

자연재앙 예방에 도전

1만년 전 빙상은 '냉동타임캡슐'



글_홍성민 한국해양연구원 극지연구소 책임연구원 smhong@kordi.re.kr

제7의 백색대륙이라고 일컫는 남극대륙의 면적은 1천 360만 km^2 이고 이는 한반도의 60여 배에 달하는 크기이다. 거대한 남극대륙은 약 98%가 만년빙으로 덮여있다. 연평균 기온은 연안 지역에서는 영하 10도 이하지만 내륙 중앙부에서는 영하 55도에 이르고 있다. 지금까지 관측한 최저 기온은 1983년 7월 21일 러시아의 보스토크 기지에서 관측한 영하 89.6도이다. 대륙을 덮고 있는 두꺼운 얼음 덩어리를 빙상(ice sheet)이라고 하는데 남극 빙상은 크게 세 부분으로 나눌 수 있다.

즉, 남극횡단 산맥(Trans-antarctic Mountains)을 기준으로 동남극 빙상과 서남극 빙상으로 구분할 수 있으며, 상대적으로 작은 빙상과 계곡 빙하들이 분포하는 특징을 갖고 있는 남극반도 지역이다. 동남극에서는 빙상의 2/3가 해수면 위에 위치하고 있는 육지를 덮고 있고 서남극에서는 빙상의 대부분이 해수면 아래에 위치하고 있다. 빙상의 평균두께는 약 2천160m이며 가장 두꺼운 빙상은 동남극에서 4천800m에 달한다. 남극 얼음의 총량은 3천만 km^3 이며 이는 지구상에 존재하는 총담수량의 약 70%에 해당한다.

남극 빙상은 강물이 흐르는 것처럼 빙상의 아래에 있는 육지의 표면경사가 큰 쪽으로 흐르는데 해안에 이르러서는 바다 위를 뚫어나가면서 점점 얇아져서 바다에 떠 있는 빙붕(ice shelf)을 형성하게 된다. 로스(Ross)해에 떠있는 로스 빙붕과 웨델(Weddell)해에 있는 론(Ronne) 빙붕은 각각 약 50만 km^2 의 해수면을 덮고 있다. 남극에서 빙붕이 차지하는 얼음의 양은 전체의 약 2% 정도이다. 서남극의 빙상이 전부 녹는

다면 전세계의 해수면은 약 5m 상승하고, 동남극의 빙상은 약 60m의 해수면을 상승시킨다.

남극 빙하 총량은 지구 물의 70%

최근에 가속되는 지구온난화로 인해 남·북극지역에 분포하고 있는 만년빙이 계속 줄어들고 있다는 기사를 가끔 접할 수 있다. 남극의 경우 거대한 빙산이 빙붕에서 떨어져 나오고 있는데, 지난 2000년 3월에는 로스 빙붕에서 자메이카 크기(1만1천 km^2) 만한 빙산이 떨어져 나오기도 했다.

남극대륙에서 남미대륙 남단으로 뻗어 있는 남극반도의 동부 연안에 있는 라센(Larsen)-A 빙붕은 1995년에 완전히 붕괴되었고 라센-B 빙붕은 지난 5년간 5천700 km^2 에 달하는 면적이 빙산 조각으로 소실되어 절반 이상이 소멸된 상태다. 떨어져 나온 빙산은 남극 주변을 떠다니면서 서서히 녹아 사라지게 된다.

지구상 담수의 거대한 저장고 역할을 하고 있는 빙하의 감소는 해수면의 상승을 초래하기 때문에 해발고도가 낮은 섬이나 연안지역의 저지대는 심각한 침수 위험에 직면하고 있다. 실례로 남태평양의 작은 섬나라인 투발루는 평균 해발고도가 1.5m에 불과한데 해수면 상승으로 인해 1만1천명의 국민이 국제적인 '환경 난민'의 위기에 처해 있다. 한편, 높은 산악지형에 발달되어 있는 빙하도 뚜렷이 그 양이 감소하고 있는데 히말라야 빙하는 40년내에 완전히 소멸될 것이라는 예측도 나오고 있다. 산악빙하의 경우는 주변 지역에서 수자원의 역할을 하기 때문에 빙하의 갑작스런 감소는 인근에 거

주하는 사람들의 생활환경을 크게 악화시키게 될 것이다.

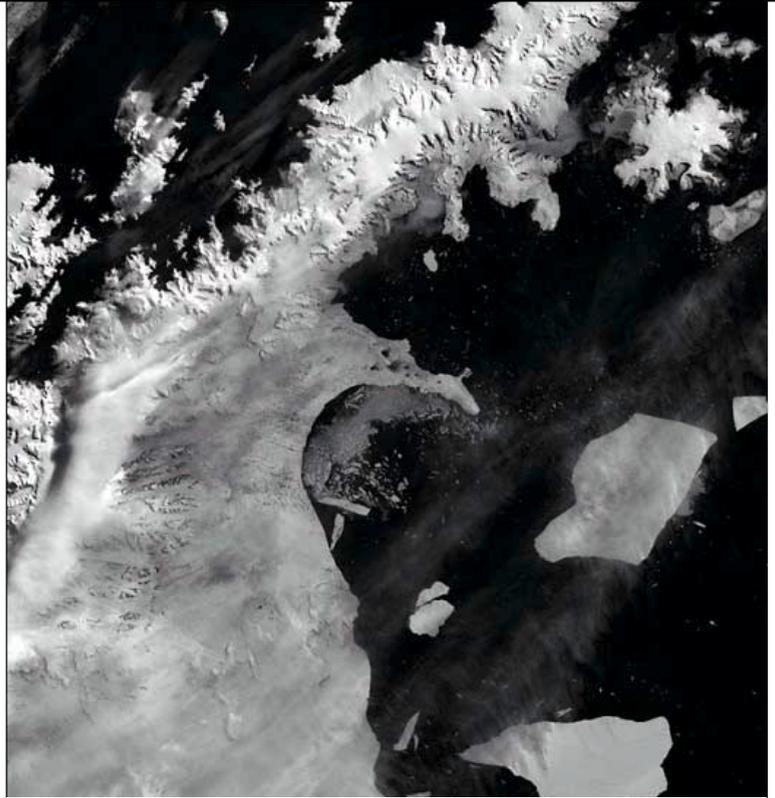
이처럼 지구온난화에 따른 빙하의 감소가 전 인류에게 미치는 영향은 주로 네거티브하게 작용한다. 알고 보면 우리의 생활과 밀접한 관련이 있는 빙하는 다른 한편으로 지구환경 연구를 위해 이용될 수 있는 좋은 연구대상이 되고 있다. 즉, 과거의 지구환경 변화에 대한 기록을 추적하고 있는 기록보관소의 역할도 하고 있다.

기후변화와 같은 지구환경변화의 연구는 궁극적으로 미래의 추세를 정확히 예측하여 만일에 발생할 수 있는 환경재앙을 미리 방지하거나 아니면 그에 대한 대책을 마련하는데 있다. 하지만 우리가 가지고 있는 지구환경 변화의 자료에서 기기를 이용한 관측 기록은 불과 수십년밖에 되지 않기 때문에 향후 환경변화를 예측하기 위해서는 오랫동안 진행되어 온 과거의 현상을 복원하여 그 현상의 결과와 효과, 조절 요인 등에 대한 방대한 과학적 지식과 자료를 추적해야 한다. 만년빙은 바로 우리가 필요로 하는 직접적인 정보를 제공할 수 있기 때문에 귀중한 연구대상이 되고 있다.

남극은 지구환경변화의 기록보관소

남극의 빙상은 매년 내리는 눈이 겹겹이 쌓여서 형성된다. 표층에 쌓인 눈은 점차 매몰되고 깊이가 점점 깊어지면서 일정한 깊이에 이르면 위에서 받는 압력으로 단단하게 고화되고 대략 60~70m 정도의 깊이에서 결국에는 얼음층으로 변형된다. 얼음으로 변형되기 전까지는 눈 입자들 사이로 공기의 이동이 가능하지만 얼음층으로 변형되면서 공기의 흐름은 차단되고 고립된 기포들이 형성된다.

이러한 기포 속에는 얼음층이 형성될 당시 공기에 있던 가스 성분들을 그대로 포획하고 있다. 이처럼



남극 빙상은 나무의 나이테처럼 깊이에 따라 나이를 가지고 있고 얼음에 함유되어 있는 각종 화학적 성분과 기포의 가스 성분은 얼음이 만들어진 당시의 대기 성분을 그대로 반영하고 있기 때문에 ‘냉동타임캡슐’이라고 일컫고 있다. 남극의 내륙 깊숙한 고원지역은 연간 강설량이 수 cm밖에 되지 않아서 사하라 사막보다도 건조한 지역을 이루고 있어 백색의 사막 지역이라고도 한다. 이처럼 강설량이 적은 지역에서 수천m 깊이의 얼음을 시추하면 길게는 수십만 년에 걸쳐 진행된 지구환경변화를 복원할 수 있다. 그렇다면 빙상은 우리에게 지구환경변화에 관한 어떤 정보를 제공하는가.

남극의 얼음을 녹인 물에서 질량수 18과 16을 갖는 산소동위원소의 비($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)와 질량수 2와 1을 갖는 수소 동위원소의 비(D/H)를 분석하면 아래와 같은 식에서 $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 의 값을 계산할 수 있다.

$$\delta = 1000 \times [(R - R_0) / R_0]$$

여기서 R는 얼음에서의 산소 또는 수소 동위원소비,

남극반도 동쪽 연안에 발달한 라센-B 빙봉에서 쪼개져 나온 거대한 빙산들

R_0 는 표준 해수시료에서의 산소 또는 수소 동위원소비를 나타낸다. 음의 값을 갖는 δ 값은 천분율(‰)로 나타내며 구름의 수증기가 눈으로 응결될 때 발생하는 분화작용과 관측지점에서의 기온변화와 밀접한 관련을 가지고 증가하거나 감소한다. 즉 기온이 상승하면 δ 값이 증가하고, 반대로 하강하면 δ 값이 감소하는 경향을 보이고 있다(그림 ❶ 참조). 이러한 경향은 짧게는 1년 중 여름과 겨울과 같은 계절변화에 의해서도 나타난다. 바로 이런 특성을 이용하여 오랜 기간 산소 또는 수소 동위원소비의 변화를 측정하면 기후변화에 따른 과거의 기온 변화를 알 수 있어서 남극의 얼음은 지구의 기온 변화를 지시하는 천연의 지구온도계로서 사용할 수 있다.

산소와 수소 동위원소비의 연중 변화는 또한 얼음의 연대를 측정하는데도 유용하게 이용되고 있다. 즉 시추한 얼음에서 연중 변화의 연속적인 주기를 구하면 일정 깊이의 연대를 알 수 있다. 하지만 깊이가 깊어질수록 상부에서 받는 압축작용에 의해 얼음의 누년 기록이 없어지게 되고, 이 때는 여러 요소들을 감안한 모델 기법을 사용해 연대를 추정한다.

한편, 남극 얼음의 기포 속에는 얼음이 형성될 당시 대기 중에 있던 이산화탄소와 메탄가스가 갇혀 있어서 이것들을 분석하면 지구상에 있는 여러 환경시료 중 유일하게 과거의 이산화탄소와 메탄가스의 농도를 직접 알 수 있다.

오늘날 지구온난화의 주범으로 간주되는 이산화탄소와 메탄가스의 대기 농도는 20세기 중엽 이후에 들어서야 관측 장비를 이용해 직접 분석하기 시작하였다. 따라서 인간활동에 의한 이산화탄소와 메탄가스의 증가와 지구온난화의 관계를 밝히고자 하는 연구들은 1980년대 이후 빙하를 이용해서 이 가스의 과거 농도를 알 수 있게 되면서 탄력을 받았다고 할 수 있다.

빙하 연구결과는 18세기 중엽 이후 이산화탄소와 메탄가스가 증가하고 있는 경향을 잘 보여주고 있다(그림 ❷ 참조). 실선으로 표시한 것은 대기의 농도를 관측 장비로 분석한 실측 자료이고, 점들은 남극의 빙하에서 분석한 농도를 표시하고 있다.



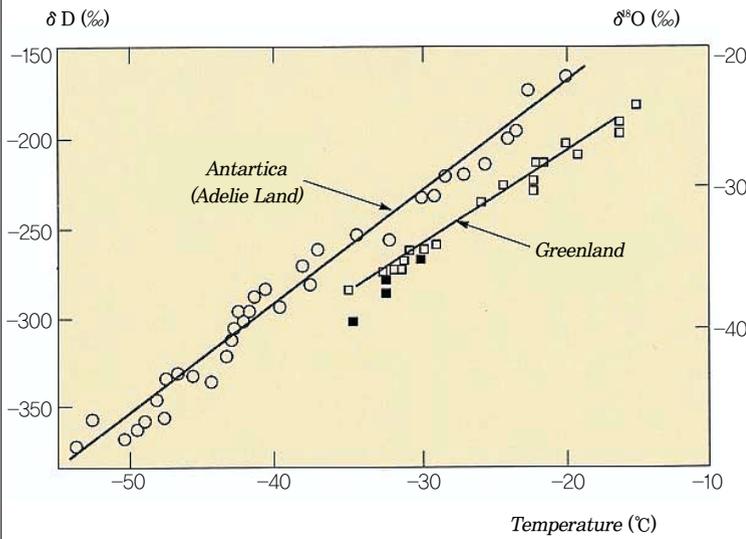
남극 세종과학기지 앞까지 떠내려 온 거대한 빙산

지구환경 복원할 자료 제공

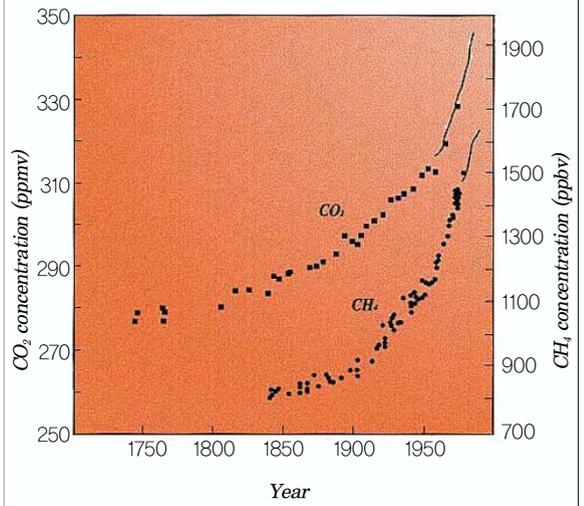
그밖에 얼음 속에는 다양한 화학성분이 포함되어 있는데 이들 성분은 과거의 대기환경상태를 설명해주는 좋은 지시자로서 이용되고 있다. 얼음의 화학성분은 구름 응집핵으로 눈 입자가 만들어지고 이후 지표면으로 떨어지는 동안에 대기의 에어로졸(aerosol, 입자상 부유물질)을 흡착하는 습식퇴적(wet deposition)과 에어로졸이 중력에 의해 눈의 표층으로 떨어지는 건식퇴적(dry deposition)의 두 가지 작용에 의해 만들어지기 때문에 화학성분들의 농도가 증가하고 감소하는 것은 대기 중에 있는 에어로졸의 농도와 관련이 있다.

남극의 대기에서 순환되는 에어로졸은 대부분 주변 대륙에서 기원하는 먼지 입자와 해양에서 기원하는 소금 입자들을 일컫는 1차성 에어로졸과 미량가스들이 입자상으로 변환된 2차성 에어로졸로 구분된다. 1차성 입자들의 농도는 기후변화에 따른 대륙의 사막화, 남극해 해빙의 확장 및 수축, 그리고 남극대륙 주변의 대기 순환 변화와 연관성을 갖고 있다. 반면에 2차성 에어로졸의 대표적인 황산염의 경우는 해양 생물과 소금, 그리고 화산활동에서 기원하는 황 화합물의 조성 변화에 영향을 받는다. 결국 얼음에서 분석한 화학성분들의 조성 변화는 과거의 지구환경을 복원할 수 있는 자료를 제공하고 있다.

예를 들면, 남극 얼음에서 분석한 황산염 농도의 비정상적



①



②

인 증가는 대규모 화산폭발에서 다량으로 배출된 아황산가스와 관련이 있기 때문에 황산염 농도의 장기간 변화를 복원하면 화산활동에 관한 시·공간적 정보를 얻을 수 있다.

보스토크 빙하는 42만년 역사 간직

지금까지 빙하연구의 선진국들은 남극의 여러 지역에서 짧게는 수백m부터 길게는 3천m가 넘는 깊이까지 빙하를 시추하였다. 이 중에서 1998년 1월 러시아 보스토크 기지에서 프랑스와 러시아 그리고 미국이 공동으로 시추한 3천623m 깊이의 시추빙하는 지금까지 세계 최장 길이라는 기록을 가지고 있다. 보스토크 빙하는 빙하기와 간빙기가 네 번 반복하여 나타나는 기후변화를 비롯하여 지난 42만년 동안 발생한 과거의 지구환경에 대한 기록을 그대로 간직하고 있는 것으로 밝혀졌다. 세르비아 수학자 밀루틴 밀란코비치(1920~)는 지구의 궤도 요소인 타원 이심률(eccentricity), 축 기울기(axial tilt), 그리고 근일점 시간 (time of perihelion)의 세 요소가 각각 10만년, 4만년, 2만1천년 주기를 가지고 변동하면서 이들 변동이 복합적으로 작용하여 지구의 태양복사량의 분포에 영향을 주기 때문에 주 빙하기가 발생한다

는 이론을 제시하였다.

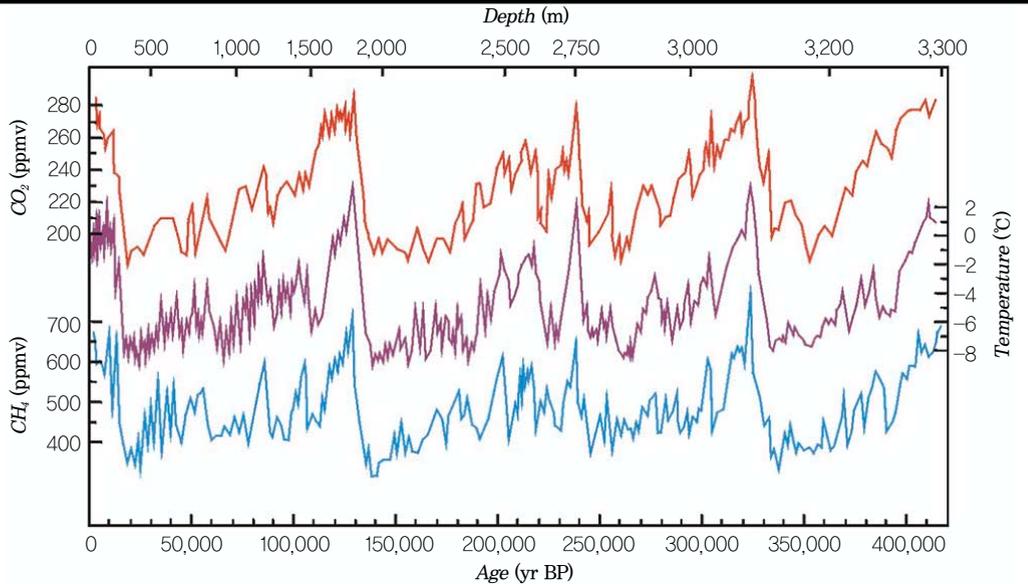
보스토크 빙하의 기후변화 기록은 세 가지 요소의 변동이 가장 크게 중첩되는 약 10만년 주기의 빙하기와 간빙기의 주기를 잘 보여주고 있다. 하지만 태양 에너지의 변화 형태만으로는 보스토크 빙하에서 나타나는 전반적인 기후변화의 양상을 설명할 수가 없다. 보스토크 빙하의 자료에서는 온실가스인 이산화탄소와 메탄가스의 농도가 기후변화와 매우 밀접하게 변동하고 있다는 것이 밝혀졌다.

이것은 태양 에너지라는 외부적인 요소와 더불어 온실가스와 같은 내부적인 요소들이 복합적으로 작용하여 피드백 효과를 유발함으로써 기온의 상승이나 하강이 증폭된다는 사실을 입증하고 있다. 보스토크 빙하를 통해서 알 수 있는 가장 중요한 자료는 바로 우리 인류가 오늘날의 지구환경을 변질시키는 가장 큰 요인이라는 사실이다. 보스토크 빙하의 기록을 보면 빙하기에서 간빙기로 접어들면 이산화탄소는 180 ppmv에서 280~300 ppmv로 증가하고, 메탄가스는 320~350 ppbv에서 650~770 ppbv로 증가하는 주기성을 보이고 있다. 그리고 오늘날의 간빙기 동안에는 산업화 이전에는 이산화탄소의 농도는 ~280 ppmv, 메탄가스의 농도는 ~650 ppbv

- ① 남극(Lorius와 Merlivat, 1977)과 그린랜드(Dansgaard와 Oeschger, 1989)에서 관측한 기온변화에 따른 산소와 수소 동위원소비의 변화
- ② 남극 얼음에서 복원한 18세기 중엽 이후 이산화탄소 농도(Neffel 등, 1985)와 19세기 중엽 이후 메탄 가스 농도(Etheridge 등, 1988)의 증가 경향. 실선은 대기에서 직접 관측한 자료



남극에서 시추한 빙하시료



보스토크 빙하에서 복원한 지난 42만년 동안의 지구환경변화 기록(Petit 등, 1999). 기온변화로 표시한 빙하 기 및 간빙기의 기후변화 주기 및 그와 연관된 이산화탄소 및 메탄가스 농도의 변화

로서 정상적인 상태를 유지하였다. 하지만 현재는 인간활동의 영향으로 각각 ~360 ppmv와 ~1,700 ppbv로 증가하였다. 이러한 온실가스의 농도 수준은 자연 상태에서 나타나는 농도의 변동 폭을 크게 벗어난 것으로서 지난 42만년 동안 전례가 없는 비정상적인 수준을 갖고 있다. 우리는 보스토크 빙하 연구를 통해서 인위적으로 배출되는 온실가스로 인해 자연 상태의 지구환경이 어느 정도 교란되고 있는지를 분명히 알게 되었으며, 이들 온실가스가 오늘날의 지구온난화를 일으키는 중요한 요소라는 과학적 추정이 가능해진다.

남극 빙하 3천200m까지 시추 성공

다양한 연구를 통해 축적된 과학적 지식은 아직까지 대기과 해양, 그리고 육지로 이어지는 복잡한 기후시스템을 이해하기에는 충분하지 않다. 지구조가 정반대인 북반구와 남반구에서 나타나는 기후변화의 양상, 그리고 극지역인 고위도에서의 기후변화가 적도의 저위도에 미치는 영향과 상호관계 등 전지구적인 기후변화의 상호 유기적인 양상을 이해하는 것이 필요하다.

이러한 노력으로 북대서양을 포함한 북반구 고위도 지역에서 발생한 과거의 지구환경변화의 기록을 복원하기 위해서는 그린란드에서 시추한 얼음을 분석하고, 중위도나 저위도 지

역에서의 환경변화를 보고자 하면 히말라야 산맥이나 안데스 산맥에 분포된 만년빙을 분석한다.

이들 지역은 남극보다는 강설량이 많기 때문에 좀더 세밀한 연구가 가능한 반면에 그린란드의 빙하에서는 최대 25만년까지, 그리고 높은 산맥의 빙하에서는 약 2만5천년까지 지구환경 변화에 대한 기록을 복원할 수 있다. 한편, 앞에서 언급한 남극의 보스토크 빙하기록보다 더 오래된 자료를 얻고자 하는 국제적 노력이 활발하게 진행되고 있다.

지난 2003년 2월에는 유럽 10개국이 참여한 남극 빙하 시추프로젝트인 EPICA(European Project for Ice Coring in Antarctica)의 시추팀이 동남극대륙의 내륙에 위치하고 있는 돔 씨(Dome C)라는 고원지대에서 3천200m의 깊이까지 빙하를 시추하는데 성공하였다. 보스토크 빙하와 시추 깊이는 비슷하지만 돔 씨 지역의 강설량이 더 적기 때문에 최하부의 얼음은 대략 100만년의 나이를 가지고 있을 것으로 추정하고 있다. 앞으로 EPICA의 빙하 시료는 과거 100만년 동안 진행된 지구환경변화를 알 수 있는 귀중한 과학적 정보와 지식을 제공할 것으로 기대되고 있다. ^{SD}



글쓴이는 인하대학교 해양학과 졸업 후 동대학원에서 석사, 프랑스 그르노블대학교에서 빙하화학과 지구화학으로 박사 학위 취득, 2001년부터 중국 빙하연구소 과학자문위원으로 재직중이다.