



No.2 (제 2호)

Polar Brief

제2호 2015년 6월 30일 | 발행 : 극지연구소 미래전략실

(406-840) 인천광역시 연수구 송도미로로 26 | Tel. 032-770-8400 | www.kopri.re.kr

Snapshot



○ 영국남극조사소(BAS)의 어제와 오늘, 그리고 미래 (김유하 / 극지연구소 미래전략실) 2면

영국남극조사소(British Antarctic Survey)는 영국의 극지연구 전문기관이다. 영국은 과거 남극탐험의 시대에서부터 현재 극지과학 연구 분야에서까지 극지 선진국의 자리를 빼앗기지 않았다. BAS는 이러한 영국 극지역사의 산 증인과 같은 기관이다. BAS의 어제와 오늘, 그리고 미래를 살펴봄으로서 우리나라 극지연구의 방향성 설정에 참고할 만한 핵심 요소를 정리해 본다.

○ 미국의 북극정책 역사와 시사점 (서현교 / 극지연구소 미래전략실) 7면

미국 오바마 정부는 북극 국가전략(2013) 및 실행계획(2014), 실행 결과보고서(2015)를 발표하며, 정책 추진체계의 완성을 이뤄냈다. 또한 現 북극이사회 의장국 미국은 북극 국가전략 중 일정 부분을 북극이사회 의장국 과제로 제시하여 정책의 일관성을 꾀하였다. 더욱이 북극 국가전략 중 기후변화 및 환경·생태계 보호, SAR(Search and Rescue) 등 국제협력이 필요한 정책을 의장국 과제로 제시함으로써 국제사회와 협력하여 동 정책들을 달성하겠다는 의지를 표명했다.

○ 남극 중앙해령(Circum-Antarctic Ridges): 남극 연구의 뉴 프런티어 (박송현 / 극지연구소 극지지구시스템연구부) 12면

남극 중앙해령은 남극 대륙을 둘러싸고 있는 해저 화산산맥으로서 지구의 기후 변화를 기록하고 있으며 열수 분출을 통해 해수의 조성에 영향을 미치고 있다. 남극 중앙해령 주변에는 열수 생태계가 조성되어 있고, 이곳에서 형성된 암석에는 남극의 진화를 이해할 수 있는 다양한 정보들이 담겨있다. 다양한 학문의 다학제적 연계가 가능한 남극 중앙해령 연구는 남극 연구의 새 지평을 열어줄 것으로 예상된다.





영국남극조사소(BAS)의 어제와 오늘, 그리고 미래

김 유 하 (극지연구소 미래전략실)

I. 머리말

영국의 남극 역사는 인류의 남극 역사와 궤를 같이한다. 18세기 남극의 존재를 가장 먼저 발견한 제임스 쿡 선장의 항해에서부터, 20세기 초 스콧(Robert Falcon Scott, 1868~1912), 섀클턴(Sir Ernest Shackleton, 1874~1922)이 남극 탐사를 나섰던 ‘영웅의 시대(heroic age)’를 거쳐, 남극조약 체결(1961) 이후 본격적인 남극 과학연구까지 영국, 그리고 영국남극조사소(British Antarctic Survey, 이하 BAS)는 언제나 누구보다 앞서 시대를 선도해왔다.

최근 미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration)는 파괴된 오존층인 오존 구멍(Ozone Hole)이 점차 작아져 2040년경에는 실질적으로 큰 문제가 되지 않을 것이라는 연구 결과를 발표해 화제를 낳았다.¹⁾ 오존 구멍의 존재는 1980년대 밝혀져 무분별한 산업발전이 인류와 지구 생명체의 건강을 위협할 수 있다는 경각심을 일깨워주었으며 누구나 알고 있는 과학상식 중 하나로 자리 잡았다. 그러나 이 오존 구멍을 처음 발견하고 세상에 알린 사람들이 바로 남극의 고층대기를 연구하던 BAS 소속 과학자들이었다는 것을 아는 사람은 많지 않다. 이렇듯 BAS는 오랜 남극 탐험의 역사와 전통을 바탕으로 고층대기 분야와 남극 대륙기반 연구 분야 등에서 세계 최고 수준의 연구 성과를 내는 명실상부한 글로벌 극지연구 선도기관으로 자리매김하고 있다. BAS는 이에 만족하지 않고 연구 영역을 확장하고 인프라를 확충하며, 미래 극지연구를 선도하기 위한 혁신을 추구하고

있다. 지난 30년간 극지연구의 기초체력을 다진 우리나라의 입장에서 BAS의 어제와 오늘, 그리고 미래는 우리나라 극지연구가 나아가야 할 방향을 잡는데 큰 도움이 될 것이다.

II. BAS의 어제: 유구한 역사와 전통²⁾

전술한대로 영국은 남극 탐험 및 조사, 과학연구에 가장 먼저 뛰어든 국가이다. 20세기 초 스콧, 섀클턴, 그리고 노르웨이의 아문센(Roald E. G. Amundsen, 1872~1928)이 활약했던 ‘영웅의 시대’를 지나 남극의 전체 지도가 그려지고 탐험이 완료되면서 남극은 남극권 국가 및 열강들의 영유권 주장이 벌어지는 각축장이 되었다.

제2차 세계대전이 한창이던 1943년, 영국은 남극해에서 적국의 전파 교신을 방해하고 포클랜드 군도(Falkland Islands)에서의 영유권 강화 등을 목적으로 ‘타바린 작전(Operation Tabarin)’이라는 비밀 군사작전을 시작한다. 이 작전의 일환으로 남극해 주변에 3개의 기지(base)를 설치하게 되고 과학연구 조사도 함께 병행한다. 제2차 세계대전 종전 후 1945년 7월 영국은 포클랜드 지사의 관할 하에 ‘포클랜드 군도 식민조사국(Falkland Island Dependencies Surveys, 이하 FIDS)’을 설립한다. 이후 FIDS는 1950~60년대 남극대륙 미탐험 지대 탐사, 국제공동연구 주도, 빙봉 위 과학기지 건설(Halley, 1961) 등 눈부신 성과를 이루었다.

1) NASA Goddard Space Flight Center, Big Ozone Holes Headed For Extinction By 2040, at <https://www.youtube.com/watch?v=7bWQQWwJymc>.

2) See British Antarctic Survey, *British Antarctic Survey History*, (NERC, 2012), pp. 1~20.

1961년 남극조약 체결 후 영국은 기존 영유권 확보 전략에서 과학연구 강화로 남극전략을 수정하고 FIDS 역시 BAS로 개편한 후 본부도 포클랜드 군도에서 수도 런던으로 이전하였다. 1965년 자연환경연구위원회(Natural Environmental Research Council, NERC)가 설립되고 1967년 BAS는 NERC의 산하기관으로 편입된 이후 지금까지 NERC의 관할하에 있다. 이후 오존 구멍의 발견(1985)을 비롯해 고층대기, 기후변화 부문 및 빙권, 해양, 그리고 남극대륙 기반 연구 부문에서 세계 최고 수준의 연구 성과를 창출하고 있다.

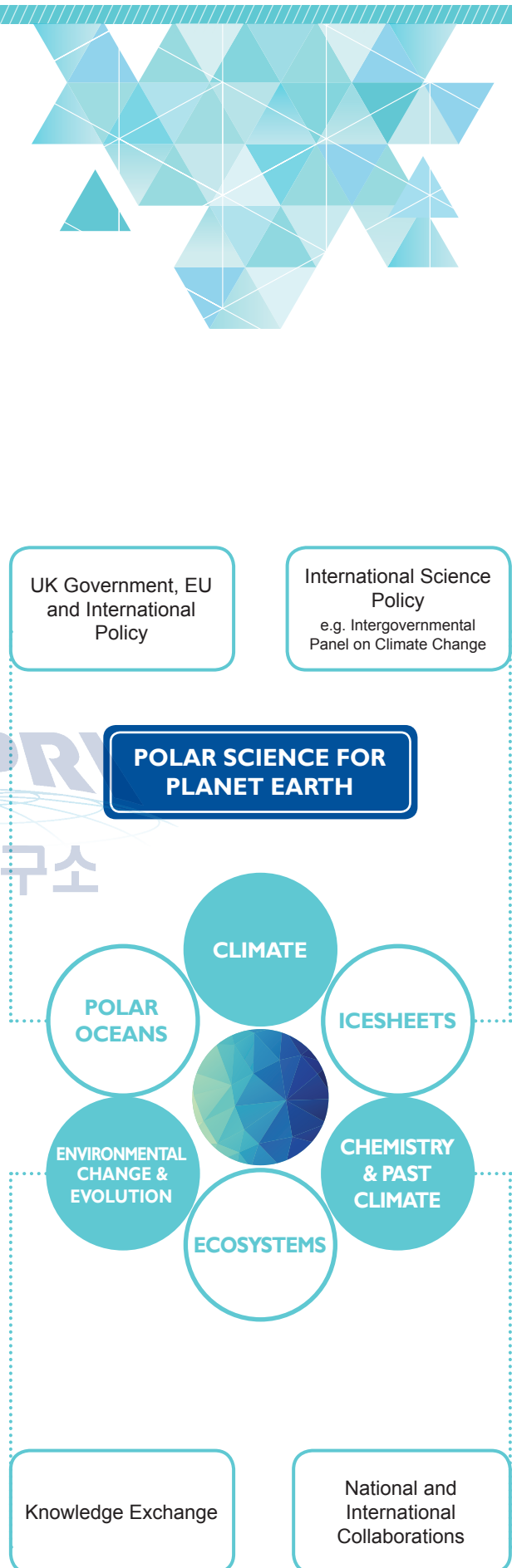
III. BAS의 오늘: 세계 최고 수준의 극지연구 기관을 지향한다.

BAS는 크게 두 축으로 이루어져있다. 한 축은 과학연구프로그램(Science Programmes)이며 다른 한 축은 운영 및 관리(Operation & Management)이다. 과학연구프로그램은 '행성 지구를 위한 극지 과학(Polar Science for Planet Earth, 이하 PSPE)'³⁾이라는 연구전략 하에 운영된다. PSPE는 크게 기후(Climate), 빙하(Icesheet), 화학 및 고기후(Chemistry & Past Climate), 생태계(Ecosystems), 환경변화와 진화(Environmental Change & Evolution), 그리고 극지해양(Polar Oceans)라는 6대 분야로 구분되어 있다. 6대 분야 및 환경적 요소에 대해서는 <그림 1>에 잘 요약되어 있다.⁴⁾

6대 분야는 서로 유기적인 연관성을 맺고 있으며 영국 및 EU, 그리고 국제적 정책에 부합할 수 있는 방향으로 연구 주제를 설정한다. 또한 국제 과학계의 정책(예: 기후변화에 관한 정부간 패널) 역시 연구 수행의 중요한 변수로 작용하며, 국내·외 연구 협력 및 지식의 교환을 통해 연구의 성과를 극대화 하는데 주력하고 있다.

3) PSPE의 Planet Earth라는 표현에 주목할 필요가 있다. 굳이 Planet Earth라는 표현을 쓴 것은 BAS의 극지연구가 극지 자체에 한정되어 있지 않고 우주, 천문, 고층대기 등 보다 광범위한 범위에서 수행되며, 극지연구를 통해 전 지구적 문제 해결에 나선다는 의지가 드러난 것으로 해석할 수 있다.

4) British Antarctic Survey, *Polar Science for Planet Earth*, (NERC, 2009), p. 2.

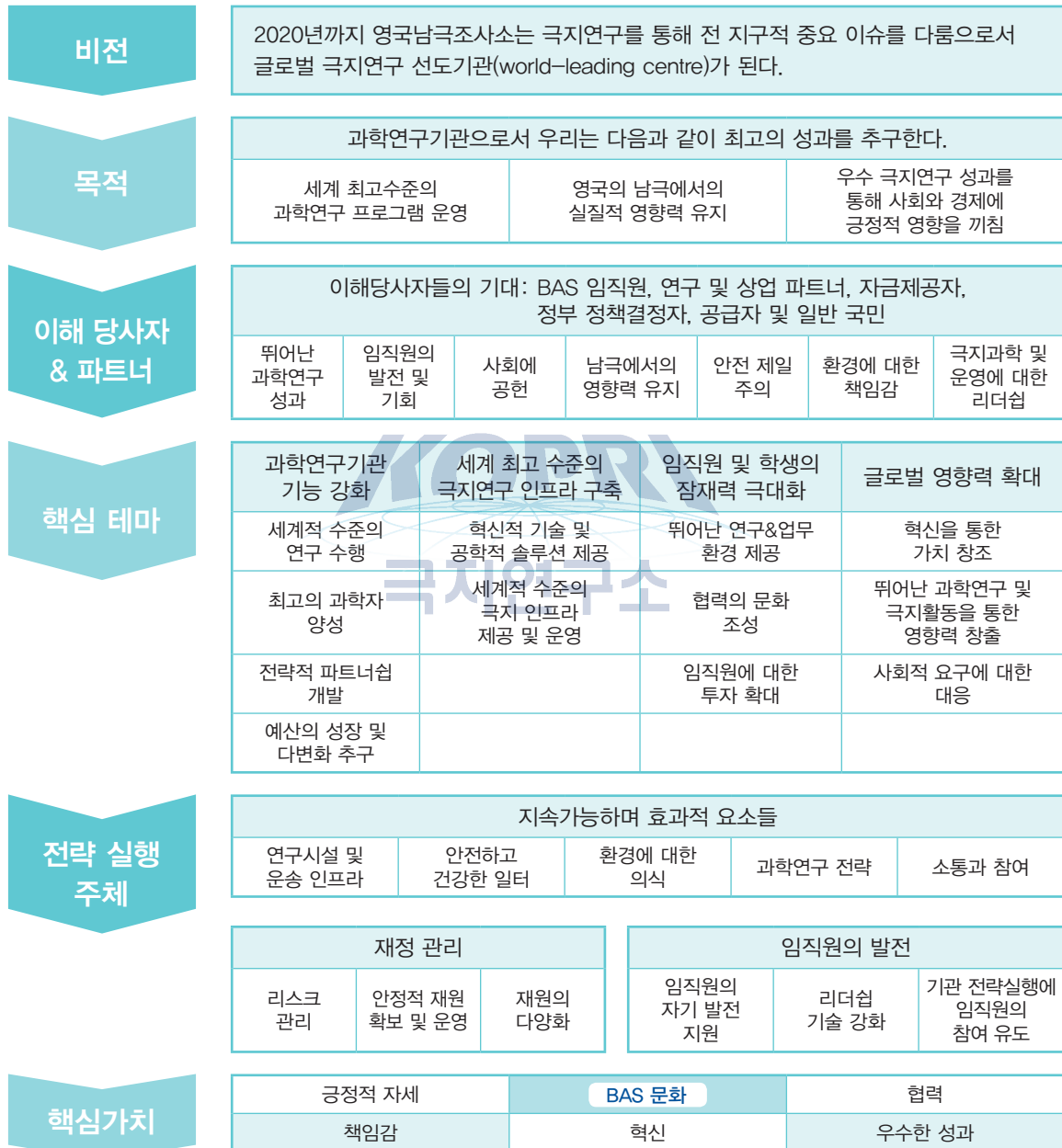


<그림 1> PSPE의 6대 분야 및 환경요소

기관의 운영 및 관리 부문에서는 매우 체계적인 비전과 전략 체계를 바탕으로 단기, 중기, 그리고 장기 목표에 대해 체계적으로 관리·추진하고 있다.

〈표 1〉에서와 같이 BAS의 비전 및 전략체계⁵⁾는 핵심가치부터 비전까지 각각의 항목들이 일관성을 갖추고 있으며, 무엇보다도

보다도 임직원의 가치와 중요성을 강조하고 투자를 아끼지 않겠다는 의지를 피력하고 있다. 또한 Business Plan이라는 제목에 걸맞게 이해당사자와 파트너에 대한 세밀한 분석을 통해 다양한 고객⁶⁾이 BAS로부터 무엇을 원하는지 파악하고 있다.



〈표 1〉 BAS의 비전 및 전략체계

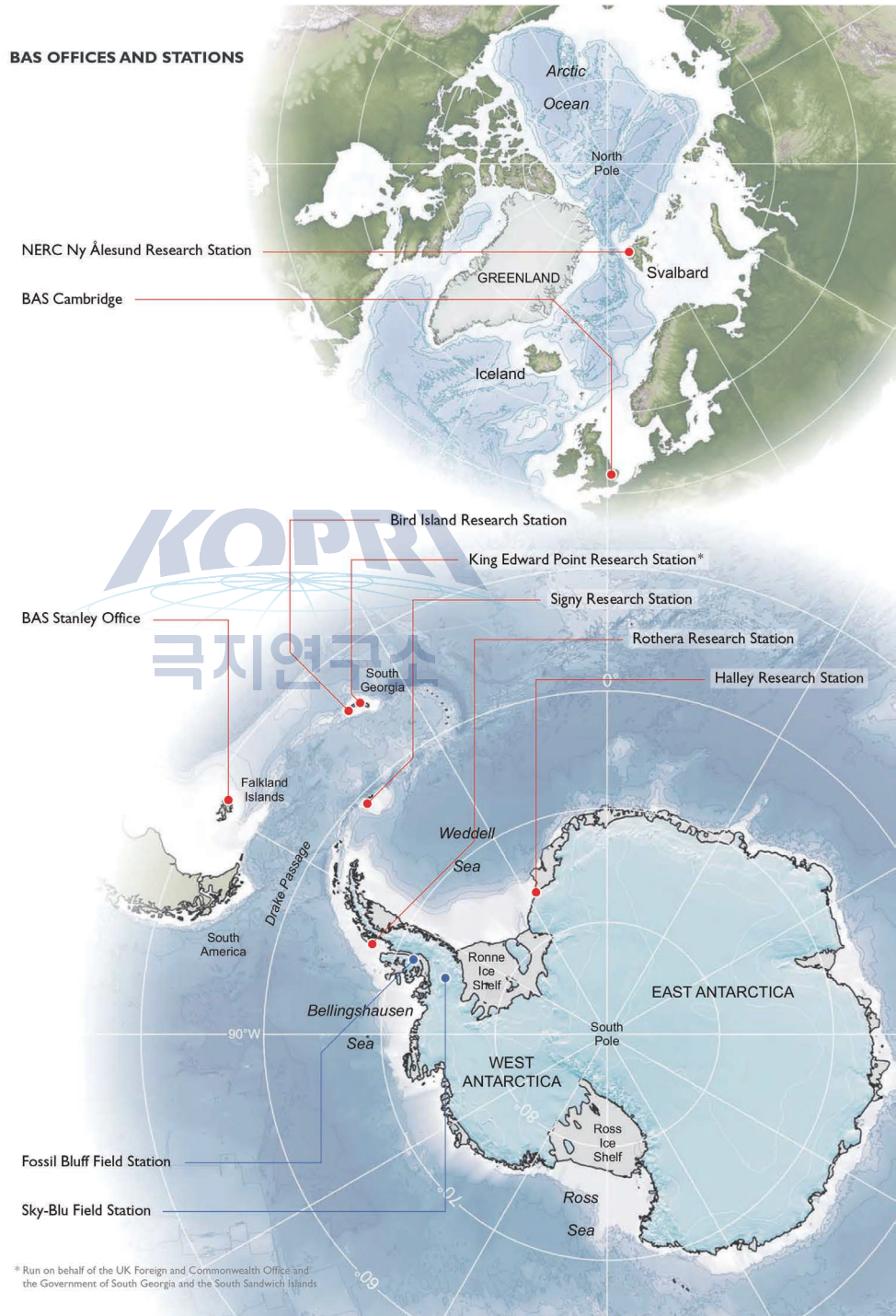
Above : BAS strategy summary. **Cover** : Rothera Research Station, Adelaide Island, Antarctic Peninsula.

i For more information, please visit our website : www.antarctica.ac.uk

5) British Antarctic Survey, *Business Plan 2014*. (NERC, 2014), p. 2.

6) 이해당사자(고객)의 맨 앞에 BAS 임직원이 자리하고 있다는 것이 눈길을 끈다.

BAS는 450여명의 임직원이 연간 약 5천만 파운드(약 900억원)의 예산을 사용하며 3개의 남극 과학기지, 2대의 쇄빙연구선(RRS James Clark Ross, RRS Ernest Shackleton), 그리고 5대의 비행기를 운영하는 대형 연구기관이다. BAS는 매년 350명이 넘는 인원을 극지로 보내며 과학인프라 관리와 운송(logistics)의 노하우를 축적하였다. BAS의 본부, 과학기지 및 인프라는 <그림 2>에 잘 요약되어 있다.⁷⁾



<그림 2> BAS의 본부 및 과학기지

7) British Antarctic Survey, *supra* note 5, p. 21.

IV. BAS의 미래: 연구 영역의 확장, 그리고 끊임없는 혁신

BAS는 앞서 소개한 기관의 비전과 목적을 달성하기 위해 단기와 중·장기 목표 및 전략을 수립하였다.

먼저 단기(1~2년)적으로는 지난 2009년 수립된 PSPE를 체계적으로 추진하되, 상위기관인 NERC와의 협의를 거쳐 수정·보완하는 계획을 가지고 있다. 수정·보완의 핵심은 북극에서의 연구 활동 강화이다. BAS는 그동안 남극에서의 연구 및 활동에 강점을 보였지만 상대적으로 북극에서의 존재감은 미약했다. 최근 전 지구적 기후변화의 영향으로 북극의 중요성이 부각되면서 BAS 역시 연구 영역을 북극으로 적극 확장하고자 한다. 이를 위하여 현재 운영 중인 두 척의 쇄빙연구선을 개선하는 작업을 추진하고 있으며, 케임브리지 대학과 공동으로 운영 예정인 혁신 센터(Innovation Centre) 역시 이 같은 연구 영역의 확장에 주력할 예정이다.

중기(2~5년)적으로 BAS는 예산의 다각화를 추진하고 있다. 특히 민간(Commercial) 부문에서의 펀딩을 통해 안정적 기관 운영을 도모하고자 한다. 또한 2019~20년 건조 완료로 목표로 약 13,000톤 규모의 제3 쇄빙연구선 건조를 추진 중이며 현재 모델링 및 설계 작업이 진행 중이다. 이 역시 BAS의 북극 연구 강화 움직임과 무관치 않다. 세계적 경기 침체에도 불구하고 영국은 극지의 미래를 위한 투자에 아낌없이 나서고 있는 모양새다.



〈그림 3〉 BAS의 제3 쇄빙연구선 모식도

장기(5~10년)적으로는 NERC 및 EU의 의지에 맞추어 북극 연구 강화에 집중하는 전략을 세웠다. 더불어 지엽적인 연구

주제보다는 전 지구적 규모의 대형 연구에 집중하며 노후화된 과학기지의 장기적 수선도 주요 장기 목표 중 하나이다.⁹⁾

V. 맺음말

영국과 우리나라의 극지연구 환경은 유사점이 많다. 두 국가 모두 남극 연구의 역사가 훨씬 더 길고 비교적 최근 북극까지 연구영역을 확장하는 전략을 취하고 있다. 연구기관의 거버넌스 역시 영국은 정부기관인 NERC, 우리나라는 해양수산부를 비롯한 정부 부처의 관할 하에 있다는 점에서 유사하다. 두 국가 모두 쇄빙연구선을 적극 활용하여 연구를 수행하고, BAS의 PSPE 연구 분야는 우리나라 극지연구소의 연구부서 체계와 유사하다. 국가의 극지연구가 분산되어 있다기보다 극지연구 전문기관에 집중되어 있는 점 역시 비슷한 구조를 갖고 있다.

BAS의 성공 비결 중 하나는 상위기관인 NERC, 더 나아가 영국 정부, 그리고 EU와의 관계를 매우 중시하고 우호적인 관계를 만들어왔다는 점이다. 실제로 BAS의 전략이나 목표에는 끊임없이 NERC, 영국 정부, 그리고 EU의 과학연구 청사진과 비전이 언급된다. 이 밖에도 체계적인 연구·기관 운영 전략, 임직원(인재)을 중시하는 문화도 선진 연구기관이 갖추어야 할 덕목이라고 할 수 있다. 이러한 BAS의 장점은 30년의 극지연구 경험을 통해 기초체력을 다진 우리나라가 참고해야 할 좋은 본보기가 될 수 있을 것으로 보인다.

8) BBC, *George Osborne orders new icebreaker for UK polar science*, at <http://www.bbc.com/news/science-environment-27129690>

9) British Antarctic Survey, *supra* note 5, p. 7.



미국의 북극정책 역사와 시사점*

서 현 교 (극지연구소 미래전략실)

1. 미국 북극정책 시초 및 태동기

미국의 북극정책 시초는 1867년 러시아로부터 알래스카 대륙을 매입한 후 북극권 국가 지위를 갖게 되면서부터이다.¹⁾ 당시 유럽연합군과의 러시아 서쪽지역 크림반도 전쟁(The Crimean War)에서 패한 러시아는 자국 동쪽에 위치한 알래스카 지역에 대한 관심이 줄게 되면서, 당시 아시아태평양 지역으로의 활동영역 확대를 꿈꾸던 미국에 720만 US달러에 알래스카 대륙을 매각했다. 미국은 매입 직후 알래스카에 크게 관심을 두지 않았고, 안보 측면의 군사관할구역으로 관리하였다. 그리고 1890년대 금광이 발견되면서 경제적으로 주목받기 시작하였고 50여년이 지난 1959년 미국의 49번째 주로 편입되었다.

이후 1971년 닉슨(Richard Nixon) 대통령은 National Security Decision Memorandum(NSDM-144)를 발표하였다.²⁾ 닉슨은 이 정책에서 알래스카를 포함한 자국의 북극권 영토에 대해 △환경 위해(危害)를 최소화하면서 북극의 건전하고 합리적인 개발 △북극에서 상호호혜적인 국제협력 추구 △북극해에서 자유의 원리 보호를 포함한 북극에서 필수적인 안보이익의 보호 등을 제시하였다. 그래서 이 정책은 북극정책 범부처 기구(Interagency Arctic Policy Group) 창설을 이끌어내었다. 이 기구는 미국의 북극정책 수행 검토 및 미국의 북극 활동과 프로그램을 조율하는 책임이 부여됐다.

1983년 로널드 레이건 대통령(Ronald Reagan)은 ‘국가 안보 결정강령’ (National Security Decision Directive-90: NSDD-90)을 발표하였다.³⁾ 레이건은 이 강령에서 북극이 국가방위, 자원, 에너지개발, 과학적 탐구와 환경보호 관련 독특하고 민감한 관심지역이라는 점을 재확인하고 이를 고려하여 수색 및 구조(SAR), 생명·재산·야생동물 보호, 국제법 준수, 상업활동 수행 등의 정책주진을 주문하였다.

1994년 빌 클린턴 대통령(Bill Clinton)은 ‘대통령 결정 강령’ (Presidential Decision Directive-26: PDD/NSC-26)을 발표하였다.⁴⁾ 이 강령은 1991년 구(舊) 소련 붕괴에 따른 냉전 종료 후 나온 미국의 첫 북극정책 강령으로, 러시아와 협력 및 개방이라는 새로운 환경이 북극권 8개국 간 전례없는 협력 기회의 활용을 천명한 선언이다. 이 강령은 △냉전 종료 후 국가안보와 방위 요구에 부응, △북극 환경 보호 및 생물자원 보존, △친환경적인 자연자원 관리 및 경제개발 보장, △북극권 8개국간 협력을 위한 제도 강화, △북극 원주민에 영향을 미치는 의사결정에 원주민 참여, △과학 모니터링 및 연구 강화로 지역, 글로벌 환경이슈에 기여 등 6대 목표로 내세웠다. 또한 남극에 대해서도 남극조약 (Antarctic Treaty)과 남극해양생물자원보존협약(CCAMLR)⁵⁾을 근거로 △남극의 오염되지 않은 환경과 그 부속 생태계의 보호, △남극과 글로벌 물리 및 환경시스템의 이해를 위한 과학연구 기회 추구, △평화적 목적의 배타적 보존을 위한

*본 원고는 극지연구소의 정책과제 연구비(PE-15240) 지원으로 작성됨.

1) <https://history.state.gov/milestones/1866-1898/alaska-purchase>.
 2) U.S. National Security Decision Memorandum(Richard Nixon) 144, 1971.
 3) U.S. National Security Decision Directive(NSDD-90, Ronald Reagan), 1983.

4) The Whitehouse(Washington), Presidential Decision Directive/NSC-26, 1994.
 5) Convention on the Conservation of Antarctic Marine Living Resources.

국제협력 지역으로의 유지, 남극해에서 생물자원의 보존 및 지속가능한 관리 등을 목표로 제시했다. 그리고 PDD-26에서 미국은 러시아와 양자협력을 북극 환경보호의 기회로 활용코자 하였다. 다만 북극에서 러시아와의 냉전 긴장이 감소됐음에도 북극의 평화와 안정을 유지하기 위해 안보와 방위에 대한 관심(Interests) 유지를 천명함으로써 방위 감축을 하지 않았다.

II. 미국 북극정책 체제 기반 구축: 조지 부시 행정부

이어 2009년 1월 9일 조지 부시 대통령(George W. Bush)은 8페이지 분량의 National Security Presidential Directive and Homeland Security Presidential Directive(NSPD-66/HSPD-25) 강령을 발표하면서 세부 북극정책 및 구체적인 담당기관을 지정하는 등 북극정책 체계를 갖춰나갔다.⁶⁾ 이 대통령 강령은 북극에서 거주민과 원주민의 역할에 대한 강조와 함께 환경보호와 지속가능 개발에 초점을 맞추고 있으며, 동 강령은 1994년 PDD/NSD-26의 6가지 목표를 달성하기 위한 7대 부문별 각 실행방안을 담고 있다.

첫째, ‘안보 강화’ 부문에서 미국의 북극권 육상, 해상, 항공 지역 보호를 위한 능력 강화, 해사 무역, 주요 인프라 및 자원 등을 보호하기 위해 북극 해사영토 제고, 북극에서 미국의 선박(군함 포함) 및 항공기 이동의 보장, 북극에서 미국의 해사 통치권의 보호, 북극지역 분쟁의 평화로운 해결 등이 제시됐다.

둘째, ‘국제 거버넌스 강화’ 부문에서 UN기후변화협약(UNFCCC) 등과 같은 조약 또는 UN 및 그와 관련된 기관들을 통해 북극 이슈에 대해 국제협력, 자원개발, 해운 등 북극 경제활동 증가 이슈에 대응하기 위한 신규 또는 강화되는 국제협정 등의 고려, 북극이사회의 과학적 검토 범위 내에서 개발되는 정책권 권고안 고려 및 해당 권고안이 북극권 국가에 종속될 수 있도록 보장, 미국 상원에 1982년 UN해양법협약(UN Convention Law of Sea Convention) 가입 설득 등이 포함됐다.

셋째, ‘북극 대륙붕 한계 연장’ 부문에서 국제법에 따른 북극권 최대 한계연장 범위 조사 및 조사기간 중 해당 영역에서의 자연관리 관리 및 보존, 1990년 미-러 해사경계협정을

러시아가 비준하도록 설득 등이 제안됐다.

넷째, ‘국제 과학협력 증진’ 부문에서는 미국의 북극지역 과학 리더십 유지, 양자 및 다자 조치를 통한 북극 연구지역 접근성 증대, 환북극 관측 네트워크 구축 노력, 과학연구 기회 정보 공유 및 국제 북극연구프로그램 조율을 증진하기 위한 북극권 국가 과학장관회의 주관, 강령에 제시된 미국 정책상의 북극 연구증진을 위한 ‘범정부 북극연구정책위원회’(IARPC)와 협력, 대학 및 연구기관과 파트너십 강화, 그리고 연구기관들의 외국파트너와 협력 강화 지원 등이 담겨 있다.

다섯째, ‘북극 해상교통’ 부문에서는 북극 해운 증가 이슈에 대한 북극권 국가와 공동대응, 북극 인간 활동에 따른 오염이나 사고 리스크 대응능력 강화 및 수색 및 구조(SAR) 협력협정 추진, 국제표준에 따른 북극 해상항로 관리 레짐 개발 등이 제시됐다.

여섯째, ‘에너지 및 경제 이슈’ 부문에서는 메탄하이드레이트 이슈 관련 국제협력, 석유/가스자원 개발 및 환경이슈 관리를 위한 관심 증대, 경제개발 기회를 위한 기후조건 모니터링, 국제기준에 부합하는 북극에너지 개발, 북극 오일/가스 개발 이슈 관련 국제포럼 구성, 미국 영유권 밖 북극 오일 & 가스에 대해 주변국들과 협력메커니즘 유지 등이 포함됐다.

마지막 일곱째, ‘환경 보호·보존 및 관리’ 이슈에서는 △외국과 협력하여 북극의 증가하는 오염원과 다른 환경 이슈에 효율적 대응, △북극 생물종(회유종 포함)과 해양생물자원을 보호하기 위한 강제 규정 검토와 지속가능한 종(種) 관리와 보호 및 보존 방법 강구 및 효율적 보존·관리를 위한 외국 정부와 협력, △미래 북극수산업을 관할할 국제협정 및 기구에 대한 고려를 포함한 북극의 상업적 어획 대응, 북극에서 EBM 도입 추진, 인간 건강·환경에 대한 오염원 악영향의 과학정보 개발 노력 및 주요 오염원의 북극 유입을 줄이기 위한 주변국과 협력 등이 제안됐다.

6) National Security Presidential Directives and Homeland Security Presidential Directive(NSPD-66/HSPD-25), the White House, President George Bush, Jan. 9, 2009.

7개 부문	담당 연방기관
안보 강화(항행 자유 포함)	국무부, 국토안보부, 국방부
국제 거버넌스 강화 (AC, UN해양법협약 등)	국무부
대륙붕 경계확장, 영토 경계 이슈	국무부
국제 과학협력 증진	국무부, 내무부, 상무부, 국립과학재단
해상 교통 강화	국무부, 국방부, 교통부, 상무부, 국토안보부
경제 및 에너지 이슈	국무부, 내무부, 상무부, 에너지부
환경 보호, 보존 및 관리	국무부, 내무부, 상무부, 국토안보부, 환경보호국

〈표 1〉 조지 부시 대통령 NSPD-66 강령의 7개 부문 및 각 담당 연방기관⁷⁾

한편 1971년 NSDM-144가 발표되면서 관련된 연방기관 정부는 7개에 불과했으나 2009년 조지부시 강령에서는 24개 부처(Departments), 기관(Agencies), 국(Office)이 포함되었다.⁸⁾

III. 미국 북극정책 체제의 완성: 오바마 행정부

오바마 정부는 2013년 5월 북극지역에 대한 국가전략(National Strategy for the Arctic Region)을 발표하여, 알래스카 주정부와 국제사회에서 수행 중인 활동과 미 연방정부 기관들의 북극정책 수행 등을 효율적으로 통합하고, 우선순위를 설정하였다.⁹⁾ 또한 동 전략을 구성하는 세부 전략으로 △안보이익 증진(Advance United States Security

Interests), △책임있는 북극지역(자원, 환경 등) 관리 추구(Pursue Responsible Arctic Region Stewardship), △국제협력 강화(Strengthen International Cooperation) 등을 제시하였고, 이 전략의 실행원리(Guiding Principle)로 △평화와 안정성 수호(Safeguard Peace and Stability), △최선의 이용 가능한 정보에 기반한 의사결정(Make Decisions Using the Best Available Information), △혁신적인 자세 추구(Pursue Innovative Arrangements), △알래스카 원주민과의 협의 및 조율(Consult and Coordinate with Alaska Natives) 등 4가지를 제안했다.

미국 연방정부는 동 전략들을 달성하기 위한 실행계획(Implementation Plan for The National Strategy for the Arctic Region)을 이듬해인 2014년 1월에 발표하고,¹⁰⁾ 각 세부전략을 달성하기 위한 파트별 세부 실행계획별 담당 기관¹¹⁾을 함께 배정하였다. 그리고 2015년 1월 동 세부전략에 대한 수행결과보고서(National Strategy for the Arctic Region Implementation Report)를 발표하였다.¹²⁾

현재의 오바마 정부에서의 미국의 북극정책 담당 부처 및 기관은 조지 부시 대통령 때보다 더 규모가 커지고 다양해졌다. 즉 컨트롤 타워는 백악관이 맡고 있고 나머지 업무분야별로 부처가 관여하는 데 국무부는 모든 북극이슈에 관여하고 있으며, 다양한 범부처 기구(Interagency)들이 있어 이들이 조율하는 역할을 하고 있다.



7) See CSIS, The New Foreign Policy Frontier—U.S. Interests and Actors in the Arctic, 2013, p.5.

8) See CSIS, The New Foreign Policy Frontier—U.S. Interests and Actors in the Arctic, 2013, p.5.

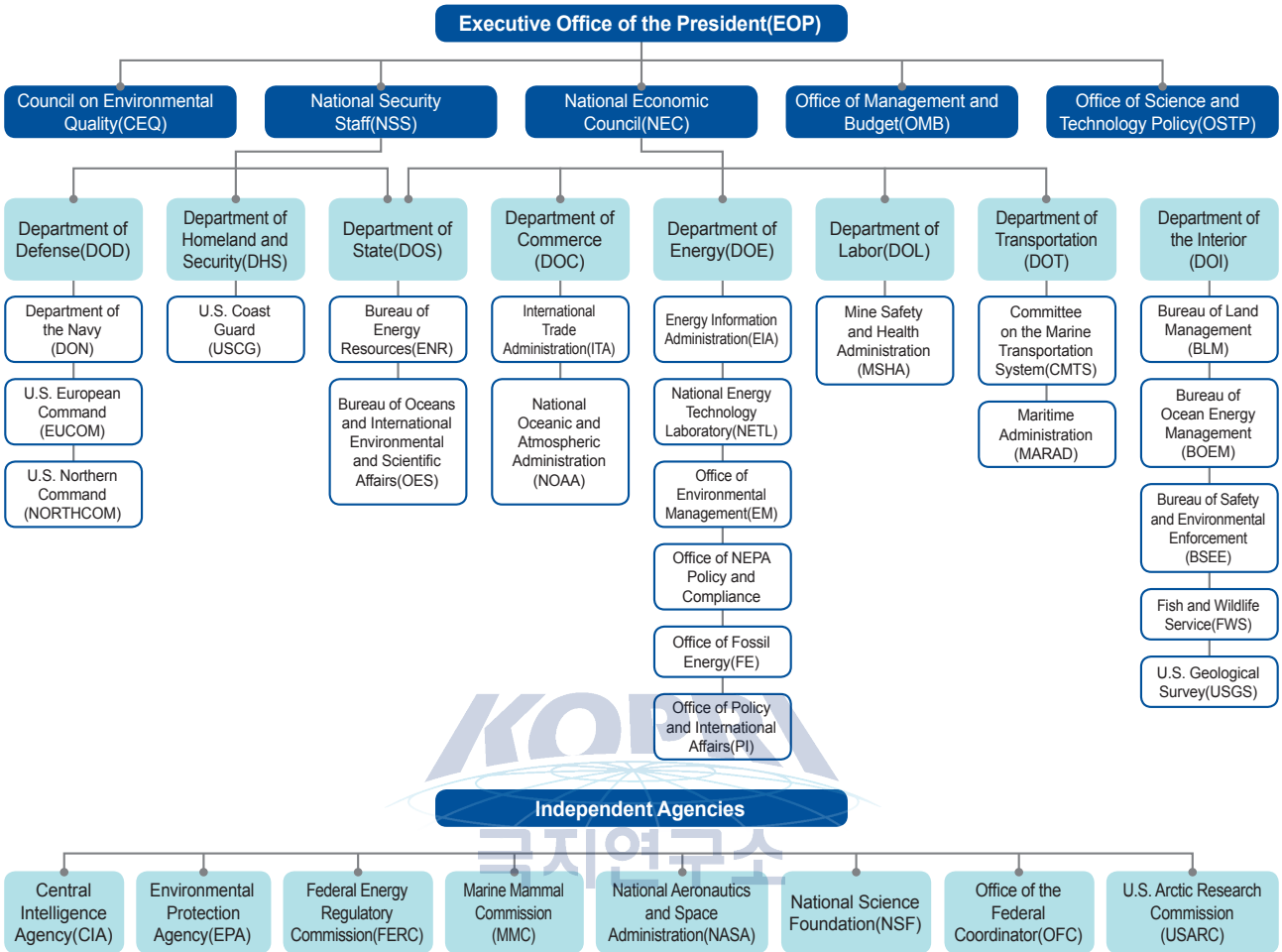
9) The White House(Washington) of US, National Strategy for the Arctic Region, May 2013.

10) The White House(Washington) of US, Implementation Plan for the National Strategy for the Arctic Region, Jan. 2014.

11) 미 국무부, 내무부, 에너지부, 국토안보부, 상무부, 국립과학재단, 국립해양대기청(NOAA), 환경보호청(EPA) 등이 정책 주무기관이다. (서현교, 2014, 50-66면 참조)

12) The White House(Washington) of US, National Strategy for the Arctic Region Implementation Report, Jan. 2015.

U.S. Actors in the Arctic



〈그림 1〉 미국의 북극정책 관련 부처 및 기관¹³⁾

즉, △Arctic Policy Group¹⁴⁾, △Interagency Arctic Research Policy Committee (IARPC)¹⁵⁾, △Interagency Policy Committee on the Arctic¹⁶⁾, △Interagency Working Group on Coordination of Domestic Energy Development and Permitting in Alaska¹⁷⁾, National Ocean Council¹⁸⁾의 범부처 기구들이 북극정책 수행의

다양한 단계에서 관련기관 간 조율을 하고 있다.¹⁹⁾

이처럼 미국 대통령들이 발표한 북극 강령은 오바마 대통령 시기에 통합적이고 완성적인 틀을 갖추게 되었고, 추진전략과 연차적 계획/실행 실적 등을 체계화하여 정책추진의 효율성 및 실효성을 확보하였다.

13) Ibid.

14) Arctic Policy Group은 국무부가 의장(Chair) 역할을 하고 있고, 작업반 레벨의 정부 간 기구. 북극에 안보분야를 제외한 국제협력 이슈에 모든 연방기관이 참여하여 월별 회의를 개최하여 의견 및 정책 조율을 한다.

15) US Arctic Research & Policy Act of 1984에 근거하여, 1984년 창설된 범부처 기구로 NSF가 의장직을 맡고 있으며, 대통령 국가과학기술위원회(National Science and Technology Council)산하 Committee on Environment, Natural Resources, and Sustainability의 범부처 작업반 기능을 하며, 북극연구정책에 대한 상호 조율 역할을 맡고 있다. (웹사이트 <https://www.whitehouse.gov/administration/eop/ostp/nstc/committees/cenrs/iarpc> 참조)

16) 차관보급 범부처 회의로 National Security Staff(NSS)가 의장직 수행. 행정부 내에서 북극정책 수행을 조율한다.

17) 2011년 창설된 범부처 기구로 내무부 차관이 의장으로 알래스카에서 내륙 및 해안에서 에너지 개발을 위한 드릴링에 대한 감시 책임이 있는 연방기관 및 관련 부처 간 범부처 협의체이다.

18) 국가해양이사회(NOC)는 백악관 과학기술정책실(Office of Science and Technology Policy: OSTP)과 백악관 환경질이사회(Council of Environmental Quality)의장이 NOC 공동의장을 맡고 있으며, 북극해 환경관련 이슈 및 정책을 조율한다.

19) The White House of U.S., supra note 12, p.23.

IV. 오바마의 북극정책과 북극이사회 의장국 프로그램 간 관계

한편 미국은 2015년 4월 북극이사회 의장국(2015-2017)이 되면서 새롭게 의장국 주도 프로그램으로 3대 중점과제 및 13개 세부 과제와 2014년 1월에 발표한 북극정책 실행 계획을 연계하면 아래 <표 2>와 같다.

의장국 3대 중점과제	의장국 중점과제별 세부과제	오바마 북극정책(2013)의 세부실행계획(2014)
북극해 안전, 보호 및 관리 (Arctic Ocean Safety, Security, and Stewardship)	수색 및 구조훈련 (Search and Rescue Exercise)	북극 수색 구조 강화 (Enhance Arctic SAR)
	해양환경보호 (Marine Environmental Protection)	비(非)재생에너지의 안전하고 책임있는 개발
	해양보호구역 네트워크 (MPA network)	-
	지역해 프로그램 구축 (Regional Seas Arrangement)	-
	북극해 산성화 대응 (Arctic Ocean Acidification)	북극생태계 보호 (산성화 충격 평가 수행)
경제 및 생활여건 개선 (Improving Economic and Living Conditions)	북극에너지 정상회의 개최 (Arctic Energy Summit)	-
	재생에너지 활용 증대 (Renewable Energy Demonstrations)	안보이익 증진: 재생에너지 자원개발 증진 (Pursue the Development of Renewable Energy Resources)
	물과 위생시설 개선 (Water and Sanitation)	-
	북극 통신 평가 (Telecommunication Assessment)	북극 통신인프라 구축 (Develop Communication Infrastructure in the Arctic)
	자살 예방 및 회복 증진 (Suicide Prevention and Resilience)	캐나다 의장국 프로그램 승계 및 강화
기후변화 충격 대응 (Addressing the Impacts of Climate Change)	단주기 오염원 (블랙카본) 감축 (Reduce Short-lived Climate Pollutants)	북극 블랙카본 감축 (Reduce Black Carbon in the Arctic)
	북극 커뮤니티 및 생태계의 기후변화 적응 및 회복 (Community and Ecosystem Climate Resilience)	보퍼트/척치해 통합 생태계연구 (적응 포함), 북극 커뮤니티 지속가능성, 웰빙, 문화 언어유산 증진
북극 기후분야 과학 증진 (Improving Arctic Climate Science)	과학협력협정 체결 추진 (Agreement on Scientific Cooperation)	직전 의장국인 '캐나다 의장국 AC 프로그램' 연장
	북극 디지털 고도지도제작 (Arctic Digital Elevation Map)	북극지역 도표/지도 제작 (Chart the Arctic Region)
	조기경보 지표시스템 도입 (Early Warning Indicator System)	-

※ 기타 북극이사회 지위 강화(Strengthening the Arctic Council) 및 북극이사회 홍보(Public Diplomacy Campaign)도 의장국 프로그램에 포함됨.

<표 2> 북극이사회 의장국 프로그램(2015.4)과 美 북극정책 세부전략(2014.1)간 비교²⁰⁾

미국의 북극이사회 의장국 주도 프로그램 중 상당 부분은 2014년 1월에 발표된 북극정책 세부전략과 연계된 내용임을 알 수 있다.

위와 같이 미국의 북극이사회 프로그램은 대부분 미국 오바마 정부가 2013년 북극정책을 기반으로 한 2014년 실행계획(안)과 상당부분 일치하거나 포함되는 구조를 갖고 있다. 즉 미국의 북극이사회 의장 프로그램은 미국 북극정책 주요 내용의 연장선 또는 북극권역(알래스카) 대상 프로그램에 확장으로 해석할 수 있다.

또한 닉슨(1971), 레이건(1983), 빌 클린턴(1994) 대통령이 발표한 북극 국가훈령은 실행(Implementation)보다는 선언적 측면이 강했으나, 조시 부시 대통령(2009)은 각 중요이슈별 실행(안)과 담당부처를 배치함으로써 북극정책 수립 및 추진을 체계화시켰다. 그리고 이같은 노력에 기반하여 미국 오바마 행정부는 북극 국가전략(2013)을 발표하였고, 이를 기반으로 하여 포괄적이고 세부적인 실행계획(2014) 및 실행결과 보고서(2015)를 발표를 연차적으로 발표하면서 북극정책 추진체계의 완성을 이뤄냈다. 또한, 이 시기에 북극이사회 의장국을 맡으면서 자국의 북극 정책 중의 일정 부분을 의장국 추진과제로 제시했다. 이러한 정책 연결에는 오바마 행정부가 북극정책 중 국제협력에 필요한 북극 기후변화 및 환경·생태계 보호, SAR 등의 이슈를 북극권 국가는 물론 국제사회와 협력함으로써 정책을 달성하겠다는 의지의 표명인 셈이다.

이같은 측면에서 북극이사회 옵저버 지위국인 우리나라는 북극이사회 기여와 함께 미국과의 북극 관련 양자협력 강화를 위해 미국의 북극정책과 연계된 미국 북극이사회 의장국 프로그램에도 관심을 기울이고, 참여방안 모색 및 기여를 검토할 필요가 있다고 하겠다.

20) See Proposed U.S. Arctic Council Chairmanship Program 2015-2017, p.1.



남극 중앙해령 (Circum-Antarctic Ridges): 남극 연구의 뉴 프런티어

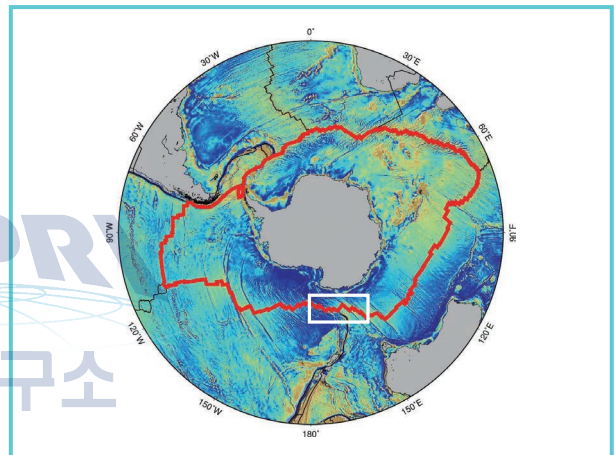
박 송 현 (극지연구소 극지지구시스템연구부)

I. 머리말

지금까지 남극 연구는 남극 대륙과 주변 섬들, 그리고 대륙 연근해에 집중되어 있었다. 그러나 이 글에서는 지평을 확대하여 향후 풍부한 탐사 및 연구 성과를 가져올 수 있을 것으로 예상되는 남극 중앙해령 연구에 대해 소개해 보고자 한다. 이러한 지평의 확대를 통해 극지 연구 영역이 넓어질 뿐 아니라 역으로 남극 대륙과 연근해의 이해를 새롭게 할 수 있는 자료를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

남극 중앙해령은 뜨거운 용암을 지속적으로 분출하고 있는 대규모의 해저 화산 산맥으로서, 지구 외각을 구성하고 있는 지판들의 경계인 중앙해령의 일부이다. 남극 대륙은 남극 중앙해령들로 둘러싸여 있는데 역설적이게도 차가운 남극 대륙은 뜨거운 해저 화산으로 포위되어 있는 형세인 셈이다. <그림 1> 기본적으로 남극 중앙해령은 남극대륙이 위치하고 있는 남극 지판의 경계에 해당하기 때문에 남극의 진화에 핵심적인 역할을 해 왔고 이곳에서 분출되는 용암이 굳어져 만들어진 현무암에는 남극과 주변 대륙의 진화를 이해할 수 있는 중요한 열쇠가 담겨있을 것으로 예상되고 있다. 그리고 남극 중앙해령에는 열수 분출구(hydrothermal vent)가 광범위하게 분포하고 있을 것으로 예상되며 이에 수반되는 열수 광물과 열수 생태계는 학문적 가치는 물론 미래 자원으로서의 가능성도 매우 높다고 볼 수 있다. 더 나아가 중앙해령과 기후 변화의 상관성은 현재 지구과학계의 떠오르는 뜨거운 이슈이며 남극 중앙해령은 이러한 연구를 위한 최적의 지역으로 평가받고 있다.

다양한 중요성을 갖고 있는 남극 중앙해령은 아직 많은 지역이 미답으로 남아 있기 때문에 쇄빙연구선 아라온 호를 운영하고 있는 극지 연구소에게는 새로운 기회와 도전의 영역이라고 볼 수 있다. 그리고 지질/지구물리학, 고기후 및 생물학을 연계할 수 있는 다학제적 연구가 가능하기 때문에



<그림 1> 남극 대륙을 둘러싸고 있는 남극 중앙해령. 빨간색 선은 중앙해령, 하얀색 상자는 극지연구소 탐사 지역이다.

다양한 분야의 연구원들에게 참여 기회가 제공될 수 있는 풍요로운 연구 영역이기도 하다. 이 글에서는 먼저 지구시스템 내에서 작동하는 중앙해령의 기능을 개괄한 후 남극 중앙해령의 중요성, 극지 연구소의 남극 중앙해령 탐사 현황 및 향후 전망에 대해 정리해 보고자 한다.

II. 지구시스템에서 중앙해령의 기능

중앙해령은 야구공의 실밥과 같은 형태로 지구를 전체적으로 휘감고 있는 지구 최대의 구조물이다. 지구 시스템 내에서 중앙해령이 갖고 있는 일차적 기능은 해저 확장을 통해 바다 밑 지각, 즉 해양 지각을 형성하는 것이다. 지구 표면을 덮고 있는 지각은 대륙의 경우 화강암질 암석이고 해양의 경우는 현무암질 암석으로 구성되어 있는데 중앙해령을 통해 맨틀로부터 녹아 나온 현무암질 마그마가 끊임없이 분출됨으로써 해양 지각이 형성된다.

중양해령에서 분출한 현무암질 마그마가 굳어져 만들어진 해양지각은 새로운 마그마가 분출되면서 중양해령으로 부터 멀어져 가다가 결국 해구로 섭입됨으로써 소멸한다. 해양 지각이 지구의 약 70%를 덮고 있다는 사실을 생각해 보면 중양해령은 해양 지각 형성 기능 하나만으로도 지구 시스템에서 차지하는 비중은 막대하다고 할 수 있다.

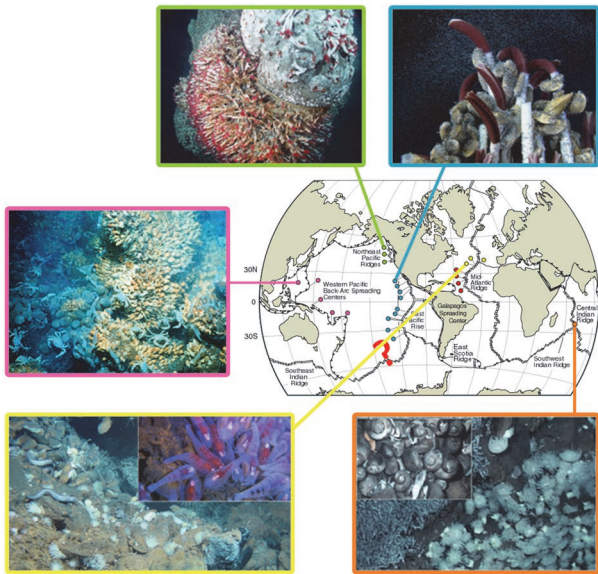
중양해령은 단순히 해양지각을 형성하기만 하는 것이 아니라 그 과정을 통해 지구 시스템에 다음과 같은 중요한 작용들을 한다. 첫째, 중양해령은 다량의 열수를 분출함으로써 해수의 조성에 큰 영향을 미친다. 열수는 중양해령 주변 해양 지각의 쪼개진 틈을 침투해 순환하던 해수가 마그마의 열기에 의해 가열되어 끓어 오른 것인데, 이 열수에는 해양 지각을 순환하는 과정에서 녹아 들어간 광물질이 고농도로 함유되어 있어 해수와 다시 섞이게 되면 해수의 조성에 변화를 주기 때문이다. 그리고 열수가 분출하여 차가운 해수를 만나 함유된 광물질들이 급격히 침전함으로써 중양해령 주변에는 금속 광산이 형성되기도 한다. 청동기 문명의 발생지 중의 하나인 지중해 키프로스 섬의 금속 광산도 이와 같은 과정을 통해 과거의 중양해령에서 형성된 것이다. 둘째, 중양해령은 열수 분출을 통해 열수 생물에게 에너지를 공급함으로써 중양해령 주변에는 특수한 열수 생태계가 형성된다. 이 생태계는 태양 에너지에 기반하는 지상 생태계와는 독립적인, 지구 내부 에너지를 기반으로 하는 심해의 특수 생태계이다. 열수 생물과 생태계는 지상의 생태계와는 매우 다른 특성을 갖고 있으며 생명의 기원을 열수 생물에서 찾기도 한다. 그리고 고온에서 적응한 열수 생물은 생물 자원으로서의 가능성도 높은 것으로 평가된다. 셋째, 중양해령은 기후 변화와 관련된 지구의 온도 조절 기능에서 큰 역할을 하는 것으로 판단된다. 지구 기후 변화에 따라 중양해령의 화산활동 과정에서 배출되는 대표적인 온실 가스인 이산화탄소(CO₂)의 양이 조절되기 때문인데 과거 지구의 온도 변화를 이해하는 새로운 변수로 각광 받고 있다. 특히 극지연구소가 수행한 최근의 연구 결과 빙하기-간빙기 사이클이 중양해령 주변 해양 지각에 각인되어 있는 것으로 밝혀졌다.

중양해령은 대부분이 지각으로 덮혀있는 맨틀이 지표와 상호 작용하는 무대로 볼 수도 있다. 따라서 중양해령은 지구 내부 맨틀에 접근할 수 있는 가장 중요한 통로이기도 하다. 중양해령에서 분출하는 마그마는 지각 아래 맨틀에서 직접 녹아 올라온 것이기 때문에 직접적인 접근이 불가능한 맨틀의 특성에 대한 매우 중요한 정보를 담고 있다.

III. 남극 중양해령의 중요성

남극 중양해령은 전 지구적으로 분포하는 중양해령 중 남극 대륙을 둘러싸고 있는 부분을 지칭한다. 전체 중양해령 규모에서 남극 중양해령이 차지하는 비중은 약 1/3로서 매우 크기 때문에 남극 중양해령이 지구시스템에 미치는 영향 역시 매우 크다고 볼 수 있다. 따라서 전지구에 미치는 중양해령의 작용을 온전히 이해하기 위해서는 남극 중양해령에 대한 탐사와 연구는 필수적이라 할 수 있을 것이다. 그러나 남극 중양해령의 많은 지역이 제대로 탐사되지 않아 많은 지역이 아직 미답으로 남아 있다. 그 이유는 남극 중양해령이 중양해령 연구 선진국들인 미국과 유럽에서 가장 멀리 떨어져 있어 접근이 쉽지 않았고 무엇보다 거친 해황(Sea Condition)때문에 탐사를 위해서는 대형 연구선이 필요했기 때문이다. 남극 중양해령의 많은 부분이 쇄빙연구선 아라온호가 장보고기지외 세종기지를 오가는 항로 상에 위치하고 있어 극지연구소는 중양해령 연구에 더할 나위 없이 좋은 여건을 갖추고 있다.

남극 중양해령에는 규명되어야 할 많은 중요한 문제들이 남아 있고, 중양해령과 관련된 과학적 문제들을 풀기에 좋은 조건을 갖고 있다. 첫째, 해수의 조성과 순환에 대한 온전한 이해를 위해서 남극 중양해령에서의 열수 분출구 분포와 특성이 규명되어야 하는데 현재까지 그 규모에 비해 남극 중양해령에서는 열수 분출구가 충분히 보고되지 않았다. 둘째, 남극 중양해령의 열수 생태계는 아직 미지의 영역이다. 기존의 연구 결과에 따르면 중양해령의 열수 생태계는 대양 별로 매우 큰 다양성을 보이고 있다. <그림 2> 특히 태평양 내에서도 동태평양과 서태평양의 열수 생물 군집은 매우 다른데 동서태평양을 잇고 있는 남극 중양해령의 열수 생물 군집에 대한 정보가 없이 이 수수께끼는 풀릴 수 없다. 그러나 아직 극지연구소가 최근 발견한 두 종의 열수 생물 외에 방대한 영역의 남극 중양해령 열수 생물 군집은 알려져 있지 않다.



〈그림 2〉 대양별로 다르게 나타나는 열수 생물의 다양성. 남극 중앙해령에서는 열수 생물이 거의 보고되지 않았다. (자료 Van Dover et al, Science 2002)

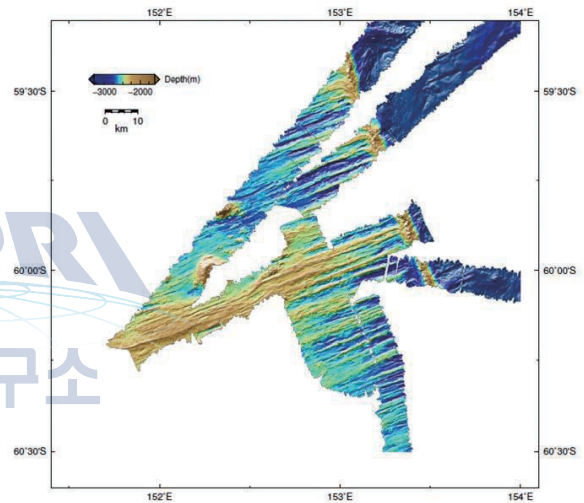
셋째, 남극 중앙해령은 기후 변화와 중앙해령의 상호작용을 연구하는데 최적의 조건을 갖고 있다. 중앙해령은 해저 확장 속도에 따라 다양한 특성을 나타내는데 대체로 확장 속도가 빨라질 수록 분출하는 마그마의 양이 증가한다. 남극 중앙해령의 너무 빠르지도 느리지도 않은 중간 정도의 속도로 확장하기 때문에 마그마의 분출 역시 중간 규모이고 이 정도 규모가 기후 변화를 반영하기에 가장 적당한 것으로 판명되었다. 확장 속도가 너무 빠를 경우 기록이 오히려 불분명해지고 확장 속도가 너무 느릴 경우에도 마그마의 부족으로 인해 기록이 잘 되지 않기 때문이다. 넷째, 남극 중앙해령은 대륙으로 단절되지 않고 전체적으로 연결되어 있기 때문에 이 중앙해령에서 분출하는 용암이 굳어져 만들어진 현무암에 대한 연구를 통해 남반구 맨틀의 진화와 순환을 연구할 수 있다.

IV. 극지연구소의 호주-남극 중앙해령 탐사 성과

극지연구소는 2011-2013년에 걸쳐 쇄빙연구선 아라온 호를 활용하여 남극 중앙해령의 일부인 호주-남극 중앙해령에 대해 3차례에 걸친 짧은 탐사를 수행한 바 있다. 〈그림 3〉 호주-남극 중앙해령은 남위 63도 동경 160 도에 위치하고 있는 중속으로 확장(약 60mm/yr)하는 중앙해령으로서 거친 해황 때문에 극지연구소 탐사 이전에는 전혀 탐사가 이루어지지 않았던 미탐의 남극 중앙해령이었다. 극지연구소는 세계 최초로 이 중앙 해령의 지형도를 작성했으며 〈그림 4〉 열수 분출구 분포 지역 발견과 열수 생물 채취에 성공하였다.



〈그림 3〉 남극 중앙해령 시료 채취 과정. 암석 시료 채취기로 시료를 채취한 다음 처리하고 있다.



〈그림 4〉 아라온 탐사 결과 작성된 호주-남극 중앙해령 지형도. 지형도에서 관찰되는 굴곡에 빙하기-간빙기 순환이 기록되어 있다.

다중빔 지형 조사 결과 만들어진 지형도에서 중심축 주변으로 발달한 해저면 굴곡의 주기가 빙하기-간빙기 사이클과 일치함이 발견되었다. 〈그림 4〉 이러한 상관 관계가 나타난 원인은 빙하기 기간 동안에는 전지구적으로 해수면이 하강함으로써 중앙해령에 가해지는 압력이 낮아져 보다 많은 지각이 형성되고 간빙기 동안에는 해수면이 전지구적으로 상승하여 중앙해령에 가해지는 압력이 높아진 결과 상대적으로 적은 량의 지각이 형성되었기 때문인 것으로 판단된다. 이 결과는 세계적인 과학 잡지인 Science 지에 게재되었다.

중앙해령 현무암 시료를 채취하기 위해 고안된 암석 채취기(Rock Corer)에 부착되어 운용된 '소형 열수 기록기'(MAPR, Miniature Autonomous Plume Recorders) 탐사 결과에 따르면 열수 분출구는 중앙해령 중심축의 가운데 부분에 주로 분포하고 있는 것으로 추정되었다.

계속된 탐사에서 이 구간에 대한 집중적인 CTD(Conductivity–Temperature–Depth Recorder: 해수의 염농도–온도–깊이를 측정할 수 있는 해양학의 기본 장비) 탐사를 통해 열수 분출구 위치를 좀더 정밀하게 파악한 다음 열수 분출의 증거가 강한 구간에서 해수 시료를 채취한 다음 실험실에서 분석하였다. 분석 결과, 채취된 해수 시료에서는 열수 분출의 증거로 볼 수 있는 망간, 철 등 금속 함량이 높게 나타났으며 이로써 열수 분출이 매우 활발하게 일어나고 있음이 확증되었다. 이 열수 분출구 구간은 ‘무진 열수 분출구 지역’로 명명되었다. ‘무진’이라는 이름은 김승욱의 유명한 단편 소설 <무진 기행>에서 차용한 것이다. 소설 속 무진의 안개 도시 이미지를 차용하여 열수 분출구 지역을 표상하고자 한 것이다.

열수 분출구 지역에서 드렛지(Dredge)를 수행한 결과 많은 양의 암석과 함께 ‘키와 게’(Kiwa crab), ‘일곱 다리 불가사리’(seven-arm starfish) 등 신종 열수 생명체가 채취되었다. <그림 5> 이 열수 생명체들은 태평양 지역 남극 중앙해령에서는 최초로 채취된 것들이다. 이러한 열수 생물 종들은 주로 남반구 중앙해령에서 발견되었으며 남반구 중앙해령의 열수 생태계가 독자적으로 연결되어 있을 가능성을 암시한다. 암석 채취기로 채취된 현무암에 대한 분석 결과 이 중앙해령 아래 분포할 것으로 예측되었던 태평양형 맨틀과는 다른 특성을 갖는 맨틀이 확인되었고 이 결과들은 남극 대륙내 화산 활동과 밀접한 관련이 있을 것으로 추론된다. 위 결과들은 유력 학술지에 잇달아 게재될 예정이다.



<그림 5> 극지연구소가 발견한 무진 열수 분출구 지역에서 채취된 키와 게와 일곱 다리 불가사리, 남극과 가장 가까운 중앙 해령에서 채취된 것들이다. (이화여대 원용진 촬영, G-Cubed에 게재 예정)

V. 향후 전망

호주–남극 중앙해령에는 지형과 기후 변화와의 관계가 세계 최초로 확인된 것은 매우 중요한 성과이긴 하지만 향후 보다 정밀한 탐사를 통해 연구를 발전시킬 필요가 있다. 다중 빔을 활용하여 작성된 지형도의 해상도는 기후 변화와 중앙해령 마그마 분출의 상관관계를 구체적으로 밝힐 만큼 높

지 않기 때문에, 훨씬 높은 해상도의 지형도와 지구 자기 자료 등 보조 자료를 얻기 위해서는 ‘자율 무인 잠수정’(AUV, Autonomous Underwater Vehicle) 탐사가 필요하다. 그리고 중앙해령 주변에서 퇴적물 주상 시료를 채취함으로써 중앙해령 지형 변화와 주상시료에 나타난 기록을 대비하는 연구가 중요하다. 이러한 연구는 기후 변화 연구의 새지평을 열 것으로 예상되고 있기 때문이다.

AUV탐사를 통해 열수 분출구 및 열수 광상의 분포를 더 정확하게 파악할 수 있으며 열수 생물들의 특성도 광역적으로 파악할 수 있다. AUV탐사를 통해 얻어진 정밀 지형 자료를 바탕으로 한 정밀 시료 채취 및 연구는 남극 중앙해령에서 일어나는 지각–맨틀간의 상호작용에 이해를 심화시킬 것이다. 더 나아가 ‘원격 해중 작업 장치’(ROV, Remotely Operated Vehicle) 탐사를 통해 열수 생물 시료 채취에 성공하게 된다면 열수 생태계 이해에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 전망된다. 그러나 남극 중앙해령은 많은 미답 지역이고 대부분의 지역에서 기초적인 탐사만이 진행되었다. 남극 중앙해령은 무궁한 가능성이 열려있는 기획의 땅이라 할만하다.

I. J. Crowley, R.Katz, P. Huybers, C. Langmuir, S. Park, Glacial cycles drive variations in the production of oceanic crust. *Science*, 2015.

OCEANOGRAPHY

Glacial cycles drive variations in the production of oceanic crust

John W. Crowley,^{1,2*} Richard F. Katz,¹ Peter Huybers,²

Charles H. Langmuir,³ Sung-Hyun Park⁴

Glacial cycles redistribute water between oceans and continents, causing pressure changes in the upper mantle, with consequences for the melting of Earth's interior. Using Plio-Pleistocene sea-level variations as a forcing function, theoretical models of mid-ocean ridge dynamics that include melt transport predict temporal variations in crustal thickness of hundreds of meters. New bathymetry from the Australian-Antarctic ridge shows statistically significant spectral energy near the Milankovitch periods of 23, 41, and 100 thousand years, which is consistent with model predictions. These results suggest that abyssal hills, one of the most common bathymetric features on Earth, record the magmatic response to changes in sea level. The models and data support a link between glacial cycles at the surface and mantle melting at depth, recorded in the bathymetric fabric of the sea floor.

The bathymetry of the sea floor has strikingly regular variations around intermediate and fast-spreading ocean ridges. Parallel to the ridge are long, linear features with quasi-regular spacing called abyssal hills (1). High-resolution mapping of the sea floor over the past few decades (2–4) has shown that these hills are among the most common topographic features of the planet, populating the sea floor over ~50,000 km of ridge length. Hypothesized models for these features include extensional faulting parallel to the ridge (5), variations in the magmatic budget of ridge volcanoes (6), and variation in mantle melting under ridges owing to sea-level change associated with glacial cycles (7). This latter model stems from the fact that glacial-interglacial variations transfer ~5 × 10¹⁹ kg of water between the oceans and the continents. This mass redistribution translates to sea-level variations of ~100 m and modifies the lithostatic pressure beneath the entire ocean. Because mantle melting beneath ridges is driven by depressurization, ocean ridge volcanism should respond to sea-level changes, potentially leading to changes in the thickness and elevation of ocean crust.

Plate spreading at mid-ocean ridges draws mantle flow upward beneath the ridge; rising parcels of mantle experience decreasing pressure and hence decreasing melting point, causing partial melting. Mantle upwelling rates are ~3 cm/year on average, whereas sea-level change during the last deglaciation was at a mean rate of 1 cm/year over 10 thousand years (8). Because water has one third the density of rock, sea-level changes would modify the depressurization rate associated with upwelling by ~10%, with corresponding effects on the rate of melt production. Mantle

using a model that computes mantle flow, thermal structure, melting, and pathways of melt transport. The model is based on canonical statements of conservation of mass, momentum, and energy for partially molten mantle (9, 10) and has previously been used to simulate mid-ocean ridge dynamics with homogeneous (10) and heterogeneous (11) mantle composition. It predicts time scales of melt transport that are consistent with those estimated from ³⁷Ar disequilibrium (12) mantle composition. In the present work, the model is used to predict crustal thickness time series arising from changes in sea level (Fig. 1) (2).

A suite of nine model runs for three permeability scales and three spreading rates was driven over a 5-million-year period by using a Plio-Pleistocene sea-level reconstruction (13). Crustal curves from simulations with larger permeability and faster spreading rate contain relatively more high-frequency content than those of lower permeability and slower spreading rate runs (Fig. 1). Our model results contradict the previous scaling arguments (6, 7) in not showing a simple decrease in the sea-level effect on ridge magmatism with increasing spreading rate.

To better understand these numerical results, we carried out an analysis of leading-order processes using a reduced complexity model. This model provides a solution for crustal thickness response to changes in sea level, approximating the results of the full mantle model, but with greater transparency. Assuming that all melt produced by sea-level change is focused to the

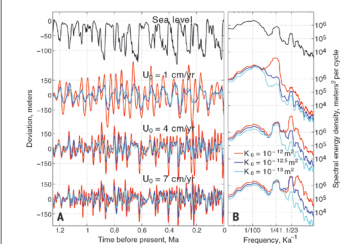


Fig. 1. Simulated bathymetric relief driven by Plio-Pleistocene sea-level variation. (A) Imposed sea-level variation (black, from (14)) and predicted bathymetric relief (color) for the past 1.25 million years from simulations at three half-spreading rates (1), and three permeability levels (2). The bathymetric relief is assumed to scale the amplitude of crustal thickness variation by 6/23 to give bathymetric relief. Permeability in the simulations is computed by applying $K(z) = K_0 e^{(z/a)}$ to the porosity field $\phi(z)$, where $a = 0.1$ is a reference porosity. Light blue, dark blue, and red lines correspond to $\log_2 K_0 = -13, -12, 12$, respectively. (B) Power spectral density estimates for each time series, made by using the multitaper method with seven tapers. Axes are logarithmic.

SCIENCE | sciencemag.org

13 MARCH 2015 • VOL. 347 | ISSUE 6227 | 1237



No.2 (제 2호)

Polar Brief

ISSN 2384-2946