



Snapshot



○ 위성자료를 이용한 영구동토층 파괴와 활동층 깊이 변화 모니터링

(김 영 옥/University of Montana, 선임연구원) 3면

영구동토층과 활동층은 극지의 생태학과 수문학 순환을 구성하는 필수 요소이다. 마이크로웨이브와 열센서 위성 자료를 이용하여 세계 최초로 극지의 영구동토층 규모와 활동층의 깊이를 계산하는 기술이 개발되었다. 30년간의 자료 분석으로부터 극지 영구동토층의 파괴 정도와 그 위치를 파악할 수 있게 되었고 기후 온난화로 인해 활동층 깊이가 더 깊어짐이 밝혀졌다.

○ 칠레 남극연구 체계와 한-칠레 남극연구협력센터의 의의

(김 유 하/극지연구소 미래전략실) 7면

칠레는 우리나라 극지연구 역사에서 빼놓을 수 없는 가장 오랜 파트너이다. 1988년 남극세종과학기지가 건설된 이래 지난 30여 년간 우리나라 남극 연구자들과 보급물품들은 칠레 남쪽 끝에 위치한 Punta Arenas를 거쳐 세종기지로 들어갔다. 세종기지 근처에 위치한 프랫(PRAT) 기지를 비롯하여 칠레의 다양한 연구거점들은 우리나라 연구자들에게 이상적인 공동연구 기반을 제공하였다. 2016년 2월 극지연구소는 Punta Arenas 현지에 위치한 칠레 남극연구소(INACH) 내에 '한-칠레 남극연구협력센터'를 개소하였다. 이 글에서는 칠레 남극연구의 체계와 주요 연구내용, 그리고 한-칠레 남극연구협력센터 개소의 의미와 향후 발전방향에 대해 알아보려고 한다.

○ 남극의 구름 형성을 촉진하는 비-생물학적 요오드 생성 메카니즘 연구

(김 기 태/극지연구소 극지기후변화연구부) 13면

남극의 오존 및 구름 형성에 영향을 미치는 활성 요오드 물질의 새로운 비-생물학적(non-biogenic)생성 메카니즘을 남극 세종과학기지 기반 현장연구 및 화학반응 모델링 결과를 바탕으로 세계 최초로 규명하였다. 요오드 이온이 포함된 얼음에서 독특한 화학반응의 결과로 활성 요오드 물질이 생성되고 이는 남극 봄철 얼음이 녹게 될 때 대기 중으로 대량의 방출된다는 것을 실험을 통해 증명하였다.

○ [특별기고] 우리나라 극지연구사의 알려지지 않은 이야기

(박 병 권/한국극지연구위원회 고문) 17면

KOPRI
극지연구소





위성자료를 이용한 영구동토층 파괴와 활동층 깊이 변화 모니터링

김영욱 (University of Montana, 선임연구원)

I. 머리말

극지의 온난화는 지구 전체 평균 기온 증가보다 훨씬 빠른 속도로 진행되고 있다. 극지에서의 이런 변화는 지구 규모 시스템과 기후에 영향을 끼치고 특정 지역의 악기상(extreme weather) 발생 가능성을 증가시킨다. 또한 극지 온난화는 추운 기온에 적응해 있던 생태계의 기후 저항성에 변화가 생기기 시작하고 지면의 열적 평형이 깨지기 시작한다. 즉 대륙 빙하가 녹음으로 인해 대기, 해양, 빙하 시스템간의 물리적 균형에 균열이 생기기 시작하게 된다. 극지 연구에서 있어 가장 시급한 주제는 크게 네 가지로 분류된다.

- ① 대륙 빙하의 융해에 따른 해수면 상승의 영향
- ② 해수면 상승이 지구 기후에 미치는 영향
- ③ 생태계 종다양성 변화
- ④ 영구동토층 (permafrost)의 파괴에 따른 기후 및 사회 인프라 시설에 대한 영향.

이 중에서 영구동토층 파괴와 활동층 깊이의 변화를 위성에서 모니터링 하는 최신 기법과 트렌드 분석에 대한 결과를 이 글에서 소개하고자 한다.

II. 영구동토층 모니터링의 중요성

영구동토층은 다년간에 걸쳐 지면의 기온이 연평균 0도 이하인 지역을 말하는데 북반구 면적의 대략 25%

정도에 해당된다. 대부분의 영구동토층은 빙하기 때 형성되었으며 얼음의 형태로 존재하는 수분을 함유한 퇴적층으로 구성되어 있고 현재 북부 시베리아와 캐나다 등지에 700m이상 깊게 분포되어 있다. 극지의 토양은 영구동토층과 활동층(Active layer)으로 구성되는데 활동층이란 영구동토층보다 위의 토양층으로 계절에 따라 동결(freezing)과 융해(thawing)가 반복되는 층으로 주로 여름에 지표면 기온이 0도 이상으로 올라가면서 녹은 경우에 생성된다. 온난화가 진행됨에 따라 영구동토층의 남쪽 경계는 지난 50년간 시베리아 지역에서 대략 50km정도 캐나다 지역에서는 약 130km 정도 북쪽으로 이동 되었고 그에 따라 활동층 깊이(active layer depth)가 증가하여 영구동토층의 토양에 함유되어 있는 유기물들이 녹아 부패하게 되는데 이 과정에서 온실기체인 이산화탄소와 메탄의 대기로의 배출을 증가 시키고 있다. 또한 이러한 현상이 다시 지표면 온도를 증가시켜 영구동토층의 융해를 가속 시키고 있다. 이는 일명 탄소피드백으로 일컬어지는데 증가된 지표면 온도가 영구동토층의 융해를 빠르게 진행하여 더 많은 탄소가 배출하게 된다는 것이다. 유엔 환경계획(UNEP)는 영구동토층에서 배출된 온실기체의 양은 지구 전체의 39%를 차지할 것이라고 예측하고 있으며 이렇게 대기 중에 배출된 온실기체가 향후 온난화를 지속 할 것이라고 주장하고 있다. 또한 영구동토층의 융해가 극지 생태계의 종다양성을 변화 시키고 지반을 불안정하게 만들어 사회적 기반 인프라 (예를 들어 도로, 철도, 파이프라인, 송전선 등)에 막대한 손실을 초래할 것이라고 밝히고 있다. 수목한계선의

북쪽으로의 이동은 영구동토층의 파괴를 가속화하여 지반을 건조하게 만들어 산불피해가 증가하게 되는데 이는 최근 툰드라 지역의 산불증가의 한 요인으로 분석되고 있다. 그런 이유로 극지 영구동토층의 융해에 대한 관심이 높아지고 있고 중요한 연구 대상지역임에 불구하고 현재까지 영구동토층에 대한 모니터링은 많이 미흡한 실정이다. 특히 중요한 문제는 극지 영구동토층의 면적이 지구 온난화에 따라 얼마나 감소하는지 그에 따라 영구동토층에서 활동층 깊이는 얼마나 깊어지는지에 관한 연구이다. 이런 변화가 극지 토양에 존재하는 미생물 활동과의 관계를 규명하여 탄소 순환의 피드백에 대한 역할과 정량적인 연구가 매우 시급한 실정이다. 이런 중요성으로 인하여 영구동토층의 특성(지면 기온, 활동층 깊이, 영구동토층 면적, 영구동토층 조각의 공간 분포, 영구동토층내의 얼음의 형태로 존재하는 수분량)변화를 주기적으로 그리고 장기적으로 모니터링하는 것은 매우 중요하다.

III. 영구동토층의 모니터링 기법

영구동토층의 변화를 감지하는 방법은 크게 세 가지가 있다. 직접 영구동토층에 가서 관측(survey)하여 자료를 확보하는 방법, 생지화학 모형을 이용하여 영구동토층의 특성을 모사하는 방법 그리고 위성자료를 이용하여 영구동토층의 특성을 모니터링하는 방법이 있다. 직접 관측하여 영구동토층의 상태와 활동층의 깊이를 측정하기 위해서는 digging, core drilling, 기온 측정을 해야 한다. 이 방법은 광활한 영구동토층의 면적(북반구 면적의 25%)에 비해 관측되는 지점의 수가 턱없이 부족하고 영구동토층의 지역 특성상 접근이 불가능한 지역이 대부분이다. 또한 관측을 하는데 고비용이 들고 비정기적인 관측으로 인해 자료의 불연속성이 존재하게 된다. 열역학적 법칙에 근거한 모형을 이용하는 방법은 열역학 기본 방정식을 풀기 위한 기상자료와 보조 자료를 필요로 한다. 그러나 기상자료의 경우 일반적으로 지상 관측소의 자료를 근거로 자료 동화의 기법을 이용하여 육상 전 지역의 기상 자료값을 추출하게 된다.

극지에서는 지상 관측소의 부족과 내삽 기법의 부정확으로 인해 많은 어려가 발생하고 있어 이와 같은 자료를 이용한 모형 결과 또한 정확성이 떨어지게 된다. 육상위성관측은 크게 광학센서, 열감지센서 그리고 마이크로웨이브 센서의 세 가지 방법에서 이루어지는데 광학센서의 경우 식생의 생물리학적 특성, 양분, 수분량을 주로 관측하고 열감지센서의 경우 지표면의 기온을 추정하는데 주로 이용된다. 그러나 이 두 센서의 경우 구름이 있는 경우에는 지표면의 자료를 얻을 수 없고 대기 중 에어로졸이나 먼지의 농도가 높은 경우 자료의 왜곡이 있어 날 수 있다. 마지막으로 마이크로웨이브 센서를 이용하는 방법인데 이 센서의 경우 구름을 투과하여 지표면의 특성을 관측할 수 있고 대기 중 에어로졸이나 먼지의 영향을 거의 받지 않으며 하루에 두 번 낮과 밤의 자료를 제공하게 된다. 이 연구에서 이용된 37GHz 주파수의 경우 눈과 식생의 상층부에서 가장 가까운 지점의 기온 변화를 감지하고 특히 더 낮은 주파수(1.4GHz)의 마이크로웨이브 센서를 이용할 경우 지면 아래(최대 10cm 깊이)까지 투과할 수 있어 토양 속 수분량과 기온 그리고 동결융해 정도를 획득할 수 있다. 2000년 이후 광학센서에서부터 마이크로웨이브 센서까지 수십 개의 위성이 세계 여러 나라에서 성공적으로 발사되어 하루에 수 테라바이트의 자료를 생성하고 있고 이런 자료로부터 극지의 영구동토층과 활동층 정보를 추출하는 알고리즘이 미국, 유럽, 일본 및 중국을 중심으로 활발히 개발되고 있다.

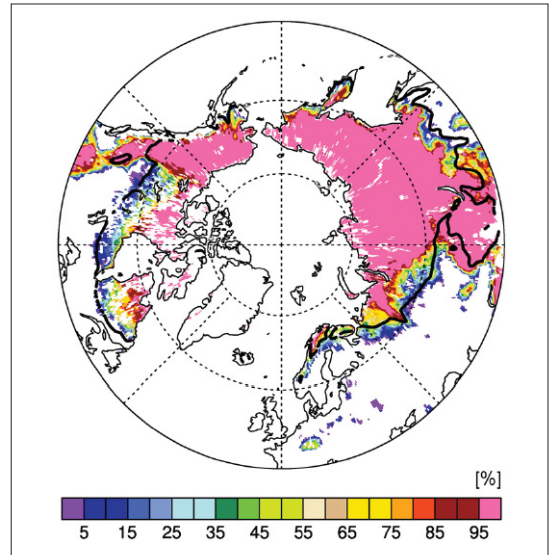
최근에 마이크로웨이브 센서를 탑재한 위성의 밝기온도(brightness temperature)를 이용하여 지표면의 동결융해를 감지하는 알고리즘이 개발되었고 이에 해당되는 자료가 생성되어 미국 국립 눈얼음 자료 센터(National Snow Ice Data Center)에서 배포 중에 있다(nsidc.org/data/nsidc-0477; Kim et al., 2011, 2012). 1979년부터 현재까지 전구규모의 동결융해자료가 일별로 제공되는데 이 위성자료는 지표면의 동결융해의 기간과 봄철의 주 융해 시기 그리고 가을철의 주 동결 시기를 알려주고 이런 정보는 고위도 지역에서 식생의 생물 시간(phenology), 눈 녹음 기간, 봄철

한파 피해 산정 그리고 영구동토층을 모니터링 하는데 많이 이용되고 있다.

IV. 영구동토층의 모니터링 연구현황 및 성과

위성자료를 이용하여 영구동토층의 지도제작(mapping)을 하려는 시도는 여러 번 있었으나 대부분의 경우 한정된 지역에 국한되고 대상 기간도 짧아 전반적인 변화를 모니터링 하는 데에 한계가 있었다. 그러나 위에서 설명한 마이크로웨이브 센서에서 관측된 동결융해 자료를 이용하여 30년간의 영구동토층 지도제작을 하고 활동층의 깊이를 계산할 수 있는 기술이 개발되어 트렌드 분석 및 공간 패턴의 변화를 모니터링 할 수 있게 되었다. 영구동토층의 발달조건은 지면이 얼 수 있는 추운 겨울이 장기간 지속 되어야 하므로 대부분의 경우 영구동토층은 주로 동결융해인 날의 비율과 연평균 기온에 의해 추정된다. 이 연구에서 북위 45도 이상인 지역에서 9월부터 그 이듬해 8월까지 동결인 날의 수가 융해의 날의 수보다 크고 그것이 2년 연속 유지 되었을 때 영구동토층으로 지정하였다. <그림 1>의 경우 30년간의 자료를 이용하여 영구동토층일 확률을 계산하였는데 100%인 경우 지금까지 계속 영구동토층인 것을 말하며 숫자가 작아질수록 영구동토층이 아니었던 연도가 많아짐을 의미한다. 즉 숫자 작아진다는 것은 영구동토층의 파괴가 많이 진행된 정도를 알려주는 것이다. 지도에서 검정색 선은 연평균 기온이 0도인 등온선을 나타낸다. 대체로 영구동토층의 지도의 남쪽 경계가 등온선과 유사한 공간 분포를 보임을 알 수 있다.

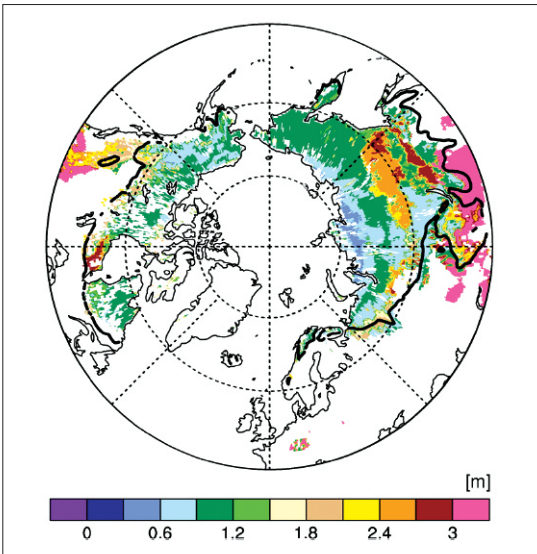
<그림 1>에서 볼 수 있듯이 남쪽 경계에서 영구동토층의 심각한 파괴가 진행되고 있음을 알 수 있다. 현재까지 100%의 영구동토층을 보이는 지역(한번도 영구동토층 파괴가 일어나지 않은 지역)은 전체 면적의 57%(12.7 million km²)을 차지하고 약한 정도의 파괴(50~99%)인 지역은 전체의 20%인 반면에 심한 정도(50%이하)인 지역은 무려 23%나 분포되어 있다. 툰드라 지역(95%) 보다는 아한대(73%) 산림지역에서



<그림 1> 마이크로웨이브에서 생성된 30년간의 영구동토층 지도를 이용한 영구동토층 확률 분포 (Park et al., 2016).

영구동토층의 파괴가 더 심하게 일어나고 있음이 밝혀졌다. 30년간의 위성자료로 분석해 보았을 때 일 년에 0.02 million km²정도의 영구동토층이 파괴되고 있음을 알 수 있었고 이것은 기상자료에서 계산된 지표면 기온이 일년에 0.04도 정도 감소하는 트렌드와도 일치했다. 이 결과는 최근의 극지 온난화에 따른 영구동토층의 파괴를 정량화한 최초의 연구 성과라 할 수 있다.

영구동토층의 활동층 깊이는 열감지 위성에서 관측된 지표면 기온의 연용해지수와 토양인자(edaphic factor)를 이용하여 계산 되었다. <그림 2>의 경우 활동층의 깊이에 관한 공간적 분포를 보여주고 있는데 대체로 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 깊어지고 있음을 알 수 있다. 30년간 계산된 활동층 깊이의 자료에서 분석해 볼 때 평균적 10년간 3cm씩 깊어지고 있고 이 결과로부터 영구동토층의 파괴가 전반적으로 진행되고 있음을 알 수 있다. 이와 유사한 연구 결과에서도 비슷한 현상을 볼 수 있는데 러시아 기상관측소에서 측정한 토양기온을 토대로 생성된 활동층 깊이의 트렌드도 10년 동안 평균 6cm정도로 깊어지고 있다고 밝히고 있다. 이 연구에서 보다시피 영구동토층의 파괴와 활동층이 깊어짐에 따라 토양 유기물의 이



〈그림 2〉 열센서에서 추출된 지면기온과 마이크로웨이브 영구동토층 지도를 이용하여 계산된 활동층 깊이 (Park et al., 2016).

동이 보다 원활해지고 미생물에 의한 부패가 증가되며 온실기체의 대기로의 배출은 점점 증가될 것으로 예측되고 있다. 또한 활동층 깊이의 증가는 지하수 저장량, 토양 배수, 메탄 배출, 토양 영양분과 식생의 성장에도 영향을 끼칠 것이다. 지속적인 연구 활동을 통해 이와 같은 인자들을 모니터링 해야 할 뿐만 아니라 영구동토층의 변화와 관련된 생지화학과 수문학 순환의 영향을 조사해야 할 것이다. 만약 활동층이 제거되고 이와 함께 영구동토층의 융해에 의해 잉여수분이 배출된다면 심각한 지반 침해가 일어날 것으로 예측되고 있어 지반 침해 수준에 대한 연구도 또한 진행되어야 할 것이다. 위성에서 관측한 위험지역(영구동토층과 활동층 파괴지역, 지반 침해 예상지역)을 중심으로 필드 사이트를 선정하고 그 지역을 집중적으로 관측한다면 시간과 비용을 절약할 뿐만 아니라 연구 결과에 대한 신뢰성이 높아지게 될 것이다.

V. 맺음말

이제 마이크로웨이브 위성에서 관측된 지표면의 동결융해 자료로부터 영구동토층의 면적과 활동층의 깊이를

계산할 수 있으며 이와 같은 자료로부터 30년 이상의 기간 동안 변화된 영구동토층의 상태를 모니터링 할 수 있게 되었다. 위성의 경우 특별한 이상이 발생하지 않는 한 현재까지도 끊임없이 자료를 생성하고 있으므로 지속적인 연구가 가능하다고 하겠다. 최근 들어 극지뿐만 아니라 고지대의 영구동토층에 대한 관심이 미국과 유럽을 중심으로 증가하고 있는데 미국 NASA에서 새롭게 추가된 연구 주제중 하나는 고지대의 변화로써 위성 관측과 모형을 이용한 연구를 장려하고 있다. 특히 티벳의 경우 중국으로부터 관측허가를 얻는 것이 상당히 어렵고 장기간의 필드관측자료가 없어 위성관측 자료를 이용한 연구가 급속히 증가하고 있다.

유럽에서 2010년에 발사된 SMOS 위성과 이와 유사한 위성인 SMAP이 미국 NASA에서 2015년 4월에 성공적으로 발사 되었다. SMOS와 SMAP 위성의 경우 저주파수(1.4GHz)를 이용하여 기존 마이크로웨이브 위성보다 더 정확하고 고해상도의 다양한 토양 정보를 모니터링 할 수 있게 되었다. 향상된 위성영상을 이용한 모니터링 기법과 정확도의 증가로 인해 영구동토층과 활동층의 상태를 좀 더 자세히 그리고 실시간으로 모니터링 할 수 있는 길이 열리게 된 것이다.

참고문헌

Kim, Y., Kimball, J.S., McDonald, K.C., & Glassy, J. (2011). Developing a global data record of daily landscape freeze/thaw status using satellite passive microwave remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(3), 949–960.

Kim, Y., Kimball, J.S., Zhang, K., & McDonald, K.C. (2012). Satellite detection of increasing northern hemisphere non-frozen seasons from 1979 to 2008: Implications for regional vegetation growth. *Remote Sensing of Environment*, 121, 472–487.

Park, H., Y. Kim, and J. S. Kimball. (2016). Widespread permafrost vulnerability and soil active layer increases over the high northern latitudes inferred from satellite remote sensing and process model assessments. *Remote Sensing of Environment*, 175, 346–358



칠레 남극연구 체계와 한-칠레 남극연구협력센터의 의의

김 유 하 (극지연구소 미래전략실)

I. 칠레 남극연구소 및 Punta Arenas (Punta Arenas) 개관

칠레는 남극에 대한 영유권을 주장하고 있는 7개 국가¹⁾ 중 하나이다. 지리적으로 아르헨티나와 함께 남극반도와 가장 가까운 나라인 칠레는 일찍이 남극연구를 시작했다. 칠레 남극연구소(INACH, Instituto Antártico Chileno)는 1963년 외교부 산하 기관으로 창립된 이래 남극 지역에 대한 연구를 전문으로 하는 유일한 기관으로 자리매김 해 왔다.

기관의 주요 임무는

- ① 남극과학연구, 기술 개발, 혁신을 장려,
- ② 남극조약체제 및 국제포럼에 국가 대표로 참여,
- ③ 정부에 남극 문제에 대한 조언

등으로 정리할 수 있다. 남극과학연구 뿐 아니라 국가 남극정책 수립 및 시행에 대한 주도적 역할까지 통합적인 임무를 수행 중이다.

남극연구소가 위치한 Punta Arenas의 지정학적 위치 역시 중요하다. Punta Arenas는 아르헨티나 우수아리아(Ushuaia)와 더불어 남극으로 진출하는 관문 역할을 수행하는 도시로서 남극연구 활동에 필요한 인력·물

자 수송, 남극 관광 활성화에 따른 크루즈 선박 기항지, 그리고 남극연구소를 중심으로 한 남극 연구활동이 수행되는 등 다양한 기능이 모여있는 도시이다. Punta Arenas의 인구는 약 12만명(2015)²⁾으로 수산업, 관광산업이 경제활동의 중심이다. 우리나라는 1988년 남극반도 킹 조지 섬에 세종기지를 건설하면서 Punta Arenas 항을 이용하기 시작했고, 이를 계기로 현재까지 세종기지에 대한 인력 입출 및 보급지원, 선박 입차 시 Punta Arenas 현지 업체를 이용하고 있다.

2003년 칠레 수도 산티아고(Santiago)에 위치하고 있던 남극연구소가 Punta Arenas로 옮겨오면서 우리나라와의 연구협력이 더욱 증진되었다. 칠레 남극연구 프로그램은 연간 약 270억원 규모(22~24백만달러/USD)로 운영되고 있다.³⁾

II. 칠레 남극연구 체계 및 주요 프로그램⁴⁾

칠레의 남극연구는 남극연구소가 연결 고리 역할(focal point)을 수행하며 다양한 대학, 연구기관이 함께 참여하는 형태로 운영된다. 이는 극지연구소를 중심으로 남극연구가 진행되는 우리나라의 체제보다는 일본의 남극연구 체계와 유사한 점이 많다. 칠레 남극연구 분야는 아래 표와 같이 남극과학위원회(SCAR)의

1) 남극 영유권 주장 7개국 : 영국, 뉴질랜드, 프랑스, 노르웨이, 호주, 칠레, 아르헨티나

2) UNdata, <http://data.un.org/Data.aspx?d=POP&f=tableCode%3A240>

3) COMNAP, <https://www.comnap.aq/Members/INACH/SitePages/Home.aspx>

4) KORPI-INACH Workshop 발표자료, INACH, 2016

프로그램과 긴밀한 관계를 가지고 진행되고 있다.

칠레 남극연구 프로그램은 <표1>과 같이 크게 5가지 중점 추진전략을 가지고 있다.

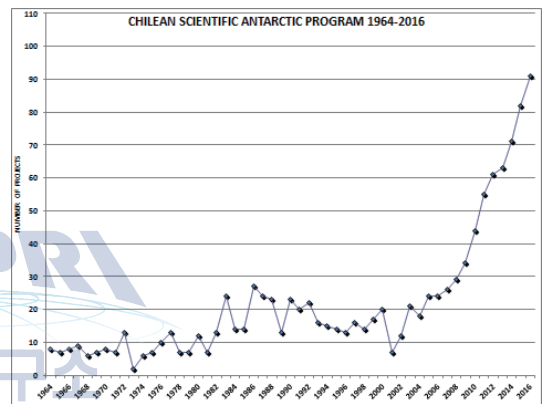
<표 1> 칠레 남극연구 체계 및 주요 프로그램

주요 SCAR 연구 프로그램	연계 칠레 남극연구 프로그램 수
1. 남극 생태계 현상 연구 (State of the Antarctic Ecosystem, AntEco)	16개
2. 남극 생태계 탄력성과 적응 (Antarctic Thresholds: Ecosystem Resilience and Adaptation, AnT-ERA)	17개
3. 남극 기후변화 (Antarctic Climate Change, AntClim21, PAIS, SERCE)	9개
4. 지구 및 대기 과학 (Earth and Atmospheric Sciences, AAA)	10개
5. 남극 미생물학 및 분자생물학 (Antarctic Microbiology and Molecular Biology)	27개
6. 남극 환경보존 (The Antarctic Environment)	12개

첫 번째 전략은 양질의 연구기획을 통한 수준 높은 연구 프로그램 운영이다. 제시된 연구 주제들을 국제적인 리뷰(international peer review)를 거치게 하여 수준 높은 연구 주제를 선별한다는 것이다. 두 번째는 칠레 국내 다양한 연구주체들의 남극연구 참여이다. 남극연구소를 포함하여 산티아고 대학(USACH), 칠레 대학교(UCHILE), 마갈라네스 대학(UMAG) 등 총 21개 대학 및 연구기관이 칠레 남극연구프로그램에 참여하고 있다. 세 번째 전략은 남극 연구기지의 확대이다. 현재 세종기지 인근의 프랫 기지(Base Prat)를 비롯하여 남극반도에 8개의 연구기지와 7개의 연구캠프를 운영 중인 칠레는 향후 남쪽으로 연구 거점 및 기지를 확장할 계획을 가지고 있다. 이와 같은 연구기지의 확충은 세종기지를 중심으로 남극반도에서 기후변화 연

구에 집중하고 있는 우리나라 연구진에게도 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

네 번째로 칠레는 소규모 남극 연구 선박을 신규 건조할 예정이다. 해양연구의 비중이 큰 남극 반도 연구에 집중하고 있는 칠레 입장에서 기지 못지않게 중요한 것이 바로 연구 선박이다. 마지막으로 기지, 항공, 선박 등 인프라 확충을 이용한 남극 반도에서 대륙으로 진출 기반을 구축하는 것이다. 칠레 남극 연구 프로그램은 전술한 전략 목표 달성을 위해 아래 그래프와 같이 지속적으로 규모를 확대해 왔으며 최근에는 더욱 빠른 성장세를 보이고 있다.



<그림 1> 칠레 남극연구프로그램 운영 현황(과제 수)

III. 한-칠레 남극연구협력센터 개소 및 그 의의

우리나라는 2014년 남극장보고과학기지를 개소하면서 남극 연구의 선진분야라고 할 수 있는 고층대기, 천문, 빙하, 운석 등 대륙기반 연구를 본격적으로 시작했다. 그러나 세종기지를 기반으로 하는 남극 반도 중심 연구의 중요성이 작아진 것은 아니다. 전 세계적인 기후변화에 따른 생태계 변동·적응과 같은 주제를 연구하는데 최적의 입지가 바로 남극반도 연구이기 때문이다.

이러한 남극연구에서의 중요성과 세종기지를 기반으로 한 양국 간의 협력 수요 증가에 따라 극지연구소와 칠레 남극연구소는 2016년 2월 26일 칠레 푼타 아레



협력약정서 서명



한-칠레 남극협력센터 제막식



기념촬영



연구시설 시찰



나스 현지에 한-칠레 남극연구협력센터(이하 협력센터)를 개소하였다. 이는 2015년 4월 우리나라 대통령의 칠레 국민 방문 시 남극연구 분야의 협력을 강화하기로 한 양국간 정상회담 결과에 따른 후속조치의 성격도 띠고 있다. 협력센터는 크게 두 가지 목적을 가지고 있다. 첫째, 우리나라와 칠레 간 공동연구 주제를 발굴하고 연구부문 협력을 강화하는 것이다. 둘째로는 세종기지에 대한 안정적인 연구활동 지원 체계를 확립하고 칠레와의 인프라 부문 협력을 강화하는 것이다.

먼저 연구협력 측면에서 협력센터는 양국의 남극 연구 프로그램을 분석하여 공동 연구가 가능한 분야를 탐색하는 역할을 수행할 것이다. 공동 연구가 가능할 것으로 예상되는 주제에는 남극 반도 기후·생태계 변화 연구, 남극 유래 생물자원 연구, 고층대기 연구 등이 있다. 대표적으로 기후·생태계 변화에 관한 연구로 우리나라에서는 극지연구소 홍순규 박사 팀을 중심으로 '기후변화에 의한 킴조지섬 생태계 변화 예측기

반 구축'이라는 중·장기 연구를 진행 중이다. 칠레에서는 콘셉시온 대학(University of Concepcion)의 카비에레스 박사(Lohengrin A. Cavieres)가 남극 반도 육상 생태계(Terrestrial Habitats) 연구를 진행 중이다. 두 연구 모두 남극 반도를 중심으로 급격한 기후변화에 따른 생태계 변화 양상 및 대응에 대한 종합적인 연구로 협력센터를 중심으로 한 공동연구 추진을 통해 연구 지역 확장, 데이터 공유 등을 통해 시너지 창출이 기대된다.

협력센터는 세종기지에 대한 안정적인 연구활동 지원에도 큰 역할을 담당할 것으로 보인다. 남극반도는 기후가 매우 불안정하고 해양 상황도 급변하는 곳이기 때문에 돌발상황이 자주 발생하는 곳이다. 협력센터 운영은 현지 업체와의 협업 체계를 강화, 항공기·선박 임차 업무, 기지 응급환자 발생 시 신속한 대응 등 세종기지 운영에 있어 다양한 이점을 가져다 줄 것으로 예상된다.

IV. 맺음말

칠레는 지구상에서 우리나라와 정 반대에 위치한 나라로, 우리나라에서 푼타 아레나스까지 가는데는 24시간이 넘는 비행 시간이 필요하다. 하지만 남극연구에 있어서 칠레는 그 어느 나라보다도 우리나라와 가까운 동반자이다. 기후변화에 대한 전 세계적인 경각심이 날로 높아지는 가운데 칠레가 다양한 연구 인프라를 보유하고 있는 남극반도 지역은, 기후변화에 의한 변화가 지구상에서 가장 빠르게 일어나는 곳이다. 한-칠레 남극연구 협력센터 개소를 계기로 이 지역에 대한 공동연구 및 인프라 기반 협력을 강화한다면 향후 기후변화 대응에 핵심적인 지식을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 극지연구소는 협력센터 개소를 시작으로 시범운영 기간(2016년)을 거쳐 전담인력 파견을 통한 본격적인 운영 활성화를 추진할 예정이다.





남극의 구름 형성을 촉진하는 비-생물학적 요오드 생성 메카니즘 연구

김기태 (극지연구소 극지기후변화연구부)

I. 머리말

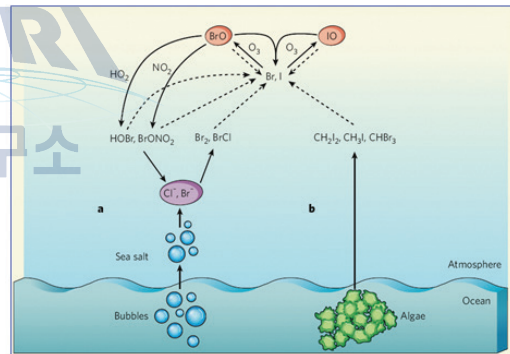
요오드는 일반적으로 바닷물에 요오드화물(iodide, I^-) 혹은 요오드산염(iodate, IO_3^-)의 형태로 포함되어 있기 때문에 대부분의 해산물에 포함되어 있고 우리가 매일 사용하는 천일염에도 많이 포함되어 있다. 특히, 다시마, 미역, 김과 같은 해조류나 멸치, 굴과 같은 어패류에도 많이 함유되어 있다. 추가적으로, 우리 인간을 포함한 많은 생물에게도 꼭 필요한 물질이다. 다양한 음식에서 섭취된 요오드는 위와 소장상부에서 흡수되어 갑상선으로 이동하여 갑상선 호르몬 합성, 에너지 생성, 신경발달에 중요한 역할을 하게 된다. 우리나라가 갑상선암 발생률이 20년 사이에 30배가 증가해 세계 1위이며 이 갑상선 암을 치료하기 위해서 갑상선에 선택적으로 흡수되는 방사성 요오드를 사용하고 있다.

과학적인 입장에서 보면 요오드는 전지구의 대기산화력에 크게 영향을 미치고 있으며 특히 극지방에서는 대기 중의 오존(Ozone, O_3)의 농도나 독성이 강한 수은(Mercury, Hg)의 농도를 조절하는 주요 원인으로 생각되어지고 있으며 최근에는 지구온난화와 관련된 구름생성과 밀접한 관련이 있는 미세입자 형성과 관련이 있음(태양 빛을 반사 또는 차단할 수 있음)이 알려져 많은 관심을 받고 있다(그림 1). 남극의 봄철에 얼

이 글은 극지연구소 연구과제 "서남극 빙봉 변화 관측 시스템 구축 및 제4기 해빙사(deglaciation) 복원 기술 개발(PP16010)"의 지원으로 작성되었음.

음이 녹는 지역 주위에서 매우 높은 농도의 활성 요오드 물질들이 대량 생성되는 것이 인공위성 및 현장관측을 통해 발견되었다. 하지만, 정확한 생성 원인 및 메카니즘은 밝혀지지 않았다(그림 2). 현재까

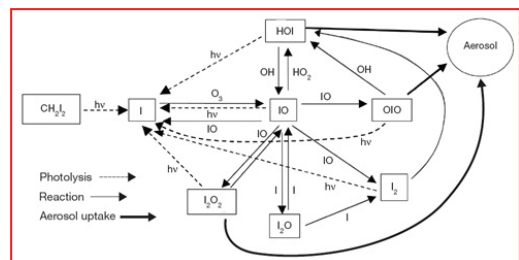
✓ 대기중 오존농도 감소



Nature, 453, 26, June 2008

Science, 291, 19, January 2001

✓ 구름을 생성하는 미세입자형성

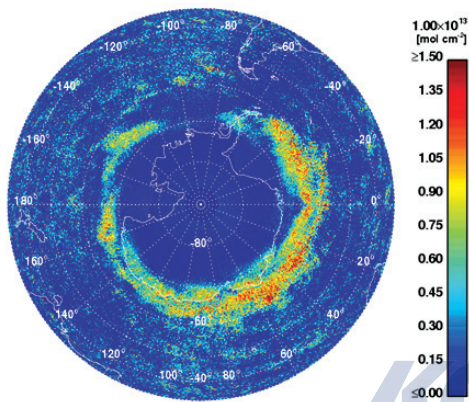


Nature, 417, 6, June 2002

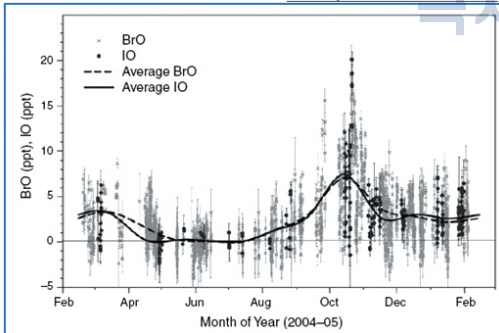
Chem. Rev., 2003, Vol. 103

〈그림 1〉 대기 중 오존의 농도 감소와 구름을 생성하는 미세입자 형성에 영향을 미치는 요오드 물질

지는 생물학적인(biogenic) 생성, 즉 다시마과의 해조류에 의해 주로 생성된다고 알려져 있지만 남극 봄철에 대기 중에서 관측되는 매우 높은 농도의 활성 요오드 물질의 농도를 설명하기에는 매우 부족하다고 생각되고 있다. 이에 관련연구자들은 비-생물학적인(non-biogenic) 혹은 화학적인(chemical) 메커니즘이 관여하고 있을 것이라 추측하고 있다.



Boundary Layer Halogens in Coastal Antarctica
Science, 20 JULY 2007 VOL 317

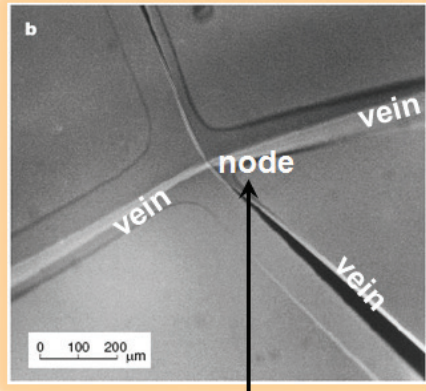


〈그림 2〉 남극 봄철에 요오드 물질 대량생성을 나타내는 위성자료 및 현장관측 자료

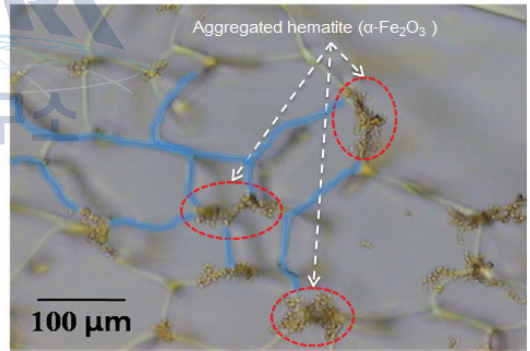
일반적으로, 아레니우스 방정식(Arrhenius equation)에 의하면 화학반응들은 온도가 내려갈수록 반응속도가 느려지게 되지만 몇몇 화학반응들은 낮은 온도 및 얼음 상태에서 반응속도가 폭발적으로 증가하는 것이 발견되었다. 지금까지의 연구결과에 따르면 얼음에서 반응속도가 크게 증가하는 원인이 얼음 내에 존재하는 얼지 않는 준-액체층(Quasi-Liquid Layer, Liquid-

Like-Layer)에 반응물 및 용존기체의 농도, pH, 이온세기(ionic strength)등이 크게 증가되기 때문이라고 알려져 있다(그림 3, 동결농축효과*).

얼음을 현미경으로 보면...



준-액체층 : Quasi-liquid layer, Liquid-like layer; Grain boundary, micropocket, unfrozen solution.



준-액체층에 농축된 산화 철 입자의 광학현미경 사진

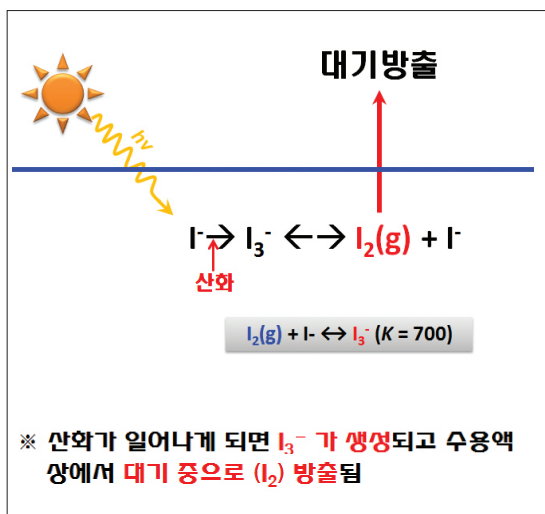
〈그림 3〉 용액이 얼 때 형성되는 준-액체층 및 동결농축효과에 의해 준-액체층에 농축된 무기물 입자의 광학현미경 사진

*동결농축효과 (Freeze concentration effect) : 얼음은 흔히 전체가 고체인 듯 보이지만, 실제 그 표면과 얼음 결정 사이의 경계면에는 액체와 유사한 성격을 띠는 영역이 존재한다. 동결농축 효과란 얼음이 얼 때 물에 녹아있던 여러 가지 물질들이 이 경계면에 모여 농도가 크게 증가하는 현상을 말한다. 그 농축효과는 보통 수천 배에서 수십만 배에 이르러, 낮은 농도에서는 일어나지 않는 화학반응들이 현저히 증가하는 현상이 관측되기도 한다.

II. 얼음에서 향상된 요오드 생성반응 메카니즘 규명

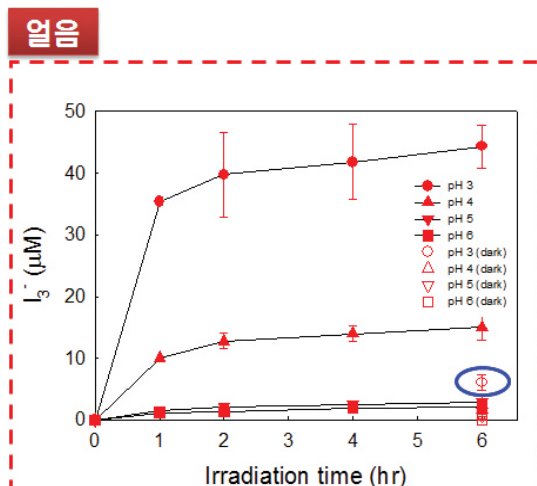
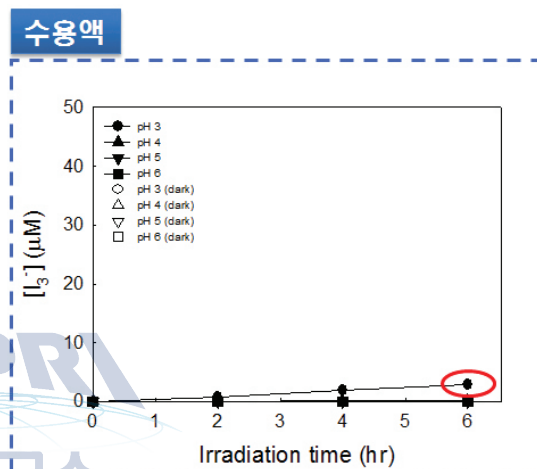
본 연구에서는 요오드 이온(iodide, I⁻)이 포함된 용액이 얼게 될 때 어떠한 화학반응이 일어나며 얼마나 많은 양의 활성 요오드 물질을 대기 중으로 발생시키는지에 대해 실험실 및 극지방 현장연구를 통해 규명하였다. 다시 말하면 요오드 이온의 산화반응으로 대기 중 활성 요오드 물질의 생성 과정에 있어서 얼음과 햇빛의 역할을 규명하는 것이 본 연구의 주요 목표이다.

요오드 이온(iodide, I⁻)이 산화과정을 거치게 되면 삼중요오드화물(tri-iodide, I₃⁻)이라는 물질이 생성되는데 이렇게 생성된 삼중요오드화물(tri-iodide, I₃⁻)은 다시 요오드 분자(I₂) 및 요오드 이온(iodide, I⁻)으로 분해되고 수용액 중에 있던 요오드 기체 분자(I₂)는 대기 중으로 방출되게 된다(그림 4). 따라서, 요오드 이온(iodide, I⁻)의 산화반응으로 삼중요오드화물(tri-iodide, I₃⁻)과 대기 중 요오드 분자(I₂)가 생성되는 반응을 관찰하는 것이 대기 중 활성요오드의 생성원인 및 메카니즘을 밝히는데 있어서 핵심적인 부분이라고 할 수 있다.



<그림 4> 수용액에 존재하던 요오드 물질이 산화에 의해 대기 중으로 요오드 분자(I₂)를 방출하는 경로 모식도

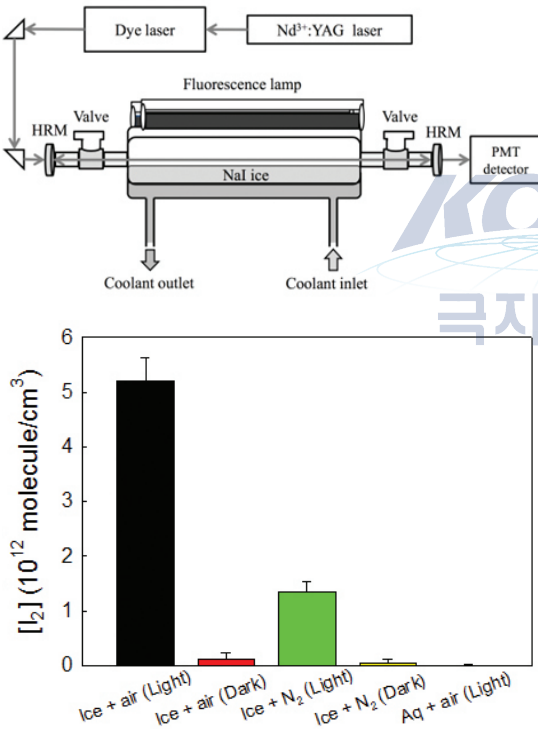
실험 결과에 따르면 요오드 이온(iodide, I⁻)의 광산화반응(Photo-oxidation reaction)이 수용액상에서 거의 일어나지 않았지만 이 수용액이 얼게 되면 매우 빠른 속도로 요오드 이온의 광산화가 이루어져 tri-iodide(I₃⁻)가 생성되었다. 수소이온의 농도가 높을 때(pH가 낮고 산성인 조건)에서 요오드의 산화반응이 빠르게 일어났으며 빛이 있을 때 요오드의 산화반응이 매우 빠르게 향상되는 것을 확인하였다(그림 5).



<그림 5> 액상과 얼음 상에서 요오드의 산화반응을 비교한 결과

얼음 상에서 생성된 삼중요오드화물(tri-iodide, I_3^-)이 실제로 대기 중으로 요오드 분자(I_2)의 형태로 방출되는지 직접적으로 확인하기 위해 일본 교토대에서 보유하고 있는 공동 광자 감쇠 분광계(Cavity ring-down spectroscopy, CRDS)를 이용해 분석하였다. 그 결과 얼음 시료에서만 많은 양의 요오드 분자의 생성이 관찰되었고 산소와 빛이 있을 때 요오드 분자의 생성 반응이 향상되었다(그림 6). 본 결과를 통해 요오드 이온(I^-)의 산화로 인해 생성된 삼중요오드화물(tri-iodide, I_3^-)이 실제로 요오드 기체 분자(I_2)로 분리되어 대기 중으로 방출됨을 확인하였다.

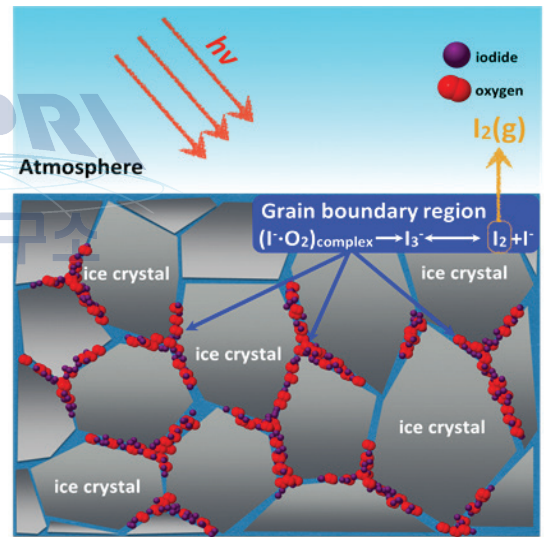
공동 광자 감쇠 분광계(CRDS)



〈그림 6〉 공동광자감쇠분광계(CRDS) 장비 모식도 및 생성된 요오드 분자(I_2) 측정 결과

얼음에서 향상된 요오드 이온의 산화반응은 동결농축 효과로 설명될 수 있다. 〈그림 7〉에서 보여지는 것처럼 동결이 진행됨에 따라 얼음결정 주위에 존재하는 준-액체층에 요오드 이온, 수소이온, 용존 산소 등이 높은 농도로 농축되게 된다. 그 결과, 액상에서 생성되

지 않던 요오드이온과 산소의 결합물(iodide-oxygen complex)이 생성 되는데 이 요오드-산소 결합물은 액상에서는 광-활성(photo-activity)이 없었던 요오드 이온이 빛에 의해 활성화 될 수 있도록 해주어 요오드 이온의 산화반응이 일어나는데 결정적인 역할을 하게 된다. 이처럼 요오드-산소 결합물의 광활성에 의해 생성된 삼중요오드화물(tri-iodide, I_3^-)은 요오드 분자(I_2 , 기체)와 요오드 이온(I^-)으로 분리 되는데 여기서 분리된 요오드 분자(I_2)는 기체의 형태로 대기 중으로 방출될 수 있게 된다. 결과적으로 동결농축효과로 형성된 요오드-산소 결합물이 산화되어 활성 요오드 분자를 대기 중으로 방출하게 되는 것이다. 실험의 결과로 볼 때 이 현상은 얼음에서만 일어나며 산소와 빛이 있을 때 더욱 향상되게 된다.

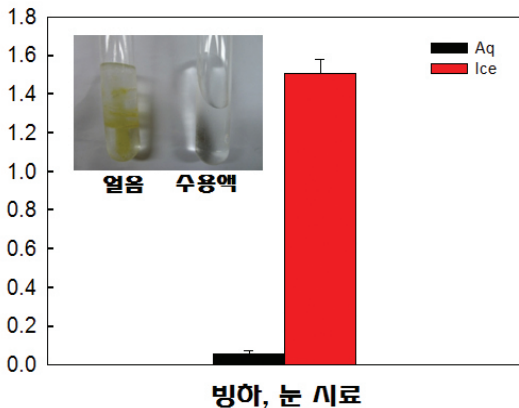
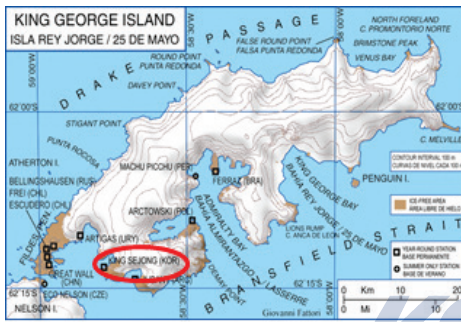


〈그림 7〉 동결농축효과에 의해 준-액체층에 요오드 이온 및 산소가 크게 농축됨을 나타내는 모식도

III. 요오드 생성관련 세종과학기지 남극 현장실험

실험실에서 관찰된 얼음에서의 요오드 물질 대량생성 메커니즘을 검증하기 위해 남극 세종과학기지에서도 현장실험을 수행하였다. 세종기지 앞 마리안 소만에서

떨어져 나온 빙하(glacier)와 기지 주변 자연설(natural snow)을 채집하여 녹인 다음 일정 농도의 요오드 이온을 넣어 남극자연광에서 요오드 이온의 광화학실험을 수행하였다. <그림 8>에서 보여지는 것처럼 얼음 시료에서 삼중요오드화물(tri-iodide, I_3^-)이 대량으로 생성된 것을 육안(노란색)으로도 확인할 수 있었다. 다양한 실험 조건에서 현장실험을 수행한 결과 대부분이 실험실과 동일하게 얼음 상에서만 활성 요오드물질이 대량으로 검출 되었다.



<그림 8> 남극세종과학기지에서 요오드 생성관련 현장 실험 수행결과

IV. 맺음말

얼음에서 일어나는 화학반응은 액상에서와는 매우 다른 경로와 속도로 진행되며 다양한 형태로 지구환경에 영향을 미칠 수 있다. 극지방에 존재하는 요오드 물질의 화학반응을 이해하는 것은 극지방 오존의 생성과 소멸 및 지구온난화와 관련된 구름형성과정을 올바르게 이해하는데 매우 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 기존에 알려지지 않았던 비-생물학적(non-biogenic)/화학적(chemical) 대기 중 활성 요오드 물질의 생성 반응에 있어서 얼음의 역할을 새롭게 규명하였다. 다양한 실험 조건(pH, 광량, 요오드 이온의 농도, 용존 가스)에서 요오드의 산화 생성반응을 연구하여 극지방 비생물학적 활성요오드 생성 메커니즘을 규명하였으며 남극 세종기지에서의 현장연구를 통해 실험실 연구결과를 다시 한번 검증하였다. 또한, 모델링 결과를 통해 제안된 얼음에서의 활성 요오드 물질의 생성반응이 극지방환경에서 매우 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

결론적으로, 남극에서 요오드 이온이 포함된 물이 액체 상태로 있을 때는 대기 중으로 활성 요오드 물질을 전혀 방출하지 않지만 얼게 될 때(예: 빙하, 눈, 해빙, 얼음 에어로졸) 얼음에서 일어나는 독특한 화학반응 및 동결농축효과로 인해 많은 양의 활성 요오드 물질을 생성하게 되고 이는 얼음에 갇혀 있다가 봄철 얼음이 녹는 시기에 대기 중으로 대량으로 방출 되는 것으로 생각된다.

향후, 얼음에서 대량으로 생성 및 방출된 요오드 분자가 실제로 대기 중 미세 에어로졸 입자, 구름응결핵, 구름으로 성장하는지에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 극지방 얼음에서 일어나는 할로겐 물질의 빙지화학(ice geochemistry) 반응이 지구온난화에 어떠한 영향을 미치는지 정확하게 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

Kitae Kim, Akihiro Yabushita, Masanori Okumura, Alfonso Saiz-Lopez, Carlos A. Cuevas, Christopher S. Blaszcak-Boxe, Dae Wi Min, Ho-Il Yoon, Wonyong Choi. Production of Molecular Iodine and Tri-iodide in the Frozen Solution of Iodide: Implication for Polar Atmosphere. *Environ. Sci. Technol.* 2016, 50, 1280-1287

Roland von Glasow. Sun, Sea and ozone destruction. *Science* 2008, Vol 453

Lucy J. Carpenter. Iodine in the Marine Boundary Layer. *Chem. Rev.* 2003, 103, 4953-4962

Alfonso Saiz-Lopez, Anoop S. Mahajan, Rhian A. Salmon, Stephane J.-B. Bauguitte, Anna E. Jones, Howard K. Roscoe, John M. C. Plane. Boundary layer halogens in Coastal Antarctica. *Science* 2007, Vol 317

Norimichi Takenaka, Akihiro Ueda, Yasuaki Maeda. Acceleration of the rate of nitrite oxidation by freezing in aqueous solution. *Nature* 1992 Vol 358 27 August

Kitae Kim, Wonyong Choi, Michael R. Hoffmann, Ho-Il Yoon and Byong-Kwon Park. Photoreductive dissolution of iron oxide in ice and its environmental implications. *Environ. Sci. Technol.* 2010, 44, 4142-4148/Editor's Choice, *Science* Vol 328, May 28, 2010





우리나라 극지연구소의 알려지지 않은 이야기

박 병 권 (한국극지연구소위원회 고문)

우리나라는 1978년 12월 7일 남극 크릴을 어획하기 위해 남극해를 조사하기로 하고 ‘남북수산주식회사’의 선박에 국립수산진흥원 허중수 연구관을 책임자로 승선시켜 남극해 엔더비랜드 (Enderby Land)와 윌크스 랜드 (Wilkes Land) 앞 바다에서 507톤의 크릴을 어획한 것이 우리나라와 남극에 관한 최초의 정부 주도 사업이었다. 그 후 해양소년단이 1985년 남극의 최고봉인 빈슨 매시프 (Vinson Massif) 등정하고 귀로에 킹 조지 (King George) 섬을 탐사 하였다. 그리고 1987년 1월 초에 외무부가 신년 업무보고에서 남극 연구의 필요성을 대통령에게 보고하자, 전두환 전 대통령이 남극에 연구기지를 건설 할 것을 지시 하였다.

필자는 육군사관학교 교수로 재직¹⁾ 중이던 1979년 호주 수도 캔베라에서 개최된 국제퇴적학회 참석하였는데, 호주 멜본 (Melbourne) 대학 교수였던 지질학자로베링 (J. F. Lovering) 교수로부터 기증받은 그의 책 ‘Last of Lands... ANTARCTICA’을 숙독한 후 우리나라도 남극 진출이 필요함을 깨닫게 되었다. 이에 필자는 당시 해양개발연구소 기획과장이었던 홍승용 과장²⁾과 협의하여 과학기술처에 남극연구에 관한 연구과제 제안서를 제출 하였다. 그러나 당시 우리나라는 남극 연구 및 진출의 중요성과 필요성에 대한 공감감이 부족하였기에, 과학기술처로부터 연구과제의 승인을 받지 못하였다.

또한 1970년대 육군사관학교 법학과 교수로 재직 중에 있었던 신각수 교수³⁾는 군 입대 전 외교부 법규과

에 근무하면서 뉴질랜드와 수산관련 협정에 관한 업무를 수행한 바 있어, 1982년 3월 현대해양 143호에 우리나라의 남극진출 방안에 관해 기고하였다. 그 원고의 제목은 ‘남극진출을 위한 제언’이었다.

그 후 1987년 당시 전두환 대통령께서 남극을 탐사하고 귀국한 윤석순 한국해양청소년단 단장의 건의를 받아들여 우리나라가 남극에 과학기지 건설을 위해 과거 처에 예비비 50억을 남극기지 건설에 사용할 것을 승인하였다.

이로부터 정부는 해양연구소에 타당성 조사와 남극과학기지 건설을 요청하고, 1987년 후반기에 시작한 일련의 작업들이 시작되었다. 1988년 1월에 세종과학기지가 준공되고 제1차 대한민국 남극월동대가 장순근 박사를 대장으로 한 연구 업무를 시작하게 되었다. 당시 해양연구소는 필자를 연구실장으로 하여 1987년 9월에 남극연구실을 개설하였다. 이렇게 우리나라 극지연구가 시작되었다.



- 1) 이후 한국해양연구원 원장, 한국공공기술연구회 이사장 역임
- 2) 이후 해양수산부 차관, 인하대학교 총장 역임
- 3) 이후 외교통상부 차관, 주일 대사 역임



KORICA
극지연구소

Polar Brief 편집위원회

편집위원장 윤호일 (극지연구소, 부소장)

편집위원 김성중 (극지연구소, 극지기후변화연구부장)

신형철 (극지연구소, 국제협력실장)

이유경 (극지연구소, 북극환경·자원연구센터장)

진동민 (극지연구소, 미래전략실장)

편집간사 서원상 (극지연구소 책임연구원)

KOPRI

「Polar Brief」에 게재된 원고는 극지연구소가 아닌 필자의 견해입니다.

본 간행물의 무단복제행위를 금합니다.





No. 11 (제11호)

Polar Brief

