BSPE16150-074-12

천부빙하코어를 활용한 남극 빅토리아랜드 고해상도 기후·환경 복원과 남북극 장주기 기후변화 연구기획

Planing of high resolution paleoclimate reconstruction using shallow ice core in Victoria Land of Antarctica and study on long term climate change of Arctic and Antarctic

KOPRI
극지연구소

2016. 5. 31

한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소

제 출 문

KOPRI
극지연구소

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “ **천부빙하코어를 활용한 남극 빅토리아랜드 고해상도 기후·환경 복원과 남북극 장주기 기후변화 연구기획** ” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 5. 31

연 구 책 임 자 : 허 순 도

참 여 연 구 원 : 홍상범, 황희진, 강정호,

한영철, 이강현, 정지웅
홍성민(인하대학교)
안진호(서울대학교)
이정훈(이화여자대학교)

편집순서 3

보고서 초록

KOPRI
극지연구소

<table>
<tr><td>과제관리번호</td><td>PE16150</td><td>해당단계 연구기간</td><td>2016. 2. 15 ~ 2016. 5. 31</td><td>단계 구분</td><td>(1단계) / (1단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2"><u>연구사업명</u></td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">연구정책·지원과제</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>중 과 제 명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부(단위)과제명</td><td colspan="4">천부빙하코어를 활용한 남극 빅토리아랜드 고해상도 기후·환경 복원과 남북극 장주기 기후변화 연구기획</td></tr>
<tr><td>연구책임자</td><td>허순도</td><td>해당단계 참여연구원 수</td><td>총 : 명
내부 : 명
외부 : 명</td><td>해당단계 연구비</td><td>정부: 5,000 천원
기업: 천원
계: 5,000 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속부서명</td><td colspan="2">극지연구소
극지기후변화연구부</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="5">연구기관명 : 연구책임자 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)</td><td>보고서 면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">KOPRI 극지연구소
○ 남극 장보고 과학기지를 기반으로 한 안정적인 빙하코어 확보 및 빙하고기후 복원 연구
○ 안정적인 빙하분석환경 구축 및 세계 최고 수준의 빙하프록시 분석기술 개발
○ 남극 빅토리아랜드의 빙하고기후 연구를 선도할 수 있는 연구과제 기획</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4"></td></tr>
</table>

편집순서 4

요 약 문

Ⅰ. 제 목

천부빙하코어를 활용한 남극 빅토리아랜드 고해상도 기후·환경 복원과 남북극 장주기 기후변화 연구기획

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

목적

- 남극 북빅토리아랜드 빙하코어 해염 및 생물학적 기원 이온 성분 프록시를 이용한 고환경, 고기후 복원 연구 기획
- 남극 빅토리아랜드 일대의 천부빙하를 이용하여 미량기체 거동에 대한 과학적 이해를 넓히고, 온실기체 농도 복원과 빙하코어 연령계산의 정확도를 높인다.

KOPRI 극지연구소

필요성

- 1979년 이후 관측된 인공위성 자료를 토대로 분석된 남극 해빙면적 변화의 가장 큰 특징은 남극은 약한 증가추세이고 동, 서남극 지역에 따라 매우 다른 특성을 보여주고 있음. 특히 아문젠/벨링스하우젠해의 경우 감소 추세, 로스해는 증가 추세가 뚜렷함. 현재 진행중인 남극 해빙면적 변화의 특성을 이해하기 위해서는 인공위성 관측시기 이전 과거 남극 해빙면적의 변화 특징을 함께 고려해야함
- 과거 남극 해빙면적 자료는 미래의 극지방 해빙면적의 변화를 예측하는 기후모델링 결과의 불확실성을 줄일 수 있도록 기여함
- 빙하코어 프록시 자료를 이용한 로스해의 해양환경 복원 연구는 2010년대부터 선진국 빙하연구 구룹에 의해 본격적으로 시작되고 있는 연구 분야임. 장보고 과학기지가 위치하고 있는 북빅토리아랜드 지역에서 시추된 복수의 빙하코어를 이용한 로스해의 과거 해양환경 변화 복원를 통해 선진국 빙하연구팀 수준의 연구결과를 도출할 수 있을 것으로 기대

됨

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

남극 북빅토리아랜드 빙하의 해염과 생물학적 기원 이온 성분들의 기후적 의미

○ 남극 북빅토리아랜드 빙하코어를 활용한 국외연구기관 연구결과 분석

○ 남극 북빅토리아랜드 빙하의 해염기원 및 생물학적 기원 이온성분 활용연구계획 수립

Ⅳ. 연구개발결과

남극 북빅토리아랜드 빙하의 해염과 생물학적 기원 이온 성분들의 기후적 의미

○ 로스해의 과거 해양환경 (polyna area, sea ice area) 및 기후요소 복원 (MSLP) 계획 수립

○ 로스해의 과거 해양환경과 대규모 대기순환 (SAM, SOI등)의 관련성 연구계획 수립

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

(필요에 따라 제목을 달리할 수 있음)

KOPRI
극지연구소

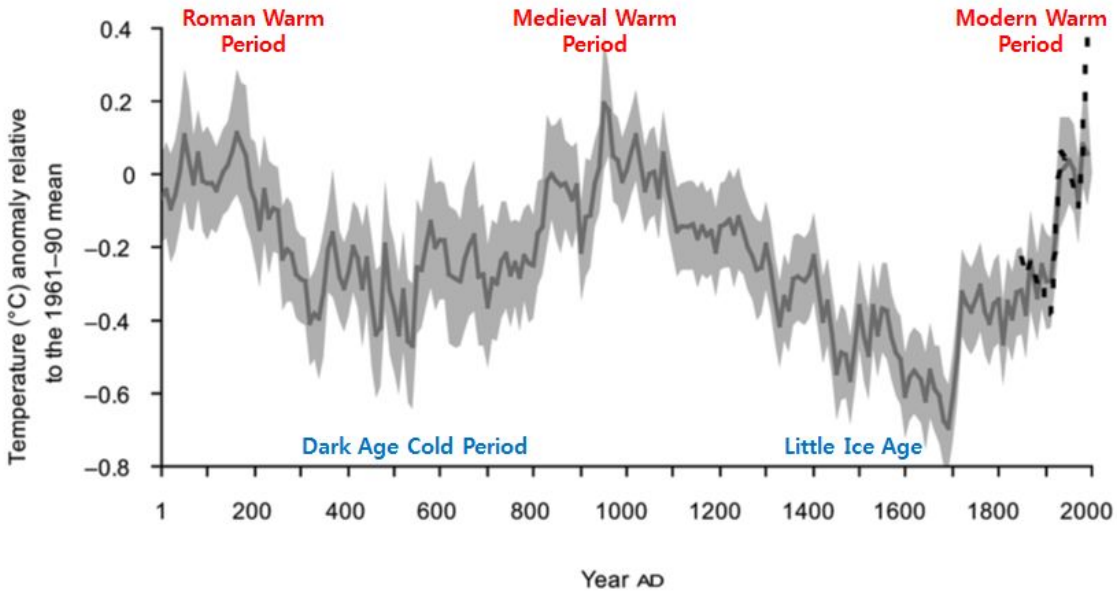
제 1 장 서론

1-1. 연구개발 목적 및 필요성

가. 빅토리아랜드 고해상도 기후·환경변화 복원

- 남극 장보고과학기지가 위치한 빅토리아랜드는 로스해와 인접한 동남극 지역으로 남극 횡단산맥이 지나고 있어 높은 산악지대 형성, 빙하의 발달과 빠른 빙하 속도와 이에 따른 Ice tongue의 발달, 넓은 로스 빙붕지대 발달 등의 다양한 빙하지대의 특성이 발현되는 곳임
- 이와 더불어 대기현상에서도 태평양과 대서양 발원의 공기가 유입되는 곳이며, 서남극 아문젠해 중심으로 발달하는 Amundsen Sea Low(ASL)의 영향을 받는 지역으로, 최근 지구온난화에 따른 기온, 강설량, 해빙의 변화 등이 민감하게 반영되는 지역임
- 빅토리아랜드에서의 최근 100년간의 고해상도 기후 환경변화 복원을 위해서 광범위한 지역을 대표하며 지형/지역적인 영향이 적은 빙하코어 시료를 채집하기 위하여 빅토리아랜드 연안을 따라 최소 100km 이내의 간격으로 천부빙하코어를 채집하여 빅토리아랜드의 기후변화를 복원하여 신뢰할 수 있는 자료 생산 필요
- 이런 연구결과들을 통해 남극 장보고과학기지를 중심으로 한 빅토리아랜드의 대표적인 기후·환경 변화 복원 자료를 제시하고 이 지역의 빙하고기후 연구를 선도할 수 있는 연구과제 필요
- 대표적인 예로써, 지구온난화에 따른 빅토리아랜드의 기온과 강설량이 증가 또는 감소되었는지, 주변의 해빙은 증가 또는 감소하였는지, 그리고 산업화의 영향으로 대기 오염물질이 남극에서 검출되는지 또는 어떠한 경로로 유입되는지 등을 밝힐 수 있는 연구 필요
- 과거 2000년은 기후·환경적으로 지구의 자연적 변동과 인간의 활동에 의한 인위적 변동성을 동시에 포함하고 있어서 지구의 역사에서 매우 중요한 시기이다. 과거의 자연적 변동성을 이해하면 현재의 기후변동성과 미래의 기후변화를 예측할 수 있는 능력을 향상시킬 수 있다. 빙하코어를 활용한 기후변화의 기록복원을 통해 기후변동의 불확도를 줄일 수 있다. 그러나 기후는 시계열적인 변화와 함께 지역적 차이에 따른 변동성이 크게 작용한다. 남극의 기후변동은 동남극과 서남극의 지역적 차이 뿐만 아니라 해안지역과 내륙지역의 차이가 크게 나타난다 (PAGES 2k Consortium, 2013). 따라서 남극지역의 고기후 자료 및 고해상도 분석자료가 필요하고 여러 지역에서 획득한 과거자료를 종합하여 판단해야 지역적 차이를 이해하고 전지구적인 기후변화를 이해할 수 있다.

KOPRI 극지연구소



나. 과거 해빙변화 복원

○ 인공위성 자료를 분석한 결과 남극 해빙면적은 증가추세(+1.2-1.8% per decade, 1979-2012, ~95% confidence level)로 나타나도 있다. 남극 해빙면적 변화의 주요한 특징은 지역적인 차이가 뚜렷한 것으로 아문젠/벨링스하우젠해는 감소추세 (-7.1%±0.9% per decade, 1979-2008)이고 로스해는 증가추세 (5.0%±0.6% per decade, 1979-2008)를 보이고 있다. 아문젠/벨링스하우젠해와 로스해의 해빙면적 변화는 서풍의 세기가 증가하면서 강화되고 있는 아문젠해 저기압 (Amundsen sea low)과 매우 밀접한 관련이 있다고 보고되고 있다. 1990년 이후 아문젠해 저기압이 강화되면서 해양으로부터 서남극 연안 지역으로 해풍 유입 빈도 증가하고 서남극 내륙으로부터 로스해로 유입되는 활강풍이 강화된다. 그리고 로스해 서쪽해역을 따라 남풍이 강화되면서 로스해 북쪽해역으로 해빙의 수송이 원활하게 된다 (Turner 등, 2009) 이들 해역의 해빙면적의 변화추세는 아문젠해 저기압의 강화 요인 외에도 대기와 해양의 온도가 해빙면적에 영향을 주고 있다. 서남극의 대기와 해양의 온도는 1950년대 이후 꾸준히 증가하고 있고 로스해의 경우 해수면 (sea surface temperature) 온도 감소추세가 뚜렷한 것으로 조사되고 있다 (Comiso, 2010).

○ 인공위성 측정 자료를 토대로 분석된 남극의 최근 해빙면적 증가추세는 북극의 해빙면적 감소추세와는 정반대 현상으로 전 지구적으로 진행되고 있는 지구온난화를 고려하면 이례적인 현상이다. 남극의 해빙면적 변화추세는 인공위성 관측시기 이전의 해빙면적 변화의 특징과 함께 이해할 필요가 있다. 실제로 남극빙하코어를 이용하여 복원한 해빙면적의 추세는 20세기동안 대체적으로 감소하는 경향을 보여주고 있고 지역적으로 감소추세를 나타내는 시기가 다른 것이 특징이다. 남극 빙하코어의 생물학적 기원 MSA (methanesulfonic acid)자료를 이용하여 복원한 겨울철 최대 해빙 면적 (maximum sea ice extent)은 벨링스하우젠해와 남극반도 서쪽해역 (70-100°W)의 경우 20세기 초반부터 꾸준히 감소추세임을 알 수 있었다. 인도양 (90-110°E) 지역은 1950년대 이후 역시 20% 까지 서서히 감소추세이고 대서양 (50°W-10°E) 지역은 1930년대부터 1960년까지 감소추

세, 이후는 정체되어 있음을 알 수 있다 (Abram 등., 2013).

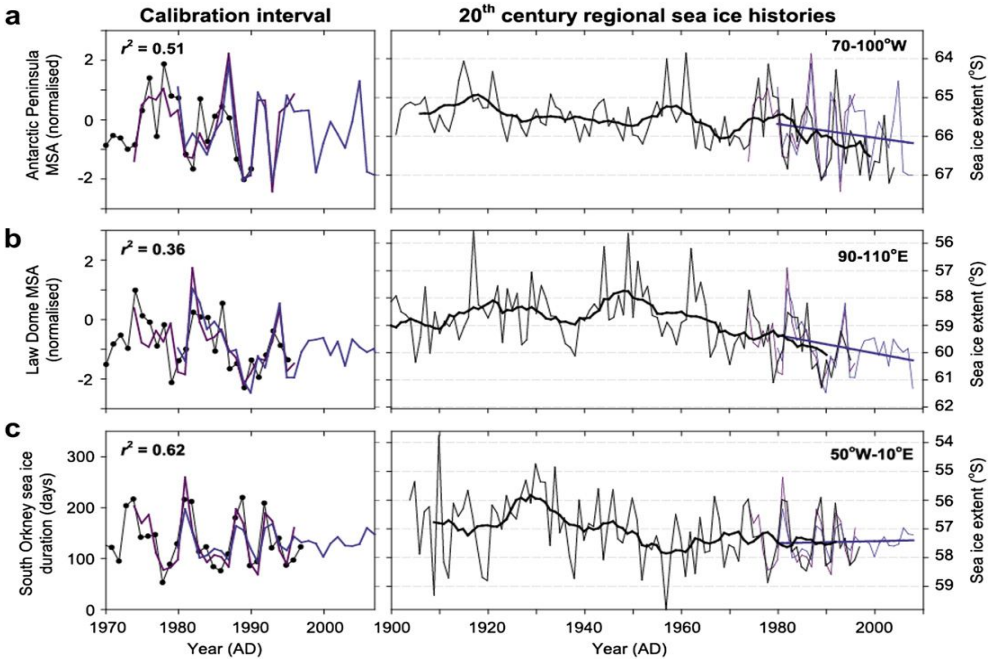


그림 ? 20세기 남극주요 지역의 겨울철 최대 해빙 면적 (winter season maximum sea ice extent) 복원 연구 결과

○ 극지역의 해빙면적 변화에 대한 기후 모델의 예측능력을 향상시키고 해빙면적 변화와 기후변화의 관련성을 이해하기 위해서는 관측시기 이전의 과거 해빙면적 변화에 대한 정보가 필요하다. 과거 해빙면적 변화 기록은 남극의 빙하코어 프록시를 이용하여 더욱 고분해도로 복원이 가능하다. 과거 해빙면적 복원 연구는 선진 빙하연구팀에서 수행중인 대표적인 연구로써 남극의 다양한 지역에서 연구결과가 발표되고 있다. 로스해 지역은 최근 해빙면적의 증가 추세가 뚜렷한 지역으로 과거 로스해의 해빙면적 기록 복원을 통해 이지역의 해빙면적의 변화추세에 대해 좀 더 이해할 필요가 있고 북빅토리아랜드 빙하코어는 로스해의 해양환경을 이해하는데 적합한 위치에 있다.

다. 자연적·인위적 요인에 의한 남극 북빅토리아랜드 대기환경 변화기록 복원

○ 남극 빅토리아랜드는 남아메리카 기원 입자물질과 오스트레일리아 기원 입자물질의 영향권의 전이지대로써 대기 순환 양상에 따라 유입되는 입자물질이 각 기원지별 특성을 반영할 것으로 예상되며 (Li et al., 2008), 따라서 빙하코어에서 복원한 입자물질 기원지 변화 기록을 통해 과거 기후변화와 남극지역 대기 순환과의 관계를 확인할 수 있을 것임.

○ 남극 빅토리아랜드에는 에레부스, 리트만, 멜번 등 대표적인 남극 화산들이 위치하고 있음. 빙하코어의 고해상도 기록 복원을 통해 화산 활동 발생지역에 따른 화산기원물질의 유입양상 차이를 확인한다면 지역적인 화산활동과 남반구 중저위도 및 북반구에서 발생한 화산활동이 각각 기후변화에 미치는 영향을 확인할 수 있을 것임.

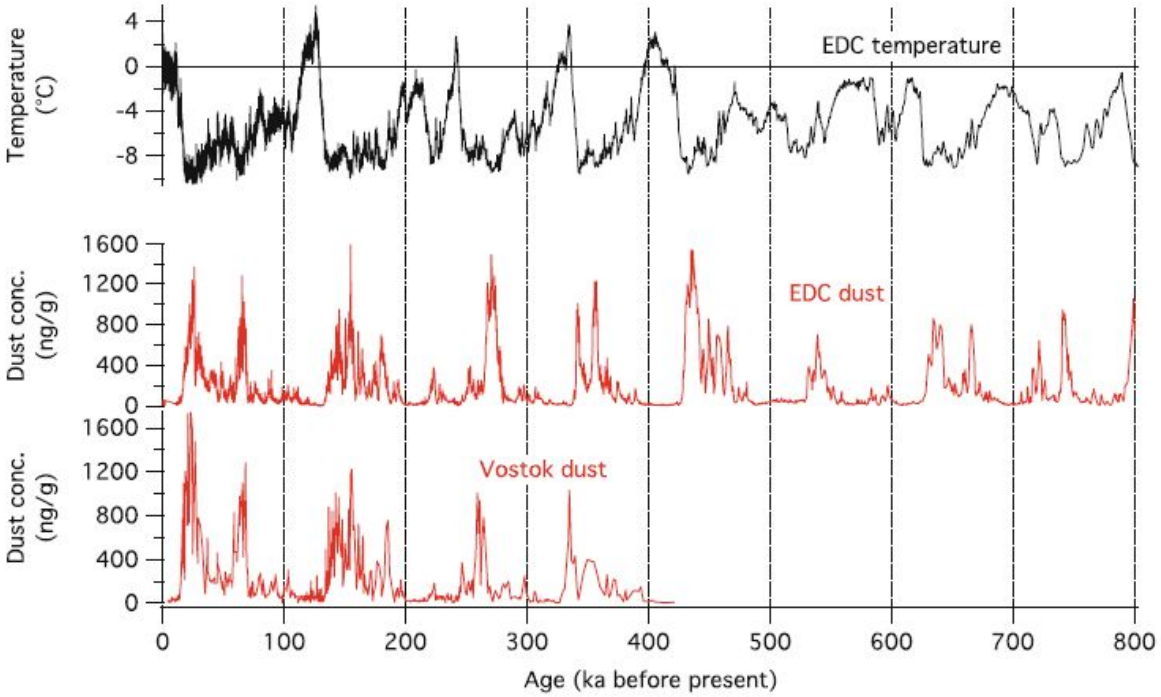
○ 남극 빙하코어에서 확인된 인간기원 오염물질의 기록은 대부분 1990년대 중반까지 복원

되어 있어 최근의 산업 활동 변화가 남극 대기환경에 미치는 영향을 파악하는데 한계가 있음. 특히, 1990년대 중반 이후 남아메리카와 오스트레일리아에서 유연휘발유 사용이 규제되면서 대기 중 납 배출량이 크게 감소한 반면 석탄 및 광물의 생산량은 급격하게 증가하고 있어 인간기원 오염물질에 대한 지속적인 모니터링 연구가 필요함 (Eichler et al., 2015; Kristensen, 2015; Mandel, 2011; Mudd, 2009).

- 최근 해빙 면적, 해양 생산성 등 해양환경 변화와 기후변화의 밀접한 연관성이 보고되면서 빙하코어시료로부터 과거 해양환경 변화를 복원할 수 있는 다양한 프록시 개발이 요구되고 있음 (Abram et al., 2013; Boyce et al., 2010).

라. 광물성 먼지 기록복원

- 광물성먼지는 기후시스템에 영향을 미치고 기후와 상호작용을 한다 (Maher et al., 2010). 광물성먼지는 태양복사에너지를 흡수하거나 반사시켜 대기의 복사특성을 변화시켜 기후에 영향을 준다. 대기중 광물성먼지는 구름핵으로 작용하기 때문에 구름의 특성을 변화시켜 지구의 복사평형과 물순환에 영향을 준다. 광물성먼지는 철과 같은 영양성분을 포함하고 있으서 해양에 침적되면 해양의 식물플랑크톤의 성장을 증가시켜 해양의 탄소를 흡수하여 결과적으로 지구의 탄소순환에 영향을 준다. 광물성먼지는 그 자체로 기후에 영향을 줄 뿐만아니라 광물성먼지의 생성-대기 수송이 기후변화에 영향을 받는 피드백 작용을 한다. 인간의 활동 또한 광물성먼지의 순환에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 광물성먼지 연구는 대기모델, 고기후, 빙하코어, 생지화학, 해양화학 등 극지과학의 전분야에서 다학제적으로 연구되고 있는 주제이다. 빙하코어에 나타난 광물성먼지의 기록은 과거 대기순환과 환경변화의 변동성을 보여준다. 빙하기와 간빙기의 기후변화 사이클 동안 동남극 Vostok과 EPICA Dome C 빙하코어에 나타난 광물성먼지의 기록은 대기 물순환, 대기수송의 효율, 기온과 적설량의 변화등과 연관되어 있다. 현재까지 남극에서는 주로 빙하기-간빙기 또는 온난기-한랭기의 큰 기후변화 사이클에 따른 광물성먼지의 연구가 진행되어 왔다. 그러나 남극에서 홀로세 이후 광물성먼지의 단기간의 변동을 이해하기 위해서는 고해상도의 변동성 기록을 복원하고 이해해야 한다. 최근 연구결과에 따르면 20세기에 들어서 알루미늄실리케이트와 같은 광물성먼지의 침적이 남극반도지역에서 두배로 증가하고 있다 (McConnell et al., 2007). 이는 남미 파타고니아지역과 아르헨티나 서쪽지역의 열대우림의 파괴와 같은 환경변화와 연관되어 있다. 광물성먼지의 침적, 변동성의 메커니즘을 확인할 수 있는 광물성먼지에 대한 동남극 지역의 고해상도 연구가 매우 제한적이기 때문에 빅토리아랜드를 중심으로 광물성먼지의 변동성 연구가 필요하다.



○ 남극 빅토리아랜드 빙하코어에 나타난 과거 2000년간 광물성먼지의 기록을 복원하여 광물성먼지의 변동성을 정량화하여 기후 이벤트에 따른 남극 대기순환을 이해한다. 광물성먼지의 화학적 특성분석을 통해 광물성먼지의 발원지를 추정하고 기후변화와 연관된 환경변화를 이해할 수 있다.

KOPRI 극지연구소

○ 남극 빅코리아랜드 빙하코어에 나타난 과거 2000년간의 할로겐의 계절적 변화를 확인하기 위해 유도결합플라즈마-고분해능질량분석기를 활용한 할로겐 분석법을 개발하고 이를 활용하여 해안지역 빙하코어에서 할로겐 농도로 해양-해빙의 연관성을 이해할 수 있다.

○ 본 연구의 최종 목적은 과거 2000년간 광물성먼지의 자연적·인위적 변동성을 정량화하고 광물성먼지의 특성을 밝힐 수 있는 생지화학적 분석을 통해 남극 대기순환, 발원지 추정, 장거리 대기이동을 이해하려고 한다. 이를 위해 빙하코어의 새로운 프록시인 잔류성유기오염물질, 할로겐원소와 같은 화학종의 분석을 통해 빙하코어 연구에 대한 이해의 폭을 넓히는 것이다.

○ 빙하 내 에어로졸 입자는 토양 기원의 먼지나 해염 입자, 화산활동 등과 같이 과거의 자연적 변동뿐만 아니라 인간의 활동에 의한 인위적 발생의 입자들로 다양하게 구성, 기록되어 있다. 대기 입자의 물리화학적 특성은 화산 분출과 같은 급격한 환경의 변화, 산업화 이후 인간의 활동 등과 밀접하게 연관되어 변화하고 있으며 이러한 특성은 기후변화에도 영향을 준다. 대기 입자가 태양으로부터 오는 빛 에너지를 직접 반사시키거나 구름의 응축 핵으로 작용하여 구름 형성을 도움으로써 간접적으로 태양 빛 에너지를 반사시키고 지구의 온도를 내리는데 기여한다는 사실이 잘 알려져 있다. 그러나 에어로졸의 특성에 대한 연구가 부족하여 기여도에 대한 추정치는 여전히 불확실성이 높다. 빙하코어를 이용하여 고해상도의 과거 에어로졸 입자의 특성을 파악하고 지역별 기후, 환경 변동을 복원하면 대기 입자가 과거 기후변화에 미친 영향을 알 수 있고 더 나아가 남극의 대기 순환을 이해할 수 있다.

○ 화산 활동은 과거부터 지금까지 세계 곳곳에서 일어나고 있으며 대기 중 가스, 에어로졸, 화산재의 중요한 공급원이다. 큰 화산 폭발은 대기 중으로 수증기, 할로겐(HCl, HBr), 황화 가스(SO2, H2S), 화산재, 미세먼지를 분출하여 전지구적으로 대기 환경에 영향을 미친다. 거대한 폭발로 인해 배출된 황은 태양 복사를 감소 시킬 수 있는 황산염 에어로졸으로 변환되어 성층권 온난화와 지구 평균 표면 온도 감소, 오존 생성 변경, 물순환 억제 등 자

연적 기후 변화의 주된 요인으로 작용한다.

- 해염입자는 자연 발생 입자 중 토양 기원 입자와 더불어 그 발생양이 많아서 대기 중 40% 이상 분포되어 있다. 해염 입자는 sea spray action에 의해 만들어지는데 NaCl이 주 성분이고 MgCl2, CaSO4 등도 포함된 무기 입자로 간주되어 왔으나 최근 해염입자에 포함된 유기화합물의 존재가 큰 관심사가 되었다. 유기물에 의해 입자의 특성이 달라지게 되면 입자의 대기 중 화학반응이 달라지게 되고 흡습성과 같은 물리적 성질의 변화는 대기 에어로졸 크기 분포에 영향을 주어 구름 형성, 대기 중 산란과 같은 기후에 영향을 미치는 인자에 변화를 준다.
- 대기 입자가 발생하여 대기 중에서 반응, 이동, 제거되는 등의 대기 중 거동을 대기입자가 개별적으로 한다는 점에서 대기입자의 특성은 개개입자의 수준에서 분석이 이루어질 때 명확하게 규명된다. 빙하 내 개개 미세 입자의 물리적 특성과 화학 조성을 명학하게 분석하면 자연적, 인위적 대기입자의 지구환경에서의 역할, 대기 오염물질의 장거리 이동에 관한 연구를 하는데 중요하고 이는 과거 남극에 영향을 미친 기원지의 변화, 대기 순환을 이해하는데에도 매우 중요하다.

마. 기상변수 복원

- 물안정동위원소(stable water isotopes)는 빙하연구에서 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 해수표면의 온도차에 의해 동위원소분화과정이 일어나기 때문에 계절적으로 동위원소 조성이 다른 강우가 발생하며 이를 이용하여 그 동안 여러 다양한 연구에 적용시켜 왔다. 먼저, 물안정동위원소는 계절성을 이용하여 천부빙하시료(shallow ice core)의 연대측정에 이용해 왔으며, 극지역에서는 동위원소분화과정이 온도와 밀접한 관련이 있으므로 과거의 기온을 추정하는 데에 이용되어 왔다. 연구지역에서 강우안정동위원소와 기온간의 상관성을 파악하면, 대부분의 극지역에서는 1차선형관계를 나타내며 이를 이용하여 빙하의 안정동위원소값으로 과거의 기온을 파악할 수 있다(Jouzel et al., 2003). 하지만, 최근에 이르러 물안정동위원소 값을 결정하는 것이 수증기가 증발하는 지역의 온도 뿐만 아니라 여러 다른 요소가 있다는 연구 결과가 제시되기 시작하였다. 이는 과거의 온도복원에 오차가 있을 수 있다는 가능성을 제시하고 있지만, 한편으로는 이를 이용하여 물안정동위원소를 이용하여 기온 이외에 다른 기상변수들의 복원 작업이 가능할 수 있다(Noone and Simmonds, 2004).
- 따라서, 향후 장보고기지 주변에서 빙하연구를 수행하여 과거의 기후를 복원하기 위해서는 물안정동위원소에 변동을 주는 요인들을 자세히 연구해야 할 필요가 있다. 물안정동위원소의 변동을 이해하기 위해서는 먼저 장보고기지 주변의 강우와 안정동위원소간의 상관계수가 확립되어야만 한다. 이는 다른 나라의 연구결과를 이용하여 연구를 수행할 수 있지만 장보고기지를 활용하여 1년 이상의 눈에 대한 연구는 필요할 것으로 판단된다. 두번째로 해빙의 면적이 어떻게 물안정동위원소에 영향을 미치는 가에 대한 연구가 수행되어야 한다. 이를 위해서는 연구지역의 기온과 해빙의 면적에 대한 자료가 요구되며 이는 각각 주변 이탈리아 기지의 자료 및 미국 NSIDC (National Snow & Data Center)에서 획

득할 수 있다. 이를 바탕으로 연대측정이 되어 있는 물안정동위원소와 기온 및 해빙의 면적을 상호 비교한다면 두 기상변수가 얼마만큼씩 현재 동위원소에 기여하고 있는 가를 알 수 있으며 이를 바탕으로 더 오래된 시간까지 이러한 상관관계를 연장하여 과거 200여년 이상의 기상변수를 복원할 수 있을 것으로 판단된다.천부빙하시료를 이용한 과거의 기상변수 복원을 통한 연구경험은 향후 극지연구소에서 목표로 삼고 있는 500m 급 이상의 빙하시추 연구에도 크게 도움이 될 것으로 판단된다.

바. 빙하코어 새로운 프록시 연구

- 요오드와 브롬은 대기 중 화학반응과 오존층 감소에 중요한 역할을 한다. 대기 중 브롬은 연쇄촉매반응에 따라 브롬옥사이드(BrO)를 형성하고 오존경계층에서 오존감소이벤트(ODE)를 일으킨다. 주로 극지 봄철에 BrO가 증가하여 오존이 감소하는 현상(OED)이 발생한다. 브롬옥사이드의 증가는 해빙(sea ice) 위의 산성조건, 저온조건에서 브롬옥사이드가 증가하고 최종적으로 HBr이 생성되어 빙하에 침적하게 된다. 결국 빙하의 Br 증가로 인하여 빙하의 Br/Na의 질량비는 해양의 Br/Na의 질량비보다 크게 된다 (Spolaor et al., 2013). 극지에서 대류권의 Br 증가는 봄철 Br enrichment로 나타난다. 한편, 대기중의 요오드는 대부분 해양의 생물성 기원으로 간주되어진다. 유기요오드는 대기중으로 방출되어 오존과 태양 빛에 의해 무기요오드로 산화된다. 요오드와 HOI는 해수면에 오존이 침적되면서도 생성된다. 남극에서 요오드의 발생은 해빙 플랑크톤의 photolabile iodocarbons의 생성으로 일년생 해빙의 다공층에서 발생된다. 여름의 눈 층에서는 광화학반응으로 인해 요오드가 감소한다. 극지빙하에서 브롬과 요오드 농도는 해빙과 관련이 되어 있다. Talos Dome 빙하코어에서 두 번의 빙하기 동안 Br enrichment는 해빙과 양의 상관관계를 보였고 요오드의 농도는 음의 상관관계를 보였다 (Spolaor et al., 2013). 최근에는 남극 Law Dome 등에서 요오드 농도와 Br enrichment 연구가 진행되고 있다. 이에 극지연구소에서 보유하고 있는 빅토리아랜드의 해안지역 GV7 빙하코어, Styx 빙하코어, Hercules Neve 빙하코어에서 할로겐의 계절적 농도변화를 연구할 필요가 있다.
- 빙하코어를 활용한 기후·환경변화 연구에서 다양한 프록시 분석기술 개발은 빙하연구 선도국과의 경쟁력을 높이고 세계적 수준의 연구결과를 생산하는데 반드시 필요한 단계임.
- 빙하의 지화학적 프록시 중에서 입자상 물질의 기원을 추적하고 대기 순환과 연계된 장거리 운반 경로를 복원하는 데는 동위원소 기법이 가장 강력한 수단을 제공하고 있음.
- 우리나라는 현재 피코그램(1 pg = 10-12 g/g) 수준의 극미량에서 납안정동위원소를 분석할 수 있는 세계적 수준의 분석기술을 개발하여 자체적으로 확보함으로써 지각먼지의 기원지를 추적하는데 활용하고 있음.
- 한편, 납안정동위원소 분석기술 개발의 후속으로 가장 강력한 외계물질 추적자 원소인 오스뮴(Os)의 동위원소 분석기술을 개발한다면 과거의 외계천체 충돌 영향과 진실 여부 등을 평가할 수 있는 증거들을 제시함으로써 국제적 수준의 연구성과를 도출할 수 있음.
- 하지만 빙하시료에서 오스뮴의 농도는 펨토그램(1 fg = 10-15 g/g) 수준의 초극미량으로

존재하기 때문에 전 세계에서 빙하의 오스뮴 동위원소를 분석할 수 있는 연구실은 거의 없는 실정임.

- 따라서 우리나라가 오스뮴 동위원소 분석기술을 개발하고 보유한다면 빙하연구의 경쟁력이 크게 향상될 것임.

사. 천부빙하를 이용한 미량기체 거동 정량적 연구

- 빙하코어를 이용한 온실기체를 비롯한 미량기체 농도 복원은 기후변화를 이해하는데 매우 중요하다. 최근 들어, 고해상도 연구가 활발히 진행되면서 학계에서의 관심은 정확한 농도복원과 연령측정에 모아지고 있다. 기존의 저해상도 연구에서는 문제가 되지 않았던, 빙하코어 자료간의 약간의 농도차이와 연령오차가 고해상도 자료의 고기후 자료해석에 걸림돌이 되고 있다.
- 빙하 내 공기방울에 보존된 과거의 공기에 대한 정확한 고기후학적 이용을 위해서는 빙하 상부 약 50-100미터 두께의 펀(firn)층에서의 공기 이동과 공기방울에 공기가 포집되는 과정을 정확히 이해하는 것이 필수적으로 요구된다.
- 펀층에서는 눈송이 사이로 공기가 이동할 수 있는데, 이곳에는 과거 수십 년의 연령에 해당하는 공기가 보존되어 있다. 펀층에서 공기를 추출할 경우 다량의 공기시료를 채집할 수 있어, 많은 시료를 필요로 하는 분석(예, 동위원소 측정)을 용이하게 수행할 수 있다.
- 펀층에서 기체가 확산에 의해서 천천히 움직이고, 공기방울이 점이적으로 형성됨에 따라, 자연적으로 평활화(smoothing) 과정이 이루어져, 최종적으로 빙하 특정 깊이에서 특정 기체종의 연령은 한 값을 갖는 것이 아니라, 일정 기간의 연령분포를 보이게 된다. 따라서, 평활화 정도를 정확하게 이해하는 것이, 고해상도 연구에서는 필수적으로 요구된다.
- 또한, 빙하코어 간 농도 차이가 관찰되는데, CH4의 경우는 위도에 따라서 달라 질 수 있지만, CO2와 N2O의 경우는 대기중 체류기간이 100년 이상이어서 농도차이가 크게 발생할 수 없기 때문에, 고해상도 연구에 문제점이 되고 있다. 이러한 농도차이에 대해서 여러 가지 가능성이 있지만, 일부 가능한 원인은 공기방울 형성과정과 관련 것으로서, 펀층에서의 미량기체 거동에 관한 연구가 시급히 요구된다.
- 펀층에서의 기체 거동은 빙하 상부의 공기와 섞일 수 있게 만들어서 특정 깊이에서의 공기 연령은 얼음연령보다 작게 된다. 과거 온도 복원은 얼음의 산소 및 수소 동위원소비를 이용하므로, 얼음연령을 따르고, 온실기체 농도는 기체연령을 따르므로, 이 두 연령간의 차이에 대한 정확한 모델이 만들어 져야, 기후변화(온도변화)와 온실기체 농도 변화 간의 시기적 상관관계를 정확히 밝힐 수 있다.

1-2. 연구개발 내용 및 범위

- 천부빙하코어를 활용하여 남극 빅토리아랜드에서 과거 2000년 이내 기온과 강설량이 시간과 공간에 따라 변동한 양상을 고해상도로 복원하기 위한 방법 연구

- 빙하코어의 정밀한 깊이-연대 관계 규명을 위한 방법
- 기온과 물안정동위원소간의 시공간적 상관관계 규명을 위한 방법
- 강설이 퇴적 후 펀/얼음 층에서 겪는 동위원소 확산작용 규명과 이를 보정하기 위한 방법
- 빅토리아랜드의 기록으로부터 전지구적 규모의 변화와 지역적 변동을 구분하기 위한 방법

- 남극 빅토리아랜드에서 시추한 천부빙하코어로부터 입도 분포, 스트론튬 (Sr) - 네오디뮴 (Nd) 동위원소 비, 희토류 원소 조성 비 등을 분석하고 이를 남아메리카 및 오스트레일리아 기원 입자물질의 물리-화학적 특성과 비교하여 기후변화에 따른 남극 빅토리아랜드 대기 순환 변화를 파악함.
- 화산기원 황산염 (non sea salt SO42-)과 비스무스 (Bi) 등의 프록시를 분석하여 과거 화산활동 기록을 복원하고, 기존에 알려진 화산활동 연대에 비추어 발생지 별 화산기원물질의 유입양상, 입도 분포, 납 동위원소 비 등을 파악하여 미확인 화산활동의 발생지를 추정함.
- 미량금속원소와 납 동위원소 비를 분석하여 2000년대 이후 남극으로 유입되는 인간기원 물질의 오염원 및 유입양상 변화를 파악함.
- 빙하코어 내에 존재하는 셀레늄의 미량분석방법을 정립하고, 남극 빙하코어시료로부터 세계 최초의 과거 변화 기록을 복원함. 상기 결과를 위성 관측 자료와 비교하여 남극지역의 대기 중 셀레늄 농도를 조절하는 인자를 파악하고 해양환경변화에 대한 프록시로써 활용 가능성을 확인함.

KOPRI 극지연구소

- 남극 빅토리아랜드는 로스해에 인접한 지역이며 인도양과 태평양 발원의 공기가 유입되는 ㅅ이다. 서남극 아문젠해 중심으로 발달하는 Amunsen Sea Low(ASL)의 영향을 받는 지역으로 최근 지구온난화에 따른 기온, 강설량, 해빙의 변화 등이 민감하게 반영되는 지역이다.
- 남극 빅토리아랜드 빙하코어에 나타나는 과거 2000년간의 화산 기록을 복원하여 화산 활동 전, 후의 대기 중 에어로졸의 특성을 파악하고 화산활동이 빅토리아랜드 지역의 대기환경 변화에 어떠한 영향을 미쳤는지 이해하고 남극 대기 순환에 대한 이해를 높인다. 빙하 내 화산재, 에어로졸의 희토류원소, 미량금속원소 농도를 복원하고 개개입자 수준에서 입자의 특성을 분석하여 화산의 종류, 지역을 규명하고 에어로졸의 유입 경로를 이해한다.
- 남극 빅토리아랜드의 빙하코어에 나타난 해빙변동, 폴리냐 형성에 따른 유기, 무기 에어로졸의 변화를 복원하여 남극 환경에 대한 생지화학적 특성을 이해한다. 지역적 환경 특성을 고려하여 Styx, GV7, Hecules Neve에 나타나는 에어로졸의 특성을 복원, 비교하여 계절적인 특성을 비롯한 지역적인 영향을 확인한다. 관측자료를 기반으로 한 최근의 해빙변동, 폴리냐 형성에 따른 남극 에어로졸의 유기, 무기 입자의 종류와 특성을 규명하여 과거 환경을 이해하고 복원한다.
- 그린란드 NEEM 빙하코어의 개개입자 수준의 특성분석과 더불어 희토류 및 미량금속원

소에 대한 동위원소 분석을 통한 기원지의 건조지역 변화 및 확장을 복원한다. 에어로졸의 광물성먼지를 분석하여 기원지의 특성을 파악하고 대기 순환을 이해함으로써 기원지의 이동, 변화 및 확장을 복원한다.

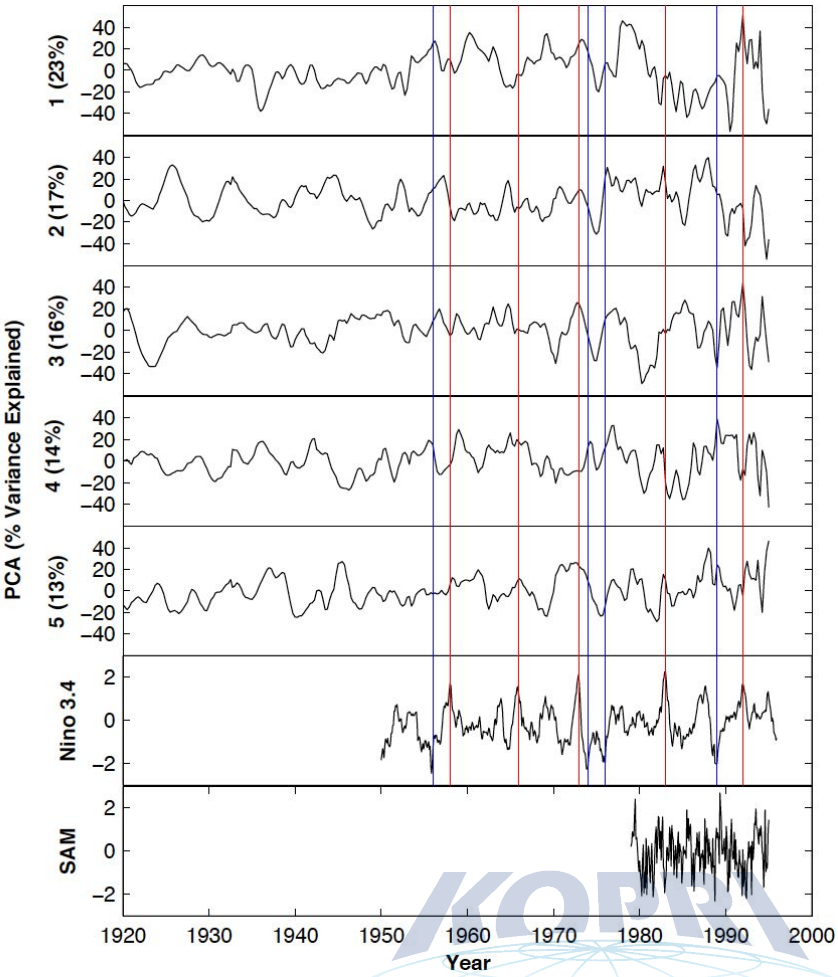
○ 본 연구에서는 천부빙하시료의 안정동위원소를 분석하여 기본적으로 빙하의 연대측정에 활용하고, 안정동위원소 값을 변동시키는 원인을 파악하여 여러 레벨의 기상변수를 복원시키는 것이 목적이다. 기본적으로 온도변화에 민감한 물안정동위원소의 분화(fractionation)정도를 이용하여 빙하의 계절성을 이용하여 빙하의 연대측정에 이용할 수 있으며, 과거 기온의 복원에 사용되고 있다. 하지만, 이러한 물안정동위원소의 분화에 영향을 미치는 요인들은 해수면의 온도 이외에도 해빙의 크기(sea ice extension), 수증기의 기원(origin of moisture source)등 다양한 요인들이 존재하고 있다. 따라서, 물안정동위원소의 변동에서 기온 이외에 위에서 언급한 요소들을 추출해 낼 수 있으며, 이는 다중회귀분석(multiple linear regression)을 이용하면 해수면의 온도 및 과거의 해빙의 크기를 다음의 식을 이용하여 복원할 수 있다(식 1).

$$y = \sum_{i=1}^{n} a_i x_i + e \qquad (1)$$

KOPRI 극지연구소

○ 여기서 y는 물안정동위원소값이며, x는 물안정동위원소를 변화시키는 다양한 원인들에 해당되며, a는 회귀상수에 해당되며, e는 선형회귀 이후의 잔차에 해당된다.

○ 또한, 주성분분석(principal component analysis, PCA)를 이용하여 빙하의 안정동위원소의 시그널(signal)을 분해하고 이를 통해 물안정동위원소에 영향을 미치는 요소에 대한 정량적인 접근이 가능하다(그림). 주성분분석은 고차원의 데이터를 저차원의 테이터로 환원시키는 방법이다.



KOPRI 극지연구소

○ 그림. 물안정동위원소를 이용한 주성분분석결과. 주성분분석결과와 ENSO 및 SAM과의 비교(Jones et al., 2014)

○ 과거 30여년 이상 측정된 현장자료들, 예를 들어 해빙의 면적등을 이용하여 물안정동위원소와 비교하여 관계식을 추정한 후 이를 더욱 오래된 빙하의 안정동위원소에 적용하여 과거의 다양한 기상변수들을 복원할 수 있다. 안정동위원소 이외에 해빙의 면적을 지시할 수 있는 이온들의 분석(MSA, Na, Cl)이 같이 이루어진다면 좀 더 정확한 연구결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

○ 펨토그램(1 fg = 10-15 g/g) 농도 수준의 오스뮴 동위원소 분석기술 개발
○ 극지연구소에서 보유하고 있는 남북극 빙설 및 빙하코어 시료를 활용하여 분석 신뢰도 검증

○ 편공기를 이용한 국내 연구의 현실을 진단
○ Styx 편공기 시료의 특징과 향후 남극 빅토리아랜드 일대 빙하의 편공기 특성 연구방향 모색
○ 편공기 연구를 이용한, 연령측정법 개선 및 고기후자료 해석 능력을 함양하기 위한 연구 전략 모색

제 2 장 국내외 기술개발 현황

2-1. 국내 동향

- 국제공동프로그램(NEEM, GV7)을 통하여 획득한 천부빙하코어의 물안정동위원소비를 분석하여 연대 측정에 활용
- 단독으로 시추한 Styx 천부빙하코어에 대하여 물안정동위원소비 측정 중
- 공동광자감쇠분광법을 사용한 물의 δ17O 분석법 개발

- 극지연구소에서는 장보고과학기지 건설 이후 독자적인 빙하시추 프로그램을 추진하여 2014-15 시즌에 스틱스 빙하 (Styx glacier)에서 210.5m, 2015-16 시즌에는 허큘레스 네베 (Herculus Neve) 지역에서 80m의 천부급 빙하를 시추하였다. 스틱스 천부빙하는 밀도, 전기전도도등의 기초 프록시 측정하였고, 펀압축모델링을 이용하여 과거 1300년? 정도 복원 가능성이 있는 것으로 조사되었다. 표층눈과 펀코어 (~10m)의 이온분석 자료를 측정하여 로스해의 해양환경 복원연구를 예비연구 진행하고 있음.

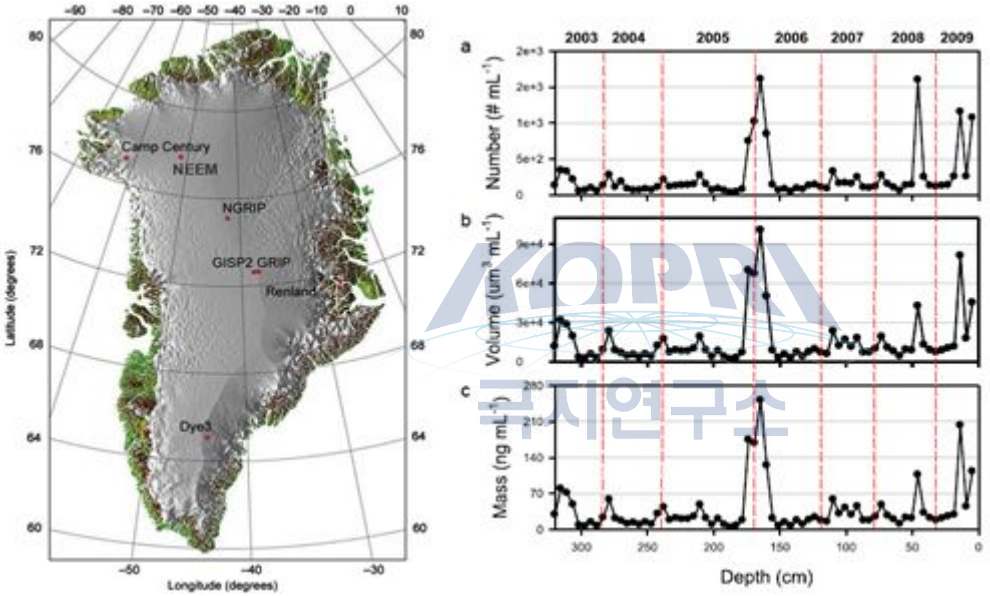
- 동남극 퀸머드랜드 (Queen Maud Land)에서 시추한 주상 눈 시료에서 백금 (Pt), 이리듐 (Ir), 로듐 (Rh)등의 백금족 원소를 분석하여 최초로 지난 50년간 남극 대기중 백금족 원소의 변화 기록을 복원하였으며, 이를 통해 화산 활동에 의한 백금족 원소 농도 증가 및 인간 활동에 의한 Pt, Rh 대기 오염 양상을 확인함 (Soyol-Erdene et al., 2011).
- 동남극 돔 후지 (Dome Fuji)에서 시추한 주상 눈 시료로부터 최초로 과거 50년간의 비소 (As), 몰리브데늄 (Mo), 안티모니 (Sb) 및 탈륨 (Tl) 변화기록을 복원하여 1990년대 이후 남아메리카 국가에서 시행하고 있는 오염 저감 정책의 효용성을 확인함 (Hong et al., 2012).
- 극지 빙설시료 내 납 동위원소 비의 고해상도 복원 및 시료 전처리 효율 향상을 위해 기존의 오염제거 전처리 방법을 개선하고 이를 그린란드 NEEM 심부빙하코어에 적용하여 새로운 분석방법의 바탕값 및 분석결과의 정밀/정확도를 확인함 (Han et al., 2015).
- 유도결합플라즈마 질량분석기 (ICP-SF-MS)를 이용하여 극지 빙설시료 내에 pg/g 수준의 미량으로 존재하는 셀레늄 분석기법을 정립하고 이를 그린란드 NEEM 빙하코어 시추 캠프에서 시추한 주상 눈 시료에 적용하여 최초로 셀레늄의 연속적인 계절 변화 기록을 복원함 (Lee et al., 2015). 또한 NEEM 천부 빙하코어의 셀레늄 분석 결과, 1900~1970년 동안의 그린란드 대기 중 셀레늄 변화가 대서양의 일차 생산성 변화와 유사한 양상을 보인다는 것과 이를 통해 셀레늄의 과거 해양생산성 변화에 대한 프록시 가능성을 제시함 (Lee et al., 2016).

- 국내에서는 남극 빙하 코어 내 에어로졸을 개개 입자 수준에서 분석하여 과거 대기 환경을 복원한 결과는 전무함.

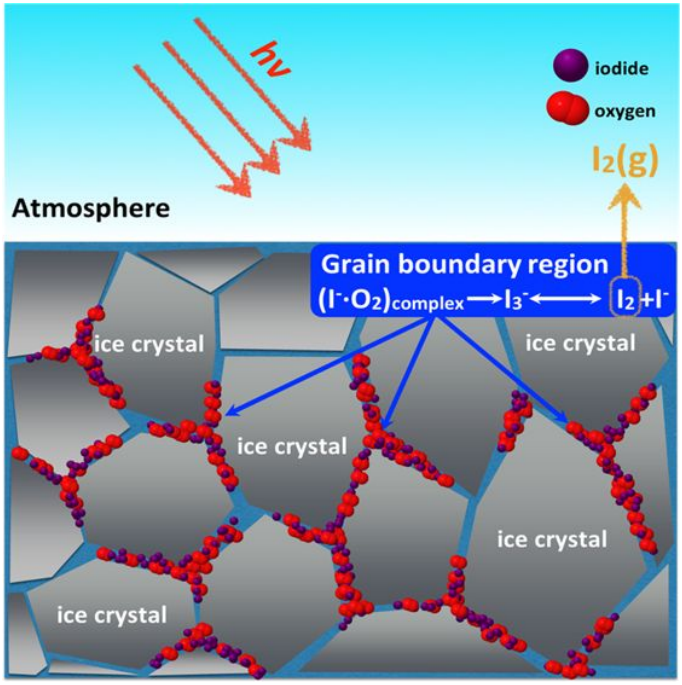
○ 대기 에어로졸 분석 기술을 빙하코어에 접목하려는 시도만 있음.

○ 극지연구소는 쿨터카운트로 극지 눈과 빙하에서 광물성먼지의 입자크기와 입자분포를 측정하는 분석법을 개발하였다 (Kang et al., 2014). 극지 눈시료에서 광물성먼지의 입자크기분포는 지역과 시기에 따라 다르게 나타나기 때문에 쿨터카운트의 아파츄 튜브 직경에 따라 입자크기의 분석범위를 설정하여 북극 그린란드와 남극 대륙의 광물성먼지의 입자크기를 분석하였다. 확립된 분석법으로 광물성먼지의 계절적 변동성 및 고기후적 주기성 연구에 활용하고 있다.

○ 북극 그린란드 NEEM 주상눈시료에서 광물성먼지의 계절적 주기성 연구를 수행하였다 (Kang et al., 2015). 광물성먼지의 2003년부터 2009년 기록을 통해 북극 그린란드로 유입되는 대기수송, 기원지추정을 통해 광물성먼지의 입자농도와 이온성분 등의 결과를 종합적으로 이해하였다.



○ 극지연구소는 남극 세종기지에서 요오드의 대량발생이 태양의 광반응에 의해 tri-iodide의 생성에 의해 발생한다는 메카니즘을 고농도의 실험실 조건에서 확인하였다 (Kim et al., 2016). 극지 눈 (빙하)시료에서 극미량농도의 할로겐 농도의 변화는 국내에서는 이루어지지 않고 있다.



○ 빙하를 이용한 과거의 환경 및 기후를 복원하기 위해서는 먼저, 연구목적에 해당되는 지역을 선정해야 한다. 이후 지구물리탐사 등 여러 조사를 통하여 최적화된 장소를 선정한 뒤에 빙하시료를 시추하여야 한다. 이를 위해서도 목표에 맞는 빙하시추기술이 존재하여야 하며, 현재 극지연구소에는 500m급 빙하시추기와 200m급 빙하시추기를 보유하고 있다. 지역에 따라 과거 50년에서 수 만년전까지의 빙하를 획득하여 과거의 환경 및 기후를 복원할 수 있다. 이를 위해서는 얼음의 안정동위원소, 주요이온 등 빙하 속에 들어 있는 여러 화학성분들을 결정하여야 하는데 이 또한 매우 어려운 일이다.

○ 국내에서 물의 안정동위원소는 주로 기초과학지원연구원의 동위원소질량분석기를 활용하였지만 고가의 분석비 및 분석 수량의 한계로 인해 고해상도의 연구가 필요한 빙하연구에는 적합하지 않은 것으로 판단되어 극지연구소에서는 레이저분광법을 이용한 장비를 활용하여 물 및 얼음의 안정동위원소를 분석하고 있다. 이태리와의 공동연구를 수행하고 있는 GV7시료, 중위도지역의 기후변화를 관찰하기 위한 참바그라프 시료 등은 레이저분광법을 통해 현재 얼음의 안정동위원소분석이 완료되어 있는 상태이다.

○ 얼음의 안정동위원소를 이용하여 스노우핏(snowpit) 또는 빙하의 연대측정이 가능하다. 빙하 또는 눈의 안정동위원소는 계절성(seasonality)를 가지게 되는데 해수로부터 기원하는 수증기가 여름과 겨울철의 해수표면의 온도에 따라 동위원소분화정도가 다르기 때문이다. 이러한 계절성은 1년 주기의 사인(sine) 함수형태로 나타나게 되고 이를 이용하여 스노우핏과 빙하의 연대를 측정할 수 있다. 하지만, 이러한 계절성을 이용한 연대측정은 검증작업이 동반되어야 확증 될 수 있다.

○ 앞에서 언급된 물안정동위원소의 계절성은 물안정동위원소가 온도와 선형관계를 가지는 특성으로 인해 나타나는 특징이다. 기본적으로 해수표면에서 증발된 수증기는 온도의 높고 낮음의 여부에 따라 동위원소분화정도에 차이가 나게 되는데, 이로 인해 물안정동위원

소는 기온 또는 수온과 선형적인 관계를 가지게 된다. 따라서, 물안정동위원소는 과거의 온도를 지시하게 되고 빙하의 안정동위원소를 활용하여 과거의 온도를 재구성할 수 있다. 현재, 국내에서는 남극에서 가져온 시료의 온도복원을 시도하고 있다.

○ 극지연구소 위탁과제의 일환으로 서울대학교 빙하·고기후 연구실에서 펀(firn)층의 공기를 채집하고 분석하는 기술을 2014-2016년도에 개발하였다. 2014/2015년 남극 하계시즌에 Styx빙하코어에서 채취된 저해상도 공기시료에 대한 온실기체 농도 분석결과를 바탕으로, 펀층(firn layer)에서의 기체 거동에 대해 정량적인 모델링을 수행하였다. 이로서, 향후 빙하를 이용한 온실기체 연구의 기초 기술을 확보하게 되었다(그림 A).

그림 A. 남극 Styx 펀층의 공기를 채집하는 모습. 펌프시스템을 이용하여 3리터 유리플라스크에 펀공기 시료를 모으고 있다.(서울대학교 빙하/고기후 연구실 제공)

2-2. 국외 동향

○ 빙하코어의 고해상도 연구를 위하여 연속흐름분석(continuous flow analysis)방법을 적용
○ 고해상도 연구를 위하여 국지적으로 여러 코어를 시추하여 signal-to-noise ratio를 높임
○ 빙상 내부에서 발생하는 물안정동위원소 확산현상에 대한 연구 진행
○ 빙상과 대기간의 상호작용이 빙하코어의 물안정동위원소비에 미치는 영향에 대한 연구 진행
○ 관측, 분석, Isotope-enabled GCM의 병행
○ δ17O에 관한 연구 증가

로스해의 최근 해양환경 특성 연구사례

○ 로스해에는 남극에서 가장 면적이 큰 로스 shelf polynya (RSP) 와 상대적으로 작은 테라노바베이 polynya (TNB), 맵머도사운드 polynya (MCM)가 존재함. 연평균 RSP의 면적은 TNB와 MCM에 비해 ~10배정도임. 활강풍의 빈도와 세기가 여전히 높은 시기에 Polyna가 형성될 경우 해양의 성층화가 불안전하여 오히려 녹조류 번성 (algae bloom)은 좀 더 늦춰지는 경향이 있음. 비록 RSP와 TNB가 인접한 곳에 위치하고 있음에도 RSP에 비해 TNB의 녹조류 번성 시기가 ~6주 정도 늦어지는데 두 지역의 기상요인의 차이에 기인하는 것으로 조사됨. TNB 지역은 RSP 지역에 비해 활강풍의 빈도는 2배정도, 세기는 3배정도 높은 것으로 나타남 (Arrigo 등., 1998).

○ 로스해와 웨델해는 최근 남극에서 해빙면적 증가추세를 보이는 대표적인 지역으로 두 해역에 존재하는 폴리냐에 의한 해빙 생성과 심층수의 형성이 매우 중요한 곳임. 로스해와 웨델해의 평균 해빙생산면적은 각각 740±90, 240±30km3로 로스해가 3배정도 크고, 로스해는 RSP, TNB, MCM에서 각각 600, 90, 50km3 생산되는 것으로 조사됨. 로스해의 해빙생산면적 추세를 조사한 결과 1992-2008년까지 연간 ±21km3 yr-1로 지속적으로 증가하고 있음 (Drucker 등., 2011).

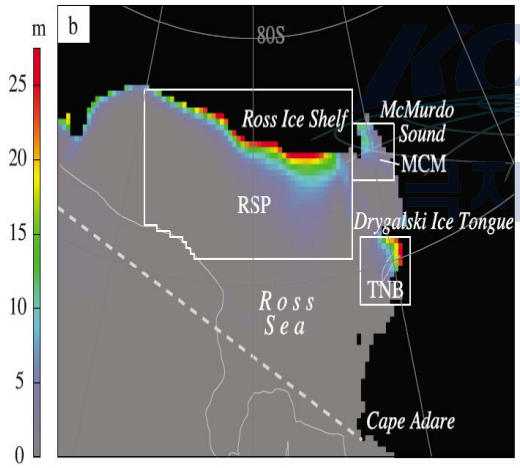


그림 ? 로스해의 폴리냐

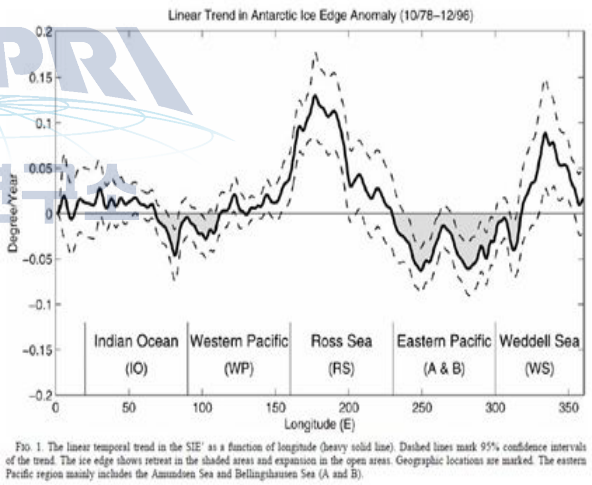


FIG. 1. The linear temporal trend in the SIE' as a function of longitude (heavy solid line). Dashed lines mark 95% confidence intervals of the trend. The ice edge shows retreat in the shaded areas and expansion in the open areas. Geographic locations are marked. The eastern Pacific region mainly includes the Amundsen Sea and Bellingshausen Sea (A and B).

그림 ? 남극의 해빙면적 변화 추이

빙하코어 이온성분 프록시를 이용한 남극해와 로스해의 과거 해양환경 (해빙과 폴리냐) 복원 연구

○ 빙하코어의 해염기원 에어로졸 성분과 생물학적 기원 성분은 과거 남극의 해빙면적 복원에 활용하고 있는 대표적인 프록시임. 해염기원 에어로졸 성분의 경우 빙하기와 간빙기 시기의 해빙면적의 특징을 밝히는 데 유용함. 생물학적 기원 성분의 경우 과거 ~200년 정도까지의 비교적 짧은 시간 범위에서 해빙면적의 연간 변동특성을 밝힐 수 있고 최근에는 Holocene 동안의 해빙면적의 변화 기록을 복원할 수 있을 것으로 조사됨.

○ 빙하코어의 해염기원 에어로졸 성분의 생성 기작이 명확하지 않은데 해양의 해수면, 새로

형성되는 해빙 위 눈꽃 (frost flower), 그리고 해빙 위 눈이 주요한 발생경로로 제안되고 있음. 빙하코어의 해염 기원 에어로졸 성분의 농도변화 특성은 해빙면적보다는 주로 기상요인들에 의해 연간 농도 변동성이 더욱 크게 변하게 나타남.

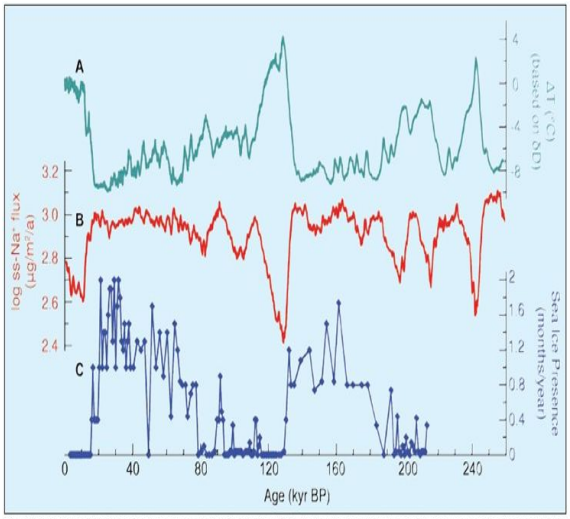


Figure 2: Comparison between ice and marine proxy records of sea ice over the last 2 glacial-interglacial cycles. A) Antarctic temperature anomaly at Dome C relative to modern (Jouzel et al., 2007). B) Sea ice extent proxy (ssNa+ flux) from Dome C (Wolff et al., 2006). C) Sea ice presence derived from diatom assemblages in marine record SO136-111 (Crosta et al., 2004).

그림 11 Dome C에서의 온도, 해염 flux, 해빙 복원 자료와의 비교

KOPRI 극지연구소

○ 생물학적 기원 황 화합물은 해빙지역에서의 DMS 가스 생성, DMS에서 MSA로의 대기산화, MSA의 수송과 침강, 보존의 4가지 주요과정에 의해서 농도 변화특성이 결정됨. MSA의 농도는 남극의 내륙지역보다 해안지역의 사이트에서 해빙면적의 변화에 민감한 것으로 밝혀짐 (Welch 등., 1993). 해안지역 빙하코어의 MSA는 겨울철 해빙면적이 증가한 후 하계시즌에 더욱 농도가 증가함. Curran 등 (2003)은 Law dome 사이트의 MSA와 겨울철 해빙면적과의 상관성을 조사한 후 최초로 해빙면적의 변화를 정량적으로 복원하였음. Law dome에서 MSA를 활용하여 성공적으로 해빙면적을 복원할 수 있었던 요인으로 해안 지역의 높은 적설 조건, 규칙적으로 해빙지역을 통과하여 빙하코어 시추 사이트로 이동하는 저기압의 형성, 그리고 여름철 시기 지속적으로 해안선 근처까지 해빙이 용융된다는 점을 지적하고 있음. Abram 등 (2010)은 20세기의 벨링스하우젠해의 해빙변화 기록을 복원하기 위해 남극반도에서 시추한 3개의 빙하코어 프록시 자료를 결합하여 단일 코어 프록시 자료의 노이즈 영향을 줄이고 MSA의 지역적인 농도변동 특성을 추출할 수 있었음. 그리고 눈 강하시의 대기수송 특성을 규명하고 NCEP 재분석 자료 (대기온도, 해면기압, 850mb zonal/meridional 바람)와 MSA의 상관성을 분석함으로써 MSA 농도 특성에 영향을 미치는 기상특성을 규명함. Becagli 등 (2009)은 해안에서 200km 내륙에 위치한 Talos dome의 MSA 농도 변동 특성은 로스해의 해빙면적 뿐만 아니라 해양지역에서 dome 사이트까지의 수송과정의 효율성을 반영하고 있다고 보고함.

○ 빙하코어 MSA는 일부 지역에서는 겨울철 해빙면적의 변화와 음의 상관성을 나타내기도 하는데 여름철 동안에 해안지역 일부에 해빙이 남아있고 해빙내부의 lead와 polynas 지역

에서 녹조류가 성장하는 지역으로 조사됨. 특히 polyna가 존재하는 로스해와 아문젠해 해안지역의 빙하코어 MSA자료는 여름철 polyna의 해양지역 (open water)의 면적을 반영한다고 보고하고 있음. 또한 해빙지역에서 발생한 MSA가 바람방향에 의해 해안지역 시추사이트로 대기 수송이 원활하지 않고 MSA 농도 변동이 바람방향에 의해 주로 영향을 받는 경우 역시 음의 상관성이 나타남.

- Rhodes 등 (2009)는 Mt Erebus Saddle (MES)에서 표층의 MSA 자료를 활용하여 여름철 해빙조건과 해양의 1차 생산속도 (rates of marine primary production)를 복원함. MSA는 polyna의 해양면적 (open water area)과 식물성 플랑크톤 생산력 (phytoplankton net primary production)과 매우 높은 상관성을 보임. Rhodes 등 (2012)은 MES 표층의 MSA와 일차 생산속도의 관계식과 빙하코어 (깊이: 168m)의 MSA 자료를 활용하여 1825년과 1875년 구간의 로스해 polyna의 생물학적 생산력 (biological productivity)을 복원하여 1875 AD 이후에 비해 80% 이상 증가했다고 제안함.
- Sinclair 등 (2014)은 화이트홀 빙하 (Whitehall glacier, 72°54′S, 169°5′E, 400m asl)에서 Deutrium excess, MSA, 해염성분을 활용하여 최초로 과거 130년 동안의 로스해 해빙면적 (sea-ice area) 기록을 복원함. 로스해 해빙면적은 1880년대-1950년대까지는 정체, 1950년 중반-1990년대 초반 2-5% 감소, 1993년 이후 5% 증가 추세를 나타냄. MSA와는 1950년 중반-1990년 초반까지는 양의 상관관계, 1993년 이후는 음의 상관관계가 나타남.

KOPRI 극지연구소

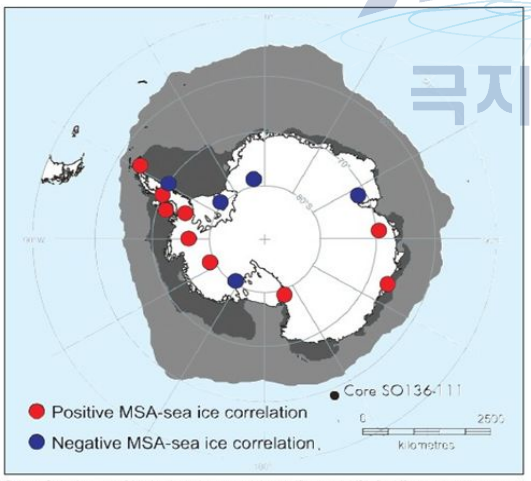


Figure 1: Spatial pattern of the correlation between methanesulfonic acid (MSA) for different coastal Antarctic ice core sites, and the winter maximum sea ice extent for the longitudinal sector considered to be the relevant source (Welch et al., 1993; Sun et al., 2002; Curran et al, 2003; Foster et al, 2006; Abram et al, 2007; Abram, unpublished data). Light and dark gray shading denotes mean winter and summer sea ice extent, respectively.

그림 12 남극의 겨울철해빙면적과 빙하코어 MSA와의 상관성분석 결과 (2009)

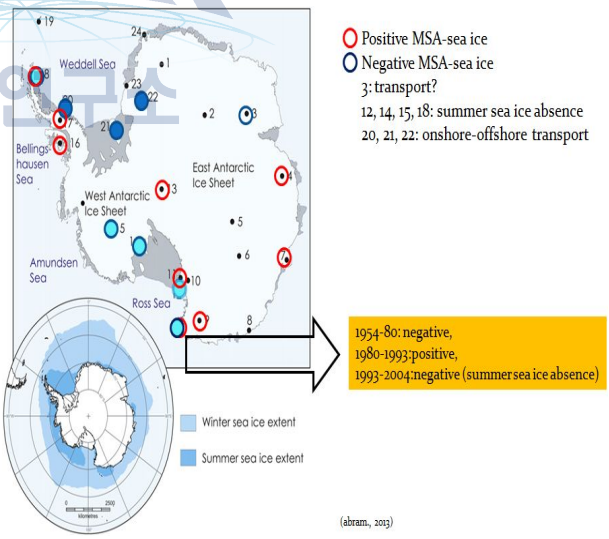


그림 13 남극의 겨울철해빙면적과 빙하코어 MSA와의 상관성분석 결과 (2013)

대규모 대기 순환과의 관련 조사 사례

- 태평양 해역의 ENSO 현상은 남극 주변의 저기압 (특히 ABSL)에 매우 중요한 역할을 수행함. 일반적으로 La Nino시기에 로스해 근처 (Ross Sea basin)에 아문젠해 저기압 중심이 형성되고, El Nino 시기에 아문젠 해역 동쪽에 아문젠해 저기압 중심이 형성됨. La

Nina (SOI>0) 시기에 강화된 극전선제트 (Polar Front Jet)는 아문젠해 저기압의 강화를 유도하고 저층의 동풍과 남극대륙으로부터의 활강풍이 강화됨 (Bertlet 등., 2006).

- SOI와 극지역 기후 이상 (anomalies) 현상은 벨링스하우젠해, 아문젠해, 웨델해에서 가장 높은 상관성을 보임. SOI>0 (SOI<0)인 경우 로스해와 아문젠해의 180°-130°W 사이의 해빙면적은 증가 (감소), 벨링스하우젠해와 웨델해의 100°W-10°E의 해빙은 감소 (증가), 웨델해의 10°-50°E에서 약간 증가(감소) 현상이 나타남 (Kwok 등., 2002).
- La Nina (SOI>0) 시기에 로스 해역에서 북빅토리아랜드 (talos dome)로 수증기/해양 에어로졸 유입 증가함. Talos dome에서 시추한 빙하코어의 MSA, SOI, SAM의 주기성 분석 결과 MSA 농도가 높게 나타나는 2.9년과 6.9년 주기는 SOI와 양의 상관관계로 SO 진동에 의해 유도된다고 보고됨 (Becagli 등., 2009).

- 동남극에 위치한 탈로스돔 (TALDICE)과 돔 C (EPICA)에서 시추한 빙하코어의 입도분포 및 Sr-Nd 동위원소 비 분석 결과, 남극 대기 중 입자물질의 기원이 마지막 빙하기 동안에는 주로 남아메리카에서 기원한 반면 홀로세동안에는 남극대륙 지각 먼지의 영향을 크게 받는 것으로 확인됨 (Delmonte et al., 2010).
- 최근 서남극 및 그린란드 빙하코어에서 고해상도의 화산기원물질 복원 기록을 통해 적도 주변 및 북반구 고위도 지역에서 발생한 화산활동에 의해 유럽지역의 기온이 -0.37 ~ -1.03℃ 하강한 것으로 보고되었음 (Sigl et al., 2015).
- 남극의 다양한 지역에서 시추한 빙하코어시료로부터 복원된 납의 유입량과 동위원소 비 변화 기록을 종합한 결과, 1990년대 중반 이후 남반구 전반에 걸쳐 유연휘발유를 규제하면서 납 유입량이 감소하고 있는 것으로 확인됨. 그러나 여전히 자연적인 유입량에 비해 3배 높은 유입량을 보이고 있어 인간 활동에 의한 영향이 심각한 것으로 파악됨 (McConnell et al., 2014).
- 남극점에서 시추한 빙하코어의 바륨 (Ba) 변화기록을 살펴보면 1980년대 이후 급격한 증가 양상을 보이고 있으며, 이는 남극점에 위치한 아문젠-스콧 과학기지에서 운영하는 디이젤 엔진 차량의 매연 저감 장치에 사용되는 Ba에 의한 것으로 확인됨 (Korotkikh et al., 2014).
- 극지역 해빙분포가 기후시스템에서 중요한 역할을 담당한다는 사실이 알려지면서 남극의 다양한 지역에서 해양염분원소 (sea salt)와 해양생물에서 기원하는 MSA (methyl sulfonic acid)를 이용하여 과거의 해빙 변화를 복원하는 연구가 수행되고 있음 (Abram et al., 2013 and therein). 그러나 지역에 따라 상반되는 양상을 보이고 있어 추가적인 해양환경 프록시 개발이 요구됨 (Abram et al., 2013).
- 최근 러시아의 북극해 인근에서 시추한 빙하코어시료에서는 요오드, 브롬 등 할로겐 원소의 변화가 계절별 해빙 면적과 상관관계가 있는 것으로 확인되어 새로운 해양환경 프록시 가능성이 제시되었음 (Spolaor et al., 2016).

- 남극에서 새로운 미네랄 형태를 발견하여 보고하였으나 아직 파악되지 않은 에어로졸의

KOPRI 극지연구소

화학종들이 많은 실정 (Genceli et al., 2013)

- 일본 돔후지 빙하코어에서 황산염과 염산염을 분석하여 과거 기후변화를 복원함 (Oyabu et al., 2014)

- 대기의 복사평형, 해양의 영양성분에 영향을 미치는 광물성먼지가 기후변화에 의해 변동되는 기록을 동남극 Vostok, EPICA Dome C 빙하코어에서 80만년간 기록복원을 통해 빙하기-간빙기간의 기후사이클 변화에 따른 광물성먼지의 발생, 대기이동, 침적의 변동성을 정량화하고 기후-광물성먼지의 연관성을 제시하였다 (Lambert et al., 2008).
- 빙하기-간빙기의 광물성먼지 연구에 따르면 대기 중 광물성먼지 농도가 증가하면 대기온도가 하락하는 연관성을 찾을 수 있다. 20세기 동안 남극반도에서 고해상도 알루미늄실리케이트 광물성먼지의 침적기록을 복원하는 연구를 발표하였다 (McConnell et al., 2007). 알루미늄실리케이트 광물성먼지의 침적이 20세기에 두배가량 증가하였고 이는 남반구의 1도 정도 상승과 연관된 연구는 현재 대기의 광물성먼지의 발생, 기후에 대한 영향을 이해하는데 도움을 준다.
- 동남극 Dronning Maud Land 해안지역에서 시추한 65 m 빙하코어 (IND-25/B5)의 광물성먼지의 변동성을 복원하는 연구가 있다 (Laluraj and Satheesan, 2014). 이전까지 빙하기-간빙기의 큰 기후변화 사이클에 따른 광물성먼지 연구와 더불어 최근 50년간 광물성먼지의 변동성을 파악하는 고해상도 빙하코어연구이다.
- 이태리 연구팀은 빅토리아랜드의 Talos Dome의 빙하코어연구를 수행하고 있다 (Delmonte et al., JQS, 2010; Delmonte et al., 2013). Talos Dome 빙하코어에서 25만년의 광물성먼지 변동기록과 빙하기와 홀로세 기간 광물성먼지의 기원지 추정을 Sr-Nd 동위원소분석을 통해 연구하였다. 빙하기에는 남아메리가가 광물성먼지의 주요 발생지역이지만 홀로세 기간중에서는 북빅토리아랜드의 주변 지역이 발생지역이다. 태평양/로스해 지역에서 불어오는 해양성 대기수송이 Talos Dome 빙하코어의 광물성먼지에 영향을 미친다.

- 극지 눈 및 빙하코어에서 할로겐 연구는 Talos Dome, Law Dome, NEEM, Svalbard에서 수행하고 있다. 눈 시료의 할로겐 (Br, I) 분석은 ICP-SFMS 또는 IC-MS 등으로 분석할 수 있지만 모두 극미량의 농도를 분석하기 때문에 분석법의 정립이 매우 까다롭다. 현재는 이태리 연구팀의 Spolar et al., 등이 할로겐 연구를 활발하게 수행하고 있기 때문에 극지연구소에서 GV7 빙하코어 공동연구를 통해 분석법의 습득, 시료의 분석, 연구결과의 해석등 공동연구가 필요하다.

- 해외에서는 오랜 빙하연구의 경험 축적으로 인해 시추부터 동위원소분석, 동위원소가 포함된 GCM (general circulation model) 연구까지 다양한 연구를 수행하고 있다(그림). 먼저, 물안정동위원소를 이용한 연대측정모델이 개발되어 있어 물안정동위원소의 화학분석이 완료되면 모델을 활용하여 연대를 추정할 수 있다. 앞에서 언급된 동위원소의 계절성

을 확인하여 1년 단위로 연대측정을 하는 원리이다. 다음으로 국내에서는 전혀 이루어지지 않고 있는 연구인 물안정동위원소가 포함된 GCM연구는 현재 미국, 프랑스, 일본등에서만 이루어지고 있다. 여러 기후그룹에서 개발된 전지구순환모델에 물안정동위원소가 탑재된 모델로서 기상변화와 강우동위원소 결과가 같이 계산될 수 있다. 현재 모델이 잘 운영된다면 과거의 기후와 안정동위원소간의 관계를 파악할 수 있으며, 이는 빙하의 안정동위원소를 통해 확정할 수 있다. 국내 빙하연구의 질을 한 단계 끌어 올리기 위해서는 국내에서도 모델 개발이 필요하겠지만 이는 5-10년 이상의 연구기간이 필요하므로 현재에는 외국의 모델그룹과 공동연구를 진행해야 할 것으로 판단된다.

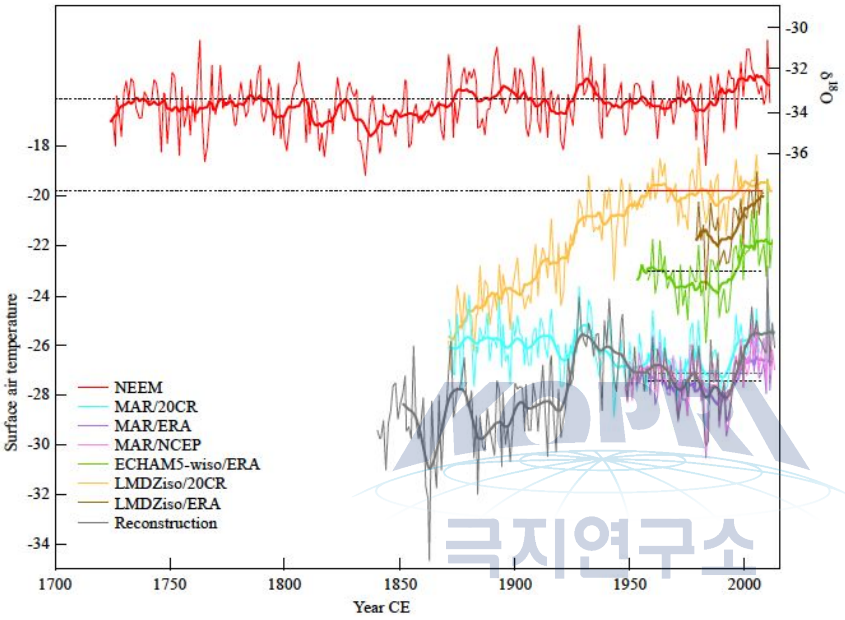


그림. NEEM에서 복원된 온도와 모델간의 비교연구(Masson-Delmotte et al., 2015)

- 현재 미국 다트머스대학교가 유일하게 초극미량 농도 수준의 오스뮴 동위원소 분석기술을 보유하고 있음.

- 미국은 남극점과 남극 심부시추지역(WAIS Divide), 그린랜드 summit에서 편공기를 채취하여 농도분석과 모델링 연구를 실시하고 있다. 최근 남극점 기지 근처에서 실시한 편공기 채집 과정에서 블래더 시스템에 문제가 생겨 채집에 실패하였다. 펜실베니아 주립대학의 Todd Sowers교수, 스크립스 해양연구소의 Jeff Severinghaus교수, 오레곤주립대학의 Ed Brook교수, UC Irvine의 Murat Aydin박사가 공동으로 연구를 진행한다(Aydin et al., 2010; Aydin et al., 2011; Battle et al., 1996; Battle et al., 2011; Buizert et al., 2012; Severinghaus and Brook, 1998; Severinghaus et al., 1999)
- 유럽은 프랑스 LGGE, 스위스 베른대학이 주도가 되어서 남극과 그린랜드 편공기 채집과 모델링 연구를 주도하고 있다(Herron et al, 1980; Schwander et al., 1984). NEEM 빙하코어 시추시 국제적인 편공기 연구를 주도하였다(Buizert et al., 2012).

○ 일본은 빙하코어 시료 해석에 필요한 최소한의 펀공기 채취 및 모델링 연구를 실시하고 있으며, 연구인력 부족으로 활발한 펀공기 연구는 수행되고 있지 못하다.

KOPRI
극지연구소

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3-1. 연구개발 목표 및 내용

연구개발 목표	내용
○고해상도 빙하코어 연구를 위한 연대측정법	○물안정동위원소비를 이용한 annual layer counting, 화산 침적물 기록, 편 압축 모델 등 빙하코어의 정밀연대 측정에 사용된 사례 조사
○기온과 물안정동위원소간의 시공간적 상관관계	○빅토리아랜드에 설치된 국내외의 AWS(자동기상관측장비) 현황, 인공위성자료, 재분석 자료를 활용한 기온자료 획득방법과 이들 자료와 물안정동위원소비의 시공간적 연관성 연구 가능성 조사
○펀/얼음에서 동위원소 확산	○빙상 내에서 확산 작용이 동위원소비에 미치는 영향과, 이를 역확산(back-diffusion) 모델을 사용하여 강설 당시의 동위원소비를 복원한 사례와 관련 연구 현황 조사
○빅토리아랜드 기록의 전지구적 대표성/지역적 특성	○빅토리아랜드에서 수행된 사전 연구 조사, IPICS2k, PAGES2k 등 국제공동 프로젝트로 진행된(혹은 진행 중인) 다른 지역의 연구 사례 조사, 비교 연구 가능성 조사
○자연적/인위적 요인에 의한 남극 빅토리아랜드 대기환경 변화기록 복원	○과거 1000년간 기후변화, 화산활동, 해양환경변화와 같은 자연적인 요인과 산업 활동 등의 인위적 요인이 남극 빅토리아랜드 대기환경에 미치는 영향을 고해상도로 복원
○ 과거 2000년간 자연적, 인위적 기원의 에어로졸 특성 변화 비교	○ 남극 빅토리아랜드 Styx, GV7, Hercules Neve 빙하코어에서 화산, 플루토늄 기록 복원을 통해 남극 대기 순환 이해 ○ 해빙변동, 폴리냐 형성에 따른 유기, 무기 에어로졸의 변화 복원을 통해 남극 환경에 대한 생지화학적 특성 이해
○ 그린란드 NEEM 및 남극 Dome C EPICA 빙하코어를 활용하여 장주기 기후변화 복원과 원인 규명	○ 그린란드 NEEM 빙하코어의 에어로졸 분석을 통한 기원지 건조지역 변화 및 확장 연구
◦과거 2000년간 광물성먼지의 자연적·인위적 변동성의 정량화와 특성 연구	◦빅토리아랜드 GV7, Styx, Hercules Neve 빙하코어의 먼지-기후 연관성 이해도 증진을 위한 광물성 먼지의 입자와 입자크기분포의 정량화 ◦빅토리아랜드 GV7, Styx 빙하코어칩을 활용한 PCBs, PAHs의 기록복원을 통해 자연적·인위적 변동성 연구 ◦GV7, Styx 빙하코어에서 Fe^{2+}, Fe^{3+}, I^-, Br^- 기록 복원

KOPRI 극지연구소

◦빙하코어연구의 새로운 분석기술 개발	◦자연적·인위적 변동성의 정량화를 위한 PAHs 분석기술 개발 ◦광물성먼지의 화학적 특성연구를 위한 Fe^{2+}, Fe^{3+}, I^-, Br^- 분석기술 개발
○천부빙하시료의 물안정동위원소분석	○스틱스 천부빙하시료 분석($\delta^{18}O$, δD) ○스틱스 시료 연대측정
○물안정동위원소와 기상변수간의 상관성 분석	○분석된 빙하의 안정동위원소를 이용하여 기온 및 해빙의 분포 복원
○장보고기지 주변 공간적인 분포를 활용한 천부빙하시추	○기온 및 해빙의 공간적인 분포를 이해하기 위한 다수의 천부빙하시료 시추
○ 초극미량 오스뮴 동위원소 분석기술 개발	○ 펨토그램 농도 수준의 오스뮴 동위원소 분석기술 개발 ○ 빙설 및 빙하코어 시료에 적용하여 분석 신뢰도 검증
○ 국내 펀공기 연구의 개선점	○최근 국내에서 개발된 펀공기 채취법, 모델링 등의 연구수행에 있어 취약한 부분에 대한 분석
○ 펀얼음의 불균질성이 빙하코어 자료에 미치는 영향 분석	○펀얼음 불균질성에 대한 정량화 기법, 공기방울에 포집된 온실기체 농도의 불균질성과의 연관성, 기체 연령분포 모델의 취약점 분석
○ 온실기체 농도를 이용한 연령설정 개선방향	○ 얼음연령-기체연령 간의 차이에 대한 모델 개선방향, 미량기체 대비를 이용한 기체연령 설정의 개선점 파악
○	○
○	○

3-2. 연구개발수행 결과

가. 고해상도 빙하코어 연구를 위한 연대측정법

○ 빙하코어 시추지역의 강설량과 연평균 기온은 해당지역의 펀 압축(firn densification) 양상을 예상할 때 기초자료로 사용된다. 예를 들어 가장 널리 사용되는 Herron-Langway model을 사용할 경우 강설량과 연평균 기온을 상수로 가정하여 해당 지역의 펀층이 압축되는 양상을 모사할 수 있는데, 이를 바탕으로 깊이-연대 모델을 수립할 수 있다(Herron and Langway, 1980). 이렇게 얻은 깊이-연대 모델은 그 불확도가 높아 고해상도 연구에 활용하기는 어려우나, 비교적 간단하여 여전히 기초자료로 널리 활용되고 있다.

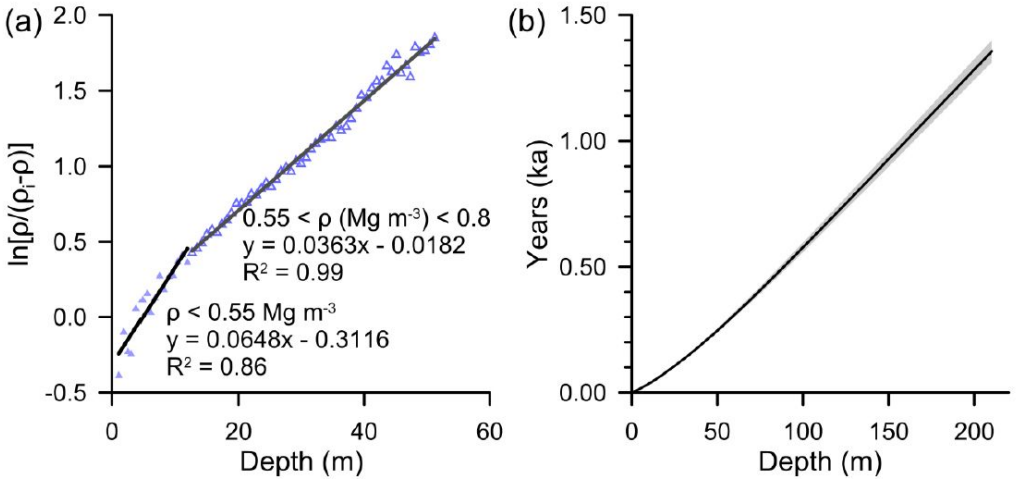


그림. 2014-15 Styx 천부빙하코어에 Herron-Langway 모델을 적용하여 깊이-연대 관계를 추정한 결과(한영철 외, 2015)

○ 물안정동위원소비는 빙하코어의 연대측정에 있어서 가장 기초적인 자료로 활용되어 왔다. 강설이 갖는 물안정동위원소비의 계절성은 그대로 빙상에 보존되어 있어 나무의 나이테와 같이 일 년에 해당하는 층을 계수(annual layer counting)함으로써 빙하코어의 깊이-연대 모델을 수립할 수 있다.

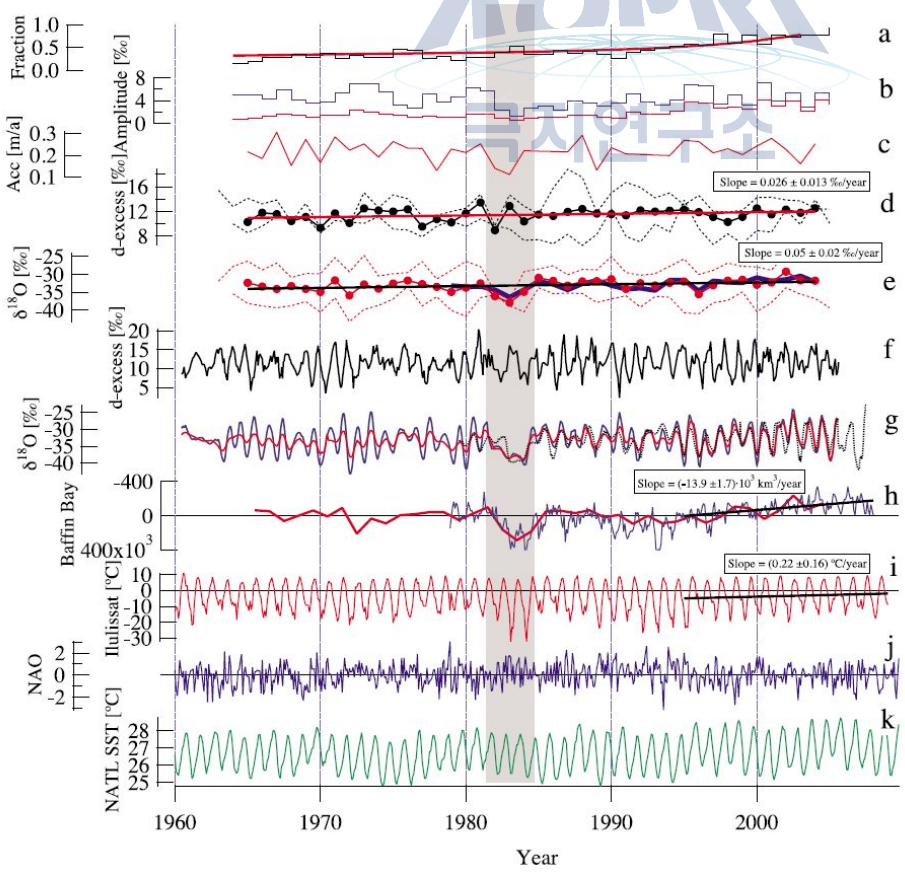


그림. NEEM2007S3 빙하코어의 물안정동위원소비 변동을 이용한 연대 측정(g)과 해당 기간의 다양한 기후 인자들 간의 상호 비교 (Steen-Larsen et al. , 2011)

○ 심부로 갈수록 동위원소 확산작용에 의하여 계절적 변동 기록이 희미해져 annual layer counting의 불확도가 증가한다. 천부빙하코어 고해상도 연구를 위하여 심부에서 깊이-연대 모델의 정확도를 높이기 위하여 가장 널리 활용되는 방법은 알려진 과거 화산 활동과 빙하코어 기록을 상호 비교하는 방법이다(Sigl et al., 2013; 2015).

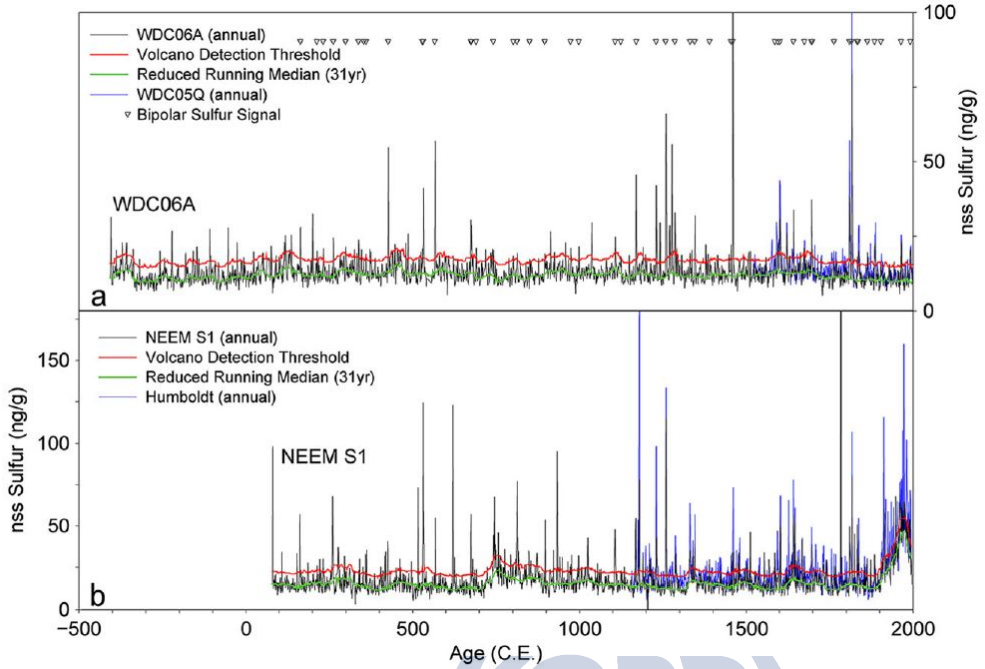


그림. 남극 WAIS Divide의 WDC06A, 북극 그린란드 NEEM2011S1 펀코어에 기록된 화산활동 기록(Sigl et al., 2013)

KORDI 극지연구소

기온과 물안정동위원소간의 시공간적 상관관계 규명

○ 물안정동위원소비는 빙하코어로부터 과거 기온 변동 기록을 복원 하는 데에 기여해 왔다(Dansgaard, 1964).

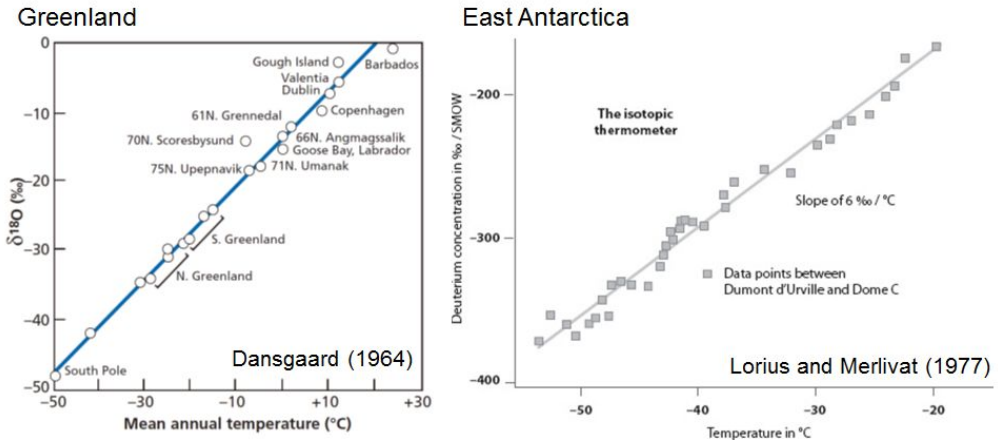


그림. 물안정동위원소비와 연평균 기온간의 상관관계(Dansgaard, 1964; Lorius and Merlivat, 1977)

○ 기온과 물안정동위원소비간의 상관관계는 과거 기온 기록의 제약으로 인하여 주로 공간적 관계성에 의존해 왔다(Lorius and Merlivat 1977).

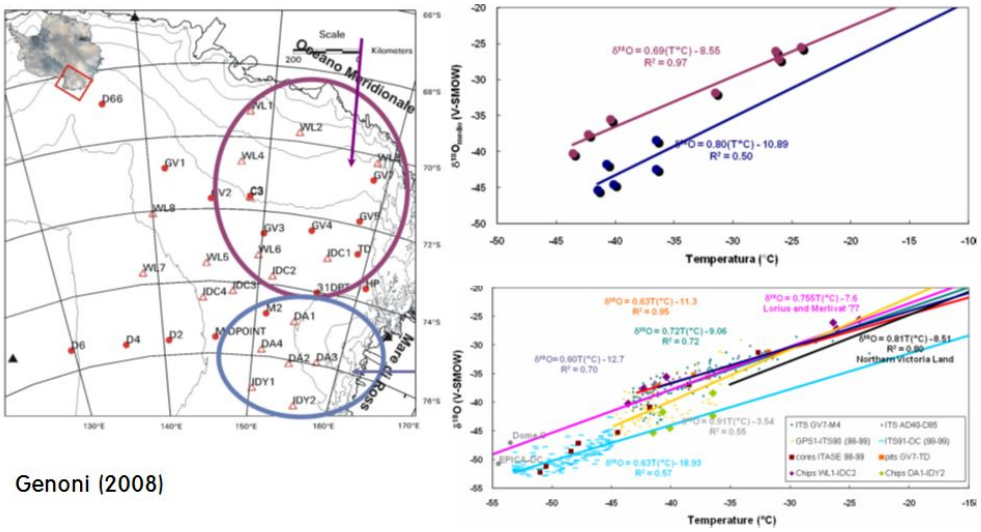


그림. 남극 빅토리아랜드와 오츠랜드(Oates Land)에 걸친 연평균기온과 $\delta^{18}O$ 간의 공간적 상관관계(Genoni, 2008).

○ 위성관측, 현장관측을 통한 시계열 기온자료가 축적되면서 물안정동위원소비와 기온간의 시간적 관계성에 관한 연구가 시도되어 왔다(Steig et al., 2005; Sinclair et al., 2012).

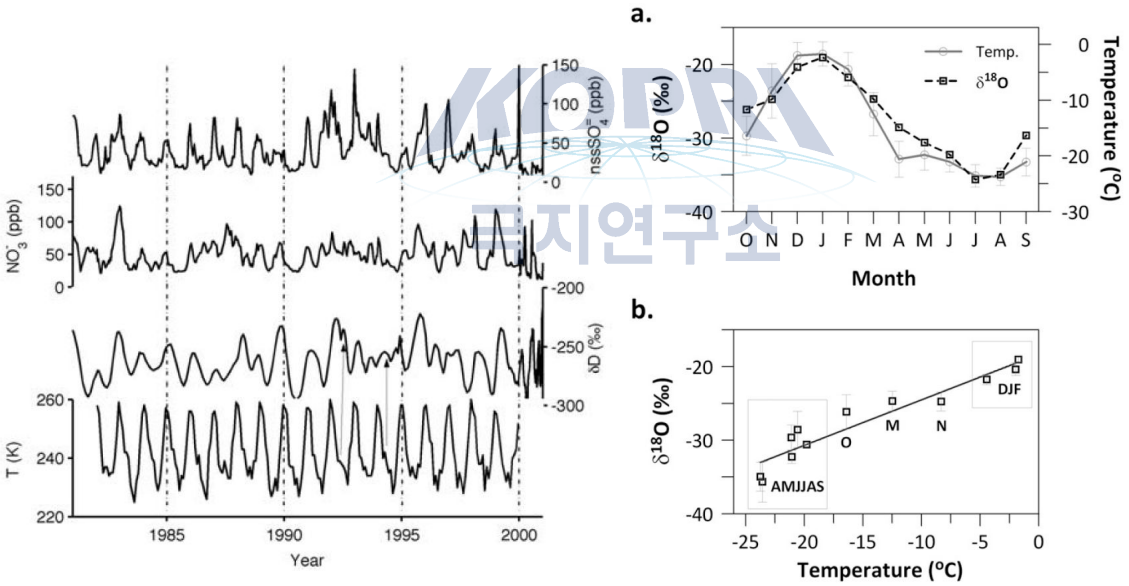


그림. (좌)δD와 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)로부터 얻은 지표면 온도 사이에 공통적으로 관찰되는 겨울 중 이상고온 현상(화살표)과(Steig et al., 2005) (우)$\delta^{18}O$와 재분석 자료(ERA-interim)에서 얻은 온도 자료간의 상관관계(Sinclair et al., 2012)

○ 빅토리아랜드에는 우리나라 포함 여러 국가에서 운용중인 AWS가 설치되어 기상자료를 축적하고 있어, 기온 자료와 빙하코어의 물안정동위원소비를 비교하여 두 자료 사이의 시간적 상관성에 대한 연구가 가능하다.

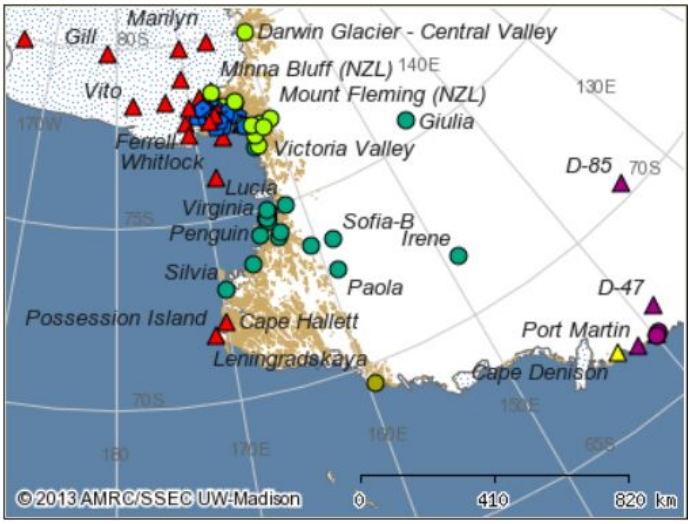


그림. 빅토리아랜드에 설치된 AWS의 위치 (https://amrc.ssec.wisc.edu/)

펀/얼음 내 동위원소 확산 연구

○ 강설은 강설 당시로부터 빙상 내 펀/얼음층을 지나는 동안 동위원소 확산작용에 의하여 처음의 물안정동위원소비로부터 변화를 겪는다.

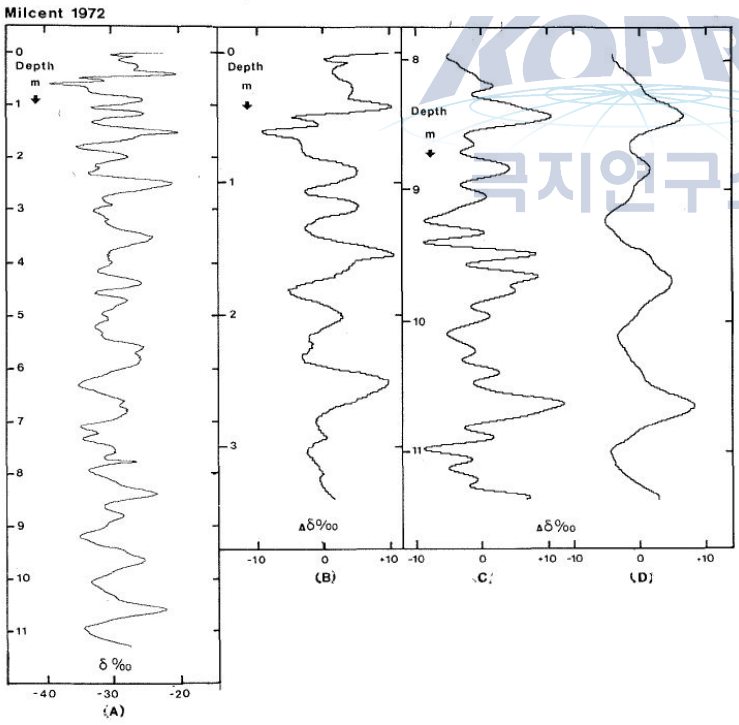


그림. 동위원소 확산작용을 다룬 Johnsen (1970) 논문. (A)는 빙하코어 깊이에 따른 $\delta^{18}O$ 변동. (B)와 (D)는 각각 상부 하부를 확대한 그림. (C)는 하부(D)가 확산작용을 겪기 전 강설 당시의 동위원소 조성을 복원한 모델(Johnsen, 1970)

- 강설 당시의 동위원소 조성을 복원하는 것은 특히 계절적 변동과 같은 단주기 변동을 연구하는 데에 있어 중요하고, 따라서 빙하코어의 고해상도 연구에 있어서 반드시 고려되어야 할 연구 분야이다.
- 강설 당시의 동위원소 조성을 복원하기 위하여 역확산 모델(back-diffusion model)이 사용되어 왔는데(Johnsen, 1970), 보다 정확한 복원을 위하여서 확산 길이(diffusion length)를 정확하게 추정하는 것이 중요하다. 일반적으로 편의상 모든 깊이 구간에 동일한 확산 길이를 가정하나, 보다 정밀한 복원을 위하여 시간에 따라 변동한 확산 길이를 알아내는 것이 중요하며 관련 연구가 일부 선도 기관에서 수행되고 있다(예: Wel et al., 2015)
- 아울러 역확산 모델을 적용하여 얻은 깊이에 따른 물안정동위원소비 변동은 annual layer counting을 수월하게 해준다.

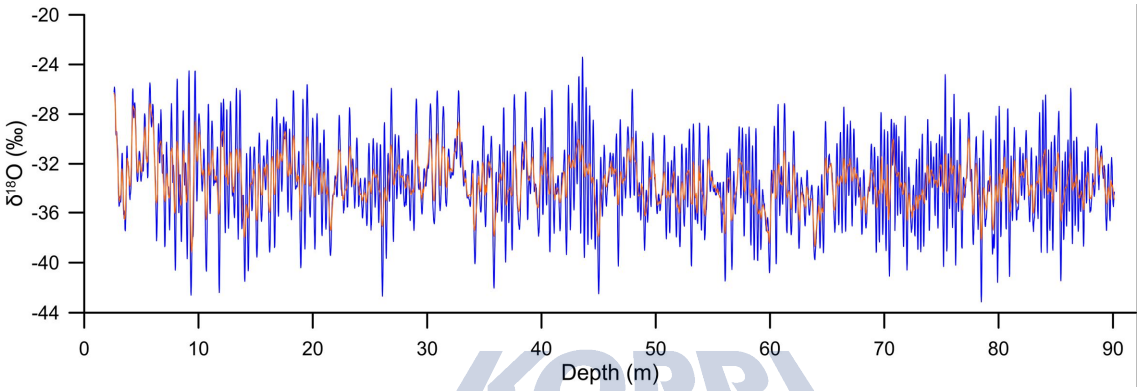


그림. NEEM2009S1 코어의 $\delta^{18}O$ 측정값(빨강)과 역확산 모델을 사용하여 강설 당시의 값을 복원한 값(파랑)

KOPRI 극지연구소

빅토리아랜드 기록의 전지구적 대표성과 지역적 특성 구분

- 지난 2000년 동안 알려진 대규모 기후 변화 특성으로는 중세온난기(900-1300 CE), 소빙하기(1300-1850 CE) 그리고 산업혁명 이후 온난화를 꼽을 수 있다. 이 기간의 기후 변화 기록은 주로 북반구에서 집중적으로 복원되어 왔고, 상대적으로 남반구 자료는 적다. 위 기간 동안 남반구 자료를 복원하는 것은 이들 기후변화 사건의 규모(전지구적 혹은 지역적), 남·북반구 기후 시스템의 연결고리를 파악하는 데에 있어 중요하다.

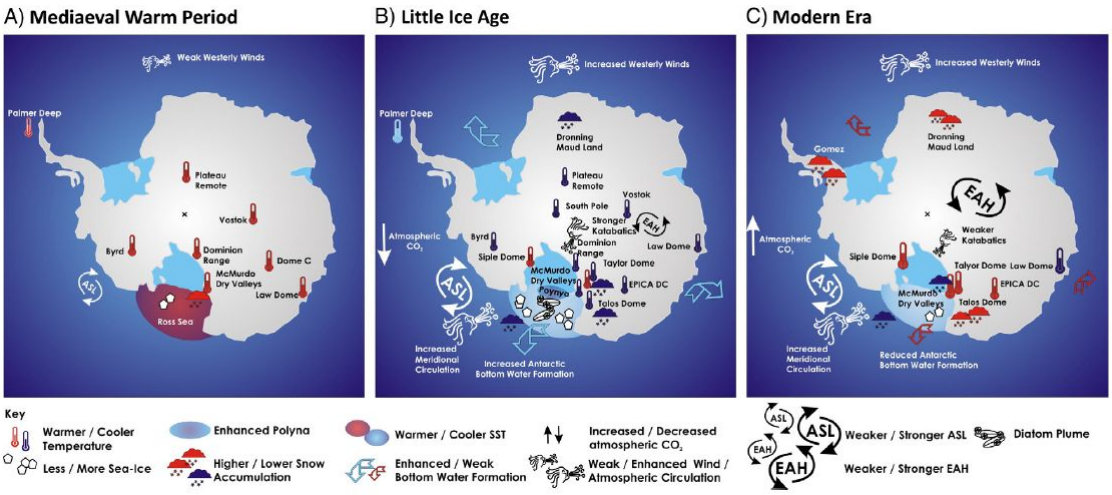


그림. 중세온난기, 소빙하기, 현재의 남극 기후 양상을 비교한 연구 예(Bertler et al., 2011)

○ 빅토리아랜드에서 얻은 변동 기록에는 필수적으로 전지구적 변동과 지역적 변동 기록이 혼재되어 있고, 따라서 보다 의미 있는 연구 결과 도출을 위하여 이 둘을 분리하는 것이 필요하다. 이를 위하여 남극을 포함한 여러 연구 결과들과 비교할 필요가 있다.

KOPRI
극지연구소

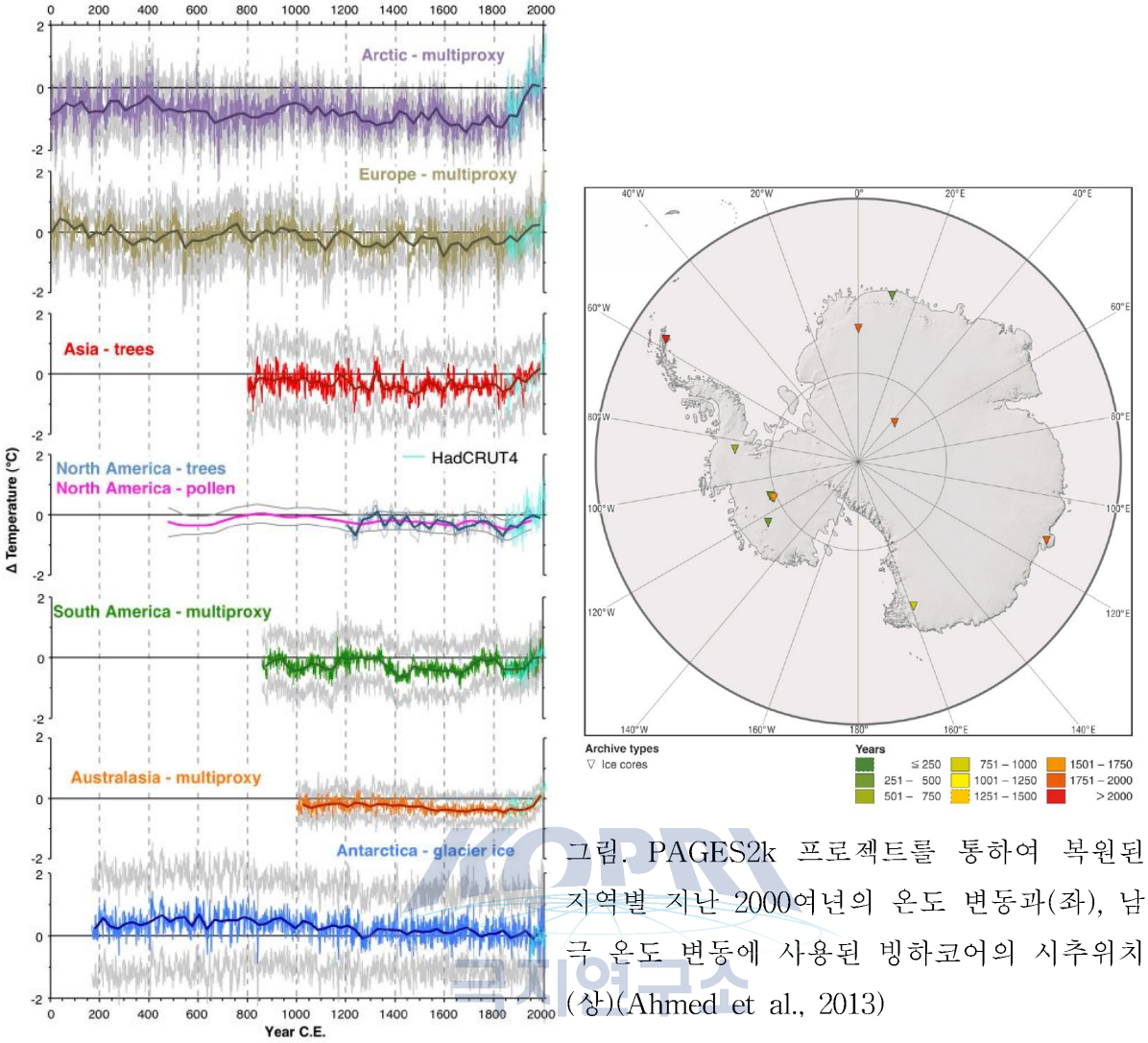


그림. PAGES2k 프로젝트를 통하여 복원된 지역별 지난 2000여년의 온도 변동과(좌), 남극 온도 변동에 사용된 빙하코어의 시추위치(상)(Ahmed et al., 2013)

남극 북빅토리아랜드 빙하의 해염과 생물학적 기원 이온 성분들의 기후적 의미

1) 해염기원 이온성분

1-1) 빙하코어 해염기원 에어로졸 발생기작에 따른 기여도 규명

- 북빅토리아랜드 빙하코어의 해염 기원 에어로졸은 해양지역 (open sea)과 해빙지역에서 발생하여 수송될 수 있고 발생기작에 따라 해염성분의 농도변화 특성은 다른 고기후적인 의미를 담고 있음.
- 해양지역 (polyna 지역 포함)에서 발생한 해염성분들의 농도변화 특성은 해양지역의 면적, 바람의 세기, 해면 기압등의 변동과 관계됨.
- 해빙지역에서 발생한 해염성분들의 농도변화 특성은 새롭게 형성된 해빙 면적 (the amount of new ice formation) 혹은 해빙지역 총면적 (total area of sea ice)을 지시함 (Abram 등., 2013).
- 북빅토리아랜드 빙하코어는 로스해로부터 수송된 에어로졸의 영향을 받을 수 있으며 로스해는 크고 작은 polyna가 존재하기 때문에 북빅토리아 빙하코어의 해염성분은 해양과 해빙지역에서 발생한 해염에어로졸의 영향을 받을 수 있음. 따라서 빙하코어의 해염기원

에어로졸 성분들의 발생기작에 대한 각각의 기여도를 규명해야함.

연구방법

- 북빅토리아랜드 복수의 빙하코어를 처리한 후 해염성분 평균 자료 획득
- 눈 강하시의 대기수송 특성을 규명하고 NCEP 재분석 자료 (대기온도, 해면기압, 850mb zonal/meridional 바람)와 해염성분과의 상관성을 분석함으로써 해염성분의 농도변화 특성에 영향을 미치는 기상특성을 규명.
- 해염성분의 계절별 농도 특성, 전기전도도 (용액), Na+/SO42-, Cl-/Na+의 계절별 변동 특성 조사
- 주변 해역 polyna (open sea area) 및 해빙면적 변화 특성과의 상관성 조사 (조사기간: 1979-현재, 방법: 인공위성 측정자료를 활용하여 해역별, 월별 polyna, 해빙면적 자료 확보, 상관성 분석: 역궤적 분석 결과를 토대로 위, 경도 해역별, 경도 sector별로 수행)

1-2) 빙하코어 해염기원 이온성분들의 고기후적 의미

- 로스해에는 남극에서 가장 큰 로스해 polyna등이 존재함으로 열염분순환의 동력인 심층수 형성과 남빙양의 일차생산력에 기여하고 있음. 따라서 과거 기후변동에 따른 로스해 polyna 면적의 변화 특성을 복원하는 것이 중요.
- 로스해는 최근에 남극 해빙면적이 증가추세에 있는 지역으로 특히 가을철의 해빙 증가가 뚜렷함.

KOPRI 극지연구소

연구방법

- 해염 기원 이온성분들의 발생기작에 따라 상관성 조사 결과를 토대로 과거 주변 해역의 해양환경 (open sea area of polyna, sea ice area) 및 기후요소 복원 (MSLP 등)

2) 생물학적 기원 이온성분 (황화합물)

2-1) 빙하코어 생물학적 기원 황화합물 발생기작에 따른 기여도 규명

- 황화합물성분은 해양지역 (open sea)과 해빙지역에서 발생한 후 시추지역으로 수송될 수 있고 발생기작에 따라 농도변화 특성이 다른 고기후적인 의미를 담고 있음.
- 해양지역 (polyna 지역 포함)에서 발생한 황화합물의 농도변화 특성은 여름철 해빙조건과 일차 생산력과 관계됨.
- 해빙지역에서 발생한 MSA 농도변화 특성은 해빙지역 총면적 (total area of sea ice)을 지시함 (Abram 등., 2013).
- 북빅토리아랜드 빙하코어는 로스해로부터 수송된 에어로졸의 영향을 받을 수 있으며 로스해는 크고 작은 polyna가 존재하기 때문에 북빅토리아 빙하코어의 황화합물 역시 해염성분처럼 해양과 해빙지역에서 발생한 에어로졸과 가스의 영향을 받을 수 있음.

연구방법

- 주요사업 기간 동안 북빅토리아랜드 복수의 빙하코어를 처리한 후 황화합물 성분 평균 자료 획득
- 눈 강하시의 대기수송 특성을 규명하고 NCEP 재분석 자료 (대기온도, 해면기압, 850mb zonal/meridional 바람)와 MSA 성분과의 상관성을 분석함으로써 MSA 성분의 농도변화 특성에 영향을 미치는 기상특성을 규명.
- 주변 해역 polyna 면적 (혹은 해양 1차 생산력, open sea area) 및 해빙면적 변화 특성과의 상관성 조사
- (조사기간: 1979-현재, 방법: 인공위성 측정자료를 활용하여 해역별, 월별 polyna, 해빙면적 자료 확보, 상관성 분석: 역궤적 분석 결과를 토대로 위, 경도 해역별, 경도 sector별로 수행)

2-2) 빙하코어 황화합물 성분들의 고기후적 의미

- 로스해에는 남극에서 가장 큰 로스해 polyna등이 존재함으로 열염분순환의 동력인 심층수 형성과 남빙양의 일차생산력에 기여하고 있음. 따라서 과거 기후변동에 따른 로스해 polyna 면적의 변화 특성을 복원하는 것이 중요.
- 로스해는 최근에 남극 해빙면적이 증가추세에 있는 지역으로 특히 가을철의 해빙 증가가 뚜렷함.

KOPRI 극지연구소

연구방법

- 상관성 조사 결과를 토대로 여름철 해빙조건 혹은 주변해역의 해빙면적 복원

3) 과거 로스해 해양환경과 대기 순환 및 원격 상관관계 조사

- 빙하코어의 해염기원 이온성분과 황화합물의 농도변화 특성은 발생 기작 및 발생지역에서 시추지까지의 수송 효율성과 관계됨.
- 해빙지역의 영향을 받을 경우 해빙의 면적과 해빙지역으로부터 빙하코어 시추지로의 수송효율과 상관성이 있음. 특히 로스해의 해빙지역이 주요한 발생원일 경우 SOI > 0인 조건에서 로스해의 해빙면적의 증가와 해양지역에서 발생한 에어로졸과 가스 성분들의 북빅토리아랜드로의 수송이 강화됨으로 MSA의 농도가 증가할 수 있음.

연구방법

- 통계적인 기법을 활용한 빙하코어 해염, 황화합물 성분들과 SOI, SAM의 주기 변동성 특성 파악
- 빙하코어 해염, 황화합물 성분들과 SOI, SAM간의 주기변동성의 물리적 의미 해석을 위한 CROSS-SPECTRAL 분석 수행

자연적·인위적 요인에 의한 남극 북빅토리아랜드 대기환경 변화기록 복원

○ 남극 빅토리아랜드는 대조되는 물리화학적 특성을 지닌 다양한 주변 환경과 인접하고 있다. Li et al. (2008)의 대기순환모델 연구결과에 따르면, 남극으로 유입되는 대기 먼지 중 남아메리카에서 기원한 대기먼지와 오스트레일리아 기원 대기먼지가 빅토리아랜드에서 전이되는 것으로 나타났으며 (Figure 1), 지리적으로는 해빙의 계절변화가 큰 로스해 (Ross Sea)와 상대적으로 해빙의 변화가 작은 소모브 해 (Somov Sea)가 빅토리아랜드와 인접하고 있다 (Figure 2). 이러한 특징으로 인해 빅토리아랜드는 대기순환의 변화에 따라 대기구성물질의 물리화학적 특성이 뚜렷한 변화를 보일 것으로 추정된다. TALDICE 빙하코어시료에서 복원된 대기먼지의 물리적 특성을 살펴보면 홀로세 동안 세립한 대기 먼지 (0.7-5μm)의 유입량이 마지막 빙하기에 비해 12배 감소한 반면, 조립한 대기 먼지 (5-20μm)의 유입량은 뚜렷한 변화를 보이지 않았다 (Delmonte et al., 2010; Figure 3). 대기를 통해 장거리 수송되는 대기 먼지가 대체로 5μm 이하의 입도를 갖는다는 점을 감안하면 TALDICE 빙하코어시료에서 나타난 대기먼지의 물리적 특성변화는 빙하기에서 간빙기로 기후가 변화함에 따라 원거리 기원지로부터의 대기먼지 유입량이 감소하였음을 보여준다.

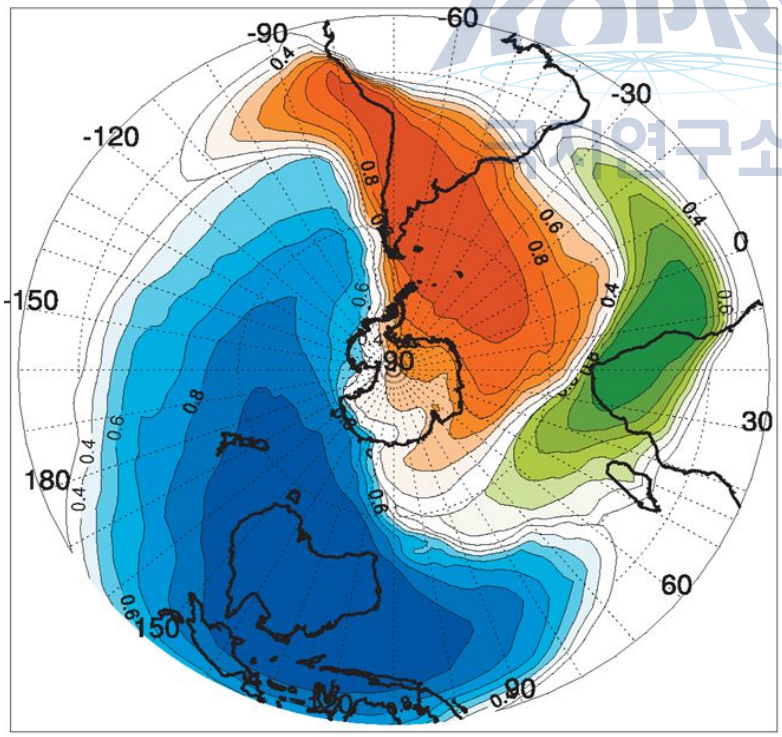


Figure 1. Relative contribution from South America (red shading), South Africa (green shading) and Australia (blue shading) to dust deposition in high latitude south hemisphere (Li et al., 2008).

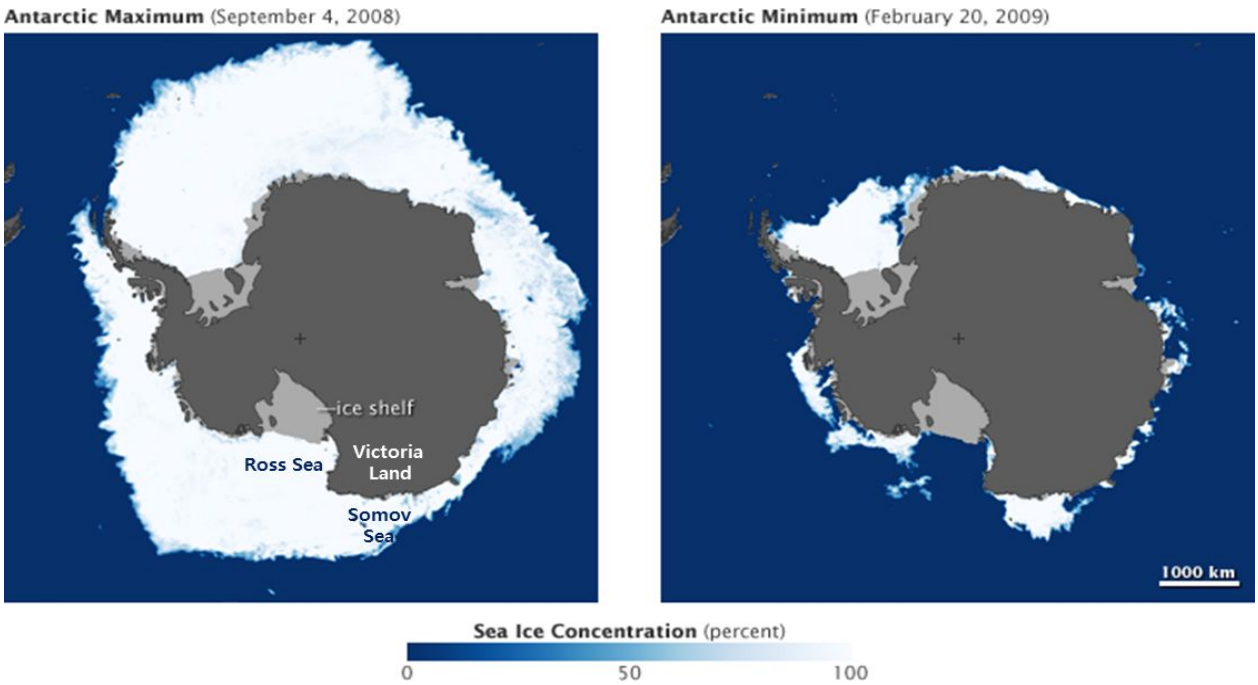


Figure 2. Antarctic sea ice extent during winter (September) and summer (February) (source: http://earthobservatory.nasa.gov/Features/SeaIce/page4.php).

○ TALDICE 빙하코어시료의 Sr-Nd 동위원소 비 분석 결과를 살펴보면, 빙하기 시료의 Sr-Nd 동위원소 비가 남아메리카 지각 물질의 동위원소 비와 유사한 값을 보였으며, 이는 빙하기동안 대기 장거리 수송을 통해 빅토리아랜드로 유입되는 대기먼지가 주로 남아메리카에서 기원하였음을 보여주고 있다 (Delmonte et al., 2010; Figure 4). TALDICE 빙하코어시료에서 빙하기-간빙기간의 Sr-Nd 동위원소 비 변화는 뚜렷하게 나타나지 않는데, 이는 빅토리아랜드 지각물질과 남아메리카의 지각물질이 유사한 Sr-Nd 동위원소 비 값을 갖고 있기 때문에 기원변화에 따른 동위원소 비 변화가 없기 때문인 것으로 확인되었다. TALDICE 빙하코어시료와 동남극 중앙 EPICA, Vostok 빙하코어시료의 Sr-Nd 동위원소 비를 비교해 보면, 빙하기 동안에는 각 빙하코어시료의 동위원소 비가 대체로 유사한 값을 보여 동남극 전반에 걸쳐 남아메리카에서 기원한 대기 먼지의 영향이 우세하게 나타난 반면, 홀로세동안에는 동남극 중앙 빙하코어시료의 동위원소 비가 오스트레일리아 지각 물질의 동위원소 비에 가깝게 변화하는 양상을 보여 빙하기-간빙기 간 기후변화에 따른 동남극 대기순환의 변화가 있었음을 시사하고 있다 (Delmonte et al., 2010).

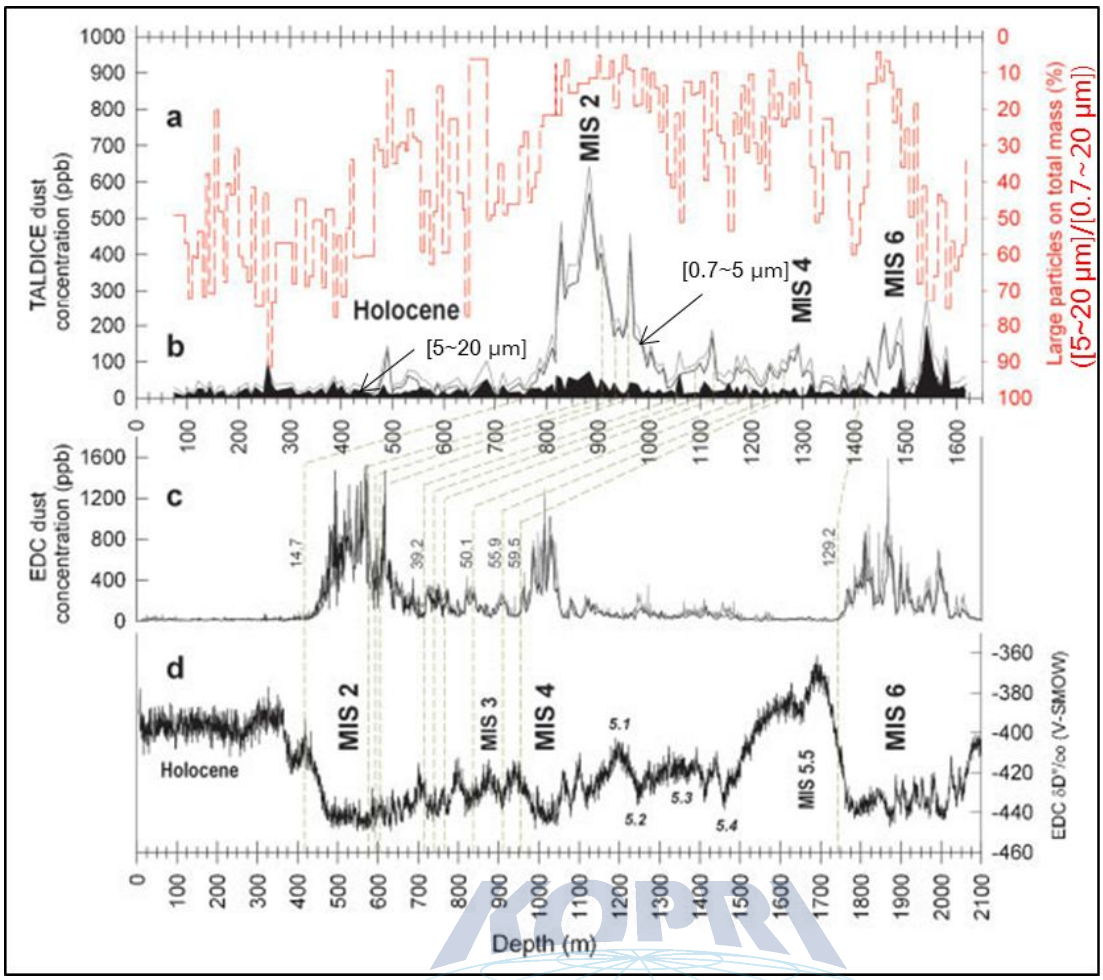


Figure 3. Dust concentration profile of TALDICE versus depth, and comparison with EPICA ice core. (a) Percentage of large particle, (b) particle concentrations in TALDICE ice core for different size intervals, (c) EPICA ice core dust concentrration profile and (d) EPICA ice core stable isotope profile (Delmonte et al., 2010).

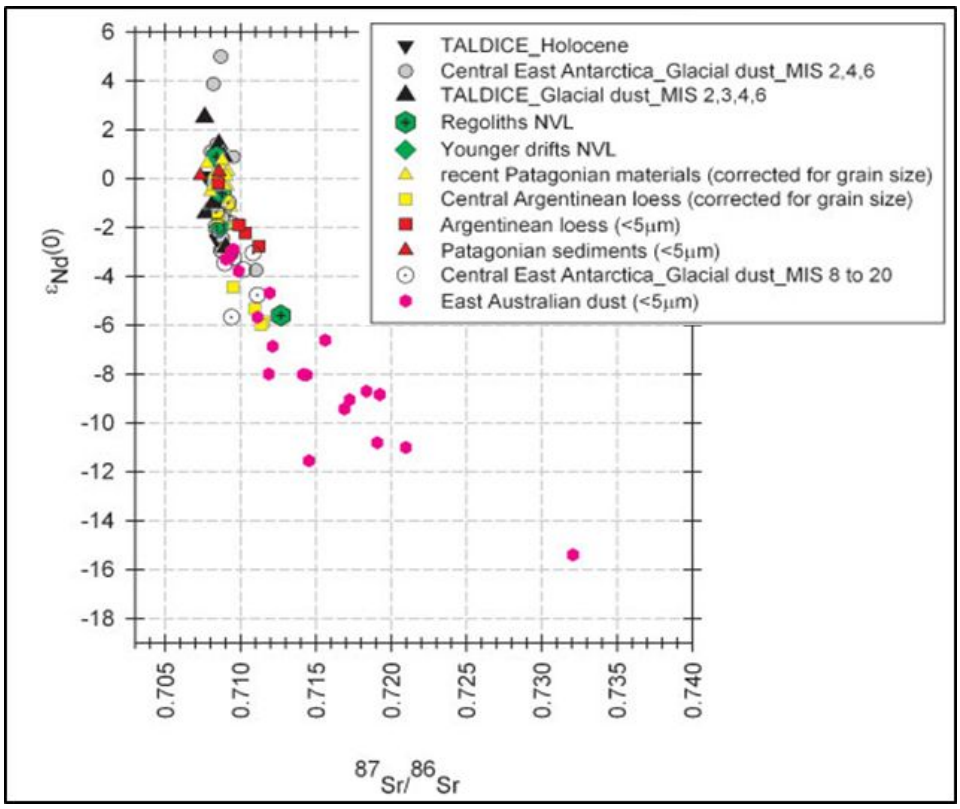


Figure 4. Isotope composition of TALDICE ice core and central East Antarctic ice core dust compared with those for regolith and glacial drifts from Antarctic Victoria Land and remote source regions (Delmonte et al., 2010).

KOPRI 극지연구소

○ 최근, 그린란드와 서남극 빙하코어시료에서는 베릴륨 (10Be), 비해염성 황산염 (non sea salt SO42-)등 화산기원물질의 지난 2500년간 변화기록이 고해상도로 복원된 바 있다 (Sigl et al., 2015). 빙하코어시료의 기록과 유럽지역 나무 나이테를 이용한 기온변화 기록을 비교해본 결과, 서기 1250년 이후의 기록에서는 빙하코어시료의 화산분출연대와 나무 나이테의 기온하강시기가 거의 일치하였으나 서기 1000년 이전의 기록에서는 7년의 차이가 나타나는 것으로 확인되었다. 이러한 차이는 이전의 빙하코어 연대추정 과정에서 발생한 오차에 기인한 것으로 보이며, 따라서 상기 연구에서는 고해상도의 화산활동기록을 이용하여 보다 정확한 빙하코어 연대를 추정하였다. 또한, 고해상도 화산활동기록을 통해 지난 2500년간 총 283회의 화산활동이 그린란드 및 서남극 빙하코어시료로부터 복원되었으며, 각 빙하코어시료 화산활동 기록의 동시성을 토대로 중저위도 지역, 북반구 고위도 지역 및 남반구 고위도 지역 등 화산분출지역에 따라 구분한 결과. 중저위도 지역 화산 분출 시 유럽의 기온이 0.43~0.62℃ 하강하였으며, 북반구 고위도 지역에서 발생한 화산활동에 의해서는 0.37~1.03℃ 의 기온 하강이 발생하는 것을 확인하였다 (Sigl et al., 2015; Figure 5). 이와 같이 빙하코어시료의 고해상도 화산활동기록은 시료의 정확한 연대추정을 위한 자료로 활용될 수 있으며, 또한 화산활동 지역에 따른 정밀한 기후변화 복원이 가능하다. 특히 빅토리아랜드에는 에레부스 화산, 리트먼 화산, 멜번 화산 등 대표적인 남극 화산들이 위치하고 있어 지역적인 화산활동의 영향이 큰 것으로 알려져 있다 (Van de Velde et

al., 2005). 따라서 빅토리아랜드 빙하코어시료로부터 남극화산활동기록과 중, 저위도 및 북반구 화산활동 기록을 구분하여 복원한다면 남반구의 과거 기후환경에 대한 보다 정밀한 해석이 가능할 것으로 예상된다.

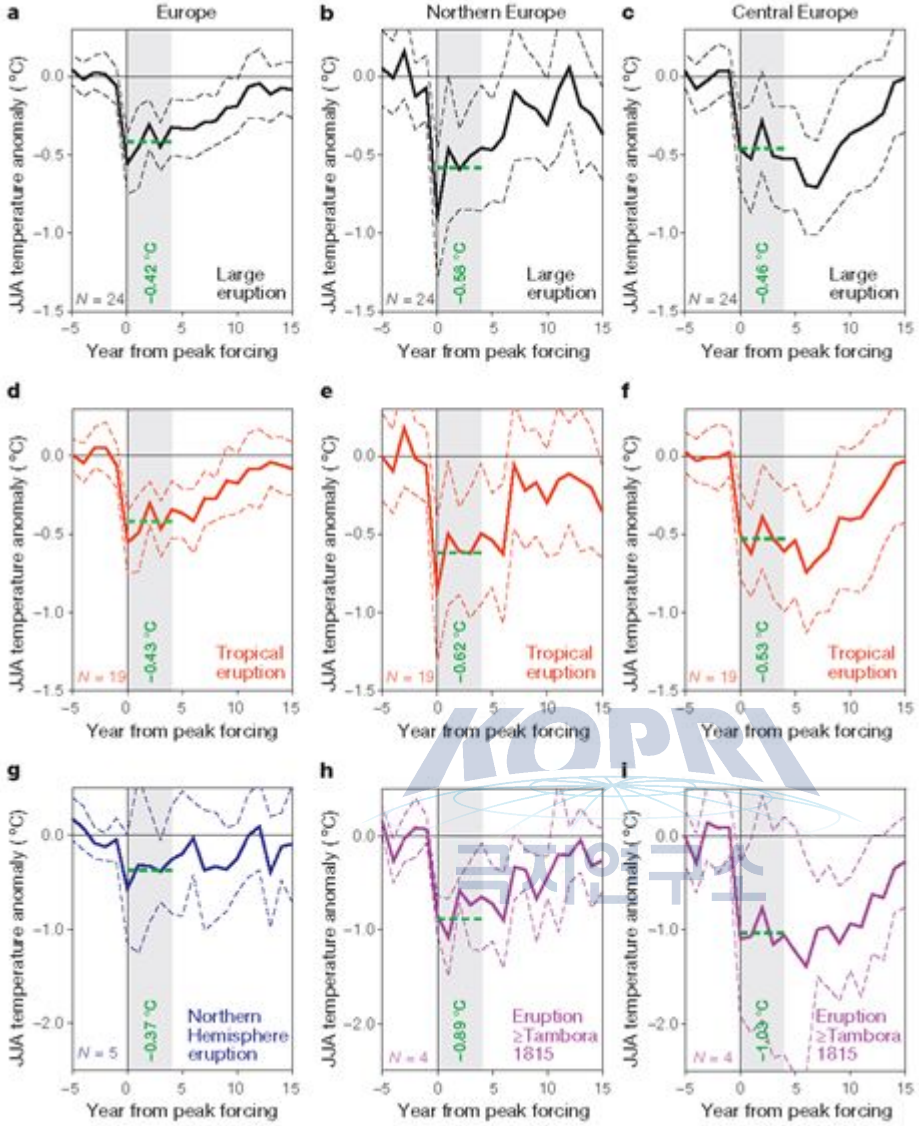


Figure 5. Post-volcanic cooling of European summer temperature response to a-c) the 24 largest eruptions, d-f) the 19 largest ropical eruptions, g) the five largest Northern Hemisphere eruptions, h,i) the four eruptions with negative forcing larger than that of the Tambora 1815 eruptions (Sigl et al., 2015).

○ 한편, 남극 빙하코어에서 복원된 미량금속원소의 변화 기록들을 살펴보면 19세기 후반부터 남반구에서의 광물 채굴 및 제련과 유연휘발유 사용 등 인위적으로 배출된 오염물질의 유입이 급격히 증가한 것으로 확인되었다 (Planchon et al., 2002, 2003; Vallelonga et al., 2002; Van de Velde et al., 2005). 그러나 대부분의 빙하코어에서 미량금속원소 변화기록이 1990년대 중반까지만 복원되어 있어 유연휘발유 규제 등 최근 20년간 남반구에서 일어난 산업 활동 변화에 따른 영향은 확인하는데 한계가 있다. 최근 남극 전역에서 1999~2013년 동안 시추한 천부 빙하코어시료로부터 현재까지의 납 농도 및 동위원소 비

변화 기록이 복원되었다 (McConnell et al., 2014). 이 연구 결과에 따르면 남극 대기 중 납의 유입량이 유연휘발유 규제 이후 지난 20년 동안 지속적으로 감소하는 것으로 나타났으며, 납 동위원소 비 (206Pb/207Pb) 변화도 유연휘발유 납 첨가물의 영향 감소와 잘 일치하였다 (Figure 6). 반면, 남아메리카와 오스트레일리아의 화석 연료 사용량과 광물 생산량은 2000년 이후 더욱 급격하게 증가하고 있어 납 이외의 미량금속원소 오염물질의 영향은 20세기에 비해 훨씬 크게 나타날 것으로 예상된다 (Figure 7). 그러나 산업공정의 발달로 오염저감기술 역시 이전에 비해 향상된 효율을 보이고 있다. 따라서 빅토리아랜드 빙하코어시료의 미량금속원소 변화 기록은 다양한 분야에서의 대기환경 개선을 위한 노력의 효용성에 대한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

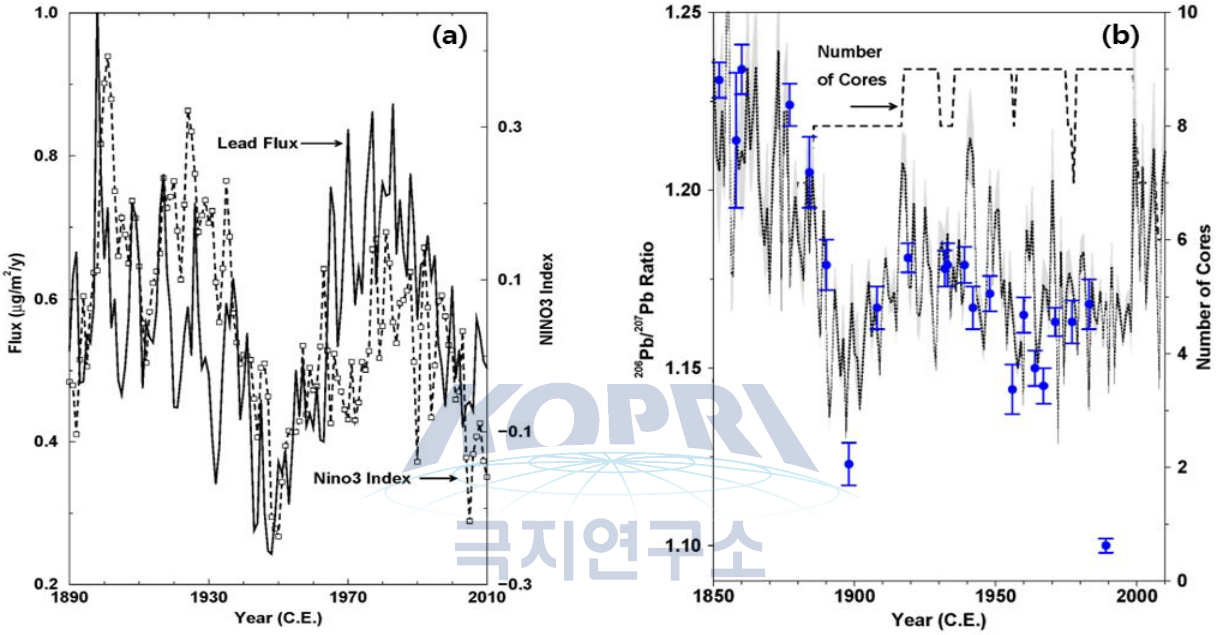


Figure 6. Composite records of (a) Pb flux and (b) isotopic composition (206Pb/207Pb) in Antarctic ice cores. Blue circles in (b) represent previously measured values from Law Dome (McConnell et al., 2014).

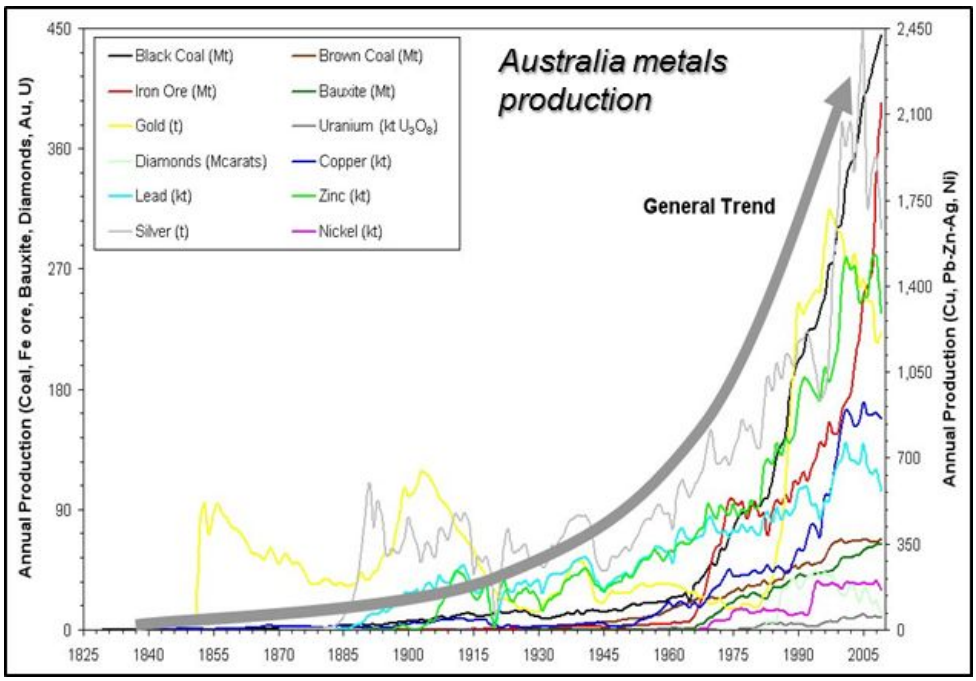


Figure 7. Annual productions of coal and various metals in Australia (Mudd et al., 2009). (Unit: t, g for gold, kg for silver and uranium)

- 또한, McConnell et al. (2014)에 따르면 남극 대기 중 납의 유입량 변화가 엘니뇨 남방진동의 영향을 받는 것으로 나타났다 (Figure 6). 따라서 다른 미량금속원소의 유입량 변화에서도 엘니뇨 남방진동과의 상관성이 확인된다면 기후변화와 오염물질 이동의 관계에 대해 보다 확실한 증거를 제시할 수 있을 것이다.
- 극지역의 해빙분포는 알베도, 해수 순환, 해양-대기간의 열교환 등을 변화시켜 기후 변화에 영향을 미친다. 또한 남극해의 해양생산성은 생물학적 펌프 기작을 통해 대기 중 이산화탄소를 조절하는 역할을 담당한다. 이와 같이 극 지역의 해양환경 변화가 기후 변화와 밀접한 연관을 갖고 있다는 사실이 알려지면서 최근 빙하코어시료로부터 과거의 해양환경 변화기록을 복원하려는 연구가 수행되고 있다 (Abram et al., 2013 and therein). 현재 가장 많이 활용되고 있는 해양환경 프록시로는 해양염분 (sea salt)과 메틸 황산염 (MSA: Methyl sulfonic acid)을 들 수 있다. 해양염분의 경우, 빙하기-간빙기와 같은 장주기동안의 변화 기록은 지역에 상관없이 대체로 일치하는 변화 양상을 보이지만, 수 년~수십 년의 고해상도의 변화기록은 바람의 세기, 이동 중의 강수 작용 등에 의해 지역에 따른 편차를 보인다. MSA 역시 지역에 따라 겨울철 해빙분포, 여름철 해빙분포 및 대기 이동 효율 등의 요인에 의한 변화 양상을 보인다. 따라서 보다 정확한 해양환경 복원을 위해서는 기존에 알려진 해양환경 프록시 이외에 해양환경 변화와 관련된 다양한 화학원소 분석결과와의 비교 연구가 필요하다. 최근 극지연구소에서는 셀레늄 (Se)를 활용한 해양환경 변화 기록 복원에 관한 연구를 수행하고 있다. 셀레늄은 MSA와 동일하게 주로 해양 플랑크톤에서 대기중으로 방출되는 것으로 알려져 있으며 (Nriagu, 1989), 대기중으로 방출된 셀레늄은 대기 입자물질에 흡착되어 장거리 수송이 가능하다 (Wen and Carignan, 2007). Lee et al. (2015, 2016)은 그린란드에서 시추한 주상 눈 시료와 천부 빙하코어시료에서 pg/g

수준의 미량으로 존재하는 셀레늄의 농도를 분석한 바 있으며, 1900-1970년 동안 그린란드 빙하코어의 셀레늄 농도 변화가 대서양의 1차 생산성과 유사한 변화 양상을 보인다는 것을 확인하였다. 이는 극지 빙하코어시료의 셀레늄 변화 기록을 통해 주변 해양의 생산성 변화를 복원할 수 있는 가능성을 보여준다. 특히, 빅토리아랜드는 해빙의 변화가 큰 로스 해와 변화가 작은 소모브 해에 인접하고 있기 때문에 지역적인 특성에 따라 남극 주변 해양의 1차 생산성 변화를 조절하는 요인의 차이를 확인할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 그린란드 빙하코어시료의 셀레늄 농도가 거의 검출한계에 가까운 낮은 값을 보이고 있어 남극 빙하코어시료의 셀레늄 연구를 위해서는 검출한계를 낮추기 위한 새로운 분석방법 개발이 필요하다.

과거 2000년간 자연적, 인위적 기원의 에어로졸 특성 변화 비교

○ 과거 2000년간의 화산 활동 기록 복원과 화산 분출 전후의 에어로졸의 생지화학적 특성 분석을 통해 빅토리아랜드로 유입되는 기원지 변화를 연구하고 빅토리아랜드 지역의 환경변화와 대기 순환을 이해한다. 화산재에 대한 물리화학적 특성분석은 입자의 크기, 결정구조, 화학조성 등으로 화산의 기원지를 추적할 수 있으며 이를 통해 주변 다른 코어와의 연대를 동기화하여 빙하코어의 연대를 규명할 수 있다. 또한 화산 분출 전후의 대기 환경 변화를 복원함으로써 화산 분출이 기후에 미치는 영향을 알 수 있다. 화산 전후의 에어로졸의 특성 분석은 지역적 대기 수송, 적설량, 해빙 변화에 따른 에어로졸의 특성을 명확하게 규명함으로써 빅토리아랜드 지역의 기후 환경 변화를 이해할 수 있다. 핵실험, 핵연료 사고와 같은 인위적 기원으로 발생된 대기 입자들이 남극 빙하 코어에 침적된 기록을 복원함으로써 전지구적 대기 순환을 이해할 수 있다. 빅토리아랜드 각 지역별 빙하코어에서 자연적, 인위적 기원의 유기, 무기 에어로졸을 복원함으로써 지역적 특성에 따른 환경 변화를 이해하고 이것이 기후변화에 미치는 영향을 설명할 수 있다.

그린란드 NEEM 빙하코어를 활용하여 기원지의 환경 변화 연구

○ 그린란드 NEEM 빙하코어의 개개입자 수준의 특성분석과 더불어 희토류 및 미량금속원소에 대한 동위원소 분석을 통한 기원지 변화와 기원지의 환경변화 복원은 기후 변화에 따른 건조지역의 확장, 대기 순환의 변화를 설명할 수 있다. 예를 들어 사하라 사막이 기후변화로 인해 건조화 되어 확장되는 변화를 복원하여 밝힐 수 있다.

과거 2000년간 자연적·인위적 변동성의 기록복원에 대한 연구주제 결정

○ 과거 2000년간의 자연적·인위적 변동성 기록복원에서 광물성먼지, 미량원소, 희토류원소 및 미량원소의 안정동위원소 분석을 통해 빅토리아랜드에 침적하는 빙하코어 프록시의 변동성을 정량적으로 복원하고 빅토리아랜드에 침적되는 광물성먼지와 미량원소의 대기 수송과정, 발생지의 특성을 이해한다. 미량원소와 희토류원소의 조성에 따라 광물성먼지

의 지각기원, 화산기원, 우주기원에 따른 잠재적 발생지 추정을 가능하게 한다. 과거 기후의 프록시로 광물성먼지는 입자농도, 입자크기, 입자조성에 따라 독특한 정보를 담고 있다. 광물성먼지는 기후를 반영하는 요소이며, 과거 대기의 건조도, 바람강도 등을 알 수 있는 프록시가 될 수 있다. 빙하코어의 광물성먼지는 과거 에어로졸 조성을 알려준다. 광물성먼지는 대기의 흐름에 따라 장거리이동을 한다. 이때 광물성먼지의 입자크기는 바람강도에 따라 달라진다. 광물성먼지의 화학조성 및 동위원소비를 비교하여 광물성먼지의 잠재적 발원지 (potential source area)를 추정할 수 있다. 광물성먼지의 농도는 대기수송과 기원지의 변화를 설명할 수 있다.

빙하코어 연구를 위한 새로운 프록시의 개발

- 본 연구사업기간 (2017-2019)에 가장 중점적으로 연구하려는 빙하코어 프록시는 할로겐이다. 극지역의 할로겐 (Br, I)은 해양에서 주로 생성되며 해빙의 변화와 높은 상관관계를 보인다. 대기 할로겐의 증가와 감소는 최종적으로 눈 (빙하)에 기록되며 빙하코어의 할로겐 농도 또는 플럭스의 기록 복원을 통해 해빙의 변화, 오존의 변화 등과 같은 연구로 확대할 수 있다. 특히 극지연구소에서 보유하고 있는 빙하코어는 해안지역의 고해상도 연구에 적합한 빙하코어이기 때문에 할로겐 연구를 통해 이들 빙하코어의 할로겐 변동의 특징을 밝히고자 한다.
- 할로겐 연구와 더불어 빙하코어 내 생물성연소 (biomass burning) 기록을 복원할 수 있는 레보글루코산, 방향족탄화수소인 PAHs는 잔류성유기오염물질인 PCBs와 같이 생물성연소, 화산활동 등과 같은 자연적·인위적 변동성을 이해하는데 필요한 중요한 빙하코어 프록시가 된다.

KOPRI 극지연구소

국내 펀공기 연구의 개선점

- 국내에서 유일하게 확보된 Styx 펀공기 자료는 국내 기술과 장비로 펀공기 연구가 가능하게 되었다는데 의의가 있다(그림 B). 그러나, 빙하시추를 지원하는 뉴질랜드-장보고기지 간의 물자 수송에 어려움이 있어, Styx 펀공기 채집 일정을 2주에서 1주로 단축해야 했다. 이 과정에서 계획되었던 20개 이상의 깊이 구간 대신 13개 구간에서 시료를 채취하였고, 연령이 급속히 변하는 lock-in 에서는 겨우 5-6개 깊이 구간에서 시료를 채취하였는데, 81년의 기간(1927-2008)에 해당하여 해상도가 16년으로서 과거 대기 농도를 복원하기에는 어려움이 있다. 향후 시료채취에서는 lock-in zone에서의 시료 채취 구간 수를 대폭 증가시켜 해상도를 높일 필요가 있다.
- 남반구/북반구 간의 농도 차이(gradient)가 시간에 따라 변하는 것을 연구하기 위해서는 남극과 그린랜드 펀공기에 모두에 대한 연구가 필요하다. 현재까지 남극 Styx 펀공기 시료채취가 유일한 경험이기 때문에, 향후 국제 공동연구 프로그램을 활용하여 그린랜드 펀공기 시료에 대한 연구가 함께 수행되는 것이 좋다.
- Styx 펀공기는 다른 펀공기와는 특이하게 다른점이 있다. 그것인 매우 오래된 연령의 펀공기가 보존되어 있다는 것이다. 일반적으로 연간 적설량이 수 cm이고, 연평균 기온이 -

50℃ 이하인 곳을 제외하고는 펀공기가 약 30-50년의 연령을 갖지만, Styx 펀공기는 약 90년의 연령의 갖는데, 아직 그 이유는 명확히 밝혀지지 않았으나, 아래에 기술되는 것처럼 펀에서의 불균질한 밀도변화가 원인이 될 것으로 추정되고 있다.

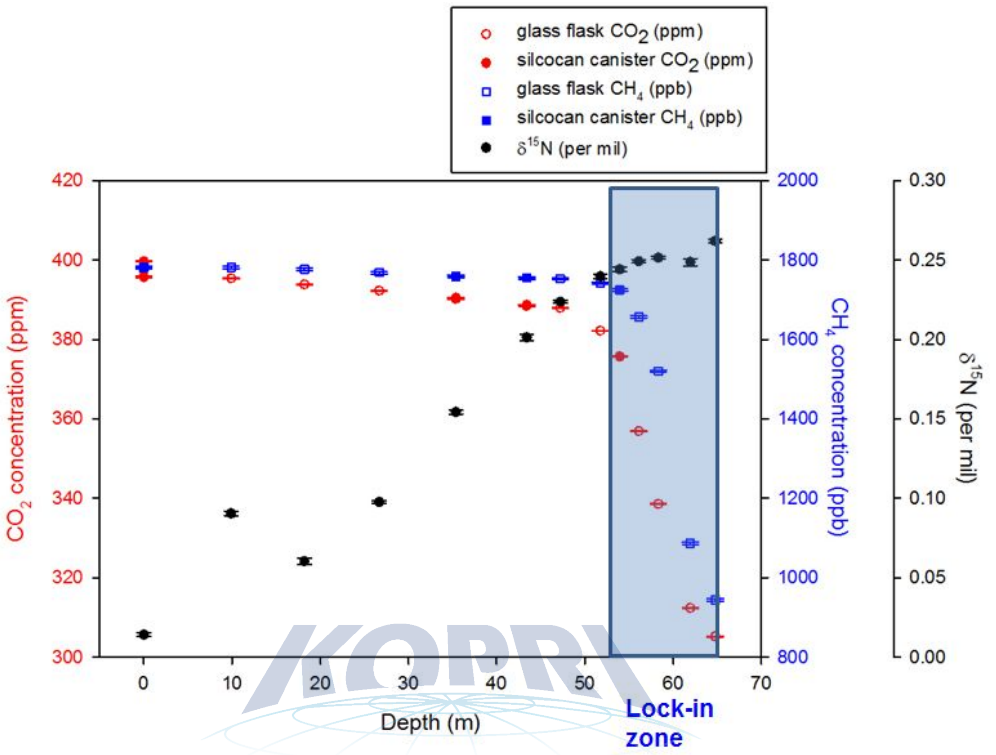


그림 B. Styx 빙하 펀공기 분석자료. 푸른색 상자는 기체확산이 없는 lock-in zone 깊이구간을 나타낸다. (서울대학교 빙하·고기후 연구실 제공)

펀얼음의 불균질성이 빙하코어 자료에 미치는 영향 분석

- 기존 펀공기 연구에서는 펀층의 밀도가 점이적으로 증가하는 것을 가정하여 모델을 만들었다. 그러나, 실제로 대부분의 펀층에서 불균질한 밀도변화가 관찰된다(그림 C). 따라서, 비록 미량기체 농도에 대한 모델이 측정값과 잘 일치한다고 하더라도 실제로 정확한 모델이라고 단정하기 어렵다. Styx 빙하 펀얼음 시료의 메탄농도와 공기함량 측정값은 밀도변화가 수 cm 규모로 불균질함을 보여준다(그림 D).
- 펀층의 불균한 밀도 변화를 펀공기 모델에 적용하기 위해서는 1 mm 규모의 정밀한 밀도 측정 자료가 필요하다. 현재까지는 독일의 Alfred Wegener Insitute와 미국의 Dartmouth 대학에 관련 측정이 가능하며, 향후 국내기술자/과학자에 의해서 시추되는 빙하코어 시료에 대해서 정밀한 밀도변화 측정이 필요하다.

그림 C. Styx빙하에서 관찰되는 경도(밀도) 변화. 수 cm ~ 수십 cm 규모로 밀도변화가 관찰된다. 사진은 Styx빙하 상부의 눈을 손으로 긁었을 때, 경도가 높은 부분은 남고, 경도가 낮은 부분은 파여 있는 모습을 보인다. (서울대학교 빙하/고기후 연구실 제공)

KOPRI 극지연구소

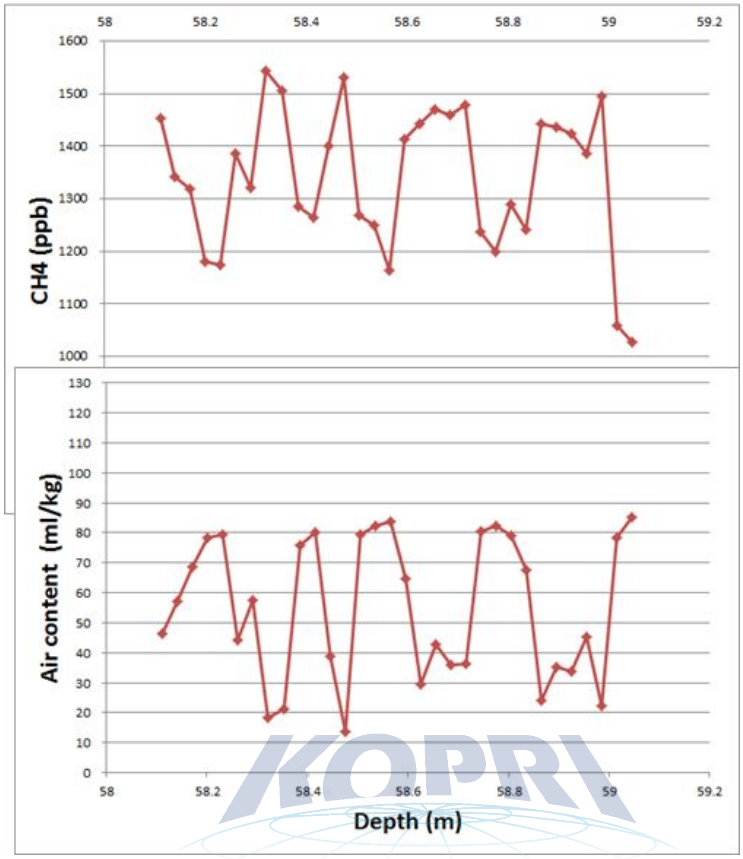


그림 D. Styx빙하 펀얼음에서 관찰되는 메탄농도와 공기함량(air content)의 거울상 관계. 메탄은 closed pore에 포집된 공기의 농도로서 연령이 open pore의 공기보다 오래된 것으로 농도가 낮게 보인다. 공기함량은 closed porosity와 비례관계이고, 공기함량이 높을수록 밀도가 높은 펀얼음에 해당한다. (서울대학교 빙하/고기후 연구실 제공)

온실기체 농도를 이용한 연령설정 개선방향

○ 메탄은 대기 체류시간이 약 10년 정도로서 CO2에 비해서 상대적을 빠르게 농도가 증가하거나 감소하는 것이 관찰된다. 따라서, 이미 연령이 잘 설정된 빙하코어가 있다면, 그 빙하코어의 메탄 농도와 우리가 연령을 모르는 빙하코어의 메탄농도를 비교하여 새로운 빙하코어의 기체연령을 알아 낼 수 있다(그림 E). 그러나, 이 경우에, 해상도가 높은 CH4자료가 있어야 대비(correlation)이 가능하다. 해상도가 높지 않을 경우에, correlation으로 연령을 맞추는 것(synchronization)에 오차가 발생한다. 따라서, 고해상도의 CH4자료를 생성하기 위하여 많은 시간과 노력이 요구된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 빙하를

깊이방향으로 연속적으로 녹이면서 분석하는 연속흐름분석(continuous flow analysis) 방법을 개발하여 CH4 농도를 측정하는 방법이 요구된다. 천부시추의 경우, 시료량이 비교적 적어서 연속흐름분석법이 절실히 요구되지 않지만, 계속되는 천부시추로 시료량이 증가하거나 중부/심부시추가 수행될 경우에는 반드시 연속흐름 분석법을 활용하여야 한다. 이미 미국, 프랑스, 덴마크, 스위스, 일본에서 이러한 분석법을 획득하고 있어, 국내에서도 조만간에 분석법 개발을 시도해야 할 것이다.

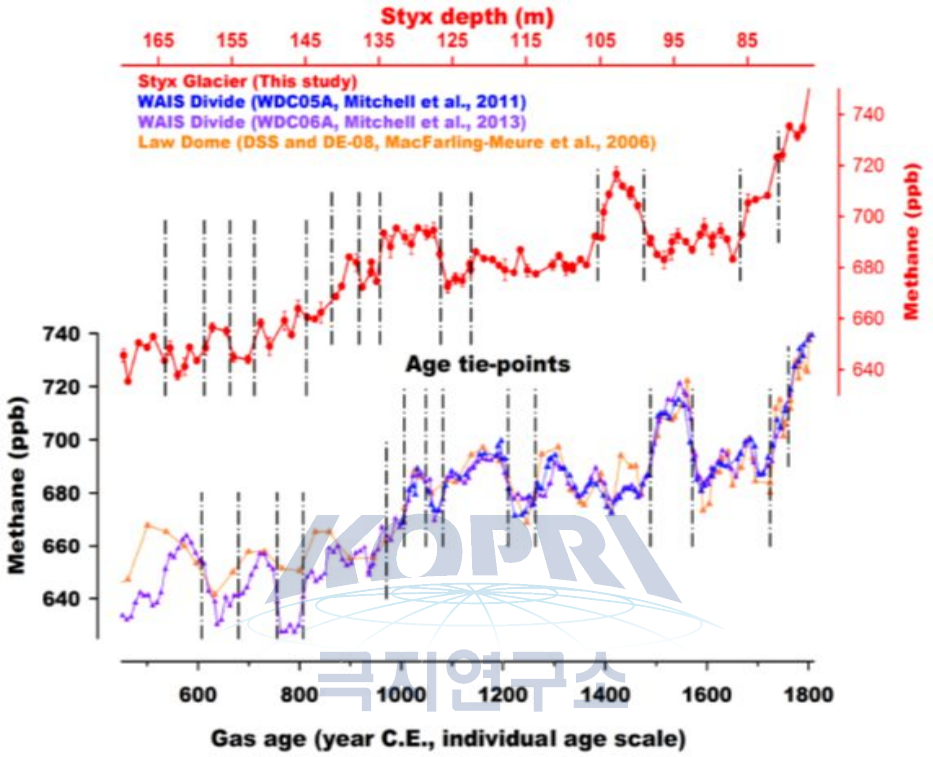


그림 E. Styx 빙하코어(빨간색)와 WAIS Divide(파란색, 보라색) 또는 Law Dome(주황색) 빙하코어 간의 메탄농도 대비(correlation) (서울대학교 빙하/고기후연구실 제공). WAIS Divide와 Law Dome의 기체연령은 독립적으로 이미 잘 설정되어 있어, 메탄대비를 통하여 Styx 빙하코어의 기체연령을 알아낼 수 있다.

- 아산화질소(N2O)는 측정오차가 커서 수십 년 시간규모에서의 변화를 측정하기 어려웠으나, 최근 서울대학교 빙하/고기후 연구실에서 1-2 ppb 수준의 측정오차로 정확히 측정할 수 있는 기법을 개발하였다. 향후, N2O 측정이 활발히 진행될 경우, N2O대비를 이용한 연령설정도 시도해 볼 만 하다(그림 F).
- CO2는 농도가 대기중에서 CH4나 N2O에 비해서 상대적으로 천천히 변하는 것으로 알려져 있어, 농도대비에 잘 활용되고 있지 않으나, CH4 자료에 한계가 있을 경우에 특징적인 변화를 이용하여 사용할 수 있다. 예를 들어, 서기 1600년 경에 대기 CO2 농도가 약 7-10 ppm (Ahn et al., 2012; Etheridge et al., 1996) 급속히 감소하는 것이 관찰되기 때문에, 연령을 모르는 빙하코어에 적용할 수 있다.

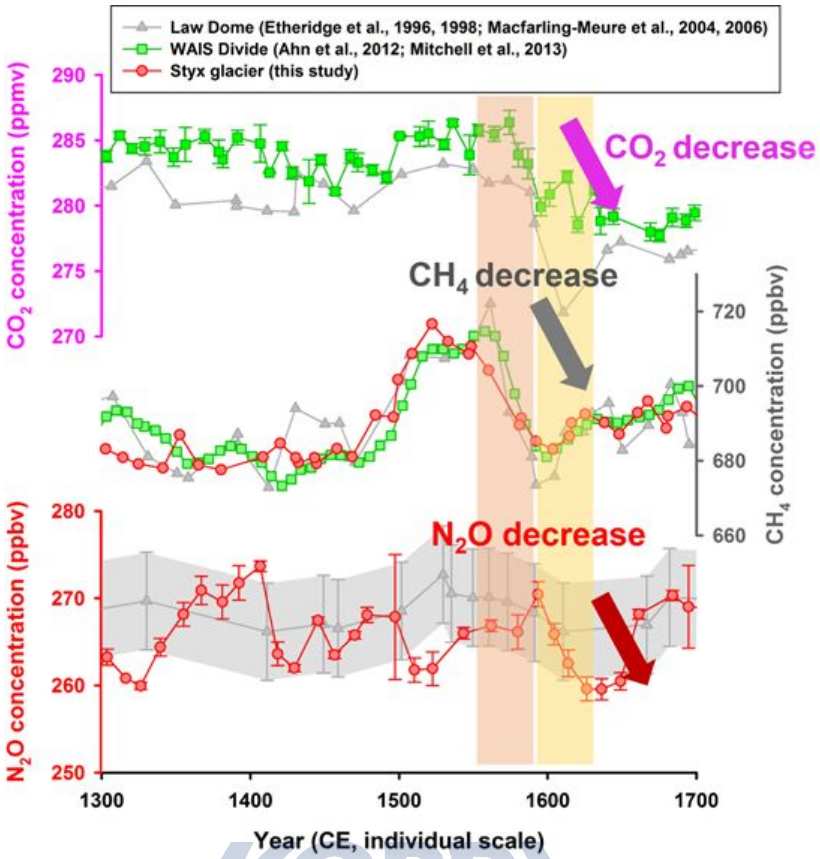


그림 F. 고정밀도 분석법을 이용한 온실기체 농도 분석결과 비교. 최근 서울대학교 빙하/고기후 연구실에서 1-2 ppb 오차수준의 매우 정밀한 N2O 측정법을 세계 최초로 개발하였다. (자료출처: 서울대학교 빙하/고기후연구실 제공)

KOPRI 극지연구소

○ 빙하코어에서 기체연령과 얼음연령이 다르다는 것은 이미 잘 알려져 있다(Schwander et al., 1999?). 빙하 상부의 펀층에서 기체확산이 발생하고, 그 결과 빙하 상부의 공기와 펀공기간의 느린 교환이 가능하다. 이러한 이유로, 펀공기가 공기방울로 갖히게 되는 시기에 공기방울 주변의 얼음 연령은 공기 연령보다 큰 값을 갖게 된다. 이러한 두 연령 간의 차이를 Δage라고 하는데, Δage를 정확히 알아야 기체연령을 따르는 온실기체 농도자료와 얼음연령을 따르는 온도 및 에어로졸 자료의 비교가 가능하게 된다. 펀공기의 기체확산은 약 50-100 미터 깊이에서 사라지게 되는데, 이 깊이를 Lock-in zone 이라고 부르며, Lock-in zone에서의 기체 연령과 얼음 연령의 차이가 천부 빙하의 경우 비슷하게 유지될 것으로 추정된다. 그러나, Δage는 온도와 적설량에 따라 달라지기 때문에, 먼 과거의 기후조건에서는 시간에 따라 변할 수 있다. 따라서, 중부/심부 시추 자료의 경우에 정확한 기후변화 및 온실기체 농도 변화 비교를 위하여 Δage에 대한 모델연구가 필수적으로 요구된다. 이러한, Δage 모델 연구는 펀공기(firn air) 연구를 통하여 개발 및 개선이 가능하다. 따라서, 향후 빅토리아 랜드 북부지역에서의 천부시추는 Δage 모델개발에 중요한 자료를 제공할 것이다.

제 4 장 연구개발결과의 활용계획

4-1. 향후 연구방향

1. 정성적 목표

구분	년도	세부연구목표	연구내용
1차년도	2017	Styx 천부빙하코어 물안정동위원소비 분석 완료	전체 구간(0-210 m)에 대한 물안정동위원소비를 고해상도(2.2 cm)로 분석 완료, Annual layer counting 방법을 활용하여 깊이-연대 모델 확립
		천부빙하코어의 역확산 모델 개발	강설 당시의 물안정동위원소비 복원을 위하여 역확산 모델을 개발하여 강설 당시의 기록 복원, GV7, Styx, Hercules Neve 빙하코어에 적용, Annual layer counting에 활용, 계절성 연구에 활용
		과거 2000년간 자연적, 인위적 기원의 에어로졸 특성 변화 비교	Styx, GV7 빙하코어에서 화산, 플루토늄 기록 복원(녹인 시료: SPA, REE, Tl, Bi, Pu) Styx 빙하코어에서 해빙변동, 폴리냐 형성에 따른 유기, 무기 에어로졸의 특성 분석(녹이지 않은 시료: SPA)
		그린란드 NEEM 빙하코어를 활용하여 기원지의 환경 변화 연구	그린란드 NEEM 빙하코어의 에어로졸 분석을 통한 기원지 건조지역 변화 및 확장 연구
		◦과거 2000년간 광물성먼지의 변동성 및 특성 연구	◦GV7 빙하코어의 광물성먼지 기록 복원
		◦빙하코어연구의 새로운 프록시 개발	◦빙하코어칩을 활용한 PCBs, PAHs 분석법 개발 ◦남극 빙하에서 I^-, Br^- 분석법 개발 ◦남극 빙하에서 생물성연소 프록시 분석법 개발
		초극미량 오스뮴 동위원소 분석을 위한 청정프로토콜 수립	오스뮴 오염제어 및 바탕값 설정을 통해 분석과정의 청정프로토콜 수립 분석 장비인 N-TIMS의 최적 분석조건 설정
		firn층 시료확보	11월경 남극 야외조사 준비 및 야외조사 시작

KOPRI 극지연구소

		준비	
		기존 firn ice 분석	기존 Styx, Hercules Neve 펀얼음 CH4 및 공기포함량(air content) 분석으로 펀층의 불균질성 연구
2차년도	2018	Hercules Neve의 천부빙하코어 물안정동위원소비 분석	전체 구간(0-80 m)에 대한 물안정동위원소비를 고해상도(4-5 cm)로 분석 완료, Annual layer counting 방법을 활용하여 깊이-연대 모델 확립
		AWS 설치지역 펀시추	AWS가 설치된 여러 지역에서 10-15 m 깊이의 펀코어를 획득하여 물안정동위원소비 분석, 동위원소비와 기온간의 시공간적 연관성 규명
		과거 2000년간 자연적, 인위적 기원의 에어로졸 특성 변화 비교	Styx, GV7 빙하코어에서 화산, 플루토늄 기록 복원(녹인 시료: SPA, REE, Tl, Bi, Pu) - Styx, GV7 빙하코어에서 에어로졸의 생지화학적 특성 분석을 통해 화산 기록 전후의 기원지 변화 연구, 남극 대기 순환의 이해(녹이지 않은 시료: SPA, ICPMS) Styx 빙하코어에서 해빙변동, 폴리냐 형성에 따른 유기, 무기 에어로졸의 특성 분석(녹이지 않은 시료)
		그린란드 NEEM 빙하코어를 활용하여 기원지의 환경 변화 연구	그린란드 NEEM 빙하코어의 에어로졸 분석을 통한 기원지 건조지역 변화 및 확장 연구
		◦과거 2000년간 광물성먼지의 변동성 및 특성 연구	◦Styx 빙하코어의 광물성먼지 기록 복원
		◦빙하코어연구의 새로운 프록시 개발	◦GV7 빙하코어칩의 PCBs, PAHs 기록 복원 ◦GV7 빙하코어에서 I-, Br- 기록 복원 ◦남극 빙하에서 생물성연소 기록복원
		초극미량 오스뮴 동위원소 분석기술 개발	국제공인 표준시료를 활용하여 오스뮴 동위원소 분석기술 개발
		고해상도 펀공기 채집	펀공기의 확산이 멈추는 Lock-in zone의 20군데 이상의 깊이에서 시료 채취, 깊이당 2리터 이상
		펀공기 δ15N-N2,	미량기체농도 및 질소기체 안정동위원소 측정

KOPRI 극지연구소

		CO2, CH4, N2O, CO 농도분석	(미국 NOAA에 분석 의뢰)
		편얼음을 이용한 온실기체 농도 측정	새로 시추한 편얼음에 대한 CH4 및 공기포함량(air content) 분석
3차년도	2019	신규시추지(V1) 천부빙하코어 물안정동위원소비 분석 완료	시추지의 강설량을 고려하여 계절적 변동을 연구할 수 있는 수준으로 해상도 결정, 물안정동위원소비 분석, Annual layer counting 방법으로 깊이-연대 모델 확립
		빅토리아랜드 기온, 강설량의 시공간적 변동 분석	빅토리아랜드 기온, 강설량 시공간적 변동을 분석하고 이를 타 연구 결과와 비교하여 전지구적 변화와 지역적 변동의 양상 연구
		과거 2000년간 자연적, 인위적 기원의 에어로졸 특성 변화 비교	- Hercules Neve 빙하코어에서 화산, 플루토늄 기록 복원(녹인 시료: SPA, REE, Tl, Bi, Pu)
		◦과거 2000년간 광물성먼지의 변동성 및 특성 연구	◦Hercules 빙하코어의 광물성먼지 기록 복원
		◦빙하코어연구의 새로운 프록시 개발	◦Styx 빙하코어칩의 PCBs, PAHs 기록 복원 ◦Styx 빙하코어에서 I-, Br- 기록 복원 ◦남극 빙하에서 생물성연소 기록복원
		오스뮴 동위원소 분석기술 검증	극지 빙설시료를 활용하여 분석기법의 신뢰도 최종 검증
		편얼음 밀도 비균질성 분석	고해상도 밀도 변화 분석 (독일 AWI 또는 미국 Dartmouth대학의 분광학적 밀도 측정기 사용)
		한국형 firn air 모델 개발	기존 모델을 개선한 한국형 편공기 모델을 개발
		최근 수십년 간 대기 미량기체 농도변화 복원	고해상도 농도측정 자료와 정확한 편공기 모델을 사용하여 최근 수십 년 간의 대기 농도변화 고해상도 복원

KOPRI 극지연구소

2. 정량적 목표

구분	국외논문		국내논문		특허출원		기술이전
	SCI* (1저자/공동)	기타	SCI (1저자/공동)	기타	국외	국내	
1차년도 (2017)	13 (7/6)	-					
2차년도 (2018)	14 (7/7)	-					
3차년도 (2019)	18 (8/10)	-					
합 계	45 (22/23)	-					

* 제1저자 및 공동저자(제2저자까지) 기재

4-2. 국·내외 공동연구 추진 계획

○한국-이태리-뉴질랜드 국제공동연구

◦이태리-뉴질랜드는 빅토리아랜드를 중심으로 빙하코어연구를 20여년간 수행하고 있음

◦이태리와는 GV7 빙하코어를 활용한 공동연구 (광물성먼지, 이온, 미량원소)를 수행하고 있고, 할로겐 등의 새로운 프록시 연구를 계획하고 있음

◦뉴질랜드에서 연구중인 빅토리아랜드 해안지역 빙하연구와 극지연구소가 수행하는 빅토리아랜드 중심의 Styx, Hercules Neve 빙하코어 연구를 통해 빅토리아랜드의 공간적 고해상도 연구결과를 완성할 수 있음

○프랑스, 일본, 미국의 동위원소모델 그룹과의 공동연구

: 국내에서는 동위원소가 탑재된 GCM그룹이 없기 때문에 정량적인 연구를 수행하기 위해서는 LMDZ-iso 또는 NCAR CAM등을 활용하여야 함

○펀얼음에 포집된 공기 및 bubbly ice에 포집된 공기의 온실기체(CO2, CH4, N2O) 농도분석을 서울대학교 빙하/고기후 연구실 장비를 활용하여 수행(Ahn and Brook, 2008; Ahn et al., 2012)

○펀공기 포집을 위한 펌프시스템, 블래더, 유리 플라스크 셑은 서울대학교 장비활용

○밀리미터 수준의 고해상도 밀도분석을 위하여 독일 알프레드베게너 연구소 또는 미국 다트머스 대학 연구팀의 분석장비를 활용

4-3. 연구개발 사업 규모

연구기간(년)	연구개발비(백만원)		
	2017	2018	2019
2017~2019 (3년간)			

4-4. 총 연구기간 로드맵

4-5. 인프라 활용 로드맵

인프라명	연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
남극 세종과학기지	2017	5											
	2018												
	2019												
남극 장보고과학기지	2017												
	2018												
	2019												
북극 다산과학기지	2017												
	2018												
	2019												
쇄빙연구선 아라온	2017												
	2018												
	2019												

KOPRI 극지연구소

* 활용 시기에 음영표시 및 활용일수 작성

제 5 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 6 장 참고문헌

* 보고서 작성시 인용된 모든 참고문헌 열거

Aarons, S.M., Aciego, S.M., Gabrielli, P., Delmonte, B., Koornneef, J.M., Wegner, A., Blakowski, M.A., 2016. The impact of glacier retreat from the Ross Sea on local climate: Characterization of mineral dust in the Taylor Dome ice core, East Antarctica. Earth and Planetary Science Letters 444, 34-44.

Abram, N.J, Wolff, E.W., Curran, M.A.J, 2013, A review of sea ice proxy information from polar ice cores. Quaternary Science Reviews, http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.01.011

Abram, N.J., E.W. Wolff, and M.A.J. Curran, 2013, A review of sea ice proxy information from polar ice cores, Quat. Sci. Rev., Vol. 79, 168-183.

Ahmed, M., Anchukaitis, K. J., Asrat, A., Borgaonkar, H. P., Braida, M., Buckley, B. M., ... & Diaz, H. F. (2013). Continental-scale temperature variability during the past two millennia. Nature Geoscience, 6, 339-346.

Ahn, J. and E.J. Brook. Atmospheric CO2 and climate change on millennial timescales during the last glacial period. Science, 322, 83-85 (2008)

Ahn, J., E.J. Brook, L. Mitchell, J. Rosen, J.R. McConnell, K. Taylor, D. Etheridge, and M. Rubino, Atmophseric CO2 over the last 1000 years: A high-reoslution record from the West Antarctic Ice Sheet (WAIS) Divide ice core, Global Biogeochemical Cycles, 26, doi:10.1029/2011GB004247 (2012).

Albani, S., Delmonte, B., Maggi, V., Baroni, C., Petit, J.R., Stenni, B., Mazzola, C., Frezzotti, M., 2012. Interpreting last glacial to Holocene dust changes at Talos Dome (East Antarctica): implications for atmospheric variations from regional to hemispheric scales. Clim. Past 8, 741-750.

Arrigo, K., Weiss, A.M., Smith, W.O., 1998, Physical forcing of phytoplankton dynamics in the southwestern Ross Sea. Journal of Geophysical Research 103(C1), 1007-1021.

Aydin, M. et al. Post-coring entrapment of modern air in some shallow ice cores collected near the firn-ice transition: evidence from CFC-12 measurements in Antarctic firn air and ice cores, Atmospheric Chemistry and Physics, 10,

5135-5144 (2010)

Aydin, M. et al. Recent decreases in fossil-fuel emissions of ethane and methane derived from firn air. Nature, 476, 198- 201 (2011)

Battle, M. et al. Atmospheric gas concentrations over the past century measured in air from firn at the South Pole. Nature, 383, 231-235 (1996)

Battle, M. et al., Controls on the movement and composition of firn air at the West Antarctic Ice Sheet Divide, Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 11007-11021 (2011).

Becagli, S., Castellano, E., Cerri, O., Curran, M., Frezzotti, M., Marino, F., Morganti, A., Proposito, A., Severi, M., Traversi, R., Udisti, R., 2009, Methansulphonic acid (MSA) stratigraphy from a Talos dome ice core as a tool in depicting sea ice changes and southern atmospheric circulation over previous 140 years. Atmospheric Environment 43, 1051-1058.

Bertler, N. A. N., Mayewski, P. A., & Carter, L. (2011). Cold conditions in Antarctica during the Little Ice Age—Implications for abrupt climate change mechanisms. Earth and Planetary Science Letters, 308(1), 41-51.

Betler, N.A.N., Naish, T.R., Mayewski, P.A., Barrett, P.J., 2006, Opposing oceanic and atmospheric ENSO influences on the Ross Sea Region, Antarctica. Advances in Geoscience, 6, 83-86

Boyce, D.G., M.R. Lewis, and B. Worm, Global phytoplankton decline over the past century, nature, Vol. 466, 591-596.

Buizert, C. et al. Gas transport in firn: multiple-tracer characterization and model intercomparison for NEEM, Northern Greenland, Atmos. Chem. Phys., 12, 4259-4277 (2012).

Comiso, J., 2010, Polar Oceans from Space, Atmospheric and Oceanographic Sciences Library 41, DOI 10.1007/978-0-387-68300-3_10.

Curran, M.A.J., Ommen, T.D., Morgan, V.I., Phillips, K., Palmer, A.S., 2003, Ice core evidence for antarctic sea ice decline since the 1950s. Science, 302, 1203.

Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. Tellus, 16(4), 436-468.

Delmonte, B., Andersson, P.S., Schöberg, H., Hansson, M., Petit, J.R., Delmas, R., Gaiero, D.M., Maggi, V., Frezzotti, M., 2010. Geographic provenance of aeolian dust in East Antarctica during Pleistocene glaciations: preliminary results from Talos Dome and comparison with East Antarctic and new Andean ice core data. Quaternary Science Reviews 29, 256-264.

Delmonte, B., Baroni, C., Andersson, P.S., Narcisi, B., Salvatore, M.C., Petit, J.R., Scarchilli, C., Frezzotti, M., Albani, S., Maggi, V., 2013. Modern and Holocene aeolian dust variability from Talos Dome (Northern Victoria Land) to the interior

of the Antarctic ice sheet. Quaternary Science Reviews 64, 76-89.

Delmonte, B., C. Baroni, P.S. Andersson, H. Schoberg, M. Hansson, S. Aciego, J.-R. Petit, S. Albani, C. Mazzola, V. Maggi, and M. Frezzotti, 2010, Aeolian dust in the Talos dome ice core (East Antarctica, Pacific/Ross Sea sector): Victoria Land versus remote sources over the last two climate cycles, J. Quat. Sci., Vol. 25, No. 8, 1327-1337.

Drucker, R., Martin, S., and Kwok, R., 2011, Sea ice production and export from coastal polynas in the Weddell and Ross Seas. Geophysical Research Letters 38, L17502.

Eichler, A., G. Gramlich, T. Kellerhals, L. Tobler, and M. Schwikowski, 2015, Pb pollution from leaded gasoline in South America in the context of a 2000-year metallurgical history, Sci. Adv., 2015;1:e1400196.

Etheridge, D.M., L.P. Steele, R.L. Langenfelds and R.J. Francey, Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO2 over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn, Journal of Geophysical Research, 101, 4115-4128 (1996).

Fuoco, R., Giannarelli, S., Onor, M., Ghimenti, S., Abete, C., Termine, M., Francesconi, S., 2012. A snow/firn four-century record of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorobiphenyls (PCBs) at Talos Dome (Antarctica). Microchemical Journal 105, 133-141.

Genoni, L. (2008). Studio geochimico isotopico per la stima del bilancio di massa nel bacino di drenaggio di Dome C (Antartide orientale) come contributo alle variazioni del livello marino.

Guner F.E., Sakurai T., Hondoh T., 2013. Ernstburkeite, Mg(CH3SO3)2 12H2O, a new mineral from Antarctica, European Journal of Mineralogy, 25, 79-84.

Han, C., L.J. Burn-Nunes, K. Lee, C. Chang, J.-H. Kang, Y. Han, S.D. Hur, and S. Hong, 2015, Determination of lead isotopes in a new Greenland deep ice core at the sub-picogram per gram level by thermal ionization mass spectrometry using an improved decontamination method, Talanta, Vol. 140, 20-28.

Herron, M. M., & Langway Jr, C. C. (1980). Firn densification: an empirical model. Journal of Glaciology, 25, 373-385.

Herron, M.M. and C.C. Langway, Firn densification: an empirical model, Journal of Glaciology, 25, 373-385 (1980)

Hong, S., T.-O. Soyol-Erdene, H.J. Hwang, S.B. Hong, S.D. Hur, and H. Motoyama, 2012, Evidence of global-scale As, Mo, Sb, and Tl atmospheric pollution in the Antarctic snow, Environ. Sci. Technol., Vol. 46, No. 21, 11550-11557

Ikumi Oyabu, Yoshinori Iizuka, Ryu Uemura, Takayuki Miyake, Motohiro Hirabayashi, Hideaki Motoyama, Toshimitsu Sakurai, Toshitaka Suzuki, and Takeo Hondo, 2014. Chemical compositions of sulfate and chloride salts over the last

termination reconstructed from the Dome Fuji ice core, inland Antarctica, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119, 14045-14058.

Johnsen, S. J. (1977). Stable isotope homogenization of polar firn and ice. Isotopes and impurities in snow and ice, 1.

Jones, T.R., White, J.W.C., Popp, T. (2014), Siple Dome shallow ice cores: a study in coastal dome microclimatology, Climate of the Past, 10, 1253-1267

Jouzel, J. et al. (2003), Magnitude of isotope/temperature scaling for interpretation of central Antarctic ice cores, Journal of Geophysical Research, 108, D12, 4361, doi:10.1029/2002JD002677

Kang, J.H., Hwang, H., Hong, S.B., Hur, S.D., 2014. Particle size distribution analysis of mineral dust in polar snow using a coulter counter. Ocean and Polar Research 36, 319-326.

Kang, J.-H., Hwang, H., Hong, S.B., Hur, S.D., Choi, S.-D., Lee, J., Hong, S., 2015. Mineral dust and major ion concentrations in snowpit samples from the NEEM site, Greenland. Atmospheric Environment 120, 137-143.

Koffman, B.G., Kreutz, K.J., Breton, D.J., Kane, E.J., Winski, D.A., Birkel, S.D., Kurbatov, A.V., Handley, M.J., 2014. Centennial-scale variability of the Southern Hemisphere westerly wind belt in the eastern Pacific over the past two millennia. Clim. Past 10, 1125-1144.

Korotkikh, E.V., P.A. Mayewski, D. Dixon, A.V. Kurbatov, and M.J. Handley, Recent increase in Ba concentrations as recorded in a South Pole ice core, Atmos. Environ., Vol. 89, 683-687.

Kristensen, L.J., 2015, Quantification of atmospheric lead emissions from 70 years of leaded petrol consumption in australia, Atmos. Environ., Vol. 111, 195-201.

Kwok, R., and Comiso, J.C., 2002, Southern ocean climate and sea ice anomalies associated with the southern oscillation. Journal of climate, 15, 487-501.

Laluraj, C.M., Thamban, M., Satheesan, K., 2014. Dust and associated geochemical fluxes in a firn core from coastal East Antarctica and its linkages with Southern Hemisphere climate variability over the last 50 years. Atmospheric Environment 90, 23-32.

Lambert, F., Delmonte, B., Petit, J.R., Bigler, M., Kaufmann, P.R., Hutterli, M.A., Stocker, T.F., Ruth, U., Steffensen, J.P., Maggi, V., 2008. Dust-climate couplings over the past 800,000 years from the EPICA Dome C ice core. Nature 452, 616-619.

Lee, K., S.-B. Hong, J. Lee, J. Chung, S.-D. Hur, S. Hong, 2015, Seasonal variation in the input of atmospheric selenium to northwestern Greenland snow, Sci. Tot. Environ., Vol. 526, 49-57.

Li, F., P. Ginoux, andV. Ramaswamy, 2008, Distribution, transport, and deposition of

mineral dust in the Southern Ocean and Antarctica: Contribution of major sources, J. Geophys. Res., Vol. 113, D10207, doi:10.1029/2007JD009190.

Lorius, C., & Merlivat, L. (1977). Distribution of mean surface stable isotopes values in East Antarctica. Observed changes with depth in a coastal area. Isotopes and impurities in snow and ice. Proceedings of the Grenoble Symposium Aug./Sep. 1975, 125-137.

Mandel, B., 2011, The Dynamics and Differentiation of Latin American Metal Exports, Federal Reserve Bank of New Yor Staff Reports no. 508, pp.46.

Masson-Delmotte, V. et al. (2015), Recent changes in north-west Greenland climate documented by NEEM shallow ice core data and simulations, and implications for past-temperature reconstructions, The Cryosphere, 9, 1481-1504

McConnell, J.R., Aristarain, A.J., Banta, J.R., Edwards, P.R., Simões, J.C., 2007. 20th-Century doubling in dust archived in an Antarctic Peninsula ice core parallels climate change and desertification in South America. Proceedings of the National Academy of Sciences 104, 5743-5748.

McConnell, J.R., O.J. Maselli, M. Sigl, P. Vallelonga, T. Neumann, H. Anschütz, R.C. Bales, M.A.J. Curran, S.B. Das, R. Edwards, S. Kipfstuhl, L. Layman, and E.R. Thomas, Antarctic-wide arrary of high- resolution ice core records reveals pervasive lead pollution began in 1880 and persists today, Sci. Rep., Vol. 4, doi:10.1038/srep05848.

Mudd, G.M., 2009, The Sustainability of Mining in Australia: Key Production Trends and Their Environmental Implications for the Future, Research Report No. RR5, Dept. of Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute, pp. 269.

Noone, D., Simmondsm I. (2004), Sea ice control of water isotope transport to Antarctica amd implications for ice core interpretation, Journal of Geophysical Research, 109, D07105, doi:10.1029/2003JD004228

Nriagu, J.O., 1989, A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals, Nature, Vol. 338, 47-49.

Planchon, F.A.M., C.F. boutron, C. Barbante, G. Cozzi, V. Gaspari, E.W. Wolff, C.P. Ferrari, and P. Cescon, 2002, Changes in heavy metals in Antarctic snow from Coats Land since the mid-19th to the late-20th century, Earth Planet. Sci. Lette., Vol. 200, 207-222.

Planchon, F.A.M., K. Van de Velde, K.J.R. Rosman, E.W. Wolff, C.P. Ferrari, and C.F. Boutron, 2003, One hundred fifty-year record of lead isotopes in antarctic snow from Coats Land, Geochim. Cosmochim. Acta, Vol. 67, No. 4, 693-708.

Rhodes, R.H., Bertler, N.A.N., Baker, J.A., Sneed, S.B., Oerter, H., Arrigo, K.R., 2009,

KOPRI 극지연구소

Sea ice variability and primary productivity in the Ross Sea, Antarctica, from mehtylsulphonate snow record. Geophysical Research Letters 36, L10704.

Rhodes, R.H., Bertlet, N.A.N., Baker, J.A., Steen-Larsen, H.C., Sneed, S.B., Morgenstern, U., Johnsen, S.J., 2012, Little ice age climate and oceanic conditions of the Ross sea, Antarctica from a coastal ice core record. Clim. Past 8, 1223-1238.

Schüpbach, S., Federer, U., Kaufmann, P.R., Albani, S., Barbante, C., Stocker, T.F., Fischer, H., 2013. High-resolution mineral dust and sea ice proxy records from the Talos Dome ice core. Clim. Past 9, 2789-2807.

Schwander, J. and B. Stauffer, Age difference between polar ice and the air trapped in its bubbles, Nature, 311, 45-47 (1984).

Severinghaus, J. P. and Brook, E. J. Abrupt climaate change at the end of the last glacial period inferred from trapped air in polar ice, Science, 286, 930-934 (1999).

Severinghaus, J. P., T. A. Sowers, E. J. Brook, R. B. Alley and M. L. Bender, Timing of abrupt climate change at the end of the Younger Dryas interval from thermally fractionated gases in polar ice, Nature, 391, 141-146 (1998).

Sigl, M., M. Winstrup, J.R. McConnell, K.C. Welten, G. Plunkett, F. Ludlow, U. Buntgen, M. Caffee, N. Chellman, D. Dahl-Jensen, H. Fischer, S. Kipfstuhl, C. Kostick, O.J. Maselli, F. Mekhaldi, R. Mulvaney, R. Muscheler, D.R. Pasteris, J.R. Pilcher, M. Salzer, S. Schupbach, J.P. Stenffensen, B.M. Vinther, and T.E. Woodruff, 2015, Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years, Nature, Vol. 523, 543-549.

Sigl, M., McConnell, J. R., Layman, L., Maselli, O., McGwire, K., Pasteris, D., ... & Mulvaney, R. (2013). A new bipolar ice core record of volcanism from WAIS Divide and NEEM and implications for climate forcing of the last 2000 years. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(3), 1151-1169.

Sigl, M., Winstrup, M., McConnell, J. R., Welten, K. C., Plunkett, G., Ludlow, F., ... & Fischer, H. (2015). Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. Nature.

Sinclair, K. E., Bertler, N. A., & Van Ommen, T. D. (2012). Twentieth-century surface temperature trends in the western Ross Sea, Antarctica: Evidence from a high-resolution ice core. Journal of Climate, 25(10), 3629-3636.

Sinclair, K.E., Bertler, N.A.N., Bowen, M.M., Arrigo, K.R., 2014, Twentieth century sea-ice trends in the Ross Sea from a high-resolution, coastal ice core record. Geophysical Research Letters 10.1002/2014GL059821.

Soyol-Erdene, T.-O., Y. Huh, S. Hong, and S.D. Hur, 2011, A 50- year record of platinum, iridium, and rhodium in Antarctic snow: Volcanic and anthropogenic sources, Environ. Sci. Technol., Vol. 45, 5929-5935.

KOPRI 극지연구소

Spolaor, A., T. Opel, J.R. McConnell, O.J. Maselli, G. Spreen, C. Varin, T. Kirchgeorg, D. Fritzsche, A. Saiz-Lopez, and P. Vallelonga, 2016, Halogene-based reconstruction of Russian Arctic sea ice area from the Akademii Nauk ice core (Severnaya Zemlya), The Cryosphere, Vol. 10, 245-256.

Spolaor, A., Vallelonga, P., Cozzi, G., Gabrieli, J., Varin, C., Kehrwald, N., Zennaro, P., Boutron, C., Barbante, C., 2013. Iron speciation in aerosol dust influences iron bioavailability over glacial-interglacial timescales. Geophysical Research Letters 40, 1618-1623.

Spolaor, A., Vallelonga, P., Gabrieli, J., Martma, T., Björkman, M.P., Isaksson, E., Cozzi, G., Turetta, C., Kjær, H.A., Curran, M.A.J., Moy, A.D., Schönhardt, A., Blechschmidt, A.M., Burrows, J.P., Plane, J.M.C., Barbante, C., 2014. Seasonality of halogen deposition in polar snow and ice. Atmospheric Chemistry and Physics 14, 9613-9622.

Steen Larsen, H. C., Masson Delmotte, V., Sjolte, J., Johnsen, S. J., Vinther, B. M., Bréon, F. M., ... & Gallee, H. (2011). Understanding the climatic signal in the water stable isotope records from the NEEM shallow firn/ice cores in northwest Greenland. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116(D6).

Steig, E. J., Mayewski, P. A., Dixon, D. A., Kaspari, S. D., Frey, M. M., Schneider, D. P., ... & Meese, D. (2005). High-resolution ice cores from US ITASE (West Antarctica): Development and validation of chronologies and determination of precision and accuracy. Annals of Glaciology, 41(1), 77-84.

Thomas, E.R., and Bracegirdle., 2009, Improving ice core interpretation using in situ and reanalysis data. Journal of Geophysical Research 114, D20116.

Turner, J., Comiso, J.C., Marshall, G.J.,, Lachlan-Cope, T.A., Bracegirdle, T., Maksym, T., Meredith, M.P., Wang, Z., Orr, A., 2009, Non-annular atmospheric circulation change induced by stratospheric ozone depletion and its role in the resent increase of antarctic sea ice extent. Geophysical Research Letters 36(L08502).

Vallelonga, P., K. Van de Velde, J.-P. Candelone, V.I. Morgan, C.F. Boutron, and K.J.R. Rosman, 2002, The lead pollution history of Law Dome, Antarctica from isotopic measurements on ice cores: 1500 AD to 1989 AD, Earth Planet. Sci. Lette., Vol. 204, 291-306.

Van de Velde, K., P. Vallelonga, J.-P. Candelone, K.J.R. Rosman, V. Gaspari, G. Cozzi, C. Barbante, R. Udisti, P. Cescon, and C.F. Boutron, 2005, Pb isotope record over one century in snow from Victoria Land, Antarctica, Earth and Planet. Sci. Lette., Vol. 232, 95-108.

Wel, G., Fischer, H., Oerter, H., Meyer, H., & Meijer, H. A. J. (2015). Estimation and calibration of the water isotope differential diffusion length in ice core records.

The Cryosphere, 9(4), 1601-1616.

Wen, H., and J. Carignan, 2007, Reviews on atmospheric selenium: Emissions, speciation and fate, Atmos. Environ., Vol. 41, 7151-7165.

한영철, 전성준, 이훈규, 안진호, 정지웅, 허순도, & 홍상범. (2015). 2014-2015 하계 남극 북빅토리아랜드 스틱스 빙하 (Styx glacier) 천부 시추. 지질학회지, 51(3), 343-355.

KOPRI
극지연구소

편집순서 7

뒷 면

(국내 과제용)

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서 입니다.
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