

# 100만년 연대 가진 '빙하코어' 시추한다

글 | 홍성민 \_ 극지연구소(한국해양연구원 부설) 책임연구원 smhong@kopri.re.kr

남극대륙을 백색의 제7대륙이라고 일컫는데, 백색이라는 수식어가 붙는 것은 두말할 것 없이 만년설과 두꺼운 빙하로 뒤덮여 있는 동토의 땅이기 때문이다. 위성사진을 보더라도 온통 흰색뿐이니 남극대륙하면 떠오르는 것이 빙하임이 당연하다. 남극대륙은 그 면적이 한반도의 60여 배에 이르는 큰 땅덩어리이고 약 98%가 빙하로 덮여 있다. 빙하의 평균 두께는 2,160m이며 가장 두꺼운 곳은 그 두께가 약 4천800m에 달한다. 남극대륙에 축적되어 있는 빙하가 전부 녹는다면 전세계의 해수면은 65~70m가 상승한다고 하니 그 엄청난 양을 미루어 짐작할 수 있다.

## 빙하는 지구환경변화 비밀 담긴 '냉동타임캡슐'

지구의 물 순환에 중요한 조절자 역할을 하고 있는 빙하는 한편으로 지구환경변화의 기록을 그대로 보관하고 있는 과학적 보고이기도 하다. 빙하의 두꺼운 층은 매년 내린 눈이 녹지 않고 겹겹이 쌓이면서 발달하기 때문에 나무의 나이테처럼 깊이에 따라 나이를 가지고 있다. 그래서 빙하의 나이별로 산소나 수소 동위원소를 분석해보면 눈이 내릴 당시의 기온을 추측할 수 있다. 이런 기온 자료들을 수만 년 내지 수십만 년에 걸쳐 복원하면 결국 과거의 기후변화에 대한 기록이 된다. 빙하는 바로 '지구의 과거 온도계' 인 것이다.

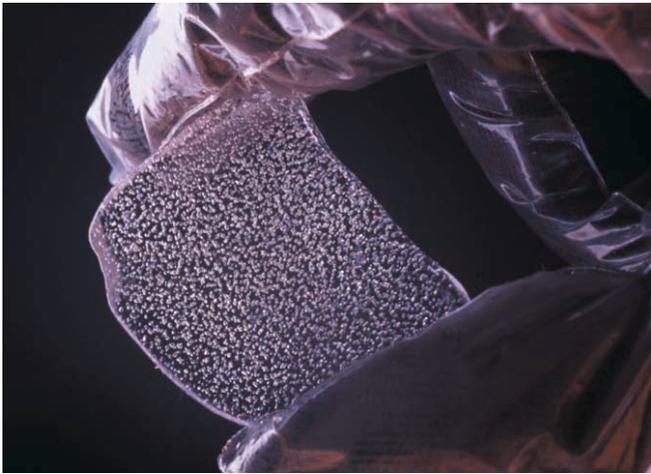
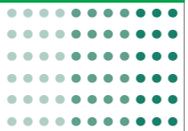
빙하가 가지고 있는 또 다른 지구 비밀의 열쇠는 바로 빙하의 얼음 속에 들어있는 기포에 있다. 빙하의 얼음은 쌓여 있던 만년설이 점점 더 깊이 매몰되면서 위에 있는 만년설의 무게에서 가해지는 압력 때문에 매몰된 눈이 다져져서 만들어진다. 매몰된 눈이 다져질 때 눈의 입자가 사이에 있던 공기가 고립되면서 바로 얼음 속의



남극대륙종단선과 주요 돔의 위치

기포로 남게 된다. 그래서 빙하의 얼음을 자세히 들여다보면 미세한 기포들이 보인다. 깊은 빙하에 갇혀있는 기포들은 수십만 년 전의 공기를 그대로 간직하고 있어서 눈이 쌓일 당시의 대기에 있던 이산화탄소와 메탄가스가 얼마나 있었는지를 원형 그대로 복원할 수 있다. 지구상에서 과거 대기가스의 실제 농도를 알려줄 수 있는 것은 이 빙하 뿐이다.

그밖에도 눈은 지표로 떨어지면서 에어로졸과 같은 각종 대기성분들을 같이 끌어내리기 때문에 기후변화는 물론 자연적인 환경변화나 인위적인 환경변화와 연관된 대기화학적 환경변화의 변천과정도 낱알이 복원할 수 있다. 그래서 빙하를 지구환경변화의 역



빙하 얼음속에 고립되어 있는 기포들

사와 그 비밀을 간직한 '냉동타임캡슐'이라고 일컫는다.

빙하가 가지고 있는 과학적 가치를 알아차린 선진국들은 빙하코어를 시추해 과거의 지구환경변화를 알아내려는 연구를 시작하게 되는데, 빙하연구가 빙하학이라는 하나의 과학 분야로 자리매김하기 시작한 것은 1966년에 미국, 덴마크, 그리고 스위스의 과학자들이 그린란드에 있는 미국의 캠프 센추리기지에서 처음으로 1천 378m 깊이까지 빙하를 시추하는데 성공하면서부터다. 빙하학이 다른 과학에 비해 상대적으로 짧은 역사를 가지고 있지만, 오늘날에는 매년 400여 편의 논문이 사이언스나 네이처를 포함한 저명 국제학술지에 발표되는 등 지구과학의 첨단 연구 분야로서 당당히 인정받고 있다. 그렇다면 빙하코어를 연구해서 어떤 과학적 신지식들이 발표되었는지를 살펴보면 그 이유를 납득할 수 있을 것이다.

미국의 캠프 센추리기지에서 처음으로 1천378m 깊이까지 빙하를 시추하는데 성공한 이후 15년이 지난 1981년에 그린란드의 'Dye 3' 라는 지역에서 시추한 2천37m 길이의 빙하코어에서 발견된 급작스런 기후변화의 흔적은 과학자들을 깜짝 놀라게 했다. 즉, 약 1만5천 년 전부터 가장 최근에 있었던 빙하기가 끝나고 지구의 기후는 서서히 오늘날의 따뜻한 기후로 변하고 있었다. 그러다가 약 1만3천 년에 '영거 드라이어스'라는 한랭기가 출현하게 된다. 그런데 영거 드라이어스 한랭기가 1만1천500년 전 쯤 불과 50년 만에 기온이 7도가 상승하면서 소멸돼 버렸다. 과학자들은 기후변화라는 것은 수만 년 내지 짧아야 수천 년에 걸쳐 진행되는 현상이라고 믿었는데 불과 100년도 되지 않는 짧은 기간에 기온이 7도나 상승한 기후학적 사건이 발견된 것이다. 지난 100년 동안 지구온난화현상으로 지구의 연평균 기온이 불과 0.6도 상승한 것에 견주어 보면 그 당시의 기후변화가 얼마나 급격한 기후변화였는지 알 수 있다. 이 연구결과는 기후변화에 대한 기존의 패러다임을 바꾸는 결정적인 계기가 되었다.

### 빙하코어 통해 76만년간 지구환경변화 알아내

그 후 10년이 지난 1992년에 그린란드의 최정상부에서 유럽과 미국의 과학자들은 각각 3천m가 넘는 GRIP와 GISP2라는 빙하코어를 시추하였다. 맨 밑에서 올라온 얼음의 나이는 25만 년이나 되었다. 이 빙하코어로 과거의 기후변화를 복원한 과학자들은 다시 한번 깜짝 놀랄 만한 사실을 밝혀냈다. 과거 12만 년 전부터 1만 5천 년 전까지 가장 최근에 있었던 빙하기 동안에 갑자기 약 7~8도 정도 기온이 상승해서 수백 년에서 수천 년 동안 지속된 아(亞)간빙기라는 따뜻한 기후를 가진 이벤트가 24번이나 반복되었던 것이다. 빙하기라고 하면 지구는 계속 추웠고, 간빙기라 하면 따뜻한 기후가 지속되는 기후 패턴을 보인다고 믿고 있었던 과학자들의 상식을 완전히 뒤집어 놓은 연구 결과였다. 빙하코어에 기록되어 있는 코드는 북대서양의 해류순환과 연관되어 반응하므로 빙하코어에 나타난 아간빙기의 복잡한 출현은 북대서양의 기후변화가 그만큼 돌출적으로 급변했으며, 결과적으로 우리가 이해하지 못하는 무언가가 기후시스템을 조절하고 있고, 그만큼 지구의 기후시스템이 복잡하다는 반증이기도 했다.

북극의 그린란드와 비교하면 남극대륙의 빙하는 훨씬 오래 된 기록을 보존하고 있다. 그 이유는 남극대륙의 내륙으로 들어가면 강설량이 연간 10cm도 안될 정도로 적기 때문이다. 강수량으로 따지면 사하라 사막보다도 적다. 그래서 남극대륙은 지구에서 가장 건조한 사막이다. 단지 내린 눈이 녹지 않고 쌓여있기 때문에 모래 대신 만년설로 덮여있는 사막인 셈이다. 이렇게 적은 적설량으로 만들어진 수천m 두께의 빙하는 당연히 긴 세월 동안 형성되었으므로 수십만 년에서 길게는 100만 년이 넘는 지구환경변화의 기록을 보존하고 있다. 남극에서 시추한 대표적인 빙하코어는 러시아기지인 보스톡 기지에서 시추한 보스톡 빙하코어와 프랑스와 이탈리아 공동운영기지인 Dome C 기지에서 시추한 EPICA 빙하코어다.

러시아 보스톡기지는 남극대륙에서도 가장 혹한 지역에 속한다. 연평균 기온이 영하 55도이고, 1983년 7월 21일에 기록한 영하 89.2도는 지금까지 지구상에서 인간이 관측한 최저기온으로 기록되고 있다. 이처럼 가혹한 환경을 가지고 있는 러시아의 보스톡기지에서 세계 최장의 빙하를 시추하고자 20여 년 동안 노력하였지만 실패를 거듭하다 마침내 러시아, 미국, 프랑스 과학자들은 1998년 3천623m 깊이까지 빙하를 시추하는데 성공했다. 보스톡 빙하코어는 지난 42만 년 동안 10만 년 주기로 네 번이나 반복된 빙하기와 간빙기의 사이클을 가진 기후변화의 기록을 가지고 있다. 이

보스톡 빙하코어에서 오늘날의 이산화탄소 농도(약 360 ppmv)와 메탄가스 농도(약 1,700 ppbv)가 지난 42만 년 이래 전례 없이 가장 높은 농도를 보이고 있다는 사실이 드러났다. 이것은 인간에 의해 진행되고 있는 지구환경의 파괴가 우리가 인식하고 있는 것보다 훨씬 심각하다는 사실을 반증하는 결정적인 과학적 증거라고 할 수 있다.

한편, 유럽 10개국은 1999년말부터 2004년까지 Dome C 기지에서 3천270m까지 EPICA 빙하코어를 시추해서 76만 년의 지구환경변화의 기록을 복원하였다. 이 기록에서 밝혀진 흥미로운 사실 가운데 하나는 바로 보스톡 빙하코어에서는 알 수 없었던 42만 년 이전에 존재했던 기후변화의 흔적들이다. 그 흔적들을 보면 지난 42만 년 동안 10만년 주기로 반복되었던 빙하기와 간빙기의 기후변화는 기온 변화의 폭이 크면서 상당히 규칙적인데 반해 76만 년 전부터 42만 년 전까지 있었던 기후변화의 주기성은 다소 불규칙했고 기온 변화의 진폭도 상대적으로 작았다는 것을 알 수 있다. 기후학자들에게 또 하나의 의문이 던져진 것이다. 지구의 기후변화를 조절하는 가장 큰 요소인 태양의 복사에너지의 변화는 지난 200만 년 동안 거의 변화가 없었는데, 왜 이렇게 기후변화의 패턴은 일정하지 않을까?

### 2007년 한·중 Dome A 탐사프로그램 가동

빙하코어에서 드러난 과거 기후변화의 패턴들은 아직까지 어떠한 기후변화 모델로도 재현할 수 없는데, 그것은 지구의 기후시스템이 너무 복잡해서 현대과학으로는 풀 수 없는 복잡한 퍼즐과 같기 때문이다. 그 퍼즐을 풀 수 있는 단초나 실마리를 빙하코어에서 찾고자하는 노력이 주로 선진국 주도의 독점적 연구형태로 수행되어 왔지만, 이제는 국제적인 프로그램들로 진행되는 경향이 두드러지고 있다. 바로 ITASE (International Trans-Antarctic Scientific Expeditions)와 IPICS (International Partnerships in Ice Core Science)가 대표적인 국제공동협력 프로그램이다.

1990년부터 시작한 ITASE 프로그램은 현재 우리 나라를 포함하여 20개국이 가입되어 있다. 이 프로그램을 가동한 목적은 산업화가 가장 급속하게 진행된 지난 200년 동안 지구상에서 발생한 기후변화와 대기화학적 환경변화의 시그널을 남극의 빙하를 통해 복원하는 것이다. 그러기 위해서 남극대륙에 기지를 가진 모든 나라들이 남극대륙 종단선을 나름대로 정해서 동시다발적인 연구를 진행한다. 그 이유는 남극대륙이 워낙 넓은 지역이라 어느 한 두 지역



EPICA Dome C 빙하코어 시추 장면

만으로는 정량화된 자료를 확보하기 어렵기 때문이다. 아쉽게도 우리나라는 ITASE에 가입은 되어 있지만 남극대륙에 기지를 보유하고 있지 않아서 실질적인 기여는 못하고 있는 실정이다.

한편, 우리 나라를 포함해 18개국이 가입되어 있는 IPICS는 ITASE 프로그램과는 그 성격이 다르다. 실질적인 빙하코어를 시추하려는 목적뿐만 아니라 우리나라처럼 빙하연구 후발국들이 빙하 시추 기술을 습득할 기회를 제공하는 훈련 프로그램 운영 등을 통해 빙하연구의 저변을 확대하려는 국제 빙하연구 협력체계 구축도 포함되어 있기 때문이다. IPICS는 현재 남극대륙에서 100만 년 이상 된 빙하층을 탐사해 EPICA 빙하코어에서 복원된 76만 년의 기록보다 더 오래된 지구환경변화의 기록을 복원하기 위해 세계 최장의 빙하코어를 시추할 계획을 추진하고 있다. 그 연구계획의 가장 적합한 후보지가 바로 중국의 대륙기지인 중산기지에서 약 1천 300km 떨어진 내륙쪽에 위치한 Dome A(Dome Argus)이다. 해발 고도가 4천93m에 달하고 지난 2005년 1월 중국의 남극대륙 빙하 탐사팀이 종단에 처음으로 성공하여 Dome A에 첫발을 내딛는데 성공했을 정도로 남극대륙에서 접근이 가장 어려웠던 곳이다.

남극에서 국제협력을 통해 많은 과학기지가 세워지고 본격적인 과학연구활동을 촉진한 계기가 되었던 1956~57년 '국제지구물리 관측년'(IGY) 50주년을 기념하여 대대적인 극지연구 프로그램을 가동하려는 2007~08년 '국제극지의 해'가 계획되고 있다. 그리고 2007~08 '국제극지의 해' 동안에 남극에서 빙하 연구활동을 벌이고 있는 모든 국가들은 국제공동 남극대륙 종단 프로그램들을 계획하고 있다. 그 중의 하나가 우리나라와 중국이 함께 추진하고 있는 중국 중산기지에서 Dome A까지의 남극대륙 종단 빙하탐사 프로



남극 Dome C 기지로 물자를 운송하는 대형설상차 행렬

그램이다. 우리 나라는 킹조지섬에 세종과학기지를 보유하고 있지만 킹조지섬의 지리환경적인 제한으로 인해 그동안 실질적인 빙하 프로그램을 개발할 기회를 갖지 못했다. 그렇기에 2007~08년도 '국제극지의 해'를 계기로 우리 나라도 본격적으로 선진국형 빙하 연구에 동참하고자 중국과 Dome A 남극대륙 종단 빙하탐사 프로그램을 개발하여 사상 처음으로 남극대륙 빙하탐사에 동참할 계획을 진행하고 있다.

한·중 Dome A 빙하탐사 프로그램은 2007~08년을 1차 연도로 해서 이후 5년 동안 Dome A 지역의 빙하를 집중적으로 탐사하고, 궁극적으로는 Dome A에서 백만 년 이상의 연대를 가지는 세계 최장의 빙하코어를 시추한다는 야심찬 계획이다. 이 프로그램은 물론 ITASE, IPICS와 연결고리를 가지고 추진되기 때문에 이들 국제공동협력 프로그램에 기여하는 우리나라의 위상도 높아질 전망이다. 물론 이 계획을 성공적으로 진행하기 위해서는 많은 난관들을 극복해야 한다. 예를 들면, 먼저 극한 환경을 어떻게 잘 극복하느냐이다. Dome A는 해발 4천93m로서 남극대륙에서 가장 높은 빙원지역이다. 자칫하면 전문산악대원이 아닌 빙하학자와 엔지니어들로 구성된 탐사대원들이 고산병과 같은 위험에 노출될 수도 있다.

다음으로 빙하시추를 위해서는 Dome A에 임시기지를 건설해야 하며, 그러기 위해서는 연료를 포함한 막대한 물자와 장비 및 보급품을 운반해야 한다. 보통 물자 운송에는 10여대의 대형설상차가 동원되는데, 1천300km를 종단하다보면 설상차 대열의 호흡도 중요하고, 남극대륙에서 수시로 불어대자 블리저드(눈이 동반된 강풍)를 만나서 예기치 못한 안전사고가 발생할 수도 있다. 이를 극복하기 위해서는 미지의 영역을 탐사하면서 겪게 되는 위험 상황에 잘

대처할 수 있는 현장 경험과 노하우가 축적돼야 한다.

### 원천기술 확보해야 독자적 빙하연구 가능

우리 나라가 빙하연구를 제대로 하기 위해서는 기본적으로 세 단계의 원천기술을 보유해야 한다. 첫째, 극한환경에서의 물자 보급 지원체계이다. 앞서 말한 대로 극한지에서 물자와 장비 보급, 그리고 운송체계 운영 등에 대한 경험을 가지고 있어야 남극대륙 깊숙이 위치한 빙하시추 지점까지 접근이 가능하기 때문이다. 두번째는 빙하탐사와 시추에 필요한 원천기술이다. 빙하연구를 하기 위해서는 당연히 빙하층을 탐사해서 가장 적합한 시추지점을 찾아내야 하고, 그 다음에 빙하코어를 시추해야 하는데, 수천 m 깊이까지 빙하를 탐사하고 시추하는 것은 고도의 공학적 기술이 요구된다. 게다가 이 정도의 깊이까지 빙하코어를 시추하기 위해서는 시간적으로도 몇 년이 소요되며, 시추 도중에 발생할 수 있는 기계적 결함을 해결할 수 있는 빙하시추 원천기술과 노하우가 없으면 실패하기 십상이다. 일본의 경우에는 1980년대초 부터 유럽 국가들의 빙하시추 현장에 참여하여 시추기술을 도입하였으며, 지금은 독자적으로 개량한 시추기술로 3천m 이상의 빙하를 시추할 수 있는 국가가 되었다. 마지막으로, 빙하코어를 분석해서 그 곳에 숨겨져 있는 환경 지시자들을 복원할 수 있는 첨단 분석 능력을 보유해야 한다. 빙하코어 연구는 기후학적, 대기화학적, 지질학적, 기상학적, 지구물리학적, 결정학적, 미생물학적 연구 등이 복합된 다학제적 연구이기 때문에 다양한 연구 인프라와 네트워크가 필요하다.

우리 나라도 2007~08년도부터 한·중 Dome A 남극대륙종단 빙하탐사 프로그램을 통해 남극대륙 기반연구의 꽃으로 불리는 빙하코어 연구에 첫발을 내딛게 된다. 아니, 어쩌면 이미 시작되었다고 볼 수도 있다. 남극대륙에서 유일하게 빙하코어를 시추하고 있는 일본 돔 후지(Dome Fuji)기지에 이미 한 명의 우리 과학자가 2007년 2월까지 빙하시추 현장에 참여해 시추기술을 습득하고 있다. 빙하연구에 필요한 원천기술 확보는 2011년까지 우리 나라 남극대륙 제2기지를 건설할 계획에 맞춰 단계적으로 추진될 예정이고, 그 이후에는 우리 나라도 독자적으로 빙하연구를 수행할 수 있는 극지과학 선진국가가 될 것으로 기대하고 있다. ㉔



글쓴이는 프랑스 그르노블 대학교에서 박사(빙하학) 학위를 받았다. 남극세종과학기지 제18차 월동연구단 대장을 지냈으며, 현재 중국 란저우 빙하연구소 과학자문위원을 겸임하고 있다.