

기상 및 기후의 수치예측에 대한 슈퍼컴퓨터의 역할

박선기

이화여대 환경학과 수문기상연구실

Role of Supercomputers in Numerical Prediction of Weather and Climate

Seon Ki Park

Hydrometeorology Laboratory

Department of Environmental Science and Engineering

Ewha Womans University, Seoul, 120-750, Korea

E-mail: spark@ewha.ac.kr

접수: 2004년 12월 1일, 게재승인: 2004년 12월 17일

Abstracts

Progresses in numerical prediction of weather and climate have been in parallel with those of computing resources, especially the development of supercomputers. Advanced techniques in numerical modeling, computational schemes, and data assimilation could not have been practically achieved without the aid of supercomputers. With such techniques and computing powers, the accuracy of numerical forecasts has been tremendously improved. Supercomputers are also indispensable in constructing and executing the synthetic Earth system models. In this study, a brief overview on numerical weather/climate prediction, Earth system modeling, and the values of supercomputing is provided.

Key words: supercomputer, numerical weather/climate prediction, Earth system modeling

1. 서론

대기의 운동 및 상태는 유체역학에서 다루는 여러 보존의 법칙들을 따른다. V. Bjerknes (1904)는 운동방정식, 상태방정식, 연속방정식

및 열역학방정식을 상세한 초기조건 및 경계조건을 주어 풀면 원칙적으로 대기의 미래상태를 완벽하게 결정할 수 있다고 언급하였다. 컴퓨터를 이용하여 대기를 지배하는 방정식들을 풀어 일기를 예측하는 것을 수치예보(numerical

weather prediction: NWP)라고 한다. V. Bjerknes의 비전은 Richardson(1922)에 이르러 처음 시도가 되었다. Richardson은 전구를 64,000개의 셀로 나누고 각 셀에서 인간에 의해 계산된 일기상태를 중앙제어지역으로 보내게 했다. 이 시도는 초기조건의 부정확성으로 인해 결국 실패하게 되었으며, 이 실패로 인해 향후 20 여년 이상 수치예보에 대한 시도를 하지 않게 된다.

수치예보의 발달은 컴퓨터의 발달과 밀접한 연관을 갖는다. 역사적으로 최초의 실질적인 수치예보는 1940년대 말에 단층 순압모델을 이용하여 24 h 동안의 적분을 함으로써 이루어졌으며, 그 결과는 Charney et al.(1950)에 보고되었다. 이 때의 수치계산은 그 당시 가장 빠른 컴퓨터인 ENIAC 을 이용하여 행해졌다. 1954년에 미국기상국은 IBM 701 컴퓨터를 도입하였고, 향후 더욱 빠른 컴퓨터의 출현과 더불어 기상모델도 더욱 정교해지면서 수치예보에 큰 향상이 이루어졌다(Thompson, 1973). Fig. 1은 북미

대륙의 500 hPa 고도의 36 h 예보에 대한 숙련도 (skill score)를 나타낸다. 1955년에서 1992년 사이에 숙련도가 35% 미만에서 95% 이상까지 향상되었음을 보여준다. 또한 이러한 숙련도의 증가가 대기 연직구조의 상세한 표현, 수평분해능의 증가, 물리과정의 향상, 그리고 다양한 자료에 의한 초기조건의 향상 등에 의해 이루어졌고 이는 컴퓨터의 프로세서가 용량이 커지고 속도가 빨라짐에 따라 가능하게 되었음을 보여준다. 예를 들어 1959년 말에 만들어져 기상분야의 연구에 많이 활용된 IBM 1620은 초당 10^3 번의 연산이 가능하였으나 최근에는 일반적인 슈퍼컴퓨터들에서 초당 10^{12} 번의 연산이 가능하여 10^9 배 정도 빨라지게 되었다.

슈퍼컴퓨터의 개념은 1970년대 후반의 벡터형 컴퓨터의 보급과 함께 형성되고 이후 1980년대의 멀티프로세서형 컴퓨터를 거쳐 고도병렬처리형(massively parallel processing: MPP) 및 분산메모리형(distributed memory) 슈퍼컴퓨터들로

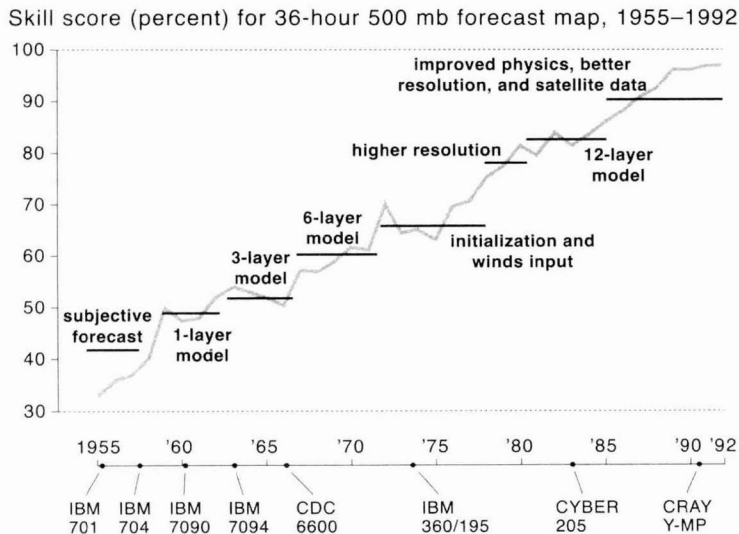


Fig. 1. Improvement in skill score of the 36-h 500-hPa prognostic chart (the US National Meteorological Center), reflecting advances in modeling and computing technology. (From Monmonier, 1999)

발전하게 된다. 최근 세계 각국의 현업기상부서에서는 전구 및 지역예보를 위한 고분해능의 수치모델을 현업으로 운영하고 있고, 이를 위해 지금까지 개발된 가장 빠르고 용량이 큰 슈퍼컴퓨터들이 이용되고 있는 실정이다. 따라서 수치예보에 있어 슈퍼컴퓨터는 없어서는 안 될 필수적인 요소라고 할 수 있다. 이 연구에서는 최근의 수치예보 시스템의 발전 동향과 슈퍼컴퓨팅이 필요한 요소들에 대해 토의하고자 한다.

2. 기상/기후 수치모델링, 자료동화 및 앙상블 예보

가장 진보된 수치예보 시스템은 원시방정식계(primitive equations)를 이용한다. 이는 운동방정식(운동량 보존), 열역학방정식(에너지 보존-열역학 제1법칙), 상태방정식(이상기체), 연속방정식(질량 보존) 등을 대기의 기본적인 지배방

정식으로 하고, 이에 수분 및 에어로솔 방정식(상변화에 따른 수분 보존 및 에어로솔 보존) 등을 포함한다. 이 방정식계는 시간 및 공간에 대한 편미분 방정식들로 이루어지며 시간에 대해 적분을 함으로써 현재의 대기 상태를 초기값으로 하여 미래의 대기 상태를 수치적으로 계산하게 된다. 각 방정식들로부터 얻어지는 예보변수는 동서, 남북 및 연직 방향의 바람, 기온 및 밀도와 수증기, 구름물, 빗물, 눈, 우박, 에어로솔 등의 혼합비이다. 또한 상태방정식으로부터 기압을 진단적으로 얻게 된다. 이들을 수치적으로 계산하기 위해 일반적으로 계산 영역을 적당한 간격의 격자점들로 나누어 이 격자점에 각 예보변수들을 할당하게 된다.

일반적으로 원시방정식계를 이용한 수치모델은 적어도 10^7 정도의 자유도를 가진다(Kalnay, 2003). 예를 들어 수평거리 1° 간격의 격자점과 20개의 연직면을 가진 전구모델의 경우 $360 \times 180 \times 20 = 1.3 \times 10^6$ 개의 격자점을 가지며, 각 격

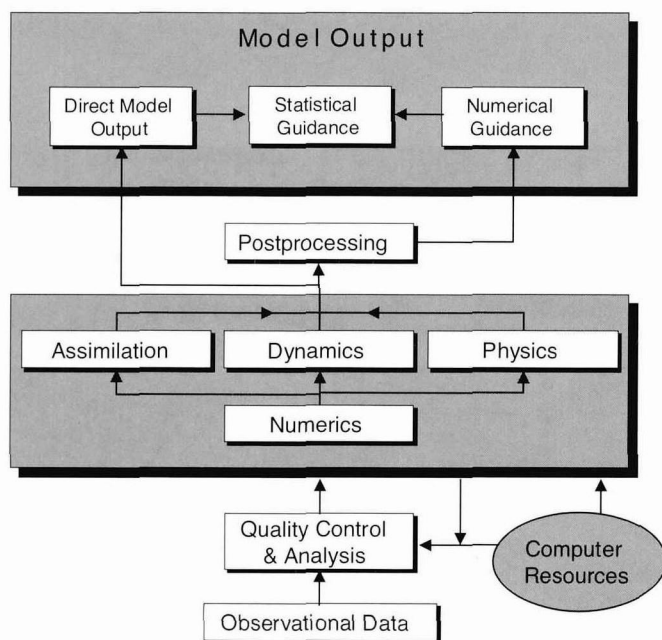


Fig. 2. Schematic diagram for processes in a numerical weather prediction system.

자점에서 적어도 4개의 예보변수(수평 바람 성분, 기온, 수증기)를 계산하게 되고 각 연직칼럼에 대해 지상기압을 얻게 된다. 여기에 수증기의 상변화를 통한 액체 및 고체 상태의 물을 포함하면 계산되는 격자자료는 더 많아지게 된다. 이는 단위 시간 간격에 계산되어지는 양이며 적분시간에 따라 총 계산량이 결정된다. 수평격자 간격을 반으로 줄일 경우 계산량은 2배로 늘어나게 된다. 또한 계산 불안정을 피하기 위해 시간간격을 충분히 작게 주어야 하는 제약도 따른다.

Fig. 2는 일반적인 수치예보 시스템을 도식적으로 표현한 것이다. 수치예보 시스템을 이용하여 모델 결과(즉, 예보변수들의 계산값)를 얻기 위해서는 1) 관측 자료에 대한 질 관리(quality control)를 하고; 2) 자료동화(data assimilation)를 거쳐 양질의 초기값을 얻고; 3) 역학 및 물리과정을 포함하는 수치모델을 수행하여 예보값을 얻고; 4) 후처리를 통해 적절한 모델 자료들을 표출하는 일련의 과정들이 필요하다. 이들

각각의 과정들이 모두 상당한 양의 계산량을 필요로 하며 이러한 일련의 과정들이 순조롭게 수행되어 원하는 예보시간보다 훨씬 앞서 모델 결과를 생산하기 위해서는 빠른 자료 처리 및 계산 속도를 가진 슈퍼컴퓨터가 없이는 불가능하다고 할 수 있다.

수치예보의 정확성이 초기값의 불확실성에 크게 의존함을 감안할 때 최적의 초기조건을 만들어주는 자료동화의 중요성은 아무리 강조해도 지나침이 없다. 가장 진보된 자료동화 기법으로는 4차원 변분동화 및 앙상블 칼만 필터링 등이 있는데 이들 모두 많은 계산량을 요구한다. 예를 들어 4차원 변분동화를 이용할 경우 적절한 동화창내에서 수치모델의 전진적분, 수반모델의 후진적분 및 최소화 과정 수행 등의 일련의 과정을 수십번 반복하여 최적의 초기조건을 얻는다 (Park and Županski, 2003 참조). 따라서 이러한 자료동화 과정 역시 엄청난 계산 자원을 요구한다. 또한 앙상블 예보를 위해서는 많은 앙상블 멤버들에 대한 모델 적분들이 필

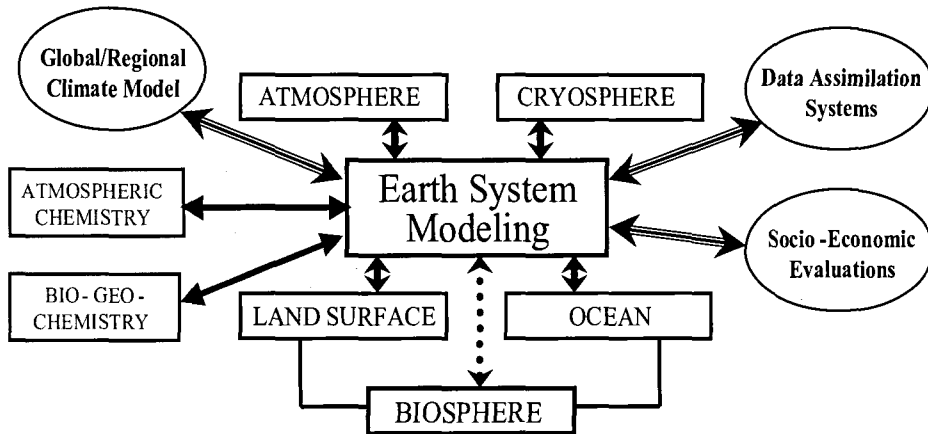


Fig. 3. Schematic diagram for an earth system modeling and associated processes.

요하다. 그러므로 수치예보 시스템이 원활하게 수행되어 예보자가 필요한 자료를 생산하기 위해서는 첨단 기법을 활용하는 슈퍼컴퓨터가 필수불가결하다.

최근의 기상/기후 수치모델링은 지구시스템(earth system) 모델링으로 발전되고 있는 추세이다(Fig. 3 참조). 즉, 대기, 해양, 빙권, 육지과정 및 생물권 까지 포함하는 접합 모델을 만들고 이에 대기화학 및 생지화학 과정까지 포함하게 되어 각 모듈에서 계산하게 되는 격자변수들의 양은 엄청나게 많아진다. 여기에 전구/지역의 기후 및 사회-경제적 효과까지 감안하고 이 통합모델의 모든 변수들에 대한 자료동화와 앙상블 예보까지 고려한다면 단순한 슈퍼컴퓨터로도 쉽게 해결할 수가 없을 것이며 수많은 프로세서들을 이용한 고도병렬처리 및 분산메모리 슈퍼컴퓨팅 기법들을 효율적으로 이용하여야 할 것이다.

3. 맺음말

기상/기후 모델을 이용한 수치예보의 발달은 컴퓨터의 발달과 그 맥을 같이 하고 있다. 수치예보의 정확성을 향상시켜주는 분해능의 증가, 물리과정의 향상 및 자료동화를 통한 초기조건의 향상 등은 컴퓨터의 능력이 향상되지 않고는 이루어질 수 없기 때문이다. 특히 첨단 자료동화 기법의 적용과 향후 지구시스템 모델의 수행 등을 위해서는 엄청난 양의 계산량이 요구되며 이는 첨단 기법들을 이용한 슈퍼컴퓨팅을 적용하여야 할 문제들이다. 이러한 맥락에서 기상청의 슈퍼컴퓨터 2호기의 도입은 중요한 의미를 가지며 향후 기상선진국으로의 도약을 위한 기본을 마련한 것이라 볼 수 있다. 다만 좋은 성능의 슈퍼컴퓨터 도입이 예보의 정확성을 높이는 것과 직결되지는 않으므로 향상된

계산 능력 및 자원을 백분 활용하여 예보의 정확성을 높이기 위해 현업 수치모델의 향상과 첨단 자료동화기법 및 앙상블 예보 시스템의 적용 등에 대해 더욱 많은 투자가 이루어져야 할 것이다. 또한 더 나은 초기조건의 생산을 위한 관측시스템의 개발과 보완에도 투자를 아끼지 않아야 할 것이며, 국제적인 관측프로그램에도 적극 참여하여 양질의 자료들을 확보하도록 하여야 할 것이다.

4. 참고문헌

- Bjerknes, V., 1904: Das problem der wettervorhersage, betrachtet vom stanpunkt der mechanik und der physik. *Meteor. Zeits.*, **21**, 1-7.
- Charney, J. G., R. Fjørtoft, and J. von Neuman, 1950: Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, **2**, 237-254.
- Kalnay, E., 2003: *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. Cambridge University Press, 341 pp.
- Monmonier, M., 1999: *Air Apparent*. The University of Chicago Press, 309 pp.
- Park, S. K. and D. Županski, 2003: Four-dimensional variational data assimilation for mesoscale and storm-scale applications. *Meteor. Atmos. Phys.*, **82**, 173-208.
- Richardson, L. F., 1922: *Weather prediction by numerical process*. Cambridge University Press, 236 pp.
- Thompson, P. D., 1973: The role of computers in developments of numerical weather prediction. *Atmospheric Technology*, No. 3, NCAR, 13-16.