

# 바다를 알면 기후가 보인다(II) : 영화 '투모로'의 진실



글 | 김경렬 \_ 서울대학교 지구환경과학부 교수 krkim@snu.ac.kr

**몇**년 전 지구가 언젠가 맞게 될지도 모를 위협을 극적으로 보여준 영화 '투모로(The Day After Tomorrow)'가 극장가를 누빈 적이 있었다. 지구온난화에 시달리던 지구기후가 갑자기 빙하기로 바뀌면서 뉴욕시가 얼음으로 뒤덮이는 기후변동의 대재앙을 소재로 한 영화였다. 에머리히 감독은 도대체 어디에서 이런 영감을 얻었을까?

## 해양의 대순환 '컨베이어벨트'

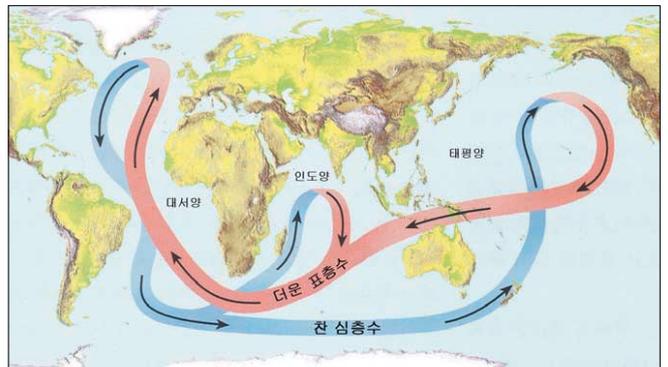
북미대륙의 동쪽 해안을 따라 고위도 멀리까지 북상하며 유럽을 데워주던 멕시코만류가 그린란드 지역에 도달할 때쯤 되면 이미 온도가 꽤 내려가 밀도가 높아져 심해로 가라앉으면서 또 하나의 거대한 바닷물의 순환이 시작된다. 밀도가 커져 심층으로 가라앉은 해수는 미주대륙 동쪽의 해안 지형을 따라 남하한 후 남극해를 거쳐 인도양, 태평양으로 이동하기 시작하며 서서히 다시 해수 표면으로 올라와 본래의 시작점인 북대서양으로 돌아가는 긴 여행을 시작한다. 고위도 지방에서 차고 짙 해수가 무거워져 가라앉으면서 해저의 지형을 따라 거대한 심층해류를 만들어내는 것이다. 이 흐름은 온도(열)와 염분(염)이 결정하는 밀도차에 의해 시작되는 해수의 순환운동이므로 '열염순환'이라고 불리며, 또한 '컨베이어벨트'라는 별명도 붙어 있다.

이 컨베이어벨트는 움직이는 속도가 너무 느리기에 이를 밝혀내는 것이 그리 쉽지는 않았지만, 심해수에 녹아있는 방사능 동위원소 탄소14의 분포를 연구하여 한 번의 순환을 마치는데 자그마치 1

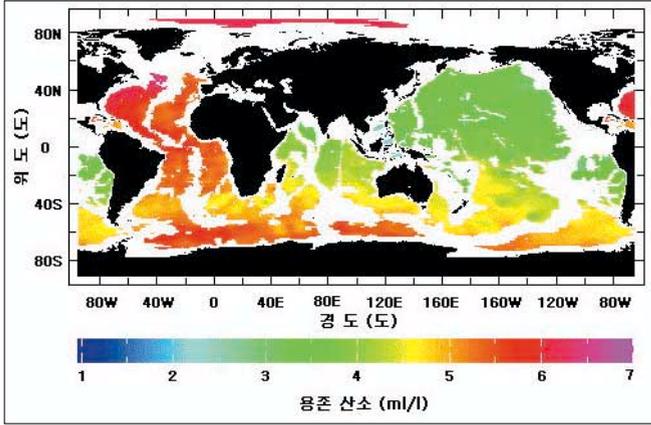
천~1천500년이나 되는 긴 시간이 걸린다는 것을 알아낼 수 있었다. 길어야 100년의 수명을 가진 인류의 기준으로 볼 때 너무 긴 시간임이 분명하다. 그런데 최근의 연구는 이렇게 느린 순환이 지구 기후를 결정하는 매우 중요한 요인의 하나라는 것을 보여주고 있다.

## 밀란코비치 순환에 따라 6만년 후 빙하기 도래

지구의 기후에 중요한 영향을 미치는 요인 중 하나에 태양주위를 도는 지구의 공전이 있다. 문제는 이와 관련된 천문학자들의 작은 요동이다. 1609년 케플러가 밝혀낸 타원형 공전궤도의 이심률이 주기적으로 변화한다. 또한 공전 면에서 약 23.5도 기울어져 있



북대서양에서 가라앉은 해수가 북미대륙을 따라 남하하여 남극해를 돌아 인도양 태평양으로 이동하다가 표층으로 다시 올라와 대서양으로 이동하는 하나의 거대한 순환계를 이루고 있다. 최근의 연구들은 이 컨베이어벨트가 지구 기후에 미치는 중요성을 더욱 높게 인식시켜주고 있다.



4000m 깊이의 해수 속에 녹아있는 산소 농도의 분포 모습. 북대서양에서 남극해를 거쳐 태평양으로 가면서 농도가 점차로 감소하는 모습을 보인다. 심해에 사는 미생물들이 산소를 소모하며 따라서 컨베이어 벨트가 진행하는 방향으로 농도가 줄어든 것이 예상된다. 이런 분포를 통해 과학자들은 컨베이어벨트의 진행방향을 이해할 수 있었다.



약 1만3천 년 전 따뜻한 기후를 향한 지구의 온도가 약 1천여 년 동안 갑자기 낮아졌음을 보여주고 있다.

는 지구 자전축의 기울기가 주기적으로 커졌다 작아지는 요동을 한다. 또한 자전하는 지구는 팽이와 같은 축차운동을 한다. 유고슬라비아의 밀란코비치는 1941년 완성시킨 이론에서 지구의 공전과 관련된 세 가지 운동의 주기적인 요동이 지구에 입사하는 태양에너지에 변화를 주며 이에 따라 지구기후가 주기적으로 큰 변화를 할 수 있음을 제안하였다.

바다 밑 퇴적물에 간직된 생물 유해의 탄소동위원소비나 고위도 지역의 빙하를 이루는 물들의 수소동위원소비 등을 조사하여 밝힌 연구 결과들은 지구가 지난 300여 만년 동안에 밀란코비치의 순환을 따라 약 10만 년을 주기로 추운 빙하기와 따뜻한 간빙기를 왕복하는 기후의 순환을 반복해왔음을 보여준다. 오늘의 인류 문명도 약 2만 년 전 마지막 빙하기의 절정을 거친 지구가 따뜻한 간빙기로 돌입하면서 꽃이 핀 것이다.

또한 밀란코비치의 순환과정에 따르면 앞으로 약 6만여 년이 지나면 지구는 서서히 다시 빙하기로 들어갈 수밖에 없다. 지상의 모



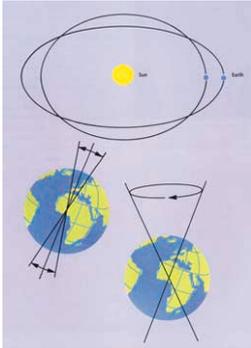
백두산에 서식하고 있는 담자리꽃(Dryas)

든 생물들은 이전과 같이 지구평균온도가 약 6도 정도 지금보다 낮아지는 빙하기에 다시 적응하면서 생활을 유지하지 않으면 안 된다. 지구만이 삶의 터전인 지상의 모든 생물체가 감수할 수밖에 없는 어쩔 수 없는 운명이다. 그런데 지금 지구상에서 일어나고 있는 여러 모습들을 보면 지구가 이런 자연의 섭리를 그대로 따라갈 것 같지가 않다.

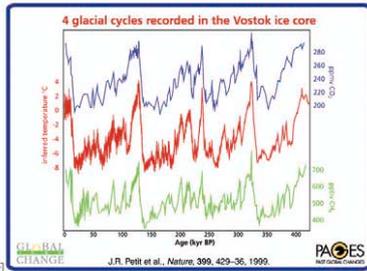
### 지구의 갑작스런 기후변동 ‘영저드라이아스 사건’

지난 2만1천 년 전 마지막 빙하기의 절정을 지나면서 지구는 따뜻한 기후를 향한 전진을 계속하고 있었다. 그러던 지구의 기온이 약 1만3천년 전 급격히 떨어지면서 약 1천200년 간 지구에는 빙하기가 다시 도래하였다. ‘영저 드라이아스기’라고 불리는 사건이다. 빙하기 시절 지구의 넓은 지역에 번성하던 한대성 담자리꽃(Dryas)이 지구가 따뜻해지면서 서서히 고위도로 물러나다가 이 시기에 갑자기 다시 번성하면서 붙여진 이름이다. 이렇게 지구를 갑작스레 빙하기로 잠시 몰고 갔던 주변으로 과학자들은 잠시 고장이 났던 컨베이어벨트를 지목하고 있다.

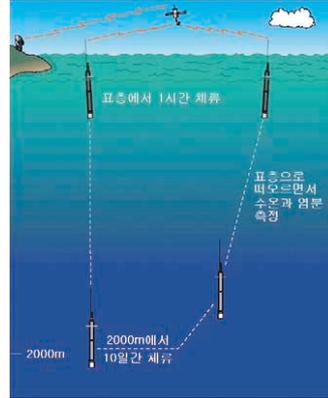
대서양 적도지방의 따뜻한 바닷물이 북상을 할 수 있도록 만드는 일차적인 힘은 바람이라는 것을 이미 앞의 글에서 살펴보았다. 그러나 여기에는 2% 부족한 것이 있었다. 북대서양 고위도에서 컨베이어벨트가 시작되어 해수가 가라앉으면서 만들어지는 빈자리를 메우려는 힘이 바로 저위도의 해수를 고위도까지 끌어당기는 중요한 원동력이 된다는 것을 영저드라이아스 사건은 분명히 보여준 것이다.



밀란코비치 순환을 만들어내는 지구공전과 관련된 세 가지 변수의 요동 모습



남극대륙 보스토크기지에서 채취된 3600m 이상의 긴 얼음시료를 분석하여 얻은 지난 40여만 년 동안의 기후변화. 약 6도 정도의 폭으로 지구가 더웠다 추웠다 하는 진동을 4번이나 반복한 모습을 보여주고 있다(붉은 색). 빙하에 갇힌 공기를 뽑아내어 당시 대기 중의 탄산가스의 농도를 분석한 결과가 함께 그려져 있다.



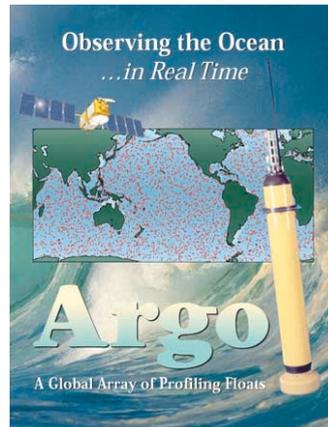
ARGO 계획에서 사용되고 있는 무인 탐사장비 P-ALACE(Profiling-Autonomous Lagrangian Circulation Explorer). 스스로 비중을 조절하여 표층에서 약 2천m의 수심으로 가라앉을 수 있으며, 이 깊이에서 열을 정도 그곳의 해류를 타고 떠다니다가 스스로 부력을 조절하여 표층으로 올라와 인공 위성에게 자신의 위치를 알리고는 다시 부력을 조절하여 2천m 깊이까지 가라앉아 떠다니기를 계속하는 최첨단 장비이다. 오르고 내리는 동안에는 표층에서 2천m 깊이까지의 수온과 염분의 분포를 덤으로 측정하여(profiling) 이들 자료를 과학자들에게 송신해 준다.

지구가 따뜻해지고 빙하가 녹으면서 캐나다 서부에 거대한 담수 호가 만들어지고 있었다. 그런데 이 호수가 빙하가 계속 녹으면서 넘쳐나는 물을 더 이상 견디지 못하고 1만3천 년 전 무너져 버리면서 한순간에 빙하가 녹은 물은 북대서양으로 쏟아 부었다. 찬 담수가 북대서양의 잔물을 희석시켜 해수를 가볍게 만들면서 1천여 년 동안 이곳에서 시작되던 컨베이어벨트를 교란시킨 것은 물론이다. 이렇게 컨베이어벨트가 약해지면서 저위도 따뜻한 해수의 북상이 약해지고 이로 인하여 해수의 북상을 통한 열전달이 따라서 줄어들며 이는 마침내는 지구를 냉각시키는 결과로 이어지게 되었다. 영저드라이아스 사건을 통하여 과학자들은 컨베이어벨트와 지구 기후 시스템 사이에 거대한 연결고리가 있음을 이해하게 된 것이다.

스펙터클을 위해 재앙과 관련한 소재를 찾던 할리우드가 이런 호재를 놓칠 리 없었다. 지구 온난화로 더위에 시달리는 지구의 빙하가 녹아내리고 이로 인해 이 느낌보 컨베이어벨트가 망가지면서 결국 지구가 빙하로 뒤덮이게 된다는 내용을 다룬 영화가 바로 '투모로'이다. 수 백 수 천 년에 걸쳐서 일어난 일을 며칠 이내의 일로 바꾸어 낼 수 있는 할리우드 특유의 과장이 들어간 것은 물론이지만 말이다.

### 연결고리를 밝히는 ARGO 연구계획

현재 진행되고 있는 지구 온난화가 빙하를 계속 녹여 바다에 쏟아 부으면서 혹시 영저드라이아스와 같은 갑작스런 기후변동 사건이 앞으로 재현되는 것은 아닐까? 1만3천 년 전 발생했던 사건에 과학자들이 영저라는 비교급을 붙인 이유가 혹시 무의식적으로 영기스트라는 최상급의 이름을 붙일 수 있는 다음 재난을 예고한 것



ARGO 연구계획을 보여주는 포스터

은 아닐까?

전 세계의 여러 해양학자들은 서로 힘을 모아 인공위성이 위치를 추적하는 심해용 탐사장비 P-ALACE를 2천개 이상이나 사용하여 심해수의 흐름을 탐사하는 프로그램 ARGO를 지난 수 년 간 진행해 오고 있다. P-ALACE는 스스로 비중을 조절하여 표층과 약 2천m의 수심을 오르락내리락 할 수 있으며, 또한 오르내리는 동안에는 표층에서 2천m 깊이까지의 수온과 염분의 분포를 덤으로 측정하여 자료를 송신할 수 있는 최첨단장비이다. 심해수의 흐름을 이해하기 위한 이런 힘든 연구에 과학자들이 더욱 박차를 가하고 있는 이유는 간단하다. 해수 순환과 지구 기후 사이의 상관관계를 밝히는 것이 기후 시스템을 이해하기 위한 핵심이 되고 있음을 지구의 과거는 우리들에게 분명히 알려주고 있기 때문이다. ㉔



글쓴이는 서울대학교 화학과 졸업 후 대학원에서 석사학위를, 캘리포니아대학 샌디에이고 캠퍼스에서 해양학으로 박사학위를 받았다. 현재 지구환경과학부 학부장 겸 BK21사업단장으로 있으며, 해양연구소장을 겸임하고 있다.