

더워지는 지구 | 키일링 곡선 이야기

하늘에서 본 우리들의 유일한 삶의 터전인 지구의 모습이 참으로 아름답기 그지없다. 물론 지상에서 보아도 아름다운 곳이 많은 지구이다. 여기에 빼놓을 수 없는 아름다운 도시인 파리가 사랑하는 것 중의 하나가 바로 에펠탑과 그 야경이다. 그런데 지난 2007년 2월 2일 파리는 에펠탑의 야경을 5분간 소등하였다. 같은 날 로마에서도 파리와 함께 콜로세움의 점등을 중단하였다. 바로 이날 낮 파리에서 있었던 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 제1 소위원회 회의 기자회견 때문이었다. 그 해 11월 발표된 IPCC 4차보고서 '기후변화 2007'의 주요 내용을 처음으로 발표한 당일의 기자회견내용에 깊은 관심을 가져야 한다는 메시지를 전 지구인들에게 전하기 위해서였다.

발표내용의 중요한 결론은 “지구 온난화는 명백한 사실이며, 더구나 그 변화속도로 볼 때 지구 45억 년의 역사를 통하여 유례가 없었던 매우 빠른 속도로 더워지고 있다. 특히 더욱 염려스러운 것은 그 원인의 중심에 사람들의 활동이 깊이 관여된 온실기체의 증가가 자리 잡고 있다.”는 것이었다.

사람들은 기록을 통하여 지구의 기후가 변해왔음을 알고 있다. 유럽이 중세기에 매우 온난하였으나 14세기에서 18세기에 걸쳐서 '소빙하기'라고 부르는 추운 기후를 겪었으며,

시간을 더욱 거슬러 가면 과거에는 지구에 빙하기가 있었음을 이미 알고 있다. 그럼에도 불구하고 과학자들은 조심스럽지만 어떤 근거에서 지구온난화는 사람들이 만들어낸 것이 거의 확실하다는 결론을 내릴 수 있었던 것일까?

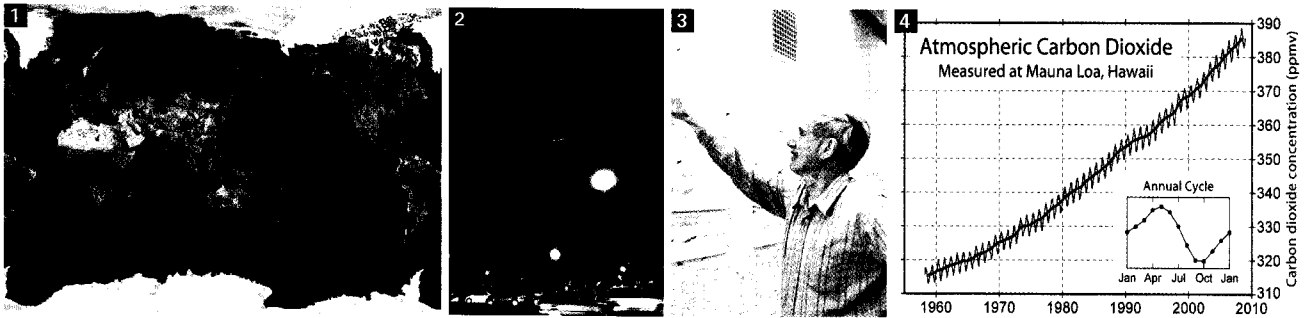
IGY와 키일링곡선

아마 최근의 지구온난화가 사람들의 활동과 연계시킬 수 있는 가장 중요한 연결고리는 '키일링곡선'으로 불리는 대기 중 탄산가스의 농도 변화 관측 자료일 것이다. 1957년은 유엔이 어떤 하나의 주제로 연도에 이름을 붙이기 시작한 첫 번째 해이다. IGY(국제 지구물리의 해)라는 이름이 붙여진 이 해에 체계적인 전지구적 관측이 시작되었다. 1985년 남극 상공의 오존 구멍을 처음으로 밝힌 영국남극 관측팀이 남극 헬리만에서 오존 관측을 시작한 것이 바로 이 해였다. 엘니뇨가 해양 현상과 어떤 관련이 있는 것 같다는 힌트를 처음으로 얻을 수 있었던 것도 이 해에 태평양에서 시작된 해양무인관측시스템 덕분이었다. 이때 이루어진 또 하나의 중요한 지구 관측이 바로 키일링이 하와이섬 마우나로아 3천 400m 정도의 고도에서 시작한 공기 중의 탄산가스 농도 관측이었다.

칼텍에서 막 학위를 마친 키일링은 이때부



글 김경렬 서울대학교 지구환경과학부 교수
krkim@snu.ac.kr
글쓴이는 서울대학교 화학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를 받았으며, 미국 캘리포니아대학 샌디에이고 캠퍼스에서 해양학으로 박사학위를 받았다. 현재 지구환경과학부 학부장 겸 BK21사업 단장으로 있으며, 해양연구소장을 겸임하고 있다.



▶▶ 1 하늘에서 살펴본 아름다운 지구의 모습 2 2007년 2월 2일 에펠탑의 야간점등을 5분간 중단하였다. 당일 파리에 있었던 IPCC WG1 소속 과학자들의 지구온난화와 관련된 기자회견 내용 때문이었다. 3 자신이 관측한 자료를 보고 있는 키일링 교수(1928~2005). 1957년부터 하와이 마우나로아 3,397m에 위치한 관측소에서 대기 중의 탄산가스의 농도를 측정하며, 최근의 지구온난화가 사람의 활동과 연계되어 있음을 보여주는 과학적 근거를 제시하였다. 4 키일링 교수의 이름이 붙어있는 마우나로아에서의 탄산가스 농도 관측자료. 여름철 낮은 값을 보이고 겨울철 높은 값을 보이는 주기적 변동과 함께 농도가 시간에 따라 꾸준히 증가하고 있는 모습을 보여주고 있다.

터 시작하여 수년전 세상을 떠나기 전까지 대기 중 탄산가스의 농도를 '정확히' 측정하는 데 일생을 바쳤다. 그가 얻는 자료를 일컫는 키일링 곡선은 북반구 대기 중의 탄산가스의 농도가 매년 여름이면 감소하고 겨울이면 증가하는 변화를 반복하고 있음을 보여준다. 지구상의 식물들이 여름철 활발히 진행되는 광합성과 겨울철의 우세한 호흡작용의 효과가 대기 중에 탄산가스의 농도 변화로 나타나고 있음을 보여준 것이다. 그런데 키일링 곡선은 이와 더불어 탄산가스의 농도가 계속해서 증가하고 있음을 분명히 보여주고 있다. 키일링 곡선의 배경에 깔려 있는 농도의 증가는 무엇을 의미하는 것일까?

빙하에서 과거 대기 정보 얻어

1980년대에 이르면서 키일링 곡선이 보여주는 대기 중 탄산가스의 농도 증가가 정말로 사람들의 활동에 의한 것인가라는 질문이 정책 결정자들 사이에서 본격적으로 대두되기 시작하였다. 이에 대한 답을 구해보려는 구체적인 연구들이 아울러 시작된 것은 물론이다. 키일링 곡선이 정말로 사람들의 활동을 반영한 것이라는 것을 분명히 알 수 있는 방법은 대기 중의 탄산가스 농도가 사람들의 영향 없이 자연적으로 변해온 과거를 이해하고 이를 최근의 변화와 비교해보는 것이다.

다행히 과거의 지구 대기에 관한 정보를 얻을 수 있는 자료가 바로 그린란드나 남극에 있었다. 과거 이곳에 매년 내린 눈이 차곡차곡 쌓여 지금은 두께가 수천 m까지 이르는 두꺼운 빙하가 있다. 이 빙하에 구멍을 뚫고 들어가 얼

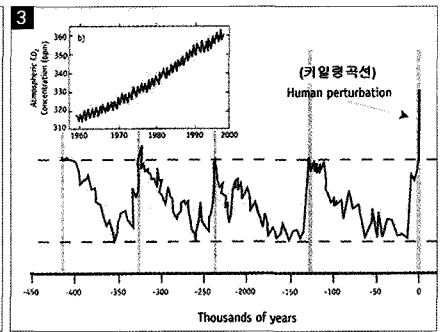
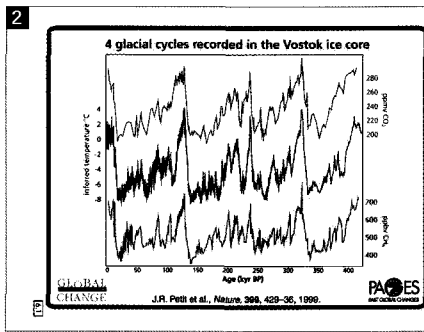
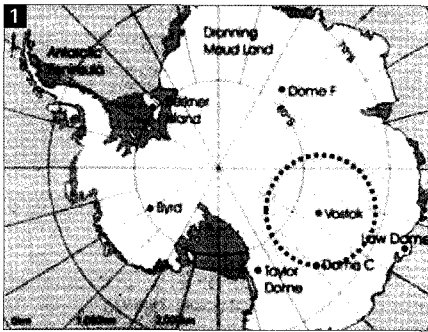
음 시료를 채취하면 과거로 거슬러가며 당시 이곳에 쌓였던 눈 시료를 얻을 수 있는 것이다. 눈이 계속 쌓여갈 때 밑에 있는 눈은 점점 눌리게 되며, 마침내 쌓인 눈의 두께가 약 70여 m에 이르면 그 아래의 눈은 얼음으로 변하면서 빙하가 만들어진다. 여기에서 중요한 것은 쌓이는 눈의 주위에 있던 공기가 얼음 속에 갇히게 된다는 점이다. 실제 얼음 부피의 약 1/10 정도의 공기가 얼음 속에 포함되어 있다. 따라서 빙하를 시추하여 이 얼음 속에 포함된 공기를 빼어내 조사를 해보면 과거 당시의 대기에 관한 정보를 알 수 있다.

키일링 곡선은 사람들의 작품

가장 성공적인 연구는 남극 보스톡 기지에서 얻은 빙하 시추시료이다. 과학자들은 약 3천700여m의 시추시료를 통하여 지난 40만 년 동안의 공기 시료를 얻을 수 있었다. 과학자들은 이 시료를 이용하여 지난 약 40여만 년까지를 거슬러가며 대기 중 탄산가스의 농도 변화를 추적할 수 있게 된 것이다.

지난 40여만 년을 통하여 지구는 약 네 번에 걸친 빙하기를 거쳐 왔다. 이들 공기시료의 분석을 통하여 대기 중 탄산가스의 농도가 자연적으로도 지난 40여만 년 동안 약 10만년을 주기로 빙하기 시기의 약 200ppmv에서 간빙기의 280ppmv 사이로 80ppm 정도의 큰 변화를 반복해온 것을 알 수 있었다.

이제 이런 자연적인 변화와 최근에 관측된 변화를 함께 도시하여 살펴보는 일만이 남은 셈이었다. 그런데 그 결과



▶▶ 1 성공적인 빙하시추작업이 이루어진 남극 보스톡지지의 지도 2 보스톡 빙하시추코어를 분석한 자료. 약 10만 년의 주기로 6~7℃ 정도의 온도변화가 빙하기와 간빙기 사이에 있으며, 이런 온도 변화와 함께 대기 중의 탄산가스 농도가 200ppm V에서 280ppm V 정도로 변해온 것을 보여주고 있다. 3 보스톡에서 얻은 탄산가스 농도의 자연변화와 키일링 곡선을 연결시킨 그림. 키일링 곡선이 자연의 변화의 일부가 아님을 분명히 보여주고 있다.

가 충격적이었음은 물론이다. 지난 1만 년 정도의 대기 중 탄산가스의 농도 변화를 보면 280ppmv 정도의 값을 보이던 탄산가스의 농도가 와트에 의한 증기기관의 발명 이후 1700년대 중반에서부터 증가하기 시작하였다. 19세기 들어 미국의 서부 개척이 활발해지며 산림이 불타고 벌목이 증대함과 함께 대기 중의 탄산가스 농도는 급속도로 증가하여 결국은 최근의 실제 관측 자료인 키일링 곡선에 자연스럽게 연결되고 있다. 지질학적 시간 잣대로 보아서는 거의 순간적인 짧은 기간인 산업혁명 이후 불과 200년 정도의 기간에 10여만 년 이상의 긴 시간에 걸쳐서 일어나고 있던 약 80ppm 이상의 농도 변화가 있었다. 지금도 꾸준히 증가하는 변화의 속도로 볼 때 최근의 농도 변화가 자연적인 변화의 일부로 보기에는 너무 큰 변화임이 분명하다.

최근에 얻어진 더욱 흥미 있는 자료에 공기 중의 산소 자료가 있다. 이 자료는 마우나로아에서의 탄산가스 농도 측정을 주도했던 키일링 교수의 아들인 램프 키일링이 얻은 자료라는 점으로 더욱 화제가 되었었다. 램프 키일링은 자신의 박사학위 논문에서 산소의 농도 또한 화석연료를 태우기 위해서 필요한 정도로 서서히 감소하고 있음을 밝혔는데, 물론 공기 중의 산소의 양이 21% 정도로 워낙 많아서 지난 10여 년 동안의 변화량은 현재 대기 중 산소의 양의 1만분에 2 정도밖에 되지 않는 적은 양이다. 그렇지만 이런 자료는 키일링 곡선이 보여주는 탄산가스 증가의 원인이 사람들의 화석연료 사용에 있음을 더욱 확실하게 뒷받침해주고 있으며, 현재 아들 램프는 아버지를 이어 키일링 곡선을 계속 그려가고 있다.

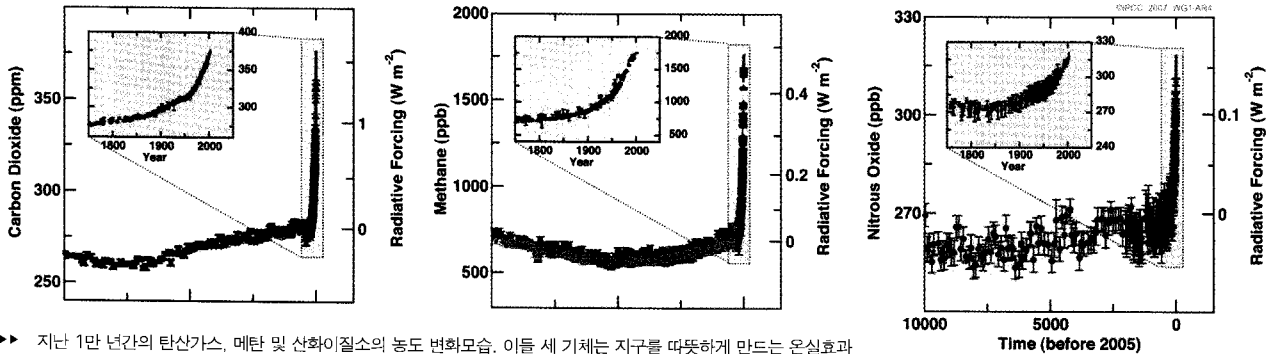
최근 약 200여 년의 급격한 탄산가스의 농도 변화와 유사한 변화가 목축산업의 부산물인 메탄(CH₄)이나 농업혁명을

이룰 수 있게 한 질소비료의 원하지 않는 부산물인 산화이질소(N₂O)와 같은 다른 온실기체에서도 마찬가지로 관측되고 있다. IPCC는 이런 관측 자료에 기초하여 키일링 곡선은 사람의 작품이라는 결론을 내릴 수 있었다. 이러한 기체들은 원래는 자연에서 지구를 따뜻하게 해주는 대표적인 온실기체들이었으나, 최근의 농도 증가는 사람들이 인위적으로 기후에 강제력을 부여하고 있음을 보여주는 것이 분명해 보인다. 그런데 이런 심증을 어떻게 과학자들은 과학적 증거로 만들어낼 수 있을까?

컴퓨터 모형으로 지구 기후변화 모사

과학자들이 사용할 수 있는 도구는 결국 컴퓨터였다. 컴퓨터의 발전과 함께 과학자들은 좀 더 정교한 기후모형을 개발할 수 있었다. 물론 아직 완벽에는 이를 수 없는 정도이지만 과학자들은 컴퓨터를 이용한 기후모형을 이용하여 비교적 일관성이 있는 기후 예측을 할 수 있게 되었다. 이런 컴퓨터 모형들을 이용하여 최근의 지구기후의 변화를 모사해 볼 수 있었음은 물론이다.

그런데 문제는 컴퓨터 모형에 키일링 곡선으로 대표되는 인위적인 강제력을 넣지 않으면 최근의 온도증가를 전혀 재현할 수 없다는 것이다. 인위적인 강제력을 포함하지 않은 모사와 인위적인 강제력을 포함한 모사를 동시에 수행하고 이들 결과를 실제 관측 자료와 비교해 보았을 때, 실제의 관측결과를 얻기 위해서는 인위적 강제력이 절대적으로 필요함을 알 수 있게 된 것이다. IPCC 과학자들이 내린 결론은 바로 이런 컴퓨터 결과에 근거한 것이었으며, 이는 현재 과학자들이 할 수 있는 최선의 방법으로 여겨진다.



▶ 지난 1만 년간의 탄산가스, 메탄 및 산화이질소의 농도 변화모습. 이들 세 기체는 지구를 따뜻하게 만드는 온실효과를 만들어내는 중요한 기체들이다.

아레니우스의 예언


사람이 지구의 기후를 변화시킬 수도 있음이 과학적으로 처음 논의된 것은 지금으로부터 100여 년 전으로 거슬러 간다. 스웨덴의 아레니우스는 1897년 석탄 사용으로 대기 중 탄산가스의 농도가 증가할 수 있으며, 만약에 탄산가스의 농도가 2배로 증가하면 적어도 2~5도 정도 지구가 더워질 수 있으리라는 계산을 발표하였다. 아레니우스는 1903년 소금물이 전기를 통할 수 있는 방법을 설명한 전리설로 노벨화학상을 받은 과학자이다.

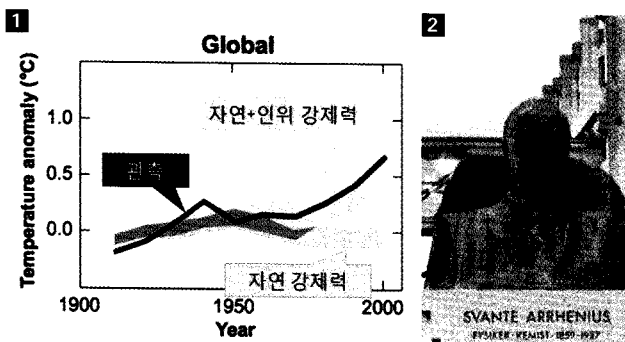
아레니우스가 우리들이 지금 염려하는 지구온난화 문제를 연구하기 위해서 이 계산을 시작한 것은 물론 아니었다. 당시는 1830년대 스위스의 애거시가 과학계에 본격적으로 논쟁을 불러일으킨 빙하기의 이론이 분명한 사실로 받아들여진 시기였으며, 그 원인이 무엇인지를 밝히는 것은 과학계의 중요한 과제의 하나였다. 오늘날 지난 300만 년 동안 약 10만 년의 주기로 빙하기와 간빙기가 반복되고 있음

을 믿지 않는 사람은 아무도 없으며, 보스톡 자료와 같이 구체적으로 지구 변화를 이해할 수 있는 단계에까지 이르렀다. 그러나 애거시가 처음으로 빙하기가 있었다는 주장을 펼쳤을 때 당시 과학계의 반발은 엄청난 것이었다.

그러나 1894년에 이르렀을 때는 빙하의 활동을 체계적으로 관측하기 위하여 국제적으로 IGC가 탄생하며, 아레니우스가 빙하기의 문제를 생각하게 되는 동기가 충분히 마련되어 있었다. 탄산가스의 농도 증가가 지구 기후를 변화시킬 수 있다는 가능성이 이미 100여 년 전에 제시된 것이다. 그러나 아레니우스 자신도 이런 일들이 가까운 장래에 일어날 수 있으리라고는 생각지 않았다. 그렇지만 그의 예상을 깨고 불과 100여 년도 안 되는 사이에 이런 일이 지구 상에서 벌어진 것이다.

IPCC, 2007년 노벨 평화상 수상

2007년 가을 IPCC 4차 보고서가 최종적으로 발표된 후 노벨상위원회는 2007년 노벨평화상 수상자로 '불편한 진실'이라는 이름으로 지구온난화를 걱정하는 많은 캠페인을 벌였던 미국의 정치가 앨 고어와 함께 IPCC 4차 보고서를 작성하는데 수고한 약 1천여 명의 과학자들을 선정하였다. 사람들이 만들어낸 기후변화에 관한 지식을 정리하고 널리 알리며 이런 변화에 대응하는데 필요한 여러 방안의 기초를 다진 노력을 기리는 수상이었다. 이렇게 평화상을 공동수상한 IPCC는 1988년 UNEP(유엔환경계획)과 WMO(세계기상협회)가 공동으로 제안하여 구성된 기후와 관련된 지구과학을 전공하는 과학자들의 모임이다. 



▶ 1 컴퓨터 기후모형으로 모사한 결과. 인위적인 강제력을 포함한 결과만이 최근의 온도 변화를 설명해주고 있음을 보여준다. 2 1903년 전리설로 노벨화학상을 수상한 아레니우스(1859~1927). 사람들의 활동이 지구기후를 변화시킬 수 있다는 가능성을 100여 년 전 처음으로 지적하였다.