

## 슈퍼컴퓨터와 기후 모델

- 글 : 이명인 교수 (UNIST 도시환경공학부)



최근 기후변화, 지구온난화 등과 함께 뉴스 미디어에 오르내리는 단어 중에 기후모델 (climate model)이란 표현이 있다. 기후모델을 쉽게 설명하면 기후를 연구하는 과학자들이 만들어 사용하는 컴퓨터 기반의 기후 시뮬레이션 소프트웨어다. 기후는 지구를 둘러싸고 있는 대기의 장기적인 상태를 말하는데, 기후모델은 이를 온도, 바람, 강수량 등을 나타내는 인공적인 숫자로 표현한다. 즉, 대기의 질량, 운동량, 에너지 보존 법칙들을 연립 편미분 방정식들로 기술하고, 초기조건과 경계조건을 이용하여 해(solution)를 풀어, 결과적으로 임의의 시간에서의 대기의 상태를 수치적으로 나타낸다. 기후모델을 이용하여 과학자들은 기후변화 예측과 아울러 몇 달 뒤에 올 계절의 상태를 예측하거나, 기후의 변동을 유발하는 엘니뇨/라니냐, 극진동과 같은 기후현상들의 복잡한 메커니즘들을 연구한다.

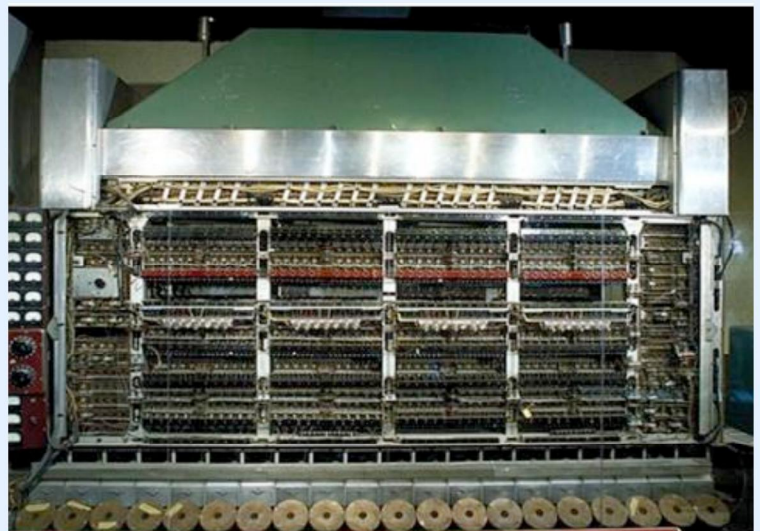
지구 대기를 표현하는 미분방정식의 해는 종이와 연필로 간단히 풀어내기에는 계산과정이 너무 방대하다. 6,470km의 반지름을 가지는 지구 표면적에 지면으로부터 100km 고도까지의 전체 계산 영역을 적어도 10-100 km 간격의 격자들로 나누어야 기후를 변동시키는 다양한 현상들을 표현하는 것이 가능하며, 지금부터 100년 후의 기후가 어떻게 변화할 지를 예측하려면 막대한 계산량과 방대한 자료 저장 장치가 요구된다. 따라서, 기후 모델 개발 (기후 모델링)의 역사는 컴퓨터의 발전과 불가분의 관계에 있다. 날씨 및 기후의 예측은 인류의 오랜 꿈이었다 (그림 1).



[그림 1] 최초로 날씨 예측 모델을 개발한 리차드슨 (1882-1953)의 날씨예보 공장 (Forecast Factory)을 묘사한 삽화. 지구를 상징하는 거대한 공장에 오케스트라 객석과 같은 형태의 좌석이 층별로 배열되고, 대략 64,000명의 인간 컴퓨터가 미분 방정식을 계산하여 이를 인접한 사람들에게 전달한다. 공장의 중앙에는 지휘자가 진동을 비추며 계산 결과의 효과적인 전달을 총괄 지휘한다. 비록 리차드슨의 노력은 실패하였으나, 그가 만약 현대적인 전자계산기나 컴퓨터를 활용할 수 있었다면 기후모델의 역사는 크게 달라졌을 것이다.

1940년대 후반, 최초의 컴퓨터 에니악 (ENIAC)이 발명된 후, 1952년 폰노이만과 차니는 프린스턴 대학의 고등과학원 컴퓨터를 이용하여 최초로 날씨 예측에 성공하였으며 (그림 2), 그 후 기후 모델은 컴퓨터 성능의 향상과 함께 비약적으로 발전하였다. 2002-2004년 동안 세계에서 제일 빠른 슈퍼컴퓨터의 자리를 차지했던 지구 시뮬레이터 (Earth Simulator)는 미래의 기후 변화를 예측하기 위하여 개발되었으며, 2011년부터 현재까지 세계 1위의 성능을 자랑하는 일본의 K 슈퍼컴퓨터는 초당  $10^{16}$  번의 연산이 가능한 초고속 컴퓨터로, 기후변화와 태풍과 같은 자연 재해의 예측이 주요 연구 분야 중의 하나이다 (그림 3).

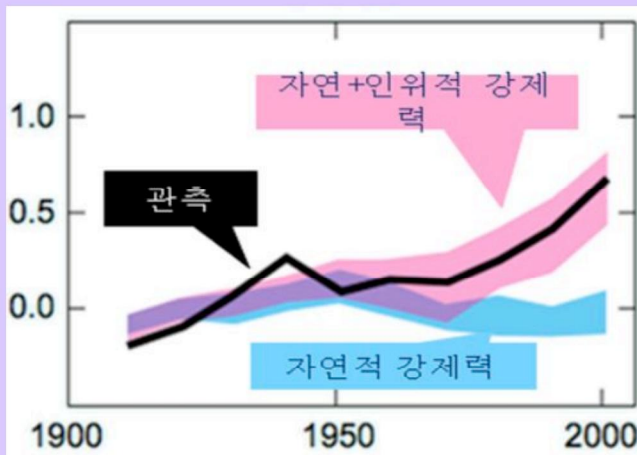
[그림 2] 폰 노이만이 1952년 개발한 프린스턴 대학의 고등과학원 (Institute for Advance Studies) 컴퓨터. 줄 차니 (1917-1981)와 함께 날씨 예측모델의 수치 적분에 성공하였다.





[그림 3] 일본 후지쓰사가 개발한 K 컴퓨터. 2011년 11월부터 현재까지 세계에서 제일 빠른 컴퓨터로 705,024 CPU 코어를 탑재하고 있으며, 10.51 페타플롭스 (초당  $10^{15}$  연산처리)의 성능을 가진다. 일본의 NICAM 기후모델을 이용한 태풍 예측, 400 m 공간해상도의 초고해상도 기후모델 개발 등에 활용되고 있다.

최근 더욱 심화되고 있는 기후변화 및 자연재해에 대한 인류의 대응 노력을 위하여 기후모델은 지난 20여 년간 기후변화의 원인을 규명하고, 미래 기후의 예측을 수행하는 등 큰 기여를 해왔으며, 향후에도 그 중요성은 더욱 커질 것으로 기대된다. 특히 2007년 발표된 국가 간 기후변화 협의체 (Intergovernmental Panel for Climate Change) 4차 보고서에는 20세기 후반부터 현재까지 진행되고 있는 지구 기온의 가파른 상승이 인간 활동에 따른 온실가스 농도 증가로 인한 것이라는 기후모델들의 결과가 제시되었다. 그림 4는 지구평균기온의 관측값 (검은 선)과 다수의 기후모델들을 이용한 과거 기후의 재현 결과를 비교한 것이다. 온실가스의 농도 증가를 고려한 시뮬레이션 결과 (핑크색 선)는 지구기온의 상승경향을 충실하게 재현하는 반면에, 온실가스 농도 증가를 고려하지 않은 시뮬레이션 결과 (파란색 선)에서는 기온 상승경향이 재현되지 않고 있다. 즉, 최근 가속화되고 있는 지구기온의 상승은 온실가스의 증가경향 없이는 설명되지 않으며, 지구온난화가 인간 활동의 영향이라는 것을 입증하는 기후모델의 중요한 결과로 평가되고 있다.



[그림 4] 1906-2005년 기간의 관측된 전 지구 평균 기온의 상승경향 (검은 선)과 기후모델들의 재현결과. 핑크색은 자연적인 조건과 인간 활동에 의한 온실가스 증가를 고려한 기후모델들의 실험 결과이며, 파란색은 자연적인 조건만을 고려한 실험결과 (출처: IPCC 4차 평가보고서, 2007).

현재 개발된 최신의 기후모델들은 대기과 해양, 지면, 극 지역의 해빙 등이 결합되어 기후계를 구성하는 각 성분들의 복잡한 상호작용과 되먹임 효과 등을 모의하는 것이 가능하다. 또한 슈퍼컴퓨터를 다수 보유하고 있는 미국, 일본, 유럽의 선진국들은 기후변화와 자연재해 대응을 위하여 1-10 km 공간 해상도의 초고해상도 전 지구 모델들을 활발히 개발 중에 있다(그림 5). 초고해상도 전 지구 모델은 단기 기상예측에서는 정확도의 개선효과가 뚜렷한 것으로 나타나, 향후 국가 방재 업무에 크게 기여할 것으로 판단된다. 이러한 초고해상도 모델을 이용하여 계절 예측이나 미래의 기후변화를 장기간 예측하는 것은 아직까지는 어려운 형편이며, 슈퍼컴퓨터 연산성능 향상, 구름 및 난류 등을 표현하는 대기물리 과정의 개선 등 지속적인 추가 개발이 필요하다.



[그림 5] NASA가 개발 중인 3.5 km 공간해상도의 전 지구 기후모델 GEOS-5 의 하층 구름 시뮬레이션 결과 (좌), GOES-14 정지궤도 위성사진 (중), 27 km 공간해상도의 전 지구 기후모델 결과 (우) 비교. 2009년 1월 2일의 경우 (출처: NASA Goddard). NASA NCCS 슈퍼컴퓨터의 4,000개 네할렘 프로세서를 사용. 공간해상도 증가에 따라 매우 현실적인 형태의 구름 모양들을 재현하고 있다.

향후 기후 모델링의 개발 방향은 식물 성장, 지각 판의 이동, 지진 등 다양한 자연 재해와 기후변화에 따른 영향을 예측하고 분석할 수 있는 지구 시스템 모델 (Earth System Model)로 더욱 고도화 될 것으로 예상된다. 기후변화와 태풍, 지진, 화산 폭발, 황사, 시베리아 산불과 같은 거대 자연재난, 그리고 방사능 폭발, 유조선 좌초에 의한 기름 유출 등 대형 환경재난 등에 대비할 수 있는 시스템의 수요가 급속히 증가함에 따라 지구시스템 모델의 기술 수요 및 사회적 요구 또한 급격히 증가할 것으로 예상된다. 막대한 계산 부하를 극복할 수 있는 CPU, 메모리, 하드웨어 시스템, 전력공급, 저장 장치 등 슈퍼컴퓨팅 연산 환경의 비약적인 발전과 함께, 소프트웨어 단위에서의 병렬 컴퓨팅 효율 향상, 기후모델링 과학 등에 지속적인 투자와 지원이 필요하다.

기후과학자들은 여전히 불평한다. 슈퍼컴퓨터가 빨리 빨라졌으면 하고...