 경우, 아직까지 화산의 어느 부분에서 지진파가 형성되는지 명확하지 않기 때문에 초기에는 관측소가 간격을 넓게 설치한 후, 최소 1년 이상 관측한 자료를 바탕으로 리트만 화산의 어느 부위에서 지진파가 발생하는지에 대한 사전 조사가 필요하고, 이 사전 조사를 통하여 조밀한 지진관측망을 어느 부분에 설치할 지를 결정지어야 될 것으로 판단됨

Characteristics of signals

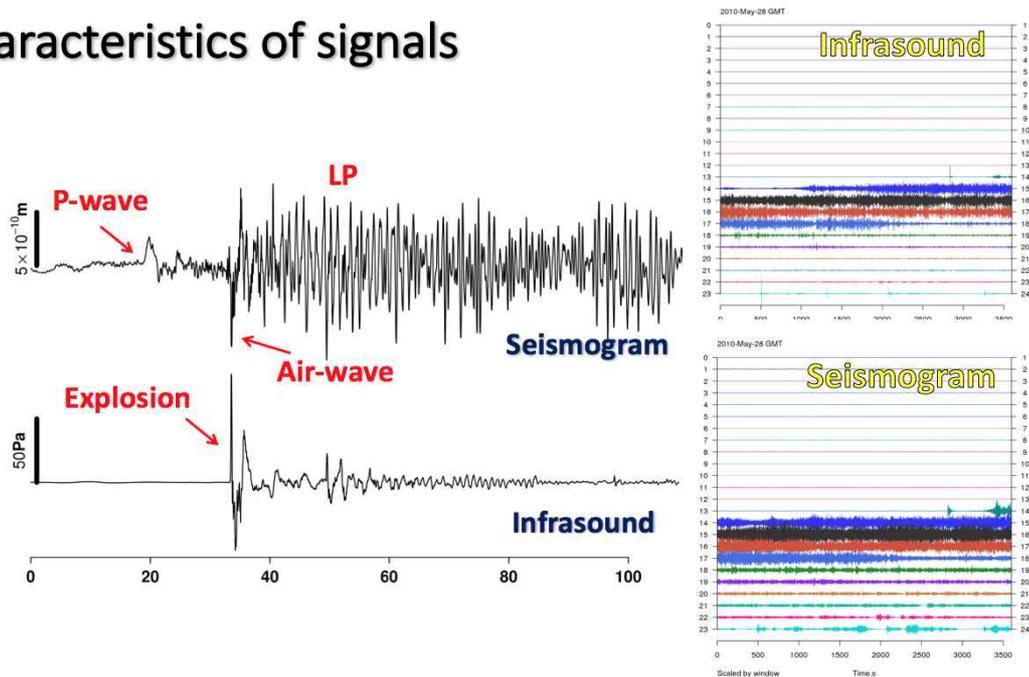


그림 2-10-6. A sample of seismic (upper left) and infrasound (lower left) traces observed on a seismic/infrasound station near Mt. Tungurahua, Ecuador. The volcanic tremors observed on infrasound (upper right) and seismic station (lower right) are also shown.

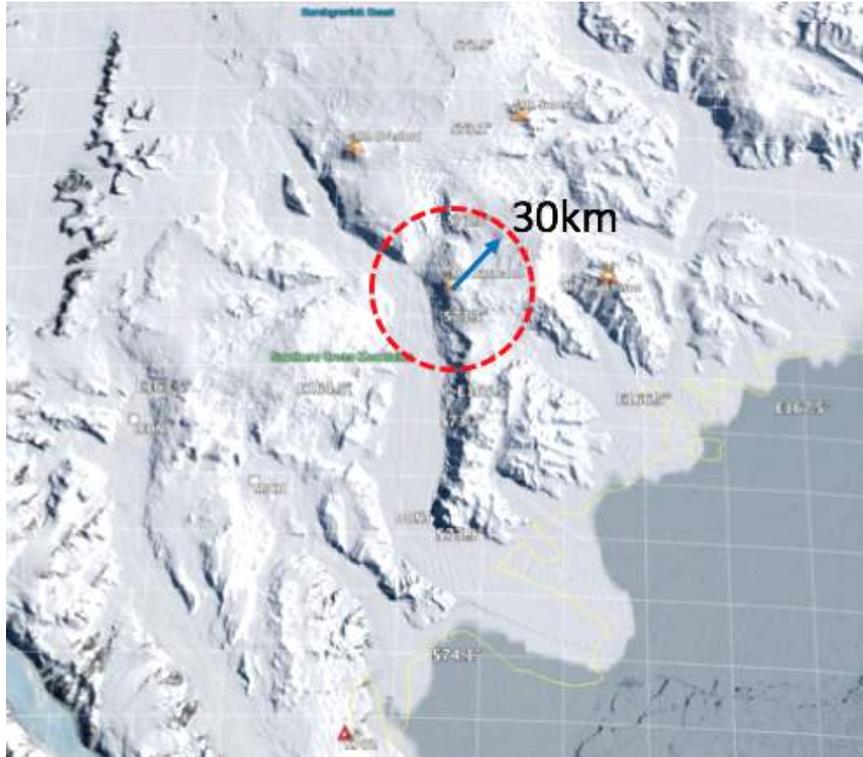


그림 2-10-7. The map of Mt. Rittmann and its vicinity. A red circle indicates ~30km distance from the center of Mt. Rittmann.

나. Airborne

- 리트만 화산은 위의 그림에서 보는 바와 같이 남극의 얼음과 눈으로 덮여 있는 화산으로 위성사진으로 칼데라의 위치를 대략적으로 알 수는 있으나 명확한 칼데라의 규모를 관측하기는 어려운 실정임
- 화산의 모양은 지가에 위치하는 마그마 방의 위치와 규모를 예측하는데 중요한 기초자료이고, 남극의 얼음 아래에 존재하는 화산의 정밀한 모양을 관측하기위해서 RES (Radio Echo Sounding) 탐사가 필요함
- 고주파를 이용할 경우 남극 얼음에 존재하는 화산재층(ash layer)의 깊이도 측정이 가능하다 (Fig. 2-2-8.).

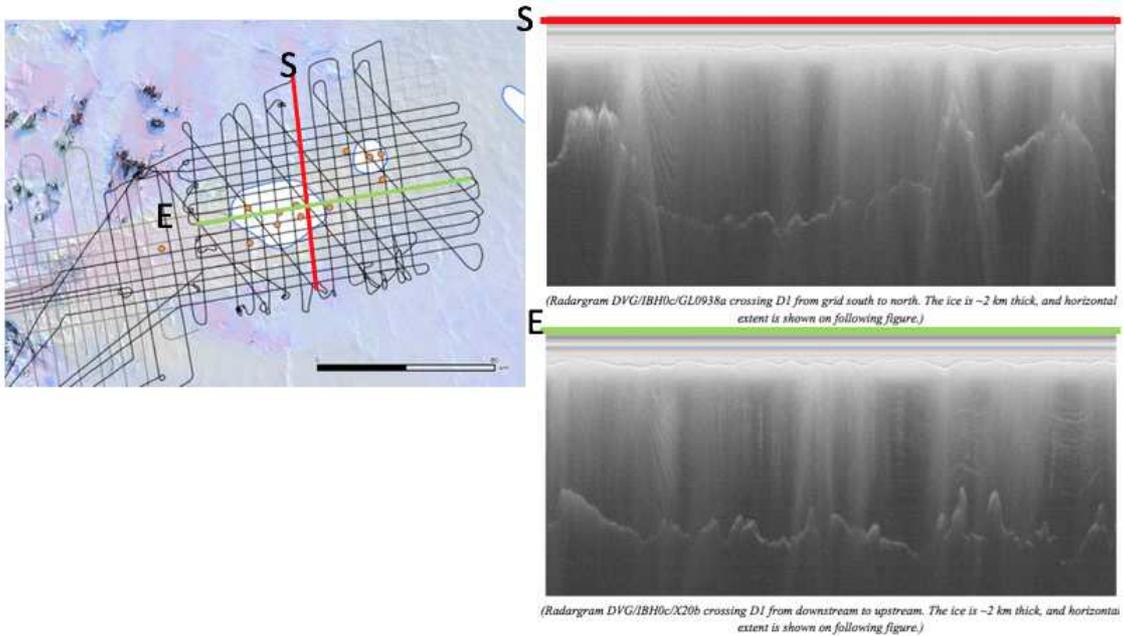


그림 2-10-8. The locations of RES survey lines performed in the upper stream of David Glacier during 2016-2017 Antarctic expedition period to find exact shapes of D1 and D2

2.2.3. 기대성과 및 활용방안

- 리트만 화산 부근에 지진/인프라 사운드 관측망이 구축되고 관측 자료가 축적된다면, 이를 이용하여 다음과 같은 여러 연구를 수행할 수 있음

가. 연속 지진자료를 이용한 지체구조 연구

(1) 3차원 지각 및 맨틀 속도 구조

- 지구 내부구조를 알 수 있는 유일한 방법으로 3차원 속도 구조를 이용하여

맨틀의 온도와 용융 정도를 유추할 수 있음

- 3차원 속도구조 모델링을 수행하여 맨틀 내에서 주변보다 뜨거운 지역, 혹은 차가운 지역을 모사하고, 이 온도차를 이용하여 맨틀의 지체구조를 도출할 수 있음
- 그림 19는 멜번화산에 구축된 지진관측망 자료를 이용하여 장보고 기지 및 멜번화산 지역의 3차원 맨틀 구조에서 40km 깊이의 속도 구조를 보여줌: 붉은 색은 주변보다 느린 지역(뜨거운 지역), 그리고 푸른색은 주변보다 빠른 지역(차가운 지역)을 나타냄
- 이와 같이 3차원 맨틀 구조에서 그림 20과 같은 지체구조를 유추하여 멜번화산의 형성원인과 맨틀의 역학적 움직임을 알 수 있음 [Park et al., 2015]

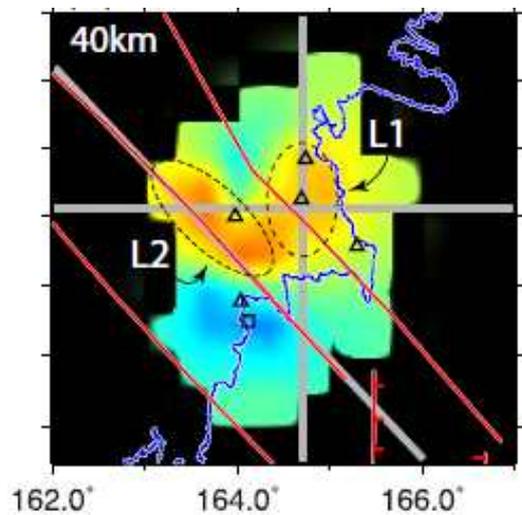


그림 2-10-9. 멜번화산에 위치한 저속도층 (L1)과 L1이 단층을 따라 흘러간 저속도층 (L2)의 존재 확인

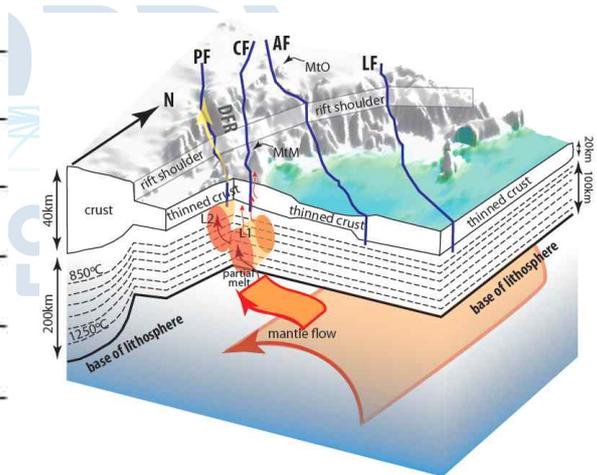


그림 2-10-10. Fig. 2-2-9의 저속도층과 멜번화산의 생성 원인을 설명할 수 있는 맨틀 edge flow 이론 [Park et al., 2015 @ EPSL]

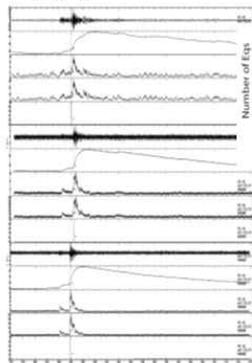
(2) Seismicity

- 연속 지진자료에 관측된 소규모 진동의 발원지와 발생원인 분석
- 파형 분석을 통하여 진원의 근원이 마그마의 운동, 단층의 발생, 혹은 빙하의 붕괴에 의한 것이지에 대한 원인을 규명할 수 있음
- Fig. 2-2-11.은 멜번 지진관측망 자료에서 결정된 미소 지진의 위치: 연간 300개 이상의 미소 지진이 관측됨

- Fig. 2-2-12.는 멜번화산 부근에서 관측된 지진의 수직성분 파형과 발생 위치를 보여줌: 이러한 장주기 특성의 지진파형은 단층에 의한 지반진동이 아니라 마그마가 움직이면서 발생시키는 화산 지진의 특성을 보여줌

Local seismicity:

- STA/LTA를 이용한 미소 지진 탐지



- 2011: 387events
- 2012: 픽킹 완료

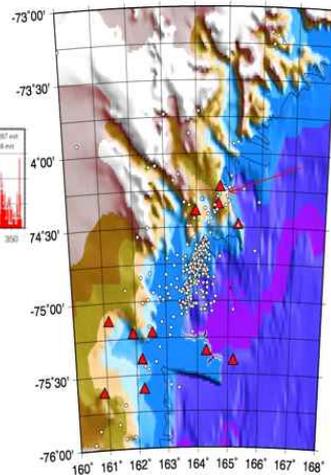


그림 2-10-11. The locations of micro earthquakes observed on the Korea Polar Seismic Network

2011.12.09 event:

- OT: 09:43:40.81
- Lat.:74.2736, Lon.:164.7310

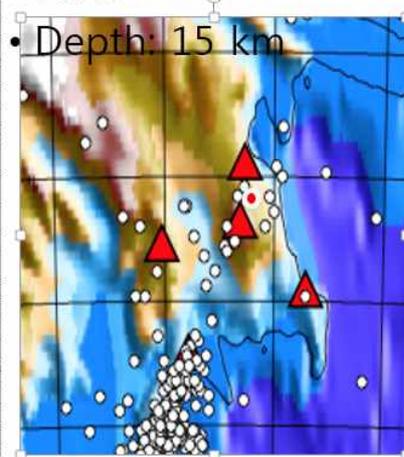
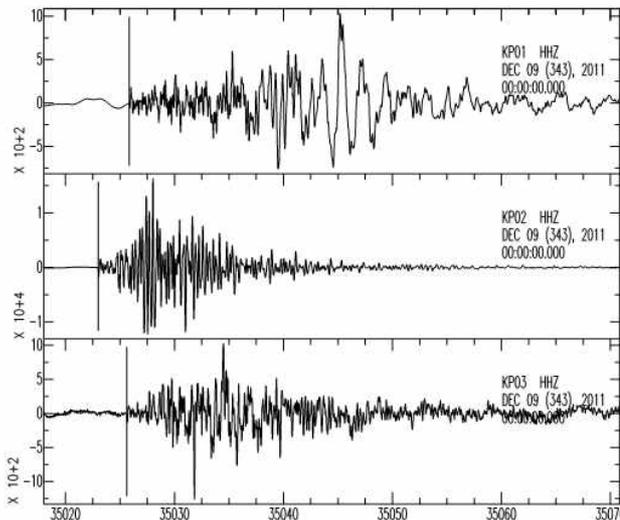


그림 2-10-12. A long period earthquake. The vertical traces show relatively longer period characteristics compared with typical tectonic earthquakes. The red dot on the map represents the location of the event.

나. 연속 지진자료와 인프라 사운드 자료를 이용한 화산 활동도 연구

(1) Magma 이동과 gas 분출

- 앞에서 보여준 지진원의 위치와 파형 분석을 통하여 마그마의 이동경로를 알 수 있고, 만일 조밀한 관측망과 자료가 축적된다면 마그마 이동의 시간적/공간적 변화를 계산하여 화산의 분화시기를 예측할 수 있음
- Figure 2-2-13은 메리 버드랜드 (Marie Byrd Land)에서 관측된 장주기 지진의 위치와 화산활동과의 관계를 보여줌
- 이와 같이 화산지진의 위치와 시-공간적 변화를 이용하여 빙하 하부 화산의 활동 유무를 알 수 있음

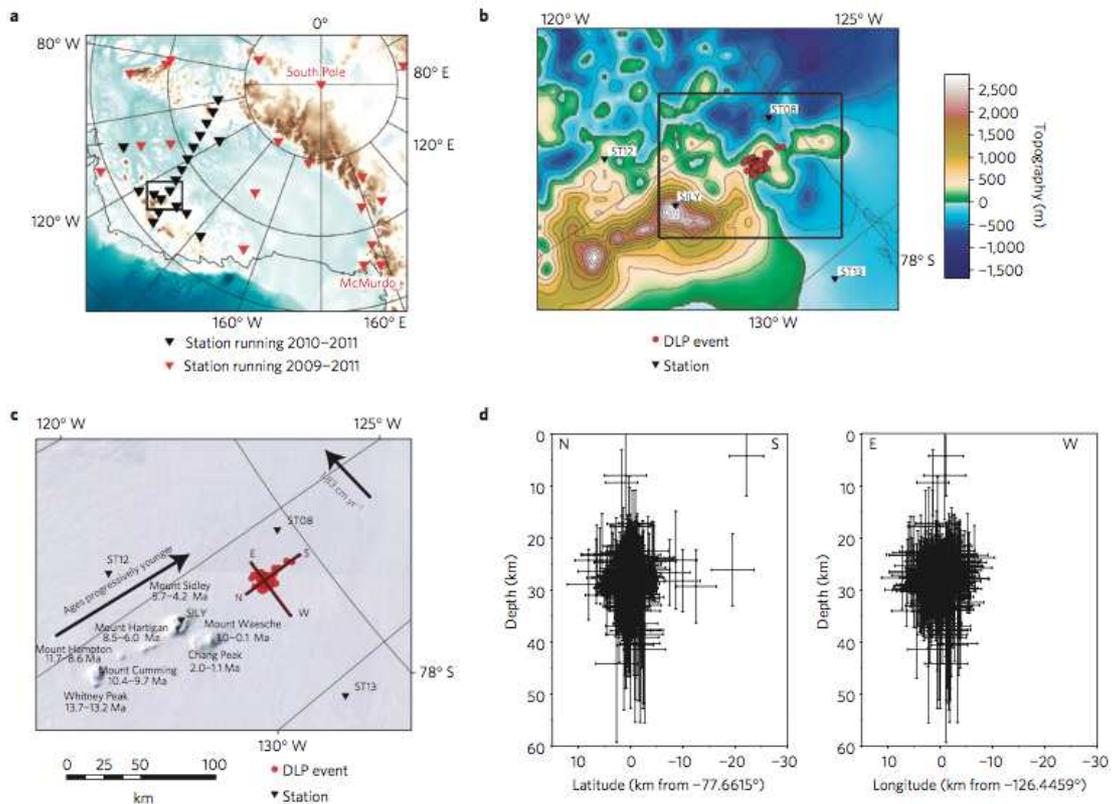


그림 2-10-13. a, POLONET stations over bed topography. b, Box in a over bed topography. Deep long period (DLP) events occur beneath a subglacial topographic high. c, Box in a over Landsat Image Mosaic of Antarctica imagery. d, Depth profiles in north-south and east-west cross-sections showing relocated events.

다. RES를 이용한 빙하 하부 화산 지형 규명

(1) 정확한 칼데라 사이즈

- 리트만 화산은 분화구가 남극 얼음아래에 위치하고 있어서 정확한 칼데라

의 크기와 위치를 알 수 없음

- Radio Echo Sound (RES)를 통하여 정확한 칼데라의 경계와 화산의 규모를 결정할 수 있음
- 이 정보는 효율적인 지진관측과 인프라 사운드 관측을 위한 관측망 설계에 꼭 필요한 자료임

참고문헌

- Armienti, P. and Tripodo, A. 1991. Petrography and chemistry of lavas and comagmatic xenoliths of Mount Rittmann, a volcano discovered during the IV Italian expedition in northern Victoria Land (Antarctica). *Memorie della Societa Geologica Italiana*, 46, 427-451.
- Bargagli, R., et al. (1996). "Preliminary investigation of the thermal biosystem of Mount Rittmann fumaroles (northern Victoria Land, Antarctica)." *Antarctic Science* 8(2): 121-126.
- Lough, A. C., et al. (2013). "Seismic detection of an active subglacial magmatic complex in Marie Byrd Land, Antarctica." *Nature Geosci* 6(12): 1031-1035.
- Park, Y., et al. (2014). "Deployment and Performance of a Broadband Seismic Network near the New Korean Jang Bogo Research Station, Terra Nova Bay, East Antarctica." *Seismological Research Letters* 85(6): 1341-1347.
- Park, Y., et al. (2015). "P-wave velocity structure beneath Mt. Melbourne in northern Victoria Land, Antarctica: Evidence of partial melting and volcanic magma sources." *Earth and Planetary Science Letters* 432: 293-299.

2.3. 멜버른 화산지대 화산 분화 특성 및 화산 물질 운반/퇴적 기작 연구

2.3.1. 연구개발의 필요성

가. 소형(단성) 화산 분화 특성 및 화산 물질 운반/퇴적 기작 연구

- 남극 빅토리아랜드에 위치한 멜버른 화산지대(Melbourne Volcanic Field)에는 해발고도 약 2,700m의 성층화산(stratovolcano)인 멜버른산(Mt. Melbourne)을 중심으로 다양한 규모, 시기, 암상의 소규모 화산들이 분포함 (Fig. 2-3-1)

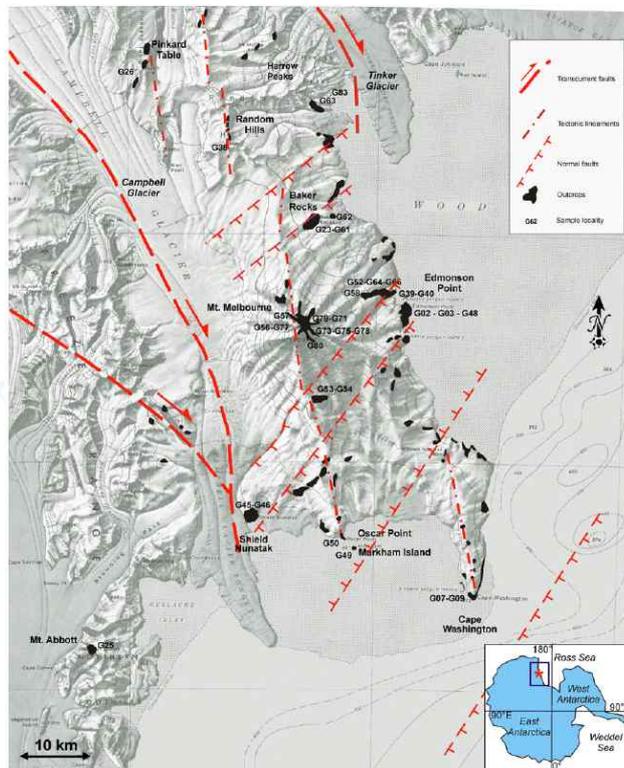


그림 2-11-1. 멜버른 화산 지대 지형, 구조, 주요 화산 노두 위치 정보

- Giordano et al. (2012)에서 제안된 플라이오세 이후 멜버른 화산지대의 화산-조구조 진화 모델(Fig. 2-3-2)에 따르면, Priestly 및 Campbell 단층 시스템들로 대표되는 우수향 주향이동 단층들이 해당 지역 구조 운동을 제어하고 있으며, 주향이동 단층 운동에 수반된 국지적 지각 신장 및 그로 인한 맨틀의 부분용융이 화산활동의 소스가 됨
- 이 지역에 해당 소형 화산들의 층서 및 활동 연대에 대한 연구에 따르면

남쪽의 Cape Washington의 분화활동이 가장 오래되었으며, 이후 화산지대 북부와 남부의 다발적 소규모 분화 단계를 거쳐 최종적으로 중앙부 멜버른산이 형성되었음

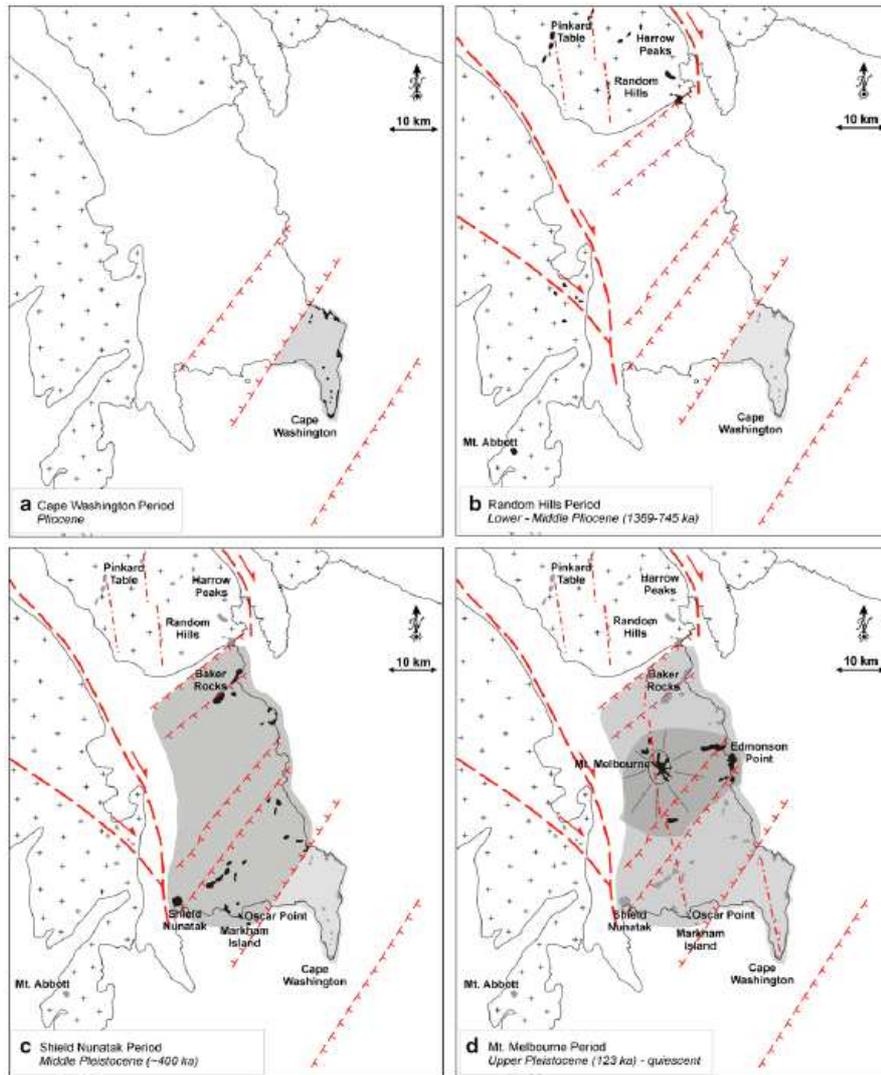


그림 2-11-2. 멜버른 화산지대 화산-조구조 진화 복원 모델

- 멜버른 화산지대를 구성하는 소형 화산들은 분화 당시에 존재하던 빙하로 인해 중·저위도 지역 화산들과는 극도로 이질적인 분화 특성 및 화산물질 운반/퇴적 프로세스를 보임
- 이러한 이질성으로 인해 남극 소형 화산들은 그 연구 가치가 매우 높지만 제한적 접근성으로 인해 심도 있는 연구가 드문 실정임

- 북반구 아이슬란드 및 캐나다 브리티시 콜롬비아 지역의 다양한 빙하화산체(glaciovolcanic edifice)들을 대상으로 수행된 연구들(예: Russel et al., 2014)과 유사한 수준의 화산물질과 빙하의 상호작용에 대한 연구가 남극에서도 이루어질 필요가 있음

나. 멜버른 화산 분화 층서 및 부석 조직 연구

- 후기 플라이스토세 이후 멜버른 화산지대의 의 화산활동은 중앙부에 집중되었으며 성층화산인 멜버른산을 형성함



그림 2-11-3. 멜버른산 정상 분화구 주변 근위 화산쇄설물 및 분기공 현장 사진

- 현재도 이 멜버른산 최상부에는 매우 활발한 분기공 활동이 관측되며, 정상부 분화구 주변에는 그 층서 및 연대가 정의되지 않은 화산쇄설물 근위 퇴적층이 발달함 (Fig. 2-3-3)
- 이들 화산쇄설층은 멜버른산의 최후기 폭발성 분화 산물로 그 연대 및 층서 체계가 규명되지 않음
- 멜버른산의 최후기 분화 양상, 분화 주기, 폭발 강도 등의 이해를 위해서는 해당 화산쇄설층에 대한 심도 있는 층서/퇴적학적 연구가 필요함

- 멜버른산 정상부의 근위 화산쇄설층 외에도 화산 사면부 및 원위에도 그 층서 및 연대가 규명되지 않은 부석질 테프라층이 빙하에 협재하여 산출됨 (Fig. 2-3-4)
- 멜버른산의 최후기 폭발성 분화 활동으로부터 기원된 화산쇄설물의 광역 층서 체계를 구축하고, 화산물질의 운반/퇴적 기작을 이해하기 위해서는 광범위한 테프라층 대비 연구가 필요함
- 화산쇄설물 층서체계 확립 및 운반/퇴적기작 규명은 특정 화산의 미래 분화 가능성 및 화산 재해의 범위를 예측하기 위해 반드시 선행되어야 할 필수적 연구 과정임

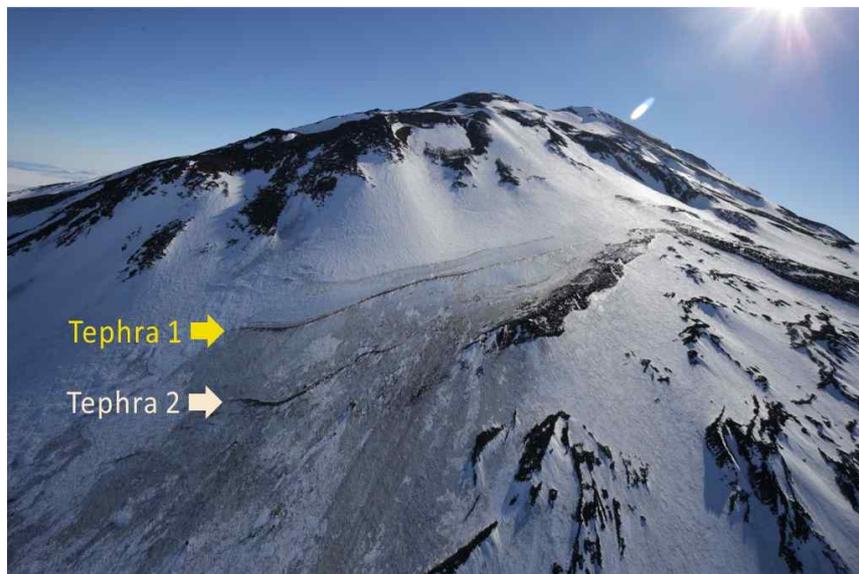


그림 2-11-4. 멜버른산 사면 빙하 협재 테프라층 항공사진

2.3.2. 연구목표 및 방법

가. 소형(단성) 화산 분화 특성 및 화산 물질 운반/퇴적 기작 연구

a) 연구목표

- 멜버른 화산지대 소형(단성) 화산(Shield Nunatak, Cape Washington, Oscar Point 등)들의 퇴적 구조 해석 및 층서 체계 확립
- 해당 소형 화산들의 분화 특성과 산출된 화산물질(용암류 및 화산쇄설물)의 운반 및 퇴적 과정 규명

- 남극 멜버른 화산지대의 빙하화산작용(glaciovolcanism) 특성 규명

b) 연구방법

- 현지 화산 노두 퇴적상 기재 및 분석용 시료 채취
- 입도분석 및 구성 물질 분석
- 전자현미경(SEM) 관찰 및 전자탐침미세분석(EPMA)을 통한 화산물질의 미세 조직 특성 및 암석 지화학 조성 분석

나. 멜버른 화산 분화 층서 및 부석 조직 연구

a) 연구목표

- 멜버른 화산의 최후기 폭발성 분화 층서 체계 확립
- 퇴적상 연구를 통해 각각의 폭발성 분화 이벤트들의 분화스타일, 폭발강도, 화산쇄설물 운반/퇴적 기작 규명
- 다공질 화산쇄설물(부석, 분석)의 기공구조 및 화산유리 조직 및 조성 연구를 통해 화도 내 마그마 상승 및 파쇄 과정을 규명

b) 연구방법

- 멜버른산 정상부 및 사면부 화산쇄설층 노두 퇴적상 기재 및 분석용 시료 채취
- 전자현미경(SEM) 관찰 및 컴퓨터단층촬영(CT)을 통한 부석의 기공구조 및 화산유리 조직 분석
- 전자탐침미세분석(EPMA)을 통한 화산 유리 및 미결정의 지화학 특성 파악

2.3.2. 기대성과 및 활용방안

- 소형 화산 연구를 통한 남극 고유의 빙하와 화산의 상호 작용에 대한 이해 증진 및 새로운 이론 체계 수립
- 멜버른산에서 확립된 분화층서 체계를 해당화산의 최후기 분화사 복원 및 미래 분화 가능성 타진에 활용
- 화산쇄설물 생성/운반/퇴적 기작 연구로부터 파악된 과거 멜버른산에서 발생한 화산 재해의 특성 및 규모를 미래 화산재해 예측 및 방재의 근거 자료로 활용

참고문헌

- Giordano, G., & Lucci, F. (2016, April). Stratigraphy, geochronology and evolution of the Mt. Melbourne volcanic field (North Victoria Land, Antarctica). In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 18, p. 17546).
- Russell, J. K., Edwards, B. R., Porritt, L., & Ryane, C. (2014). Tuya: a descriptive genetic classification. *Quaternary Science Reviews*, 87, 70-81.



남극대륙에 기록된 지구진화 연구를 위한 연구의 경제적 타당성 분석

2018. 3. 14



한국 환경경제학회

< 연구진 >

▣ 남극대륙에 기록된 지구진환 연구를 위한 연구의 경제적
타당성 분석

인천대 연구진 : 강희찬 인천대학교 교수

외부 연구진 : 박시용 한국환경경제학회



극지연구소

목 차

제 I 장 편익 추정	1
제1절 편익 추정 방법론	1
1. 편익의 산정	1
2. 편익 산정 방법론	4
제2절 편익 추정	21
1. 방법론의 선정	21
2. 편익 추정 대상	23
3. 남극대륙에 기록된 지구진화 연구에 따른 사회적 편익 추정	23
4. 본 연구 사업에 따른 전체 사회적 편익 계산	39
제II장 공공성 평가	41
제1절 경제성 분석	41
1. 경제성 분석 지표	41
2. 경제성 분석 기본 전제	43
3. 경제성 분석 결과	44
제2절 민감도 분석	46
1. 민감도 분석의 필요성	46
2. 민감도 분석의 결과	46
참고문헌	48
부록	51

표 목차

<표 I -1> Hicks적 편익 추정치	2
<표 I -2> 경제적 가치측정 방법론	5
<표 I -3> 헤도닉 가격기법이 적용된 연구	7
<표 I -4> 헤도닉 가격기법의 적용절차	8
<표 I -5> 여행비용 접근법을 적용한 연구사례	10
<표 I -6> 컨조인트 분석법을 적용한 연구사례	12
<표 I -7> CVM의 질문 설계방법	16
<표 I -8> 조건부 가치측정법을 적용한 연구사례	18
<표 I -9> HPM, TCM, CAM, CVM의 비교	21
<표 I -10> 비시장재의 가치평가방법의 분류	22
<표 I -11> 지역별 표본 수	24
<표 I -12> 설문대상자의 성별	24
<표 I -13> 설문대상자의 연령대	25
<표 I -14> 설문대상자의 교육 수준 분포	25
<표 I -15> 설문대상자의 소득 분포	26
<표 I -16> 한국의 남극 장보고 기지 설치 및 활동 관련 인지 여부	26
<표 I -17> 미지의 세계에 대한 지적 호기심 충족 가능성 인지 여부 부분	27
<표 I -18> 교육적 가치 증진가능성 인지 여부	27
<표 I -19> 국민의 인식 제고 가능성에 대한 인지의여부	28
<표 I -20> 남극지하자원을 선점할 가능성을 높이는 것에 대한 인지의여부	28
<표 I -21> 화산폭발 가능성 예측력 제고 인지 여부	29
<표 I -22> 속성 변수와 수준	30
<표 I -23> 선택지 예시	33
<표 I -24> 설명 변수와 설명	35
<표 I -25> 추정 결과	36

<표 I -26> 속성별 MWTP	37
<표 I -27> 연간 본 연구 사업에 따른 사회적 편익 합계	39
<표 I -28> 편익 연차별 흐름표(할인을 적용 前)	40
<표 II -1> 남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업의 경제성 분석 결과	43
<표 II -2> 비용·편익 흐름	45
<표 II -3> 할인율 변화에 따른 민감도 분석	47
<표 II -4> 비용 변화에 따른 민감도 분석	47
<표 II -5> 편익 변화에 따른 민감도 분석	47

그림 목차

[그림 I -1] 경제적 가치의 종류	2
[그림 I -2] 비시장재의 가치추정 방법론 비교	8
[그림 I -3] 헤도닉 가격모형의 운용 절차	9
[그림 I -4] 여행비용 접근법의 적용절차	16
[그림 I -5] 컨조인트 분석법의 적용절차	17
[그림 I -6] 진술선호 접근법의 방법론 비교	18
[그림 I -7] 양분선택형 질문의 추정모형별 비교	18
[그림 I -8] NOAA 패널의 지침	19
[그림 I -9] 조건부 가치측정법의 적용절차	19

제 I 장

편익 추정

제1절 편익 추정 방법론

1. 편익의 산정

가. 경제적 의미의 가치

본 과제가 추정하고자 하는 남극대륙에 기록된 지구진화 연구는 경제적 가치(economic value)를 갖는다. 여기서 경제적 가치란 가치가 경제학 이론에 근거하며 화폐단위로 계산된다는 의미를 갖고 있다. 따라서 남극대륙에 기록된 지구진화 연구의 편익을 추정하기에 앞서, 경제적 가치에 대해 먼저 논의할 필요가 있다. 본 연구에서 사용되는 경제적 가치는 신고전학과 후생경제학(welfare economics)에 기초하고 있다. 후생경제학의 기본적인 전제는 경제활동의 목적이 사회를 구성하는 개인들의 후생(welfare)을 증진하는 데 있고, 주어진 상황에서 각 개인의 후생 수준을 가장 잘 판단할 수 있는 사람은 자기 자신이라는 것이다. 각 개인의 후생은 자신의 시장재 소비뿐만 아니라 아직 시장에서 거래되고 있지 않은 비시장재(non-market goods)인 공공재의 소비에도 의존한다.

따라서 공공재의 질적 또는 양적 변화에 대한 경제적 가치는 그 변화가 인간의 후생에 미치는 영향에 근거하고 있다. 물론 경제적 가치의 인간중심적 사고가 다른 종의 생존이나 복지에 대한 관심을 배제시키지는 않는다. 인간은 이타적(altruistic)이거나 윤리적(ethical)인 관심도 가지고 있기 때문인데 이는 경제적 가치의 구성요소 중 하나인 비사용가치의 근원이 된다.

공공재와 같은 비시장재에 대한 개인의 후생을 측정하려는 경제이론은 지난 수십 년 동안 계속 발전되어 왔다. 이 이론은 두 가지를 가정하고 있는데, 첫째, 사람들은 시장재와 비시장재로 구성된 상품묶음(bundle of goods)들에 대해 잘 정의된 선호를 갖는다. 둘째, 사람들은 자신의 선호를 알고 있으며, 이러한 선호는 상품묶음을 구성하는 시장재와 비시장재 사이의 대체가능성(substitutability)이라는 성격을 갖는다. 즉, 어떤 개인의 상품묶음에서 한 재화의 소비를 감소시키면 그 개인은 후생의 감소 없이 다른 재화의 소비를 증가시킬 수 있다는 것이다.

이 대체가능성은 사람들에게 중요한 상품묶음에서의 교환비율과 관계가 있기 때문에 경제적 의미의 가치 개념의 핵심이다. 한 재화의 소비를 줄여 다른 재화의 소비를 늘린다면 그로부터 우리는 사람들이 이러한 재화에 두고 있는 가치를 알 수 있기 때문이다. 즉, 상품묶음을 구성하는 재화 중 단 하나의 재화라도 화폐가치를 가지고 있고, 그 재화와 관심 재화사이의 교환비율을 안다면, 관심 재화의 화폐가치를 알아낼 수 있다는 것이다. 바로 이러한 대체가능성에 근거한 가치개념은 지불의사액(WTP, willingness-to-pay) 또는 수용의사액(WTA, willingness-to-accept)으로 표현될 수 있다.

나. 편익의 측정

편익의 측정은 1850년경 프랑스의 경제학자인 듀퐁(J. Dupuit)에 의해 처음 소개되었다. 그는 교량건설로 인한 주민들의 피해를 보상하는 문제를 소비자 잉여(consumer surplus)의 개념으로 해결하고자 노력하였다. 그러나 편익추정이 본격적으로 개발된 것은 20세기에 들어와서 후생경제학이 발전되고 난 후부터이다. 가격이나 수량의 변화가 있을 경우, 마샬(Marshall)의 소비자 잉여는 통상수요곡선(ordinary demand curve)의 아래 면적의 변화로 정의된다. 하지만 이 개념은 통상수요곡선이 효용을 일정하게 유지하는 것이 아니라 소득을 일정하게 유지하는 것이라는 이론적 문제점을 가지고 있다.

릭스(Hicks)는 이와 같은 문제를 극복하기 위해 효용수준을 일정하게 유지시키는 보상수요함수(compensated demand curve)에 근거한 보상변화(CV, compensating variation), 동등변화(EV, equivalent variation), 보상잉여(CS, compensating surplus), 동등잉여(ES, equivalent surplus)라는 새로운 후생개념을 제시하였다. 앞의 두 가지 개념은 가격변화시의 후생과 관련이 있다. 반면 환경재나 공공재의 경우는 보통 정부가 질이나 양을 직접 통제하게 되어 가격변화의 경우와 달리 소비자가 소비량을 자유롭게

계 선택할 수 없는 것이 일반적이다. 이런 경우에는 뒤의 두 가지 개념을 이용한다. 이러한 네 가지 측정치는 소비자의 재산권과 분석하고자 하는 재화의 상대적 관계에 따라 특정 효용수준을 유지하는 데 필요한 지불의사액(WTP) 혹은 수용의사액(WTA)으로 나타낼 수 있다. WTP는 평가 대상 재화의 개선된 공급수준을 얻기 위해 기꺼이 지불하고자 하는 금액이며, WTA는 평가 대상 재화의 악화된 공급수준을 기꺼이 받아들이는데 대한 보상금액(보상받고자 하는 금액)을 의미한다. 이 조합을 정리하면 <표 I-1>과 같다.

정책적 관심은 대개 소비자의 현재 또는 초기 효용수준으로부터 측정되는 평가 대상 재화의 공급수준 개선으로 인한 편익에 있으므로 보상잉여가 적절한 측정치가 된다.

<표 I-1> Hicks적 편익 추정치

구 분	서비스 공급수준의 개선		서비스 공급수준의 악화	
	수량 증가	가격 하락	수량 감소	가격 상승
WTP	보상잉여	보상잉여 ; 보상변화	동등잉여	동등잉여 ; 동등변화
WTA	동등잉여	동등잉여 ; 동등변화	보상잉여	보상잉여 ; 보상변화

다. 가치의 종류

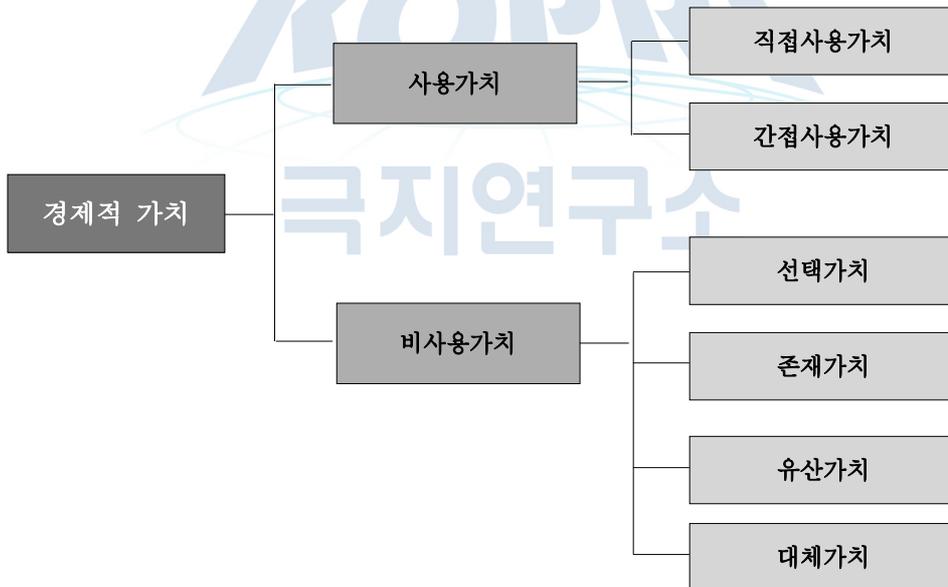
경제학적으로 재화의 가치는 크게 사용가치(use value)와 비사용가치(non-use value 또는 passive use value)로 구분될 수 있고 따라서 재화가 주는 총가치(total value)는 사용가치와 비사용가치의 합이 된다. 여기서 사용가치란 개인이 재화를 물리적으로 이용하는 것에 부여하는 가치이며, 사용가치는 다시 직접사용가치(direct use value)와 간접사용가치(indirect use value)로 분류될 수 있다. 직접사용가치는 상업적 이용이나 재화 자체의 소비와 관련된 가치이고, 재화를 통한 감정적, 정신적 만족 등과 관련된 가치가 간접사용가치이다. 한편 비사용가치는 사용가치 이외의 가치를 통칭하는 것으로 개인이 물리적으로 재화를 이용하지 않음에도 불구하고 재화에 부여하는 가치이다. 이는 크게 선택가치(option value), 존재가치(existence value), 유산가치(bequest value), 대체가치(vicarious value)로 세분될 수 있다.¹⁾

현재는 직접적으로 이용하지 않지만 미래에 이용가능성이 있는 경우 그 재화가 가

1) 선택가치는 사용가치로 분류되기도 한다.

지고 있는 가치를 선택가치라고 한다. 예를 들어, 현재는 사용되지 않는 어떤 환경재가 미래에 사용될 가능성이 있다고 판단되는 경우 그 환경을 지금 훼손하게 되면 미래의 선택 폭이 감소하게 되고 따라서 그 만큼의 편익을 미래에 상실할 수 있다. 이 선택가치는 주로 환경의 개발과 관련된 의사 결정 단계에서 중요시된다. 존재가치란 비록 재화를 직접 이용하는 것이 혹은 직접적인 편익을 얻는 것이 없다 하더라도 그것이 존재한다는 것을 단지 아는 것과 관련된 가치를 의미한다. 즉, 존재가치는 제공되는 효용이 대상 자원과의 어떠한 직접적인, 간접적인 상호작용에도 연결되지 않음을 전제한다. 유산가치란 미래세대를 위하여 재화를 보존하는 것 자체에 부여하는 가치를 말한다. 그리고 대체가치란 자신은 사용하지 않지만, 타인이 사용할 수 있음으로써 얻는 만족감과 관련된 가치이다. 이를 그림으로 정리하면 다음과 같다.

[그림 1-1] 경제적 가치의 종류



시장재가 시장 거래를 통해 관찰된 가격으로 가치를 측정할 수 있는 것과 달리, 공공재의 성격을 가지며, 다양한 측면에서 긍정적인 외부효과를 유발하는 남극대륙에 기록된 지구진화 연구의 가치는 시장에서 도출된 가격으로 나타낼 수 없으므로, 시장적 가치추정 방법은 진정한 편익을 제대로 반영하지 못한다. 따라서 남극대륙에 기록된 지구진화 연구는 적절한 비시장적 가치추정 방법론을 적용하여 경제적 가치를 측정하는 것이 바람직하다.

2. 편익 산정 방법론

경제학적으로 재화나 서비스의 편익(또는 가치)은 시장에서 관찰할 수 있는지 여부와 시장에서 그 재화의 가치를 직접 측정할 수 있는지 여부에 따라 다음과 같이 네 가지 방법을 통해 측정이 가능하며 이를 <표 I-2>에 정리하였다.

첫 번째로 현실시장에서 직접 그 가치를 관찰할 수 있는 경우 다시 말해, 재화나 서비스가 시장에서 거래되는 경우에는 그 재화나 서비스의 가격이 재화의 가치가 된다. 또는 비시장재 또는 비시장재 개선의 편익은 관측이 가능한 시장에서의 거래자료를 이용해 추정될 수 있다. 예를 들어 시장적 방법을 적용하는 경우 환경개선에 따라 발생하는 두 가지 변화를 분석하여 가치를 측정할 수 있다. 첫 번째 변화는 투입요소인 환경의 개선으로 인해 발생하는 농산물이나 최종산출물의 공급량 변화이다. 이 변화는 피해함수(damage function)나 생산함수(production function)를 추정하여 분석된다. 두 번째 변화는 환경개선으로 인해 시장재의 생산성이 달라지면 이에 따라 생산자 및 소비자의 선택까지도 변화되고 따라서 시장균형 자체가 달라질 수 있다. 그러나 비시장재가 제공하는 재화나 서비스의 시장이 존재하는 경우는 매우 드물고 거래자료 또한 없는 것이 일반적이어서 시장접근법이 사용될 수 있는 경우는 매우 제한되어 있다.

한편 이 방법은 토양이나 수질 등과 같이 비시장재가 주로 다른 시장재를 생산하는데 필요한 투입요소로 사용될 경우에 적용된다. 왜냐하면 비시장재가 개선될 경우 비시장재를 투입요소로 사용하는 산업의 생산성 향상이나 비용절감이 발생할 것이고 이를 추정하여 비시장재 개선의 편익으로 본다. 비시장재의 개선으로 인해 높아진 생산성의 가치는 시장에서 거래되는 산출물의 가격을 이용해 평가될 수 있기 때문에 시장적 방법이라 불리며 비시장재와 시장재 생산량 사이의 물리적 관계를 분석하는 것이 가능한 경우에 사용될 수 있다.

다음으로 대상재화의 가치를 직접 알 수 없지만 관련 재화의 가치를 시장을 통해 알 경우에는 관련 재화의 가치를 통해 대상재화의 가치를 간접적으로 유추하는, 즉 현실시장에서 간접적으로 측정하는 방법을 사용할 수 있다. 예를 들어 깨끗한 환경의 편익을 측정하고자 할 때, 사람들이 공기 좋은 곳에서 살고 싶어 하다 보니 다른 조건이 같다면 공기 좋은 곳의 부동산 값은 공기가 나쁜 곳의 부동산 값에 비해서 비싸진다는 사실을 이용할 수 있다. 즉, 깨끗한 환경의 가치가 땅 값이나 집값에 포함되게 되므로 이 경우 깨끗한 환경의 가치를 직접 알 수는 없지만 깨끗한 환경 여부에 따른 땅 값이나 집값의 차이가 깨끗한 환경의 가치가 된다고 보는 것이다. 이와 관련된 대표적인 방법론은 헤도닉 가격모형(Hedonic price model; HPM)과 여행비용 접근법(Travel cost method; TCM)이다. 세 번째는 대상재화나 서비스의 거래가 시장에서 이루어진다고 가정하여 그 재화의 가치를 사람들에게 직접 물어보는 가상시장을 이용한 직접적 측정방법이다. 이와 관련된 대표적인 방법론은 조건부 가치추정법(Contingent Valuation method; CVM)이다. 네 번째는 대상재화에 대한 가상의 시장을 설정하고 사람들에게 다양한 대안을 제시하여 사람들이 여러 대안들 중 하나를 선택하거나 순위를 매김으로써 간접적으로 대상재화에 대한 가치를 유추하는 방법이다. 이와 관련된 대표적인 방법론은 컨조인트 분석법(Conjoint analysis)이다.

<표 1-2> 경제적 가치추정 방법론

구 분	현실시장을 관찰하는 방법	가상시장을 이용하는 방법
직접적인 측정법	시장에서의 거래 가격	조건부 가치추정법
간접적인 측정법	헤도닉 가격모형 여행비용 접근법	컨조인트 분석법

일반적으로 여행비용 접근법이나 헤도닉 가격모형과 같은 현실시장 속에서 관련 재화의 가치를 통해 대상재화의 가치를 간접적으로 측정하는 방법을 현시선호(Revealed preference) 접근법이라고 하고 조건부 가치추정법이나 컨조인트 분석법처럼 가상의 시장에서 재화의 가치를 측정하는 방법을 진술선호(Stated preference) 접근법이라고 한다.

이와 같은 추정기법의 장단점을 [그림 I-2]와 같이 나타낼 수 있다.

[그림 1-2] 비시장재의 가치추정 방법론 비교

<p>현시선호 접근법 (Revealed Preference Method, RP)</p>	<input type="checkbox"/>	<p>1. 현실적으로 적용이 용이하지 않음 2. 과소추정 및 과대추정의 가능성</p>
<p>진술선호 접근법 (Stated Preference Method; SP)</p>	<input type="checkbox"/>	<p>1. 비시장재의 가치추정에 적합 2. 이론적 검증이 이루어진 상태 3. 조사에 많은 비용 소요</p>
<p>결합모형 (RP + SP Method)</p>	<input type="checkbox"/>	<p>1. 이용가능한 현실적인 자료의 확보 곤란</p>

본 절에서는 헤도닉 가격모형, 여행비용 접근법, 컨조인트 분석법, 조건부 가치측정법의 특성 및 분석절차를 구체적으로 살펴보고 적용가능성을 검토하고자 한다.

가. 헤도닉 가격모형 (Hedonic Price Model; HPM)

1) 헤도닉 가격모형의 개요

헤도닉 가격모형은 대상 재화나 서비스에 대한 시장이 명시적으로 존재하지 않는 상황에 그 대체시장으로서 주택시장이나 토지시장을 이용하여 주택이나 토지의 가격에 반영된 관련 재화의 가치를 간접적으로 측정하는 방법이다. 사람들은 더러운 환경보다 깨끗한 환경을 더 좋아하기 마련이다. 따라서 사람들은 은연중에 깨끗한 물이나, 아름다운 경치 등에 대해 가치를 부여하는데, 이러한 가치가 특정 상품의 가격에 내포되는 경우가 많다. 예를 들면, 사람들이 공기 좋은 곳에서 살고 싶어 하다 보니 다른 조건이 같다면 공기 좋은 곳의 부동산 값은 공기가 나쁜 곳의 부동산 값에 비해서 비싸진다. 즉, 깨끗한 환경의 가치가 땅 값이나 집값에 포함되게 된다.

헤도닉 가격모형은 여기에 착안하여 특정 재화에 대해 시장에서 직접 거래되지 않는 어떤 요인이 가격결정에 영향을 미친다는 가정 하에 소비자가 재화 구매를 결정하고 가격을 지불할 때 간주하였을 가능한 모든 속성으로 분해하여 각각의 속성에

대해 가치를 측정한다.

구체적인 예를 들어, 서울시의 한강정비사업으로 한강의 경관을 크게 개선시켰다고 하자. 그 이후 강변 쪽에 위치한 아파트 가격이 상대적으로 많이 올랐다고 하였을 때 다른 모든 조건이 같다면 가격의 차이는 한강의 개선된 경관의 가치가 아파트 가격에 반영된 것으로 볼 수 있다. 따라서 개선된 경관의 화폐적 가치를 아파트 시장에서 간접적으로 도출해 낼 수 있게 된다. 마찬가지로 유독가스를 배출하는 공장이 들어설 경우, 사람들이 악취에 시달리거나 호흡기 관련 질환에 잘 걸리는 등의 피해가 발생한다면 주택가격에 영향을 미칠 것이고 다른 조건이 같을 때의 주택가격의 차이는 이 공장이 입지함으로써 발생하는 피해액으로 볼 수 있다. 헤도닉 가격기법의 대표적인 국내의 연구사례는 <표 I-3>과 같다.²⁾

<표 I-3> 헤도닉 가격기법이 적용된 연구

구 분	적용분야	연구문헌
자연자산	자연자산의 가치측정을 위해 필요한 간접시장이 없어 HPM의 적용 연구 사례 없음	
기 타	화력발전소 입지 도시 대기오염 공항 주변의 소음수준 지진의 위험성 서울시 대기오염 서울시 대기오염 쓰레기 매립장	Brookshire et al.(1982) 임영식·전영섭(1993) Kwak et al.(1996) 김광임(1996)

2) 헤도닉 가격모형의 단점

그러나 대체시장을 매개로 활용되는 헤도닉 가격모형에 내재한 문제점을 지적하면 다음과 같다. 첫째, 충분한 시장자료를 구하기 어렵다. 둘째, 헤도닉 가격함수의 구체적인 형태가 알려져 있지 않다. 셋째, 사람들은 비시장재의 각 수준에 대한 물리적 차이를 인식하기 어렵다. 넷째, 비시장재의 변화에 대한 희망은 일반적으로 관측되지 않는다.

2) 경제학적 이론적 배경에 대해서는 Lancaster(1966), Rosen(1974), Freeman(1974) 등을 참고하면 된다.

3) 헤도닉 가격모형의 적용절차

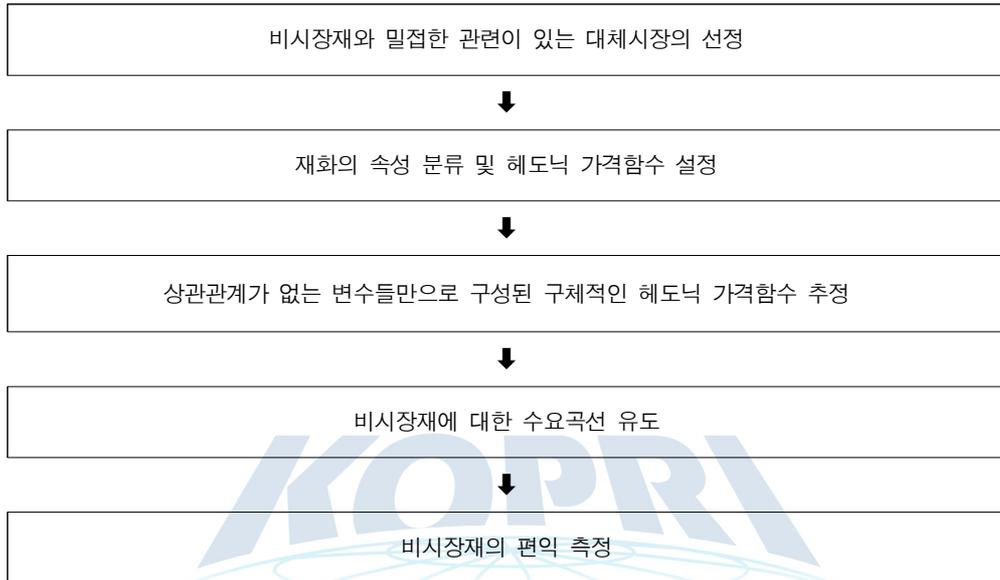
헤도닉 가격기법은 단일시장 자료와 다중시장자료에 적용시킬 수 있다. 다중시장 자료를 이용할 경우 헤도닉 가격기법의 적용 과정은 크게 2개의 단계로 구분되는데, 간단하게 요약하면 <표 I-4>와 같다.

<표 I-4> 헤도닉 가격기법의 적용절차

단 계	절 차
1단계	① 각 시장별로 헤도닉 가격방정식을 추정한다. ② 추정된 각 시장별 헤도닉 가격방정식으로부터 관심대상 비시장재 특성의 한계가격을 계산한다.
2단계	① 계산된 한계가격을 시장별로 구별하지 않고 모두 이용하여 비시장재에 대한 역수요함수를 추정한다. ② 비시장재 수준이 변화하였을 때의 후생변화를 측정한다.

이상의 헤도닉 가격기법의 운용절차를 간략히 나타내면 [그림 I-3]과 같이 나타낼 수 있다.

[그림 I -3] 헤도닉 가격모형의 운용 절차



나. 여행비용 접근법(Travel Cost Method; TCM)

1) 여행비용 접근법의 배경

여행비용 접근법은 Hotelling이 1947년 미국 국립공원국(National Park Service)에 처음으로 제안한 이후 널리 사용되고 있다. 여행비용 접근법은 비시장재의 가치추정방법으로는 가장 먼저 제안되었는데 비시장재의 가치를 그 재화와 관련되어 있는 시장에서의 소비행위에 연관시켜 간접적으로 추정하는 방법이다. 특정 재화를 이용하기 위해 사람들이 얼마만큼의 액수를 지불할 의사가 있는지를 추정하기 위해 그 지역에 도달하는 데 소요된 시간과 비용에 대한 정보를 이용하는 것으로 등산, 낚시, 사냥, 숲의 이용 등 야외 여가활동과 관련된 휴양시설의 가치추정에 많이 이용되는 방법이다. 여행비용 접근법을 적용한 사례는 <표 I -5>와 같다.

<표 1 -5> 여행비용 접근법을 적용한 연구사례

적용분야	연구문헌
대구 팔공산 자연공원	이성태·이명현(1999)
영국 산림	Willis and Garrod(1993)
영국 요크셔 야생지역	Willis and Venson(1988)
산림	Hanley and Ruffell(1992)

2) 여행비용 접근법의 장점

여가지역 혹은 휴양지역에서 특정 시설이나 유물 등의 속성의 질이 개선되었을 때 발생하는 편익을 추정하는 데 유용한 방법이다. 통상적으로 여행비용은 그 자체로 여가지역에서 제공되는 서비스의 추가치로 간주되며, 여행비용 접근법에서는 입장료의 증가가 수요량을 감소시키는 것과 같이 여행비용의 증가가 휴양지역에 대한 방문율을 감소시킨다는 전제 아래 수요곡선을 도출한다. 휴양지역의 편익을 구할 때 소비자 잉여를 포함하는 지불의사액(Willingness To Pay; WTP)을 사용한다는 점에서 이론적인 배경을 갖고 있다.

3) 여행비용 접근법의 단점

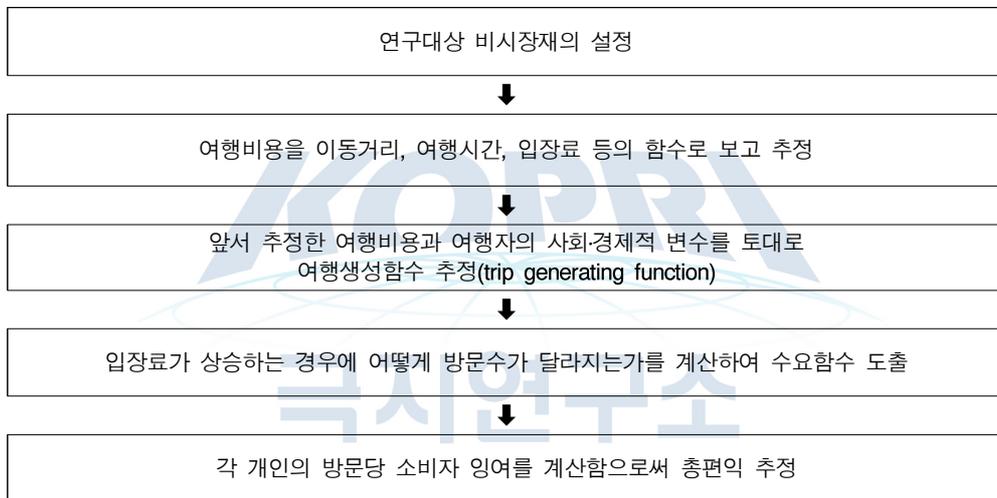
여행비용 접근법은 다음과 같은 문제점들을 갖고 있다. 첫째, 여행목적이 여러 개 라면 각 목적들 간에 시간 및 화폐의 기회비용을 적절하게 배분하여야 하는데, 그것은 대단히 자의적일 수밖에 없다. 둘째, 사용가치만 측정하게 되고 비사용가치에 대한 편익은 제외된다. 셋째, 여행비용을 산정할 때 포함되는 시간의 범위를 설정하는 어려움이 존재한다. 넷째, 관심대상 재화를 실제로 방문한 사람들에 대해서만 편익이 측정되므로 그렇지 않은 사람들은 배제하는 표본선택편의(sample selection bias)의 문제를 피하기 어렵다.

4) 여행비용 접근법의 적용절차

우선 관심대상 재화를 이용하는데 소요되는 여행비용을 이동거리, 여행시간, 입장

료 등의 함수로 보고 추정한다. 다음으로 각 여행자가 그 재화를 얼마나 자주 이용(방문)할 것인지를 예측하는 ‘여행생성함수(trip generating function)’를 앞서 추정한 여행비용과 여행자의 사회·경제적 변수의 함수로 보고 추정한다. 이후에는 추정된 결과를 이용하여 입장료가 상승하는 경우에 어떻게 방문 수가 달라지는가를 계산하여 수요함수를 도출한 후 각 개인의 방문 당 소비자 잉여를 계산함으로써 편익을 추정하게 된다.

[그림 I -4] 여행비용 접근법의 적용절차



다. 컨조인트 분석법 (Conjoint Analysis Method)

1) 컨조인트 분석법의 배경

컨조인트 분석법은 응답자들에게 가상적 상황을 제시하고 예산제약 하에서 자신의 효용을 극대화할 수 있는 선택을 통해 재화의 다양한 속성들에 대한 가치를 측정하는 방법론이다. 컨조인트 분석법은 수리심리학(mathematical psychology)에서 태동하였지만 주로 미국을 중심으로 시장조사(market research)에의 적용을 통해 급속하게 발전하였다. 교통계획분야에서 컨조인트 분석법이 통상적인 시장조사기법으로서 처음으로 사용되었는데 수요예측과 여행시간의 가치에도 널리 적용되었다. 이후 교통정책의 환경영향을 유용하게 평가하는 연구들이 수행되었으며 공공교통의 사용가치와 비사용가치를 추정하기 위해 연구되었다(Hopkinson et al., 1992).

영국의 교통부는 고속도로계획의 공식적인 비용-편익분석(Cost-Benefit Analysis)에 포함되는 환경영향의 범위를 확장하기 위해 CVM과 더불어 컨조인트 분석법을 정식 기법으로 채택하였다(Pearman, 1994). 또한 CVM의 블루리본이라 불리는 패널보고서의 작성을 주도한 미국의 National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA)에서도 컨조인트 분석법을 공공의 WTP를 측정하고 자연자원피해를 평가하는데 유용한 기법으로 채택하였다. 컨조인트 분석법을 적용한 사례는 <표 I -6>과 같다.

<표 I -6> 컨조인트 분석법을 적용한 연구사례

적용분야	연구문헌
여가지역의 쾌적성 가치	Lew and Larson(2005)
해수질 개선으로 인한 건강영향의 가치	Machado and Mourato(2002)
다양한 속성의 여행지 선택	Hensher(1993)
휴양지역의 선택	Adamowicz et al.(1994)
다양한 에너지계획 선정	Johnson and Desvousges(1997)

2) 컨조인트 분석법의 특징

컨조인트 분석법은 지불의사 유도방법에 따라 조건부 선택법(contingent choice method), 조건부 순위결정법(contingent ranking method), 조건부 등급결정법(contingent rating method) 등 크게 세 가지로 구분될 수 있다.

첫째, 조건부 선택법은 응답자에게 다양한 속성들과 WTP로 구성된 2개 이상의 가상적 대안들을 제시하고, 자신의 예산제약 하에서 가장 좋아하는 대안을 선택하게 함으로써 서로 상충관계에 놓여있는 속성의 수준변화에 대한 화폐가치를 측정하는 방법이다.

둘째, 조건부 순위결정법은 응답자들이 제시된 가상 상황들에 대한 그들의 선호를 숫자로 된 척도에 근거하여 표현하도록 질문하는 방법이다. 즉, 응답자들에게 제시된 가격을 포함한 다양한 속성들로 구성된 2개 이상의 가상적 상황들에 대해서 가장 좋아하는 것(most-preferred)부터 가장 싫어하는 것(least-preferred)까지의 순위를 결정하도록 묻는다. 이 방법은 순위를 매겨야 할 대안의 크기가 커질수록 순위선정의 오류로 인해 응답자의 부담이 커진다는 한계가 있다. 또한 조건부 순위결정법은 선택 대안간의 무차별 문제를 해결할 수 없다(Mackenzie, 1993).

셋째, 조건부 등급결정법은 좀 더 엄밀하고 정확한 정보를 얻기 위하여 조건부 순위결정법에서 결정된 각 순위의 대안들에 대하여 그 중요도에 따라 최소 1점부터 최대 10점까지 점수를 부여하도록 하는 방법이다. 이 방법은 조건부 순위결정법과 달리 선택 대안간의 무차별한 경우를 표현할 수 있으며 대부분의 응답자들이 비율의 크기에 친숙하기 때문에 응답이 용이하다는 장점이 있다(Mackenzie, 1993).

3) 컨조인트 분석법의 장점

컨조인트 분석법의 장점으로 두 가지를 들 수 있다. 첫째, 컨조인트 분석법은 응답자들이 제시된 가상 상황들에 대해 그들이 만족하는 선택 또는 서열(등급)을 표현하기 때문에 비시장재의 가치에 대한 WTP를 직접 화폐가치로 표현할 필요가 없다. 둘째, 컨조인트 분석법은 응답자들에게 다양한 선택대안(choice option)들을 제시함으로써 그 분석결과에 따라 실행 가능한 개선 대안을 구별할 수 있고 최소비용으로 실행될 수 있는 대안을 선택할 수 있다.

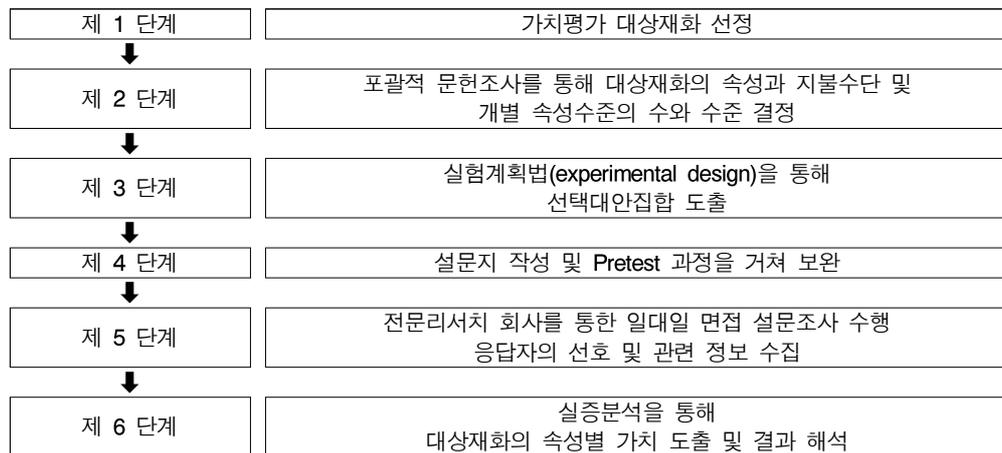
4) 컨조인트 분석법의 단점

컨조인트 분석법은 다음과 같은 단점을 갖고 있다. 첫째, 컨조인트 분석법의 적용을 위해서는 일반 응답자들이 쉽게 식별할 수 있는 대안을 마련해야 하는데 이를 사전적으로 쉽게 알 수 없다. 이때 표적집단(focus group)은 선택 가능한 대안들을 결정하는 데 도움을 줄 수 있다. 둘째, 컨조인트 분석법은 상충관계에 있는 선택대안들을 포함한 다수의 질문을 요구하기 때문에 응답자들에게 인식상의 부담을 크게 줄 수 있다. 분할표본전략(split-sample strategy)을 사용하여 질문의 수를 줄일 수는 있으나, 이 경우 상대적으로 더 많은 응답자들이 필요하게 된다. 아울러 조건부 순위결정법의 경우 응답자가 질문에 싫증을 느끼거나 순위를 정하는데 어려움을 갖는 경우 각각 후반부와 초반부 응답의 질이 떨어진다. 또한 일부 응답자들은 이러한 상충관계에 있는 질문들이 일반인이 아닌 전문가나 대답할 수 있다고 생각할 수도 있다. 셋째, 실제 상황이 아닌 가상적 상황 하에서의 선택행동이라는 점과 응답자들에게 친숙하지 않을 수도 있는 재화나 서비스를 설명하는 데 따르는 어려움이 있을 수 있다.

5) 컨조인트 분석법 적용절차

컨조인트 분석법 적용절차는 [그림 I-5]와 같이 가치평가의 대상을 선정하고 속성과 속성수준의 수 및 수준(level)을 결정하여 실험계획법을 통해 선택대안집합을 도출하는 과정을 거친 후 설문조사를 수행하고 실증분석을 하는 여섯 단계를 거친다.

[그림 I-5] 컨조인트 분석법의 적용절차



라. 조건부 가치 측정법 (Contingent Valuation Method; CVM)

1) CVM의 특징

CVM은 사람들이 비시장재에 부여하고 있는 가치를 직접적으로 이끌어내는 방법이다. 즉, CVM은 일대일 면접조사, 우편조사 혹은 전화 인터뷰를 통해 사람들이 갖고 있는 비시장재에 대한 가치를 설문하는 방식을 사용하고 있다. 특별히 고안된 설문지는 비시장재의 변화에 대한 가상적인 상황을 설정하고 여러 조건들을 달아 사람들을 설정된 가상적인 상황에 결합시키는데 이런 조건하에서 응답자들은 비시장재의 가상적인 변화에 대해서 어느 정도 지불의사(willingness to pay; WTP)가 있는지를 답변하게 된다.

진술선호 접근법의 두 가지 대표적인 방법론인 조건부 가치측정법과 컨조인트 분석법의 특징과 적용조건에 대해서 살펴보면 다음 [그림 I-6]과 같다.

[그림 I-6] 진술선호 접근법의 방법론 비교



CVM은 후생경제학의 이론적 근거에 기반을 두고 있고, 간접적 방법을 적용할 수 있는 대상에는 물론, 간접적 방법을 적용할 수 없는 대상에도 다양하게 사용할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 CVM은 선호를 나타내려는 응답자의 의사와 능력에 크게 의존한다.

이러한 관점에서 볼 때 CVM이 성공적으로 편익추정에 사용되려면 설문지 작성, 설문과정 등 적용과정에서 CVM의 배경상 논쟁이 되었던 전략적 행위, 가상성, 의향과 행동의 상관관계 등을 충분히 살펴봐야 한다. 또 설문방식을 편익추정의 수단으

로 사용하기 때문에 지불의사 유도방법이나 설문방법 등도 CVM에서는 중요한 점검 사항이 된다. CVM의 WTP 질문의 설계방법은 크게 네 가지로 구분될 수 있으며 이를 <표 I-7>에 요약하였다.

<표 I-7> CVM의 질문 설계방법

방 법	내 용
개방형 질문법	응답자가 직접 WTP를 대답하도록 개방형으로 질문한다.
경매법	임의의 WTP에 대한 지불의사를 질문하는 과정을 되풀이하여 일정 금액에 수렴하면 질문을 중지한다.
지불카드법	다른 재화에 대한 가구당 평균적인 지출 목록을 함께 제시하면서, 연구대상재화에 대한 지불의사액을 답하도록 한다.
양분선택형 질문법	일정금액을 지불할 의사가 있는지 여부를 묻고, '예/아니오'로 답하도록 한다.

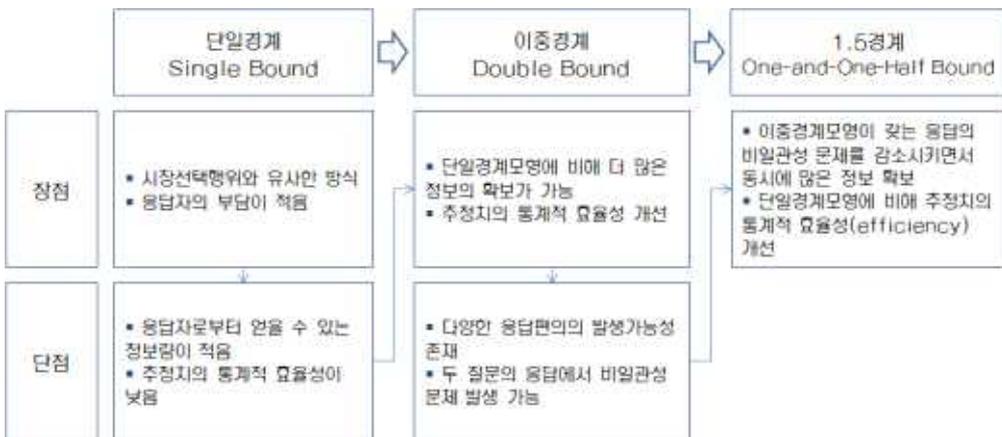
개방형 질문법(open ended question)은 질문방식은 단순하지만, 무응답이나 극빈치(outlier)가 발생할 가능성이 높다는 단점을 갖고 있고, 경매법(bidding game)은 여러 번 질문을 반복하여 응답자의 WTP로 근접해 갈 수 있다는 점에서 유용하나, 초기 WTP제시금액을 얼마로 잡느냐에 따라 그 결과가 달라질 수 있다는 단점이 있다. 지불카드법(payment cards)은 만일 연구대상과 비슷한 성질의 정보가 타 항목으로 주어졌을 경우, 그와 비슷한 수준의 값으로 지불의사액을 답할 가능성이 있으므로, 평가대상과 무관한 정보를 제시해야 한다는 주의점이 있다. 양분선택형 질문(dichotomous choice question)은 응답이 비교적 쉽고, 극빈치의 발생확률이 작다는 장점이 있으나, 추정이 어렵다는 한계점도 있다.

양분선택형 질문법은 Hanemann(1984)에 의하여 알려진 후 최근의 CVM 연구에서 널리 사용되어 왔다. 양분선택형 질문법은 응답자에게 연구대상재화에 대해 특정 금액에 대한 지불의사 여부를 “예/아니오”로 물음으로써 실제 시장의 상황을 모방한다는 측면에서 상당히 유인 일치적(incentive-compatible)이다. 이 때 WTP 질문에서 응답자에게 제시되는 금액은 본 설문 이전의 사전조사(pre-test)를 통해 결정된다. 양분선택형 질문법은 응답자가 대답하기 용이하여 응답률이 높고, 출발점 편의(starting point bias)나 설문조사원 편의에 의한 영향이 적으며, 비합리적 지불의사가 발생할 가능성이 적고, 응답자의 전략적 행위를 줄일 수 있다는 장점이 있다.

구체적으로 양분선택형 질문법은 미리 설정된 금액을 “대상 재화 공급의 대가로 지불할 용의가 있는가?”라고 물어보면, 응답자가 “예/아니오”로 대답하는 방식이다. 이 때 사전에 개방형 질문법으로 조사된 WTP 값을 이용하여 본 설문시 제시할 금액들을 결정하며, 이 금액들 중 임의로 한 가지 금액을 각 응답자에게 제시한다. 다만 각 금액들은 비슷한 수의 응답자들에게 배당된다. 응답자는 제시된 금액이 본인의 WTP보다 같거나 작으면 “예”라고 대답하고, 높으면 “아니오”라고 대답하게 된다. 이렇게 얻어진 자료를 이용하여 제시된 금액과 “예”라고 대답한 응답자의 비율을 분석함으로써 WTP의 대표값을 추정하게 된다.

양분선택형 질문법은 단일경계 양분선택형, 이중경계 양분선택형, 1.5경계 양분선택형 모형으로 나누어진다. 단일경계 양분선택형 모형은 한 번만 지불금액이 제시되는 방식이고, 이중경계 양분선택형 모형은 두 번에 걸쳐 지불금액이 제시되는데, 두 번째 제시금액은 첫 번째 제시금액에 대해 ‘예’라고 대답한 경우 첫 번째 제시금액의 2배가 되며, ‘아니오’라고 대답한 경우 첫 번째 제시금액의 1/2이 된다. 한편 1.5경계 양분선택형 모형은 응답자 그룹을 2개로 나누어 첫 번째 그룹의 응답자에게는 하한의 지불금액을 제시하여 이 질문에 ‘예’라고 대답한 경우 상한의 지불금액을 제시하고 두 번째 그룹의 응답자에게는 상한의 지불금액을 제시하여 이 질문에 ‘아니오’라고 대답한 경우 하한의 지불금액을 제시하는 방식이다.

[그림 1-7] 양분선택형 질문의 추정모형별 비교



한편 Kenneth Arrow, Robert Solow 등으로 구성된 미국의 NOAA패널은 1993년 1

월 11일 보고서를 제출하여, “CVM이 비사용가치를 포함하여 피해를 법적으로 평가하는 출발점이 되기에 충분히 믿을만한 추정치를 제공할 수 있다”는 결론을 내렸다. NOAA 패널 보고서에 제시된 지침들 중 중요한 몇 가지만 요약하면 다음과 같다.

[그림 1-8] NOAA 패널의 지침

전화나 우편조사가 아닌 개별면담조사(face-to-face interview)
WTA가 아닌 WTP를 측정
지불수단으로는 특정 제시값(bid)에 대해 Yes/No로 응답하는 양분선택형
프로그램의 기대효과를 정확하게 묘사
제시된 WTP를 받아들이는 경우 다른 지출을 줄여야 함을 명시
대상 재화에 대한 대체제를 명시하고 인지시킴
질문을 제대로 이해하고 응답했는가를 확인할 수 있는 질문을 추가

조건부 가치측정법을 적용한 사례는 <표 1-8>과 같다.

<표 1-8> 조건부 가치측정법을 적용한 연구사례

적용재화	연구문헌
코펜하겐의 왕립극장	Bille. T.(1998)
이탈리아 박물관의 문화서비스	Brave. M., F. Scarpa and G. Sirchia(1998)
문화공공재와 정책 디자인	Santagata. W(2000)
야생공원	Rollins and Lyke(1998)
물의 휴양가치	Bergstrom et al.(1990)

2) 조건부 가치측정법의 장점

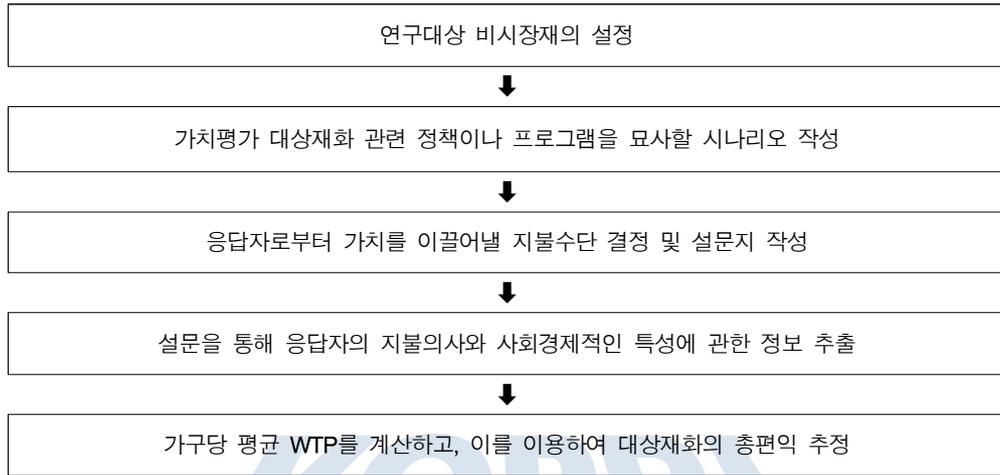
CVM은 자원 및 환경경제학 분야에서 더욱 광범위하게 받아들여졌지만, 경제학의 범주에만 그치는 것이 아니라 실험설계, 마케팅, 정치학, 심리학, 사회학, 조사연구 등의 다른 영역과 결합되어 유연성 있게 이용되고 있다. CVM은 그 적용범위가 계속 확대되어 대기질, 수질, 레크리에이션 등의 다양한 분야의 가치측정에 널리 이용되었다. 아울러 CVM은 주로 학문적으로 연구되다가 1980년대에 이르러 소송(litigation)에서 이용되면서 현재 주요 정부부서, 국제기구, 연구소 등에서 많이 사용되고 있다. 비시장재의 가치측정에 있어 CVM의 장점을 간략히 요약하면 다음과 같다.

- 첫째, 다른 기법에 비해 보다 많은 비시장재에 적용될 수 있다.
- 둘째, 다양한 유형의 비사용가치를 직접 측정할 수 있다.
- 셋째, Hicks적 후생(Hicksian welfare)³⁾을 정확하게 직접 측정할 수 있다.
- 넷째, 유효성 및 신뢰성을 검사할 수 있도록 설계할 수 있다.

CVM의 적용절차는 [그림 I-9]와 같이 가치평가의 대상에 대한 시나리오를 작성한 후 설문을 통하여 응답자로부터 WTP을 도출하는 다섯 단계를 거친다.

3) 특정 재화나 서비스의 가격이나 수량 변화에 따른 후생의 변화는 통상수요곡선 아래 면적의 변화로 정의되는 마샬(Marshall)의 소비자잉여(consumer's surplus)를 이용하여 측정할 수 있다. 하지만 통상수요곡선을 이용할 경우, 효용이나 만족도가 일정하게 유지되는 것이 아니라 소득이 일정하게 유지되고 있다는 이론적 문제점이 있다. Hicks(Hicks)는 이와 같은 문제를 극복하기 위해 효용수준을 일정하게 유지시키는 보상수요함수에 근거하여 보상변화(compensating variation), 동등변화(equivalent variation), 보상잉여(compensating surplus), 동등잉여(equivalent surplus)라는 새로운 후생개념을 제시하였다. Hicks적 후생이란 소비자가 효용증대를 얻기 위하여 얼마의 화폐소득이 필요한가를 측정함으로써 이를 특정 재화가 주는 후생의 지표로 삼는 것을 뜻한다.

[그림 1-9] 조건부 가치측정법의 적용절차



제2절 편익 추정

1. 방법론의 선정

지금까지 살펴본 방법론들의 특징을 요약하고 각 방법론을 비교해보면 다음 <표 I-9>와 같다.

<표 I-9> HPM, TCM, CAM, CVM의 비교

방법론	내용 및 특징	가치측정 범위		
		직접 사용가치	간접 사용가치	비사용 가치
헤도닉 가격기법	시장재에 내재하는 비시장재적 특성에 관한 암묵적 가격을 도출함	○	○	-
여행비용 평가법	휴양지 방문에 따른 비용을 기반으로 휴양에 대한 가치를 유도	○	○	-
컨조인트 분석법	설문기법을 사용하여 가상적 시장을 구축하고 속성별 가치를 간접적으로 평가	○	○	○
조건부 가치측정법	설문기법을 사용하여 가상적 시장을 구축하고 가치를 직접적으로 유도	○	○	○

네 가지 방법론 중에서 본 조사의 대상재화인 남극대륙에 기록된 지구진화 연구의 사용가치뿐만 아니라 비사용가치를 반영하여 편익을 추정하기 위해 적합한 방법론으로 컨조인트 분석법과 조건부 가치측정법을 들 수 있다. 컨조인트 분석법의 경우, 대상재화를 구성하는 각 속성별 가치를 도출할 수 있다는 장점이 있어 본 연구에서 채택한다.

본 사업 대상인 남극대륙에 기록된 지구진화 연구는 기초과학 기술 개발이라는 비시장재화와 서비스에 해당하며, 기초과학 기술개발로 인한 다양한 편익이 본 사업의 가장 직접적인 편익에 해당한다. 현재까지 기초연구분야 R&D 투자사업의 경제적 가치를 평가하기 위한 표준화된 평가방법은 존재하지 않는다. 이는 기초연구분야의 R&D에 내재한 불확실성과 R&D 성과 측정의 어려움에 기인한다고 볼 수 있다. 이러한 현실은 예비타당성조사와 같이 사전적으로 R&D 부문 사업의 편익을 추정하려는

시도가 매우 큰 제약요인 하에 놓여 있으며, 편익 추정방법의 채택과 적용 시에도 신중을 기할 필요가 있다. 본 연구에서는 극지연구소가 수행하려 제안한 ‘남극대륙에 기록된 지구진화 연구’에 대한 사회적 편익을 추정하기 위해 설문조사 기반의 선택실험법(CE, Choice Experiment)을 활용할 예정이다.

<표 1-10> 비시장재의 가치평가방법의 분류

선호 연계방법		가치측정법	비고
물리적연계		손해함수접근법(Damage Function Approach) 대체비용접근법(Replacement Cost Approach) 비용절감접근법(Cost of Savings Approach)	소비자선택이론에 근거하지 않음
행태적 연계	시장접근법	시장수요접근법(Market Demand Approach)	가장 선호됨
	현시선호접근법 (RP)	여행비용접근법(Travel Cost Approach) 특성가격접근법(Hedonic price Approach) 회피비용접근법(Averting Behavior Approach)	간접적 대리시장을 활용함. 선호되는 접근법
	진술선호접근법 (SP)	조건부가치접근법(Contingent Valuation Method) 조건부순위접근법(Contingent Ranking Method) 조건부행위접근법(Contingent Behavior Method)	RP의 적용이 어려운 경우 보완적 적용 추천
	편익이전	가치이전, 함수이전, 메타분석	

자료: 한국개발연구원, 『에비타당성조사를 위한 CVM 분석지침 개선 연구』, 2012

2. 편익 추정 대상

본 사업의 경우 남극대륙에 기록된 지구진화 연구이다. 남극대륙에 기록된 지구진화 연구에 대한 편익은 크게 직접적 편익과 간접적 편익으로 구분할 수 있으며, 직접적 편익은 본 연구를 통해 근시일내로 획득할 것으로 예상되는 편익으로 이에는 ① 남극대륙에 기록된 지구진화 연구의 성과물을 산업화하여 발생하는 편익과 ② 기술 의존도 감소에 따른 기술료 지불 감소를 포함한다. 이에 반해 간접적 편익은 연구 성과물로 인해 비록 불확실하지만 중장기적으로 획득할 수 있는 편익으로, 남극대륙에 기록된 지구진화 연구에 따른 ① 남극 지하자원 선점가능성 제고, ② 화산폭발에 대한 예측력 제고, ③ 남극대륙에 기록된 지구진화 연구 분야에 국제적 연구 업적 달성을 통한 국민의 자긍심 고취, ④ 미지의 세계에 대한 지적호기심 충족 등의 편익이 발생할 수 있다.

본 (기초)연구의 특성 상 ‘직접적 편익’의 발생가능성은 매우 낮은 반면, ‘간접적 편익’은 그 불확실성에도 불구하고 존재할 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 간접적 편익을 중심으로 선택실험법(CE)을 활용하여 사회적 편익을 추정한다.

3. 남극대륙에 기록된 지구진화 연구에 따른 사회적 편익 추정

가. 설문조사 개요

남극대륙에 기록된 지구진화 연구에 대한 전국민 대상 설문조사는 크게 두 부분으로 구분된다. 첫 번째 부분의 설문조사는 인식조사 부분으로, 한국의 남극 장보고 기지 설치 및 활동 관련 인지여부, 본 과제를 통한 미지의 세계에 대한 지적 호기심 충족 가능성 인지 여부 부분, 본 과제에서 얻어진 연구결과를 이용한 교육적 가치 증진 가능성 인지 여부 부분, 본 과제로 인한 국민의 인식 제고 가능성에 대한 인지여부, 본 과제를 통해 남극에 매장된 희귀한 지하자원을 선점할 가능성을 높이는 것에 대한 인지여부 부분, 본 과제 성과로 남극의 활화산활동 모니터링 자료를 활용한 백두산 화산폭발 가능성 예측력 제고 인지 여부 부분과 사회·경제적 변수(사회기부 여부, 직업, 소득, 학력, 나이, 성별)에 대한 질문이다.

두 번째 부분의 설문조사는 선택실험법을 통한 남극대륙에 기록된 지구진화 연구에 대한 피설문자의 지불의사액을 구함으로써 본 사업의 사회적 편익(Social welfare)을 추정하는 부분이다.

설문조사에 앞서 피설문자에 대한 ‘설명 및 보기카드’를 통해 남극대륙에 기록된 지구진화 연구사업과 내역에 대해 충분한 설명의 시간을 가졌다.

나. 설문 1 부분 (인식 조사 및 사회 경제적 변수 조사)

본격 설문에 앞서, 남극대륙에 기록된 지구진화 연구와 관련하여 사전 인지 정도와 사회·경제적 변수 추출 등에 대한 직접 면접조사를 실시하였다.

가) 설문조사 결과

□ 설문조사 대상 및 개요

본 설문조사는 제주도를 제외한 전국민을 대상으로 2018년 1월 25일부터 2월 7일

까지 이뤄졌으며, 총 설문 크기는 301가구를 대상으로 이뤄졌다.

<표 1-11> 지역별 표본 수

지역	가구수	비중(%)	표본수	비중
서울	3,915,023	19.74	61	20.3
수도권	5,732,612	28.90	97	32.2
충청권	2,155,480	10.87	30	10.0
영남권	5,130,780	25.86	76	25.2
호남권	2,281,827	11.50	29	9.6
영동권	621,943	3.14	8	2.7
합계	19,837,665	1.00	301	1.00

자료: 통계청(2017), 국가통계포털 2016년 인구총조사 가구부문

□ 빈도 분석 결과

남극대륙에 기록된 지구진화 연구사업에 대한 전국민 대상 설문조사에 참여한 응답자의 성별 특성은 남성 51.3퍼센트, 여성 48.7%의 비중을 차지했다.

<표 1-12> 설문대상자의 성별

		빈도	퍼센트
유효	남성	154	51.2
	여성	147	48.8
	합계	301	100

남극대륙에 기록된 지구진화 연구사업에 대한 전국민 대상 설문조사에 참여한 연령대 특성은 전 연령대에 걸쳐 균형있게 구성되었는데, 20대가 23.3%, 30대 23.3%, 40대 26.9%, 50대 이상이 26.6%의 분포를 보이고 있다.

<표 I -13> 설문대상자의 연령대

		빈도	퍼센트
유효	20대	70	23.3
	30대	70	23.3
	40대	81	26.9
	50대 이상	80	26.6
	합계	301	100

남극대륙에 기록된 지구진화 연구사업에 대한 전국민 대상 설문조사에 참여한 응답자의 교육수준은 고졸이 30.3%, 전문대졸이 18.3%, 대졸이 48.0%, 대학원졸 이상이 2.3%, 모름 및 무응답이 1%의 분포를 보이고 있다.

<표 I -14> 설문대상자의 교육 수준 분포

		빈도	퍼센트
유효	중졸 이하	2	0.7
	고졸	104	30.3
	전문대졸	50	18.3
	대졸	137	48.0
	대학원졸 이상	8	2.3
	합계	301	100

남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업에 대한 전국민 대상 설문조사에 참여한 응답자의 월 평균 가구 소득은 100만원 미만인 1.3%, 200~300만원 미만인 12.0%, 300~400만원 미만인 24.6%, 400~500만원 미만인 30.2%, 500~600만원 미만인 23.6%, 700~800만원 미만인 5.6%, 800~900만원 미만인 1.3%, 900만원 이상이 1.3%로 분포되어 있다.

<표 1-15> 설문대상자의 소득 분포

		빈도	퍼센트
유효	100만원 미만	4	1.3
	200~300만원 미만	36	12.0
	300~400만원 미만	74	24.6
	400~500만원 미만	91	30.2
	500~600만원 미만	71	23.6
	700~800만원 미만	17	5.6
	800~900만원 미만	4	1.3
	900만원 이상	4	1.3
	합계	300	100

□ 인지수준에 관한 세부 항목 분석 결과

○ 한국의 남극 장보고 기지 설치 및 활동 관련 인지여부

한국의 남극 장보고 기지 설치 및 활동 관련 인지여부에 대해서 전체 응답자 중 3.32%가 전혀 모르고 있다고 답변하였고, 약 57.48%가 내용을 잘 모르거나 전혀 들어보지 못했다고 답변했다. 내용에 대해 구체적으로 아는 비율은 3.32%정도였으며, 대략적인 내용만 알고 있는 비율은 39.20%라고 답변하였다.

<표 1-16> 한국의 남극 장보고 기지 설치 및 활동 관련 인지여부

질문내용	답변	비중
구체적인 내용까지 잘 알고 있다. (1)	10	3.32
대략적인 내용 정도를 알고 있다. (2)	118	39.20
들어본 적은 있으나 내용은 잘 모르고 있다. (3)	131	43.52
전혀 모르고 있다. (4)	42	13.95
합계	301	100.0

○ 미지의 세계에 대한 지적 호기심 충족 가능성 인지 여부 부분

본 항목에서는 본 과제를 통하여 미지의 세계에 대한 지적 호기심 충족 가능성 인

지 여부 부분에 대한 질문에 대한 답이다. 설문 결과 긍정적인 답변은 82.06%이었고, 들어본 적은 있으나 내용을 잘 모르거나 전혀 모른다고 응답한 경우는 17.94%인 것으로 나타났다.

<표 1-17> 미지의 세계에 대한 지적 호기심 충족 가능성 인지 여부 부분

질문내용	답변	비중
구체적인 내용까지 잘 알고 있다.	31	10.30
대략적인 내용 정도를 알고 있다.	216	71.76
들어본 적은 있으나 내용은 잘 모르고 있다.	44	14.62
전혀 모르고 있다.	10	3.32
합계	301	100.0

○ 교육적 가치 증진가능성 인지 여부

본 항목에서는 본 과제로 인해 교육적 가치 증진가능성 인지 여부를 묻는 질문으로, 설문 결과 긍정적 답변이 89.04%인 반면, 부정적 답변은 10.96%에 그쳐서 많은 사람들이 인지하고 있는 것으로 나타났다.

<표 1-18> 교육적 가치 증진가능성 인지 여부

질문내용	답변	비중
구체적인 내용까지 잘 알고 있다.	64	21.26
대략적인 내용 정도를 알고 있다.	204	67.77
들어본 적은 있으나 내용은 잘 모르고 있다.	30	9.97
전혀 모르고 있다.	3	1.00
합계	301	100.0

○ 국민의 인식 제고 가능성에 대한 인지여부

본 항목에서는 본 과제로 인해 국민의 인식 제고 가능성에 대한 인지여부를 묻는 질문으로, 설문 결과 긍정적 답변이 88.70%인 반면, 부정적 답변은 11.30%에 그쳐서 많은 사람들이 인지하고 있는 것으로 나타났다.

<표 1-19> 국민의 인식 제고 가능성에 대한 인지여부,

질문내용	답변	비중
구체적인 내용까지 잘 알고 있다.	90	29.90
대략적인 내용 정도를 알고 있다.	177	58.80
들어본 적은 있으나 내용은 잘 모르고 있다.	33	10.96
전혀 모르고 있다.	1	0.33
합계	301	100.0

○ 남극에 매장된 희귀한 지하자원을 선점할 가능성을 높이는 것에 대한 인지여부
 본 항목에서는 본 과제로 인해 남극에 매장된 희귀한 지하자원을 선점할 가능성을 높이는 것에 대한 인지여부를 묻는 질문으로, 설문 결과 긍정적 답변이 88.37%인 반면, 부정적 답변은 11.63%에 그쳐서 많은 사람들이 인지하고 있는 것으로 나타났다.

<표 1-20> 남극지하자원을 선점할 가능성을 높이는 것에 대한 인지여부

질문내용	답변	비중
구체적인 내용까지 잘 알고 있다.	84	27.91
대략적인 내용 정도를 알고 있다.	182	60.47
들어본 적은 있으나 내용은 잘 모르고 있다.	32	10.63
전혀 모르고 있다.	3	1.00
합계	301	100.0

○ 남극의 활화산활동 모니터링 자료를 활용한 화산폭발 가능성 예측력 제고 인지 여부
 본 항목에서는 본 과제 성과로 인한 남극의 활화산활동 모니터링 자료를 활용한 백두산 화산폭발 가능성 예측력 제고 인지 여부를 묻는 질문으로, 설문 결과 긍정적 답변이 88.70%인 반면, 부정적 답변은 11.30%에 그쳐서 많은 사람들이 인지하고 있는 것으로 나타났다.

<표 I -21> 화산폭발 가능성 예측력 제고 인지 여부

질문내용	답변	비중
구체적인 내용까지 잘 알고 있다.	66	21.93
대략적인 내용 정도를 알고 있다.	201	66.78
들어본 적은 있으나 내용은 잘 모르고 있다.	32	10.63
전혀 모르고 있다.	2	0.66
합계	301	100.0

나. 설문 2 부분(본 사업에 대한 사회적 편익 추정)

1) 설문 개요

설문조사의 두 번째 부분은 남극대륙에 기록된 지구진화 연구에 대한 효과를 묻는 설문으로, 이를 통해 본 사업을 통해 얻게 되는 非시장적 가치를 추정하는 것이다.

본 조사는 선택실험법(Choice experiment)을 이용함으로써 응답자의 소득세 지불에 대한 선호를 파악함으로써 남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업을 통해 얻게 되는 편익의 속성(Attribute)별 지불용의액을 도출할 수 있다.

2) 본 과제로 인한 편익 속성 및 수준

본 과제의 남극대륙에 기록된 지구진화 연구로 인해 국민들의 편익에 영향을 미치는 속성들과 그에 따른 속성의 수준들은 다음과 같다. 본 과제에서는 속성과 수준은 <표 I -40>에 나와 있는 것과 같다. 본 속성과 수준은 국내외 문헌에 대한 조사와 전문가 집단을 대상으로 한 자문을 거쳐 수정한 내용이다. 또한 일반 응답자들을 대상으로 한 사전조사(전체 설문 재상자의 10%인 30명)를 통해 2차 수정한 내용이다. 가격속성(소득세)을 제외한 본 과제로 인한 속성들은 모두 3개의 수준을 갖도록 하였다. 각 속성에서 가장 낮은 것은 현재 상태의 수준을 나타낸다.

<표 1 -22> 속성 변수와 수준

속 성	수 준
남극 지하자원 선점 가능성 높임	1) 0% 높임* 2) 10% 높임 3) 20% 높임
화산폭발에 대한 예측력 제고	1) 0% 높임* 2) 5% 높임 3) 10% 높임
세계 최고 수준의 연구 성과 도출로 국가위상 제고	1) 없음* 2) 연구성과 1건 3) 연구성과 3건
미지의 세계에 대한 지적호기심 충족	1) 없음 2) 약간 충족 3) 많이 충족
가구당 소득세 신설을 통한 연(年)별 부담액	1) 0원* 2) 2,000원 3) 4,000원 4) 6,000원 5) 8,000원 6) 10,000원

주: 속성수준에서 *은 현재 수준을 나타냄.

개별 속성들의 내용에 대한 설명은 다음과 같다.

가) 남극 지하자원 선점 가능성 높임

남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업은 남극 지질관련 연구 영토를 넓힘으로써 향후 남극에 매장된 희귀한 지하자원을 선점할 가능성을 높일 수 있다. 남극은 북극과 달리 대륙이며, 남극 대륙에는 여러 가치가 높은 지하자원들이 많이 매장되어 있다. 그러나 현재는 남극조약(1959년)으로 인해 남극에 매장된 자원에 대한 개별국가의 개발 및 거래가 금지되어 있다. 그러나 향후 국제관계 변화와 같은 일이 일어날 경우 남극에 매장된 지하자원 개발이 가능해 질 가능성이 있고, 남극대륙의 지질에 관한 지속적인 연구성과를 도출한 국가가 자원에 대한 접근성은 당연히 높아질 수밖에 없다. 현재 파악된 남극에 매장된 천연자원은 석유, 철, 구리 등이 백년 이상 사용할 수 있는 양이라고 한다 이러한 이유에서 세계 각국에서는 남극에 과학기지를 건설하고 지질 개발에 높은 관심을 보이고 있다. (기지개수: 아르헨티나(6개), 러시아(5개), 칠레(4개), 미국(3개), 한국(2개))

따라서 본 설문조사에서는 남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업은 향후 한국이 남극의 지질관련 연구를 통해 향후 남극에 매장된 지하자원의 선점가능성을 높일 수 있는 사회적 편익이 존재한다고 확신하고 이를 속성의 하나로 설정하였다. 한편, 본 설문조사에서 설정한 속성 수준은 현재 상태, 10% 선점 가능성 제고, 20% 선점 가능성 제고로 설정하였는데, 이는 관련 전문가들에 대한 지속적인 자문의견을 바탕으로 해당 연구 사업을 통해 달성할 수 있는 선점 가능성 제고의 범위라고 확정되었다. 현재 수준에서는 선점 가능성의 추가적인 증가가 어려운 경우이며(0% 증가), 해당 연구 사업을 진행할 경우, 정부의 지원 의지(금액)에 따라 최소 10% 증가에서 최대 20%의 선점 가능성을 높일 수 있다고 판단하였다.

나) 화산폭발에 대한 예측력 제고

남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업을 통해 남극 장보고기지 주변 빅토리아랜드의 활화산활동 모니터링 자료 수집 및 분석을 통한 한국의 지질 분석 및 백두산 화산폭발에 대한 예측력을 높일 수 있다. 남극 화산분화 물질 및 지형 변화에 대한 분석을 통해 한반도 백두산의 화산폭발에 대한 연구 기반을 마련할 수 있으며 이를 통해 화산활동에 대한 예측력을 높일 수 있다. 행정안전부(2015)에 따르면, 백두산 화산이 폭발할 경우 남한에 최대 11조 1천 900억원의 피해가 발생할 것으로 추정하고 있다.

결과적으로 본 연구 사업은 남극대륙의 지구진화 연구를 통해 한국의 지질 분석 및 백두산 화산폭발에 대한 예측력을 높이고 이는 국민들에게 사회적 편익으로 돌아갈 수 있다고 확신하고 이를 속성의 하나로 설정하였다. 한편, 본 설문에서 설정한 속성수준은 현재 상태, 5% 예측력 제고, 10% 예측력 제고로 설정하였다. 이러한 수준 설정은 관련 전문가들과의 지속적인 자문회의를 통해 도출될 결과로, 남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업에 대한 정부 예산 투자 수준에 따라 최소 5%에서 최대 10%의 예측력 제고를 달성할 수 있다는 결론에 도달하여 이와 같이 수준을 설정하였다.

다) 세계 최고 수준의 연구 성과 도출로 국가위상 제고

남극대륙에 기록된 지구진화 연구는 세계 최고 혹은 최초의 연구성과를 도출하여냄으로써 획기적인 학문적 성과와 더불어 국민들에게는 한국의 위상제고라는 효과를

낼 수 있다. 한편 남극대륙에 기록된 지구진화 연구 성과의 도출은 다만 한국의 관련 분야 위상제고라는 효과뿐만 아니라 연구 성과를 국제적인 연구기관 및 정부들과 공유하고, 이를 바탕으로 향후 공동연구에도 활용할 수 있는 중요한 자산이 될 수 있다. 따라서 본 연구사업은 이러한 한국의 국제적인 위상제고와 더불어 향후 공동연구를 위한 기초자산 축적이라는 측면에서 사회적 편익이 존재한다고 확신하고 이를 속성의 하나로 설정하였다. 한편, 본 설문조사에서 설정한 속성 수준은 현재 수준에서 정부의 남극대륙에 기록된 지구진화 연구에 대한 지원의지(금액)에 따라 최소 연구성과 1건에서 최대 연구성과 3건까지 달성으로 설정하였다. 이는 관련 관련 전문가들과의 지속적인 자문회의를 통해 해당 연구사업에서 달성할 수 있는 범위라고 확정되었다.

라) 미지의 세계에 대한 지적호기심 충족

남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업은 본질적으로 인간의 미지의 세계에 대한 지적호기심을 충족시켜주고 연구결과는 교육을 위한 자료로 활용될 수 있는 사회적 편익이 존재한다. 교육자료는 초등학교에서부터 전문영역에 이르기까지 남극과 기상 그리고 해수면 상승 분야에서 활용가치가 높다고 할 수 있다. 본 설문에서 설정한 속성 수준은 전문가 자문회의를 거쳐 현재수준에서남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업에 대한 정부의 지원의지에 따라 ‘약간 충족’될 수 있는 수준까지 연구성과를 도출하거나 ‘많이 충족’될 수 있는 수준까지 도출하는 것으로 도출하였다.

마) 소득세 증가

본 과제에서 가격속성은 남극대륙에 기록된 지구진화 연구를 추진할 경우 기대되는 효과로 사업 추진을 위해 가구당 지불해야 하는 소득세 증가로 설정하였다. 본 금액은 사전예비설문조사를 통해 적당한 구간을 설정하였다.

3) 선택대안집합의 설계

본 조사는 허용오차를 최소화하는 직교계획법인 D-Efficiency설계를 적용하여 선택 실험을 응답자 일인당 네 개로 만들고, A, B의 2개 그룹으로 나누어 설문을 진행하였다. 설문 결과는 통상 컨디셔널 로짓(Conditional Logit model) 모형을 적용하였다. 추정모형을 이용하여 최종적으로 각 속성별 응답자의 지불용의액을 도출할 수 있다.

본 설문에서 지불방식으로 선택한 것은 향후 5년 동안 매년 세금(소득세) 증가이며, 부과 대상은 개인이 아닌 ‘가구’로 설정하였다. 본격적인 설문조사에 앞서, 30명

에 대한 사전설문을 통해 확정된 금액은 0원, 2,000원, 4,000원, 6,000원, 8,000원, 10,000원 등 총 6개의 금액을 선택하였다.

4) 설문지 작성

각각의 선택지에는 세 개의 선택대안(A, B, C)이 담기며, 피설문자는 세 개의 선택대안 중 가장 선호하는 하나를 선택한다. 아래는 실제 설문에서 사용된 선택지 하나를 예로 보여준다. 응답자는 선택지에 제시된 3개의 속성의 다양한 수준으로 구성된 정책대안 A, B를 선택하거나 둘 다 선택하고 싶지 않은 경우에는 C(현재 상태)를 선택할 수 있다. 응답자들은 각각의 속성의 다양한 수준들이 가져다주는 편익과 이에 따른 세금(소득세)의 증가를 비교하여, 가장 선호하는 대안을 선택하게 된다. 참고로 ‘선택대안 C’를 선택하면, 어떠한 추가적인 편익도 증가하지 않는 반면 추가적인 세금도 증가하지 않는다.

<표 I -23> 선택지 예시

특성	① A	② B	③ C(현재)
1) 남극 지하자원 선점 가능성 높임	20% 높임	10% 높임	0% 높임
2) 화산폭발에 대한 예측력 제고	5% 높임	10% 높임	0% 높임
3) 세계 최고 수준 연구 성과 도출로 국가위상 제고	연구성과 3건	연구성과 1건	없음
4) 미지의 세계에 대한 지적호기심 충족	많이 충족	약간 충족	없음
5) 가구당 소득세 신설을 통한 년(年)별 부담액	10,000원	4,000원	0원
선택 [√]	[]	[]	[]

5) 모형 설정

컨조인트 분석에서는 이론적으로 확률효용모형(Random Utility Model)을 활용하는 것이 일반적이다. McFadden(1974)에 의해 개발된 다항로짓모형(Multinomial logit model)은 대안의 구성요소인 개별 속성이 응답자의 선택확률에 어떻게 영향을 주는지를 모형화하는 데 있어 계량경제학적인 체계를 제공한다. 다항로짓 모형은 ‘비관련

대안의 독립성' (independent of irrelevant alternative, IIA)'을 따른다고 가정한다. 이 모형에서는 소비자의 간접효용함수는 두 가지 요소로 구성되어 있다고 가정하고 있는데 하나는 연구자가 관측가능한 확정적인(deterministic) 부분이고 다른 하나는 관측 불가능한 확률적인(Stochastic) 부분이다. 일반적으로 관측불가능한 부분은 확률적(Stochastic)인 부분으로, 독립적이며 동일한 제 1형태 극치 분포(Type I extreme value distribution) 혹은 Gumbel 분포를 따른다고 가정한다. (McFadden, 1974) 응답자 i 가 직면한 선택대안 집합 A_i 내에 있는 하나의 선택대안 j 로부터 얻는 간접효용함수는 다음과 같이 표현해 볼 수 있다.

$$U_{ij} = V_{ij}(Z_{ij}, S_i)\theta + \epsilon_{ij} \quad F(\epsilon_{ij}) = \exp(-\exp(-\epsilon_{ij})) \quad (1)$$

잠재적 소비자는 전체 선택 집합(A_i) 중의 모든 대안들에 대해 $U_{ij} > U_{jk}$ ($k \in A_i, k \neq j$)를 만족한다면 선택대안 j 를 선택할 것이다. 이 때 잠재적 소비자 i 가 선택대안 j 를 선택할 확률은 다음과 같다.

$$\Pr_i(j|A_i) = \Pr(V_{ij}\theta + \epsilon_{ij} > V_{ik}\theta + \epsilon_{ik}) = \Pr(V_{ij} - V_{ik} > \epsilon_{ik} - \epsilon_{ij}) \quad (2)$$

이 경우 응답자 i 가 선택대안 j 를 선택할 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Pr_i(j|A_i) = \frac{\exp(V_{ij}\theta)}{\sum_k \exp(V_{ik}\theta)}, \quad V_{ij} = [X_{ij}, Z_j], \quad \theta = [\alpha, \beta] \quad (3)$$

선택적 질문으로부터 얻어진 각 응답자의 다변량응답(multinomial response)은 응답자의 효용극대화를 위한 선택결과로서 해석될 수 있다. 본 연구에서는 선택실험법 질문은 응답자에게 둘 다 선호 안 함을 포함하여 세 개의 대안들을 제시하고, 응답자가 주어진 대안들에서 속성들과 가격속성 사이의 상충관계를 고려하여 세 개의 대안들 중 한 개의 대안을 선택하도록 하고 있다. 결과적으로 선택실험법에서 응답자는 '예' 또는 '아니오'의 대답을 하는 것으로 설계될 수 있고, 이와 관련된 지시함수(indicator function) Y_{ij} 를 $Y_{ij} = 1$ (i 번째 응답자가 j 를 선택)로 정의할 수 있다. 따라서 본 컨조인트 분석을 위한 로그-우도함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\ln L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J Y_{ij} \cdot \ln[\text{Pr}_i(j | A_i)] \quad (4)$$

식(4)에 최우추정법(Maximum likelihood estimation)을 적용하면 필요한 모수를 추정할 수 있다. (Stern, 1997; Greene, 2000).

여기서 남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업에 대한 속성별 한계지불의사액(Marginal Willingness to Pay, MWTP)을 도출하기 위해 다음과 같은 추정식을 설정하였다.

$$V_{ij} = \beta_1 resource_{ij} + \beta_2 volcano_{ij} + \beta_3 reputation_{ij} + \beta_4 curiosity_{ij} + \beta_5 tax_{ij} + \epsilon_{ij} \quad (5)$$

이 식의 β 는 응답자의 효용에 영향을 미치는 개별 설명들에 대한 계수로 추정되어야 할 모수이다. 여기에 있는 설명 변수들은 <표 I-42>에 설명되었다.

<표 I-24> 설명 변수와 설명

변수	설명
<i>resource</i>	남극 지하자원 선점 가능성 제고(%)
<i>volcano</i>	화산폭발에 대한 예측력 제고(%)
<i>reputation</i>	세계 최고 수준 연구 성과 도출로 국가위상 제고(건)
<i>curiosity</i>	미지의 세계에 대한 지적호기심 충족
<i>tax</i>	가구당 소득세 신설을 통한 년(年)별 부담액

이제 식 (5)에 로이의 항등식(Roy's Identity)을 적용하면 개별 속성에 대한 한계 지불의사액을 구할 수 있다.

$$MWTP_{resource} = \Delta tax / \Delta resource = -\beta_1 / \beta_5$$

$$MWTP_{volcano} = \Delta tax / \Delta volcano = -\beta_2 / \beta_5$$

$$MWTP_{reputation} = \Delta tax / \Delta reputation = -\beta_3 / \beta_5$$

$$MWTP_{curiosity} = \Delta tax / \Delta curiosity = -\beta_4 / \beta_5$$

6) 추정 결과

식 (5)를 추정한 결과는 <표 I-43>에 제시되어 있다. Wald-통계량을 근거하여 판단할 때, 모든 추정계수는 0이라는 귀무가설은 유의수준 1%에서 기각되어 추정된 방정식은 통계적으로 유의하다. 또한 간접효용함수에 포함된 개별 속성에 대한 추정계수(β)는 모두 유의수준 1%에서 통계적으로 유의했다. 경제학적인 추론과 일치하듯이 세금(tax)에 대한 부호는 음(-)의 값으로 나타나고, 나머지 속성(편익)들에 대한 추정치는 양(+)의 값으로 나타났다.

<표 I-25> 추정 결과

	Coefficient	Std.Err	P-value
<i>resource</i>	0.0313660	0.0099475	0.000
<i>volcano</i>	0.1132792	0.0178057	0.002
<i>reputation</i>	0.2461484	0.0441528	0.000
<i>curiosity</i>	0.4405535	0.0872417	0.000
<i>tax</i>	-0.0003151	0.0000176	0.000
관측지 개수		3612	
로그-우도값(log-likelihood)		-2011.1627	
Wald-통계량		547.29	
(p-value)		0.0000	

7) 속성별 MWTP 추정

한계지불의사액은 개별 속성 수준을 한 단위 추가적으로 개선하는 것에 대한 가구당 월 단위의 WTP를 의미한다. 남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업에 대한 개별

속성 별 MWTP는 <표 I -44>에 제시되어 있다. 또한 각 한계지불의사액의 95% 신뢰 구간⁴⁾도 제시되어 있다. 예를 들어 남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업을 통해 남극 지하자원 선점 가능성 제고 편익은 가구당 연평균 WTP는 99.34원이며, 화산폭발에 대한 예측력 제고에 대한 사회적 편익은 359.51원이며, 세계 최고 수준 연구성과 도출로 국가위상 제고에 대한 사회적 편익은 781.20원이며, 미지의 세계에 대한 지적 호기심 충족에 대한 사회적 편익은 1,398.19원으로 추정되었다. 결론적으로 남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업에 대해 국민들은 ‘미지의 세계에 대한 지적호기심 충족’ 속성이 가장 중요하고 편익이 가장 크게 발생할 수 있다고 판단하였으며, ‘세계 최고 수준 연구성과 도출로 국가위상 제고’, ‘화산폭발에 대한 예측력 제고’, ‘남극 지하자원 선점 가능성 제고’ 순으로 편익이 발생한다고 선호를 표명하였다.

이는 본 연구 과제의 특성상 기초연구라는 것을 감안할 때, 다른 속성(편익)보다는 미지의 세계에 대한 지적호기심 충족이라는 편익에 대한 가장 높은 선호를 표방한 것은 매우 당연한 결과라고 볼 수 있으며, 본 연구 과제를 통해 얻게 되는 ‘남극 지하자원 선점 가능성’의 속성에 대해서는 본 편익이 실제 현실화될 수 있을지에 대한 불확실성과 향후 언제 발생할지에 대한 불확실성으로 인해 그 편익이 상대적으로 평가절하된 것으로 평가된다. 따라서 본 추정 결과를 통해 얻을 수 있는 시사점은 극지연구소의 남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업의 성과를 어떻게 국민들이 실감할 수 있도록 현실화시킬 것인지에 대한 보다 구체적인 청사진이 분명하게 제시되어야 한다는 점이며, 비록 처음에는 충분하지 않더라도, 구체적으로 나타날 수 있는 크고 작은 성공사례를 직접 시현해냄으로써 국민들이 느끼는 불확실성을 최소화시킬 수 있는 대안들을 되도록 많이 창출해 내야 한다는 점이다. 이러한 ‘연구성과 도출 → 현실 적용 성공사례 발굴 → 국민적 신뢰 구축’의 순환과정이 반복될수록 ‘남극 지하자원 선점 가능성’과 같은 편익부분은 보다 현실적인 수치로 추정될 수 있을 것이라 판단된다. 따라서 본 연구과제의 중국의 결과물에는 향후 얻어질 결과물에 대한 보다 구체적이고 현실적인 예상결과를 제시하는 것이 필요하리라 판단된다.

4) 95% 신뢰구간은 Krinsky and Robb(1986)이 제안한 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation) 기법을 이용하여 추정함.

<표 1 -26> 속성별 MWTP

구분	지불의사액(단위:원)	95% 신뢰구간
남극 지하자원 선점 가능성 제고	99.34	[40.15, 158.53]
화산폭발에 대한 예측력 제고	359.51	[242.69, 476.34]
세계 최고 수준 연구 성과 도출로 국가위상 제고	781.20	[505.46, 1056.94]
미지의 세계에 대한 지적호기심 충족	1,398.19	[865.94, 1930.43]
합계	2,638.24	

8) 남극대륙에 기록된 지구진화 연구의 비시장가치편익 추정

남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업의 비시장가치의 연간 편익은 다음과 같은 방식을 통해 계산할 수 있다. 우선 통계청 국가통계포털 2016년 인구총조사 가구부문에 따라 2016년 총 가구수인 19,837,665가구에 본 연구에서 추정된 총 한계지불의사액(2,638.24원)을 곱한다. 이를 통해 계산된 남극대륙에 기록된 지구진화 연구의 비시장가치의 연간 편익은 52,336.52백만원으로 계산된다.

4. 본 연구 사업에 따른 전체 사회적 편익 계산

남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업으로 인한 연간 사회적 편익은 비시장가치 추정에 따라 52,336.52백만원이며, ‘남극 지하자원 선점 가능성 제고 편익’은 1,971백만원, ‘화산폭발에 대한 예측력 제고 편익’은 7,132백만원, ‘세계 최고 수준 연구 성과 도출과 국가위상 제고 편익’은 15,497백만원, 마지막으로 ‘미지의 세계에 대한 지적호기심 충족 편익’은 27,737백만원으로 추정되었다.

<표 I -27> 연간 본 연구 사업에 따른 사회적 편익 합계

(단위: 백만원/년)

사회적 편익 구분	추정량
남극 지하자원 선점 가능성 제고	1,971
화산폭발에 대한 예측력 제고	7,132
세계 최고 수준 연구 성과 도출로 국가위상 제고	15,497
미지의 세계에 대한 지적호기심 충족	27,737
합계	52,337

<표 1-28> 편익 연차별 흐름표(할인을 적용 前)

(단위: 백만원)

구분	남극 지하자원 선점 가능성 제고	화산폭발에 대한 예측력 제고	세계 최고 수준 연구 성과 도출로 국가위상 제고 편익	미지의 세계에 대한 지적호기심 충족	총편익
2019년	0	0	0	0	0
2020년	0	0	0	0	0
2021년	0	0	0	0	0
2022년	0	0	0	0	0
2023년	0	0	0	0	0
2024년	1,971	7,132	15,497	27,737	52,337
2025년	1,971	7,132	15,497	27,737	52,337
2026년	1,971	7,132	15,497	27,737	52,337
2027년	1,971	7,132	15,497	27,737	52,337
2028년	1,971	7,132	15,497	27,737	52,337
2029년	1,971	7,132	15,497	27,737	52,337
2030년	1,971	7,132	15,497	27,737	52,337
합계	13,797	49,924	108,479	194,159	366,359

제 II 장

공공성 평가

제1절 경제성 분석

1. 경제성 분석 지표

편익/비용 비율(B/C ratio)은 개별 대안사업별로 편익의 현재가치를 비용의 현재가치로 나눈 값이 가장 큰 대안을 선택하는 방법이다. 사업의 비용, 편익은 장시간에 걸쳐 투입되거나 발생하기 때문에 할인율을 적용하여 이를 특정기간(일반적으로 현재 연도)에 발생하는 것으로 환산하여 비교하게 되는데 이를 ‘현재가치화’라고 한다. 각 사업의 편익-비용비는 현재가치로 환산된 편익과 비용으로 나타내는 것이 일반적이며 일반적으로 편익/비용 비율이 1이상 이면 경제성이 있다고 판단한다.

$$B/C \text{ ratio} = \frac{PV \text{ of } B_t}{PV \text{ of } C_t}$$

그러나 위 식에서 보듯이 편익/비용비율(B/C ratio)은 사업의 비용 1단위당 편익이 얼마인가를 보여주는 것이므로 자연히 소규모 사업이 상대적으로 높은 편익/비용 비율을 갖게 되는 경우가 많으며 비용과 편익을 명확히 구분하기 어려울 때가 많다. 따라서 사업의 우선순위를 결정하는데 있어 편익/비용 비율기준만으로 큰 의미가 있다 할 수 없다.

순현재가치(Net Present Value: NPV)는 현재가치로 환산된 장래의 연차별 순편익의 합계에서 초기 투자비용 및 현재가치로 환산된 장래의 연차별 비용의 합계를 뺀 값을 의미한다. NPV>0이면 경제성이 있다고 판단한다.

$$\text{순현재가치}(NPV) = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

여기서, B_t : 편익의 현재가치
 C_t : 비용의 현재가치
 r : 할인율(이자율)
 n : 내구연도(분석연도)

내부수익률(Internal Rate of Return: IRR)은 편익과 비용의 합계가 동일하게 되는 수준의 현재가치 할인율을 의미한다. 즉, 어떤 사업의 순현재가치의 값을 '0'으로 하는 특정한 값의 할인율을 의미한다. 내부수익률이 시장이자율보다 높은 경우 혹은 공공사업에 대해 사회적으로 용인할 수 있는 이자율보다 높게 나타나면 그 사업은 타당성이 있다고 평가를 한다.

$$\text{내부수익률}(IRR): \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

여기서, B_t : 편익의 현재가치
 C_t : 비용의 현재가치
 r : 할인율(이자율)
 n : 내구연도(분석연도)

각 방안별 문제점을 간략하게 지적하면 우선, B/C ratio와 IRR을 사용함에 있어 애매한 경우가 다소 있다. 구체적으로 B/C ratio는 재투자 비용이 드는 사업을 평가함에 있어 재투자 비용을 비용측으로 산정할 것인지 혹은 음의 수익으로 산정할 것인지에 따라 다른 값을 가진다. 그러나 이는 일관성 있는 지침을 활용함으로써 해결할 수 있다. 또한, IRR은 사업규모가 다른 경우 IRR만으로는 우열을 가리기 힘들다는 문제가 있으며 사업간 상호 독립적이란 가정 하에 도출하는데, 만약 사업간 상호배타적인 경우, 즉 경쟁적 관계의 사업에서 다수의 IRR을 가지는 경우가 발생할 수 있는 문제점이 있다. IRR 및 B/C ratio의 문제점으로 인해 일반적으로 NPV가 우월하다고 알려져 있다. 그러나 NPV 또한 예산상 제약이 있는 경우 한계가 드러난다. 대규모사업이 소

규모사업에 비해 큰 순현재가치가 발생하게 되어 대규모사업이 통상 유리하게 평가 되는데, 예산제약으로 인해 하나의 대규모 사업과 여러 개의 소규모 사업 중 선택해야 하는 경우가 있는데, 이 경우 NPV는 올바른 평가를 수행할 수 없다. 결국 어떤 사업의 경제적 타당성의 유무판단기준으로서 어느 한 기준에 전적으로 의존하는 것은 문제가 있음을 인식해야 하며, 결론적으로 순현재가치, 내부수익률 및 편익/비용 비율 세 가지를 모두 적절하게 고려한 후 의사결정을 내리는 것이 타당하다.

2. 경제성 분석 기본 전제

가. 분석 대상기간 및 기준연도

경제성 분석은 사업 추진과 관련한 모두 비용 및 편익을 고려하여 사업추진을 위해 소요된 사회적 비용보다 더 큰 사회적 가치를 발생시킬 수 있는지를 확인하는 절차이다. 본 사업에 대한 비용-편익 분석에 앞서 다음과 같은 조건을 가정한다.

본 사업은 2017년도 상반기 공공기관 예비타당성조사로 KDI의 『예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정·보완 연구(제5판)』(한국개발연구원, 2008. 12.)에 따라 착수된 전년도말로 분석 기준연도를 설정하며, 모든 비용과 편익을 2017년도 불변가격으로 산정한다.

둘째, 편익의 발생기간은 투자완료 후 6년으로 전제한다. 즉, 『남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업』 기간인 2019~2023년(5년간)까지 연구 사업을 완료하고, 2024년부터 편익이 발생하는 것으로 분석하고 편익의 발생기간은 2024년부터 2030년까지 발생하는 것으로 분석하였다.

셋째, 현재가격은 2017년을 기준으로 사업의 비용 및 편익에 적용하고 연구사업은 그 성격상 비용이 초기에 집중 발생하는 반면, 편익은 건설 후 장기간 동안 발생하기 때문에 분석기간 동안 예상되는 비용과 편익에 사회적 할인율을 적용하여 현재가치로 환산하여 평가한다.

나. 사회적 할인율

비용과 편익의 미래 현금 흐름을 비교하기 위하여 사용되는 할인율은 자원의 기회

비용, 즉 투자 사업에 사용된 자본에 기대하는 최소수익뿐 아니라 사람에 따라 다를 수 있는 시간의 객관적인 가치를 나타낸다. 할인율 개념의 적용에 있어서는 많은 이견이 있으나 특정 건설 사업이 정부에 의해 주도되는 경우에는 사회적 할인율의 개념을 적용하고 민간자본에 의해 추진되는 경우에는 시장이자율에 근거한 재무적 할인율을 적용하는 것이 일반적이다. 사회적 할인율은 통상 시장이자율보다 낮은 수준으로 책정되는데 그 이유는 사회적 할인율을 사용하여 사업타당성을 평가하는 주체가 주로 정부이며 정부로서는 미래사업의 중요성이 더 높게 평가되어야하기 때문이다. 대부분의 국가는 투자사업의 특성에 따른 할인율을 자국의 경제성장률, 물가상승률, 경제적 잠재능력 등을 고려하여 개괄적인 방법으로 정부가 추정하여 사용하고 있는데 일반적으로 개발도상국 사회간접자본의 경우는 7~8% 이상, 선진국의 경우는 보통 5~6% 수준을 적용하고 있다. 본 연구에서는 KDI의 『예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정·보완연구(제5판)』(한국개발연구원, 2008. 12.)에 따라 4.5%의 할인율을 적용하였다.

3. 경제성 분석 결과

남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업에 따른 편익 및 비용의 현재 가치화된 현금흐름을 활용한 경제성 분석결과, B/C는 5.85이다. NPV는 214,423백만원, 내부수익률(IRR)은 0.57로 나타났다.

<표 II-1> 남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업의 경제성 분석 결과

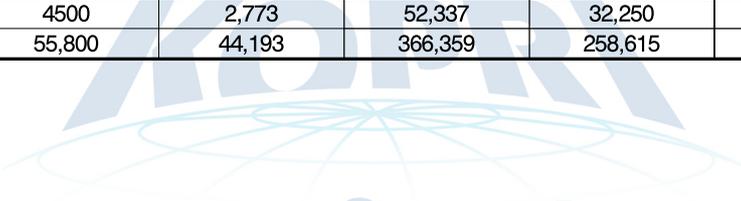
(단위: 백만원)

구분	할인편익계	할인비용계	B/C	NPV	IRR
비용편익 분석 결과	258,615	44,192	5,85	214,423	0.57

<표 II-2> 비용·편익 흐름

(단위: 백만원)

연도	비용		편익		순편익의
	총비용	현가	총편익	현가	현가
2019년	4000	4,000	0	0	-4,000
2020년	4000	3,828	0	0	-3,828
2021년	4000	3,663	0	0	-3,663
2022년	4000	3,505	0	0	-3,505
2023년	8300	6,960	0	0	-6,960
2024년	4500	3,611	52,337	41,997	38,386
2025년	4500	3,456	52,337	40,189	36,733
2026년	4500	3,307	52,337	38,458	35,152
2027년	4500	3,164	52,337	36,802	33,638
2028년	4500	3,028	52,337	35,217	32,189
2029년	4500	2,898	52,337	33,701	30,803
2030년	4500	2,773	52,337	32,250	29,477
합계	55,800	44,193	366,359	258,615	214,423



극지연구소

제2절 민감도 분석

1. 민감도 분석의 필요성

민감도 분석(Sensitivity Analysis)이란 공공투자사업에서 불확실한 외생요인의 변화가 건축사업의 경제성에 어떤 영향을 미치는가를 검토하는 것을 의미한다. 이러한 요인들로는 할인율의 변화, 공사비의 증감, 편익의 증감 등이 있다. 본 분석에서는 사회적 할인율을 4.5%로 가정하여 경제성 분석을 수행하였다. 할인율은 미래의 비용과 편익을 현재가치로 환산하는데 사용하는 이자율로써, 할인율의 변화는 본 과업의 경제적 타당성을 변화시킬 수 있기 때문에 할인율 변화에 따른 민감도 분석을 수행할 필요가 있다.

2. 민감도 분석의 결과

분석된 결과를 바탕으로 할인율, 비용, 편익의 변화에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 할인율의 변화는 4.5%를 기준으로 $\pm 1\%$ 를 상하 2개씩 적용하여 총 5개에 대하여 민감도 분석을 수행하였으며, 비용과 편익의 변화를 $-10\% \sim +10\%$ 로 설정하여 분석을 하였다.

우선 할인율 변화에 따른 민감도 분석에 있어서는 편익비용비율(B/C ratio)이 1 이상으로 분석되어 경제적 타당성을 확보되는 것으로 분석되었다.

또한 비용과 편익의 변화에 따른 민감도 분석에 있어서는 검토안과 대안 모두에서 편익비용비율(B/C ratio)이 1이상으로 분석되어 경제적 타당성을 확보되는 것으로 분석되었다.

이러한 결과는 앞서 평가한 남극대륙에 기록된 지구진화 연구 사업의 결과와 일관성이 유지되고 있는 점을 감안했을 때 할인율의 변화나 비용과 편익의 변화에 따라 본래 경제성평가 결과가 변하지 않는 것을 확인할 수 있다.

<표 II-3> 할인율 변화에 따른 민감도 분석

구분	B/C	NPV(백만원)
2.5%	6.17	252,223
3.5%	6.01	232,456
4.5%	5.85	214,423
5.5%	5.70	197,953
6.5%	5.55	182,893

<표 II-4> 비용 변화에 따른 민감도 분석

구분	B/C	NPV(백만원)
-20%	7.32	223,261
-10%	6.50	218,842
0%	5.85	214,423
+10%	8.32	210,004
+20%	4.88	205,585

<표 II-5> 편익 변화에 따른 민감도 분석

구분	B/C	NPV(백만원)
-20%	4.68	162,700
-10%	5.27	188,562
0%	5.85	214,423
+10%	6.44	240,285
+20%	7.02	266,146

참고문헌

- Adamowicz, W., J. Louviere, and M. Williams, "Combining Revealed and Stated Preference Methods for Valuing Environmental Amenities", *Journal of Environmental and Economics Management*, 26, 1994, pp.271-292.
- Bergstrom, J. C., H.K Cordell, G.A Ashley, A.E Watson, "Economic Impacts of Recreational Spending on Rural Areas: A Case Study", *Economic Development Quarterly*, 4 (1) 1990, pp. 29-39
- Bille, T., "A Contingent Valuation Study of the Royal Theatre in Copenhagen", in Navrud, S. and R. C. Ready (eds.) *Valuing Cultural Heritage*, Edward Elgar, 1998, pp.200-237.
- Bravi, M., R. Scarpa and G. Sirchia, "Valuing Cultural Services in Italian Museums: a Contingent Valuation Study", in Navrud, S. and R. C. Ready (eds.) *Valuing Cultural Heritage*, Edward Elgar, 1998, pp.184-199.
- Brookshire, D.S, Mark A. Thayer, William D. Schulze and Ralph C. d'Arge, "Valuing Public goods: A Comparison of survey and Hedonic Approaches" *The American Economic Review*, Vol. 72, 1982, pp. 165-177,
- EC, "ExternE Externalities of Energy". Volume 8. Global Warming. Published by the European Commission, 1999, EUR18836
- Freeman, A, M, III, "On Estimating air pollution control benefits from land value studies", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol 1k 1974, pp. 74-83
- Hanemann, W. M., "Welfare Evaluations in Contingent Valuation Experiments with Discrete Responses," *American Journal of Agricultural Economics*, 66, 1984, pp. 332-341.
- Hanley, N. D. and R. J. Ruffell, 'The Valuation of Forest Characteristics', Working paper 849, Institute for Economic Research, 1992, Queen's University, Kingston, Canada
- Hensher, D. "Stated Preference Analysis of Travel Choices: The State of the Practice," *Transportation*, 21, 1994, pp.107-133.
- Holland, M and Watkiss, P, *Benefits Table database: Estimates of the marginal external costs of air pollution in Europe*, 2002, netcen.
- Hopkinson P. G., Nash C. A. and Sheehy N. "How Much Do People Value the Environment?," *Transportation*, 19, 1992, pp.97-115.
- Johnson, F. R. and W. H. Desvousges, 1997, *Estimating Stated Preferences with Rated-pair Data:*

- Environmental, Health, and Employment Effects of Energy Programs, *Journal of Environmental Economics and Management*, 34, 1997, pp.79-99.
- Kwak, S. J., Lee K. - P . and Chun . Y. , “Estimation of the Benefit of Air Quality Improvement: An Application of Hedonic Price Technique in Seoul”, *The Economics of Pollution Control in the Asia Pacific*, 8, Edward Elgar(UK), 1996, pp. 171- 181
- Lancaste, K. J. “A new Approach to Consumer Theory”, *The journal of Political Economy*, Vol. 74, 1966 No. 2, pp.132-157
- Lew, D. K. and D. M. Larson, "Valuing Recreation and Amenities at San Diego County Beaches", *Coastal Management*, 33, 2005, pp.71-86.
- Machado, F. S. and S. Mourato, "Evaluating the Multiple Benefits of Marine Water Quality Improvements: How Important Are Health Risk Reductions?", *Journal of Environmental Management*, 65, 2002, pp.239-250.
- Mackenzie, J., “A Comparison of Contingent Preference Models”, *American Journal of Agricultural Economics*, 75, 1993, pp.593-603.
- Mohamed, A. M and El Bassouni K. M, “Externalities of fugitive dust, *Environ Monit Assess*, 130(1-3) 83-98. 2007
- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce., “Natural Resource Damage Assessments Under the Oil Pollution Act of 1990”, *Federal Register*, 58(10), 1993, pp.4601-4614.
- Pearman A., “The Use of Stated Preference Methods in the Evaluation of Environmental Change,” in Pething R.(eds.), *Valuing the Environment: Methodological and Measurement Issues*, Kluwer Academic Publishers, 1994.
- Rollins, K. and Lyke, A., “The Case for Diminishing Marginal Existence Values”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 36(3), 1998, pp. 324- 344.
- Rosen, S, “Hedonic prices and Implicit Market: Product Differentiation in Pure Competition”, *The journal of political Economy*, Vol. 82, Issue 1, 1974, pp. 34-55
- Santagata. W, "Contingent Valuation of a Cultural Public Good and Policy Design: The Case of Napoli Musei Aperti", *Journal of Cultural Economics*, 24(3), 2000, pp. 181-204.
- Willis, K. G, and Benson, J. F. “ Valuing Informal Recreation on the Forestry Commission Estate, *Forestry Commission Bulletin*, 104, 1988
- Willis. K. G. and Garrod, G. D., “Valuing Landscape: a Contingent Valuation Approach”, *Journal of Environmental Management*, 37(1), 1993, pp.1- 22.
- 기획재정부, 「2011년도 공기업·준정부기관 예산편성지침」, 2011.

김광임, “쓰레기 매립장 기피의사 추정 : 수도권 매립장의 사례”, 자원경제학회지, 제5권, 제2호, 1996, pp. 303- 315

농림축산식품부(2014) 2013년 농수산물도매시장 통계연보

이성태·이명현, “대구 팔공산 자연공원의 편익가치 측정- 여행비용접근법을 통하여- ”, 1998년도 한국환경경제학회 정기학술대회 논문집, 1998, pp. 55- 78.

임영식·전영섭, “헤도닉가격기법을 이용한 대기질 개선시의 편익추정”, 자원경제학회지, 제3권, 제1호, 1993pp. 81- 105.

통계청 국가통계포털, <http://www.kosis.kr/>

한국개발연구원, 『예비타당성조사 조사를 위한 CVM 분석지침 개선 연구』, 2012.



부록 1

설명 및 보기 카드



1. 남극대륙 지질연구란?

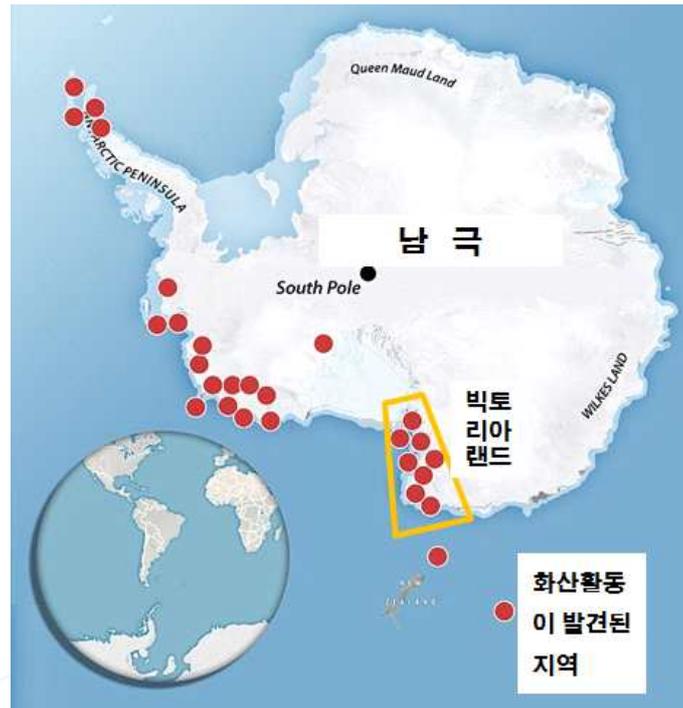
■ 남극의 현황

- 남극의 면적은 천4백만 제곱킬로미터(한반도 전체 면적의 60배)
- 남극대륙의 99%는 일년 내내 얼음에 덮여있고, 평균 고도는 2,300미터
- 얼음의 평균 두께는 2천 미터 이상
- 영하 40도 아래의 혹한, 초속 40미터의 강풍.

■ ‘남극대륙의 지질연구’란 남극 장보고기지 주변 빅토리아랜드의 화산활동과 지구내부 물질을 연구하여 남극대륙에 기록된 지구의 진화를 규명하는 연구임.

- 장보고기지 주변 활화산 모니터링
 - 활화산 자료 조사
 - 화산 아래 지질 연구를 통해 연대측정
 - 한국의 백두산 폭발에 대한 예측력 높임.
- 화산활동 기록을 통한 지질의 진화 복원
 - 신생대, 중생대 화산활동 분석 및 과거 지질시대 환경 복원
 - 지질 및 암석 연구를 통해 국내 지질 연구에 활용
- 지구의 기원 탐구
 - 운석과 해성 시료를 통해 지구의 기원 연구
 - 지구 지각 구조 및 진화 연구
 - 우주개척 기초자료 확보 및 극한 환경 실험 가능.

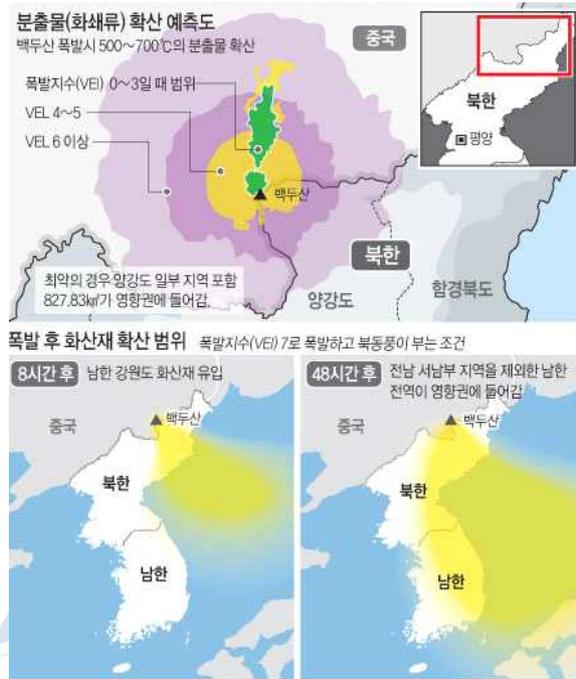
[그림 1] 대상연구지역



2. 남극대륙 지질연구를 통해 얻는 사회적 편익

- ▣ 남극 장보고기지 주변 빅토리아랜드의 활화산활동 모니터링 자료 수집 및 분석을 통한 한국의 지질 분석 및 백두산 화산폭발에 대한 예측력 제고
 - 남극 화산분화 물질 및 지형 변화에 대한 분석을 통해 한반도 백두산의 화산폭발에 대한 연구 기반 마련 및 예측력 제고
 - 행정안전부(2015)에 따르면, 백두산 화산이 폭발할 경우 남한에 최대 11조 1천 900 억원의 피해가 발생할 것을 추정함.

[그림 2] 백두산 화산폭발 예측 결과



▣ 남극 지질관련 연구 영토를 넓힘으로써 향후 남극에 매장된 희귀한 지하자원 선점의 가능성을 높일 수 있음.

- 남극은 북극과 달리 대륙이며, 남극 대륙에는 여러 가치가 높은 지하자원들이 많이 매장되어 있음. 그러나 현재는 남극조약(1959년)으로 인해 남극에 매장된 자원에 대한 개별국가의 개발·거래가 불가능
- 향후 국제관계 변화에 따라 남극의 지하자원 개발이 가능할 경우, 남극대륙의 지질에 관한 지속적인 연구와 성과를 도출한 국가가 자원에 대한 접근성이 높아질 가능성이 있음.
- 현재 파악된 남극에 매장된 천연자원은 석유, 철, 구리 등이 백년 이상 사용할 수 있는 양임.
- 이러한 이유에서 세계 각국에서는 남극에 과학기지 건설(80여 개)과 지질 개발에 높은 관심을 보임.(기지개수: 아르헨티나(6개), 러시아(5개), 칠레(4개), 미국(3개), 한국(2개))

▣ 남극의 지질 연구 및 지구 기원 탐사분야에서 세계 최고·최초의 연구성과를 도출하여 학문적 성과와 더불어 한국의 국가적 위상을 제고할 수 있음.

- 세계 최초의 연구 성과를 현재의 1건에서 3건까지 확대할 수 있음
- 남극 지질연구분야 최고의 연구 성과 도출을 통해 얻어진 학문적 성과를 다른 국가 및 연구기관과 공유하며, 공동연구에 활용될 수 있음

▣ 인간의 미지의 세계에 대한 지적호기심을 충족시켜주고 교육적 자료로 활용도가 높음.

- 남극 빙하 밑의 지질에 대한 탐사 등 인간의 미지의 세계에 대한 지적호기심을 충족시켜줌
- 운석 등의 분석을 통해 태초의 우주·지구·생명의 기원을 밝히는 지적호기심을 충족시켜줌
- 초등학교로부터 전문영역에 이르기까지 남극 및 지구 기원 분야의 교육적 자료로 활용 가능함.



부록 2



110-054 서울시 종로구 사직동 208 전화 (02. 3702-2100, 팩스 (02. 3702-2121, 한국갤럽 홈페이지 www.gallup.co.kr,
한국갤럽 GALLUP KOREA

affiliated with GALLUP INTERNATIONAL

Gallup 0000-000-000

극지빙상·해수면 변동관측 및 예측 연구의 경제적 가치에 대한 설문조사

안녕하십니까? 여론조사 전문기관 “한국갤럽조사연구소”입니다.

이번에 저희는 『극지연구소』의 의뢰를 받아 대한민국 국민을 대상으로 ‘극지빙상·해수면 변동 관측 및 예측 연구’의 경제적 가치에 대한 인식을 조사하고 있습니다. 조사 결과는 남극 빙상 녹아내림과 해수면 상승 간의 관계 규명과 남극 빙상 변화 분석기술 향상을 위한 정책 자료로 활용됩니다. 응답 내용은 통계 분석에만 사용되고 통계법 33조에 따라 절대 비밀이 보장됩니다. 바쁘시더라도 잠시만 시간을 내 주시면 감사하겠습니다.

아래 질문 내용 중 하나를 선택해 주시기 바랍니다.

- 문1)** 귀하는 한국이 남극에 장보고 기지를 설치하고 남극의 지질과 남극 운석 등 다양한 남극 연구를 하고 있다는 것을 알고 계신가요?
1. 구체적인 내용까지 잘 알고 있다.
 2. 대략적인 내용 정도 알고 있다.
 3. 들어본 적은 있으나 내용은 잘 모르고 있다.
 4. 전혀 모르는 내용이다.
- 문2)** 귀하는 남극의 지질과 운석 연구가 미지의 세계(남극 얼음 밑 땅, 과거 따듯했던 남극의 모습, 운석 분석을 통한 다른 행성의 물질연구, 생명과 물의 기원 등)에 대한 인류의 근본적인 지적호기심을 충족시킬 수 있다고 생각하십니까?
1. 매우 그렇다
 2. 그런 편이다.
 3. 별로 그렇지 않다.
 4. 전혀 그렇지 않다.
- 문3)** 귀하는 남극의 지질과 운석 연구에서 얻은 과학적 연구 성과가 한국을 포함한

전세계 어린이로부터 전문영역까지 남극 및 지구 기원 부분에서 교육적 자료로 가치가 있을 것이라고 생각하십니까?

1. 매우 그렇다
2. 그런 편이다.
3. 별로 그렇지 않다.
4. 전혀 그렇지 않다.

문 4) 귀하는 한국이 남극의 지질과 운석연구를 통해 세계 최고의 또는 최초의 학문적 연구성과를 도출한다면 한국의 국가 위상을 높이는데 기여할 수 있을 것이라고 생각하십니까?

1. 매우 그렇다
2. 그런 편이다.
3. 별로 그렇지 않다.
4. 전혀 그렇지 않다.

문 5) 귀하는 한국이 남극의 지질연구를 통해 향후 남극에 매장된 희귀한 지하자원을 선점할 가능성을 높이는 것이 어느 정도 중요하다고 판단되시나요?

1. 매우 중요하다.
2. 중요한 편이다.
3. 다른 것들과 비교해서 별로 중요하진 않다.
4. 전혀 중요하지 않다.

문 6) 귀하는 한국이 남극의 활화산활동 모니터링 자료를 활용하여 백두산에서 발생할 수 있는 화산폭발 가능성의 예측력을 높이는 것이 어느 정도 중요하다고 판단되시나요?

1. 매우 중요하다.
2. 중요한 편이다.
3. 다른 것들과 비교해서 별로 중요하진 않다.
4. 전혀 중요하지 않다.

남극대륙 지질연구 효과에 대한 의견

문7~문10은 『남극대륙 지질연구』를 추진할 경우 기대되는 효과와 사업 추진을 위해 구당 지불해야 할 지방세 정도를 나타내고 있습니다. 조건을 고려하시어 A, B 중 귀하가 선호하는 유형을 선택해 주십시오. 현재 상태에 만족하시면 C를 선택하시면 됩니다.

문 7) 귀하는 A, B 중 어떤 것을 선호하십니까? 현재 상태에 만족하신다면 C를 선택해 주십시오.

특성	① A	② B	③ C(현재)
1) 남극 지하자원 선점 가능성 높임	20% 높임	10% 높임	0% 높임
2) 화산폭발에 대한 예측력 제고	5% 높임	10% 높임	0% 높임
3) 세계최초 연구 성과 도출로 국가 위상 제고	연구 성과 3건	연구 성과 1건	없음
4) 미지의 세계에 대한 지적호기심 충족	많이 충족	약간 충족	없음
5) 가구당 소득세 신설을 통한 매년 부담액	10,000원	4,000원	0원
선택[√]	[]	[]	[]

문 8) 귀하는 A, B 중 어떤 것을 선호하십니까? 현재 상태에 만족하신다면 C를 선택해 주십시오.

특성	① A	② B	③ C(현재)
1) 남극 지하자원 선점 가능성 높임	10% 높임	20% 높임	0% 높임
2) 화산폭발에 대한 예측력 제고	5% 높임	10% 높임	0% 높임
3) 세계최초 연구 성과 도출로 국가 위상 제고	연구 성과 3건	연구 성과 1건	없음
4) 미지의 세계에 대한 지적호기심 충족	약간 충족	많이 충족	없음
5) 가구당 소득세 신설을 통한 매년 부담액	2,000원	6,000원	0원
선택[√]	[]	[]	[]

문 9) 귀하는 A, B 중 어떤 것을 선호하십니까? 현재 상태에 만족하신다면 C를 선택해 주십시오.

특성	① A	② B	③ C(현재)
1) 남극 지하자원 선정 가능성 높임	10% 높임	20% 높임	0% 높임
2) 화산폭발에 대한 예측력 제고	5% 높임	10% 높임	0% 높임
3) 세계최초 연구 성과 도출로 국가 위상 제고	연구 성과 3건	연구 성과 1건	없음
4) 미지의 세계에 대한 지적호기심 충족	많이 충족	약간 충족	없음
5) 가구당 소득세 신설을 통한 매년 부담액	6,000원	8,000원	0원
선택 [√]	[]	[]	[]

문 10) 귀하는 A, B 중 어떤 것을 선호하십니까? 현재 상태에 만족하신다면 C를 선택해 주십시오.

특성	① A	② B	③ C(현재)
1) 남극 지하자원 선정 가능성 높임	10% 높임	20% 높임	0% 높임
2) 화산폭발에 대한 예측력 제고	5% 높임	10% 높임	0% 높임
3) 세계최초 연구 성과 도출로 국가 위상 제고	세계최초 연구 성과 1건	세계최초 연구 성과 3건	없음
4) 미지의 세계에 대한 지적호기심 충족	많이 충족	약간 충족	충족 못함
5) 가구당 소득세 신설을 통한 매년 부담액	10,000원	6,000원	0원
선택 [√]	[]	[]	[]

통계적 분류를 위한 질문

문1) 귀하께서는 소득의 일정부분을 사회기부 형태로 지출하고 계십니까?

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

KOPRI
극지연구소