

기상/기후 연구 및 예보 기관의 슈퍼컴퓨터 보유 역사와 현황

조민수*

한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅센터
(2006년 4월 10일 접수; 2006년 5월 26일 승인)

The History and Current Status of the Supercomputers in Institutions for Research and Forecast of Weather/Climate

Minsu Joh*

Supercomputing Center
Korea Institute of Science and Technology Information
(Manuscript received 10 April 2006; in final form 26 May 2006)

Abstract

A revolution in weather and climate forecasting is in progress. This has been made possible as a result of theoretical advances in our understanding of the predictability of weather and climate, and by the extraordinary developments in supercomputer technology. New problem areas have been discovered and different solutions have been found by the recent high performance computers whose performance has been increased rapidly. Such advances in the computational performance may change the strategy of development of numerical models and prediction methods. This paper discusses a brief history and current status of the supercomputers in institutions for research and forecast of weather/climate. The main purpose of this study is to provide the preliminary information about supercomputers such as architecture of system and processor. Such information would be useful for meteorologists to understand the features and the preference of super-computers in each institution.

Key words: predictability, processor architecture, supercomputer technology, system architecture, weather and climate research institutions

1. 서 론

오늘날 일반적으로 슈퍼컴퓨터를 분류하는 기준으로 사용되는 자료는 전 세계 최고의 성능을 가진 500대의 고성능컴퓨터에 관한 자료가 집계되어서 발표되고 있는 Top500 목록이다 (TOP500, 2006a). Top500 목록에 포함되는 고성능컴퓨터의 순위는 미국 Tennessee 대학교의 Dongarra 교수가 컴퓨터의 계산 성능을 측정하는 방법으로 제안한 LINPACK 벤치마크를 수행한 결과를 비교하여 결정된다. LINPACK은 선형 시스템의 해를 구하는 데 널리 사용되는 연산 패키지로서

연산의 많은 부분이 부동소수점 연산으로 구성되어 있다 (Petitet *et al.*, 2004).

Top500 목록에 포함된 고성능컴퓨터를 범용컴퓨터와 구분하여 슈퍼컴퓨터라고 부르는데, Top500 목록에는 500대의 고성능컴퓨터 각각에 대하여 설치 장소, 시스템 제조 업체명, 시스템 제품명, 프로세서 개수, 설치 년도, 이론 성능, 실제 성능의 정보가 포함되어 있다. 전 세계 500대 슈퍼컴퓨터에 대한 유용한 정보를 제공하는 Top500 목록은 1993년 이래로 매년 두 차례 (6월과 11월)씩 독일과 미국에서 각각 개최되는 슈퍼컴퓨팅 관련 학회에서 발표되고 있으며, Top500 슈퍼컴퓨터 사이트 (TOP500, 2006b)의 데이터베이스를 통해서도 제공되고 있다. 2006년에는 6월에 독일 Dresden에서 개최되는 국제슈퍼컴퓨터학회 (International Supercomputer Conference; ISC, 2006)에서 제27차 Top500 목록이, 그리고 11월에 미국 Tampa에서 개최되는 슈

*Corresponding Author: Minsu Joh, KISTI Supercomputing Center, P. O. Box 122, Yuseung, Daejeon, Korea.
Phone : +82-42-869-0557, Fax : +82-42-869-0599
E-mail: msjoh@kisti.re.kr

퍼컴퓨팅학회 (Supercomputing Conference; SC, 2006)에서 제28차 Top500 목록이 각각 발표될 예정이다.

가장 최근인 2005년 11월에 미국 Seattle에서 개최된 슈퍼컴퓨팅학회에서 발표된 제26차 Top500 목록에 따르면, 세계 최고 성능의 슈퍼컴퓨터는 미국 에너지성 산하 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory)이 보유하고 있는 IBM BlueGene/L이다. 이 슈퍼컴퓨터는 총 131,072개의 프로세서로 구성되어 있고, 2005년에 설치되었으며, 이론 성능은 367,000기가플롭스 (Giga floating point operations per second, 1초에 10억 번의 부동소수점 연산 수행)이고, LINPACK 벤치마크를 통해 측정된 실제 성능은 280,600기가플롭스이다. 한편 Top500 목록의 500위 슈퍼컴퓨터의 실제 성능은 약 1,646기가플롭스인데, 이것이 현재 슈퍼컴퓨터를 범용컴퓨터와 구분하는 일반적 기준으로 사용되고 있다. 단일 프로세서의 성능 향상과 단일 시스템을 구성하는 프로세서의 개수가 증가함에 따라 고성능컴퓨터의 성능도 향상되었고, 이에 따라 슈퍼컴퓨터를 정의하는 기준도 시간이 흐름에 따라 상향 조정되어 왔는데, 1993년 6월에 발표된 제1차 Top500 목록의 500위 슈퍼컴퓨터의 실제 성능 (0.422기가플롭스)을 가장 최근의 500위 슈퍼컴퓨터의 실제 성능과 비교했을 때 지난 13년간 슈퍼컴퓨터를 정의하는 기준이 약 4,000배 가량 상향 조정되었음을 알 수 있다.

기상/기후의 연구 및 예보 (research and forecast of weather/climate) 분야 (이하 WCR 분야라 함)는 수치모형을 이용하여 해결하고자 하는 계산 문제의 정확한 해를 얻기 위해서 뿐만 아니라 많은 데이터를 빠르게 처리하기 위해서 슈퍼컴퓨터를 필요로 하는 대표적인 슈퍼컴퓨팅 응용 연구 분야이다 (Foster, 1995). WCR 분야의 슈퍼컴퓨터 보유 기관의 공통점은 각 기관의 임무가 연구개발이거나 예보현업인 것에 관계없이 기상 및 기후 현상을 정확하게 이해하고, 신속하고 정확한 예측을 목표로 수치모형의 개선에 노력하고 있고, 그러한 노력에 슈퍼컴퓨터를 활용하고 있다는 점이다. 수치모형 성능 향상, 예보의 정확도 향상 등은 각 기관에서 활용 가능한 슈퍼컴퓨터의 성능 규모, 프로세서 아키텍처 또는 시스템 아키텍처의 특징 등에 영향을 받는다. 예를 들면, FSL의 MacDonald 박사는 2000년에 개최된 제9차 ECMWF 워크숍 발표를 통해서 미래 기상/기후 예측 분야의 발전에 기여할 중요한 기술의 하나로 첨단 컴퓨팅 기술과 그 역할에 대해 논의한 바 있고 (MacDonald, 2000), DWD의 Hoffmann 교수는

2002년에 개최된 제10차 ECMWF 워크숍 발표를 통해서 과거 18년 동안 슈퍼컴퓨터 성능이 약 10^4 배 향상되었음을 지적하고 이것이 ECMWF 계산 성능 향상에도 영향을 미쳤음을 밝힌 바 있다 (Hoffmann, 2002). 또한 ESC와 같이 벡터 슈퍼컴퓨터를 보유한 기관에서는 수치모형의 벡터 최적화에 대한 노력을 기울이며 (Shingu *et al.*, 2002), 병렬 슈퍼컴퓨터를 보유한 기관에서는 수치모형의 병렬코드 개발 및 병렬효율 향상에 대한 노력을 더욱 기울이게 되는데, UKMO와 같이 공유메모리 시스템을 보유한 기관에서는 공유메모리 프로그래밍 모델인 OpenMP를 이용한 수치모형 개발에 적극적이며 (Ford and Burton, 2000), 분산공유메모리 시스템을 보유한 기관에서는 OpenMP와 분산메모리 프로그래밍 모델인 MPI를 이용한 수치모형 개발에 적극적이다 (Hamrud *et al.*, 2002).

이 연구는 WCR 분야의 슈퍼컴퓨터 보유 추이 분석 연구 (조민수 · 박혜선, 2005)가 국가별 특징을 분석하는 데 초점을 둔 것과 달리 WCR 분야의 슈퍼컴퓨터 보유 주요 기관을 대상으로 삼아, (1) 각 기관이 과거 13년 동안 보유했던 슈퍼컴퓨터를 프로세서 아키텍처, 시스템 아키텍처, 프로세서 개수 등의 관점에서 비교 분석하고, (2) 각 기관이 연도별로 슈퍼컴퓨터를 어떻게 운영해 왔는지를 사이트 효율성 관점에서 비교 분석하여, 각 기관의 슈퍼컴퓨터 보유 역사와 현황에서 드러나는 시스템의 구조적 특징과 특정 시스템에 대한 기관의 선호도를 파악함으로써 각 기관의 슈퍼컴퓨터 확보 전략 및 활용 전략을 이해하는 데에 목적이 있다.

2. 자료 및 분석 방법

2.1 자료

이 연구에서는 1993년 6월부터 2005년 11월까지 지난 13년간 총 26차례 발표된 Top500 목록에서 기본적으로 제공되는 슈퍼컴퓨터의 실제 성능 (Rmax), 이론 성능 (Rpeak), 프로세서 개수 등을 기초자료로 사용하였다. 이 밖에 분석에 필요한 2차 가공자료는 Top500 슈퍼컴퓨터 사이트에서 제공하는 자체 통계처리 시스템을 이용하여 재생산한 자료를 사용하였다. Top500 목록은 2005년 11월 기준으로 총 26개의 응용분야로 분류하고 있고, 이 가운데 이 연구의 대상이 되는 기상/기후 연구 및 예보 분야는 각각 독립적으로 자료를 제공하고 있다. 그런데 예보 분야의 자료가 별도로 제공

되기 시작한 것이 2001년 6월이며, 현재까지 예보 분야에 포함되었던 기관은 NCEP 한 개 기관이었기에 이 연구에서는 두 분야를 따로 구분하지 않았다.

2.2 분석대상 기관

총 26차의 Top500 목록에 기관이 보유하고 있는 고성능컴퓨터가 WCR 분야의 슈퍼컴퓨터로 등재된 적이 한 차례 이상 있는 기관은 총 31개 기관이다. 이 가운데 2000년도 이전에 한 차례 이상 등재되었지만 현재 사이트 정보가 없는 3개 기관(독일의 DLR, 미국의 NBS, 독일의 GEOVOR)을 제외시키고, 일본의 ESC와 덴마크의 DMI를 포함시켜 총 30개 기관을 1차 분석대상 기관으로 삼았다. ESC는 해당기관이 보유하고 있는 지구 시뮬레이터가 현재 Top500 슈퍼컴퓨터 사이트에서 제공하는 통계처리 시스템에서는 불특정 분

야(not specified)의 시스템으로 분류되고 있지만, 실제로 고해상도 대기, 해양, 대기/해양 접합 대순환 모형 등의 개발에 활용되고 있고 대기와 해양 분야의 주요 현상에 대한 예보 및 이해를 위한 연구 분야에도 적극적으로 활용되고 있기 때문에 포함시켰다. DMI의 경우는 명백히 WCR 분야에 포함되는 기관임에도 Top500 목록에서 분류상 누락되어 있었기에 포함시켰다. 그리고 1차 분석대상 기관에는 미국의 GSFC도 포함되어 있는데 현재 GSFC가 보유하고 있는 슈퍼컴퓨터가 WCR 분야가 아닌 항공우주 분야로 분류되고 있으나 과거 WCR 분야로 분류된 적이 있었고 현재도 보유하고 있는 슈퍼컴퓨터의 일부가 WCR 분야에 활용되고 있기에 1차 분석대상 기관에 포함시켰다. Table 1은 총 30개의 1차 분석대상 기관의 보유 시스템이 Top500 목록에 등재된 차수와 슈퍼컴퓨터 대수를 보인 것이다. 한 차례도 빠짐없이 Top500에 등재된 시스템을 보

Table 1. The total number of supercomputing systems and institutes ranked in the weather and climate research areas in the Top500 list from 1993 to 2005.

TOP500 list	Institute ID																															Total No. of the ranked in the list	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	System	Institute
1	Jun. 1993	1		1		3	1	1	1			2	1	2		1					1	1	3		1	2	1	2	25	17			
2	Nov. 1993	1		1		3	1	1	1			2	1	2	1	1					2	1	4		1	2	1	2	28	18			
3	Jun. 1994	1		1		2		1	1			1	1	2	1	1				1	2	1	2		2	1	1	1	23	18			
4	Nov. 1994	2				2		1	2			1	1	1	1	1				1	2	1	4		2	1	1	1	25	17			
5	Jun. 1995	2			1	2			2			1	1	1	1	1				1	1	2	5	1	3	1	1	27	17				
6	Dec. 1995	3			1	1			2			1	1	2	1	1	1			1	1	1	2		2		1	22	16				
7	Jun. 1996	3			1	1	1		2			1	1	2					1	1	1	1	3	1	2		1	23	16				
8	Nov. 1996	3			1	1	1		3			1	2	3					1	1	1	2	1	1	1	1	2	25	16				
9	Jun. 1997	3				1	1		5			3	1							1		4	2	1				22	10				
10	Nov. 1997	2				1	1	1	2			2	1							1		4	1	1			1	18	12				
11	Jun. 1998	1		1		1	1	1	2			1	2	1						1		1	4	1	1		1	20	15				
12	Nov. 1998	1		1		1	1	1	3			2	2						1		1	3	2				1	19	12				
13	Jun. 1999	1		1			1	1	2			2	2						1	1	1	4	1	1	1		1	21	15				
14	Nov. 1999	2	1		1			1	2			2	1						1	1	2	4	2	1	1		1	2	25	16			
15	Jun. 2000	2	1	1				1	3			1	1	1						2	1	2	2	2	1	1		1	2	27	18		
16	Nov. 2000	2	1			1	1	3			1	1	1	2					1	1	1	2	2	3	1	1		1	2	28	19		
17	Jun. 2001	2	1			1	1	3			1	1	2	2					1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2	28	19		
18	Nov. 2001	2	1			2	3				1	1	4	2					1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2	31	19		
19	Jun. 2002	2	1		1	2	2	1			1	1	3	3					1	2	1	1	1	1	1	2		1	2	30	20		
20	Nov. 2002		1		1	2	4	1			1	2	5	3					1	1	1	1	1	2	2	4		1	2	36	19		
21	Jun. 2003	1			1	1	1	2	1		2	1	5	2					1	1	2	1	2	2	3			3	32	18			
22	Nov. 2003			1	1	1	2	1			1	1	5	2	1				1		1	1	2	2	3			4	30	17			
23	Jun. 2004	1	1			1	1	4	1		2	1	2						1		1		3	2	2			2	25	15			
24	Nov. 2004		1	1	1		1	2	1		1	1	2	2						1	1		4	1	4			2	26	16			
25	Jun. 2005			1	1		2	2	1		1	1	7	1	1					2	1		4	2	4			1	32	16			
26	Nov. 2005			1		2	2	1	1	1	1	3	1	1						1	1		3	3	4			1	27	16			

1. AES, 2. AFWA, 3. AGB, 4. BOM, 5. CMA, 6. DKRZ, 7. DMI, 8. DWD, 9. ECMWF, 10. ESC, 11. FMI, 12. FNMOC, 13. FSL, 14. GFDL, 15. GSFC, 16. INM, 17. INPE, 18. JMA, 19. KMA, 20. MRI 21. Meteo-France, 22. MSC, 23. NAVOCEANO, 24. NCAR, 25. NCEP, 26. NIWAR, 27. NOAA, 28. NPSF, 29. TCWB, 30. UKMO

Table 2. Selected institutes for the analysis. The figure in the parenthesis means the total numbers ranked in the Top500 lists from 1993 to 2005.

Continents	Asia-Oceania		Americas		Europe	
	Institute	Country	Institute	Country	Institute	Country
Selected Institute	BOM(14)	Australia	AFWA(8)	USA	DKRZ(18)	Germany
	CMA(8)	China	FNMO(21)	USA	DMI(11)	Denmark
	ESC(8)	Japan	FSL(11)	USA	DWD(21)	Germany
	JMA(16)	Japan	GFDL(25)	USA	INM(8)	Spain
	KMA(10)	Korea	GSFC(26)	USA	ECMWF(26)	UK
	MRI(19)	Japan	MSC(8)	Canada	Meteo-France(20)	France
	TCWB(11)	Taiwan	NAVOCEANO(26)	USA	UKMO(25)	UK
			NCAR(26)	USA		
			NCEP(20)	USA		
			AES(14)	Canada	FMI(1)	Finland
Non-Selected Institute	None		INPE(6)	Brazil	AGB(1)	Germany
			NIWAR(6)	USA		
			NOAA(8)	USA		
			NPSF(5)	USA		

유했던 기관은 미국의 GFDL, GSFC, NAVOCEANO, NCAR이다. 차수별로 Top500 목록에 등재된 시스템을 보유하고 있던 기관은 최저 10개 (9차 Top500 목록)에서 최고 20개 (19차 Top500 목록)이며 평균 16개 기관이다.

Table 2는 Table 1에 보인 1차 분석대상 기관을 아시아-태평양, 아메리카, 유럽의 세 개 지역으로 분류하고, 총 26개의 Top500 목록 중에 각 기관이 보유한 시스템이 등재된 횟수를 괄호 안에 표기하여 지역별, 기관별, 등재 빈도를 정리한 것이다. 이때 등재 횟수는 각 기관의 등재된 시스템의 대수와는 관계없이 차수별로 1회만 인정하였다. Table 2를 이용하여, 이 연구의 최종 분석대상으로 선정된 기관은 8차례 이상 등재된 적이 있는 기관이며, 이러한 기준에 해당하지만 기관 명칭이 바뀌었거나 더 이상 존재하지 않는 경우 (캐나다의 AES)와 Top500 목록에서 더 이상 WCR 분야로 분류되지 않는 기관 (미국의 NOAA)은 제외하였다. 1차 분석대상 30개 기관 중에서 등재 횟수가 8회 미만인 기관은 5개 기관이며, 따라서 최종 분석대상 기관은 총 23개 기관이다.

2.3 프로세서 아키텍처 및 시스템 아키텍처 분석방법

지난 30년간 고성능 프로세서의 아키텍처는 CISC (complex instruction set computer), RISC (reduced instruction set computer), 벡터 (vector), VLIW (very long instruction word)와 같이 크게 네 가지 형태로 발

전되어 왔으며, 슈퍼컴퓨터 제작에 사용되는 프로세서는 기본적으로 이 네 가지 유형 가운데 하나에 포함된다 (Wadleigh and Crawford, 2000). Top500 슈퍼컴퓨터 사이트에서는 CISC, RISC, VLIW를 구분하지 않고 있으며, 이 때문에 Fig. 1에 보인 바와 같이 프로세서 아키텍처가 초기에는 SIMD (single instruction-multiple data), 벡터, 스칼라의 세 가지로만 구분되다가 1997년 6월 이후로는 SIMD 프로세서가 더 이상 존재하지 않게 됨으로써 현재는 벡터와 스칼라의 두 가지로만 구분되고 있다. Fig. 1은 응용 분야에 대한 구분을 두지 않고 전체를 대상으로 한 프로세서 아키텍처의 추이를 보여 주고 있는데, 이 그림으로부터 제4차 Top500 목록을 기점으로 스칼라 프로세서 시스템의 대수가 벡터 프로세서 시스템의 대수를 능가하여 그 격차가 점점 커지고 있으며, 실제 성능과 이론 성능 총합 역시 스칼라 시스템이 벡터 시스템을 능가하여 전체 성능의 대부분을 스칼라 시스템이 차지하고 있음을 알 수 있다. 시스템 아키텍처의 경우에는 Fig. 2에 보인 바와 같이 단일 프로세서, SIMD, MPP (massively parallel processing), SMP (symmetric multi processing), 성운 (constellations), 클러스터 (cluster)의 여섯 종류로 구분되고 있는데, 1997년을 기점으로 단일 프로세서와 SIMD 시스템은 사라지고, 클러스터 시스템이 등장하여 현재는 MPP, 성운, 클러스터의 세 종류로 구분되고 있다. 시스템 대수와 이론 성능으로 보면 클러스터, MPP, 성운의 순서로 크며, 실제 성능과 프로세서 개수는 MPP, 클러스터, 성운의 순서로 많다.

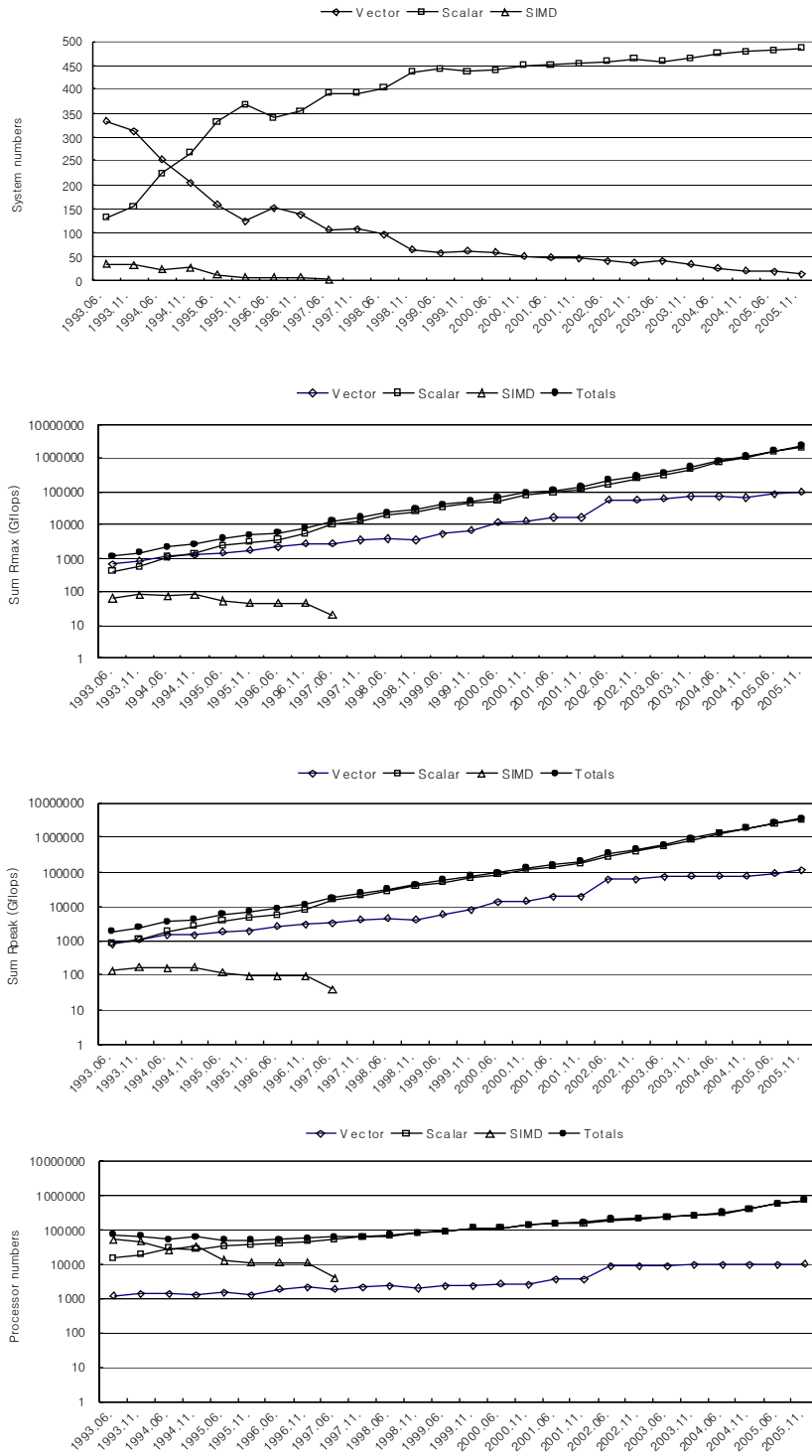


Fig. 1. History of the processor architecture development in the Top500 list from 1993 to 2005.

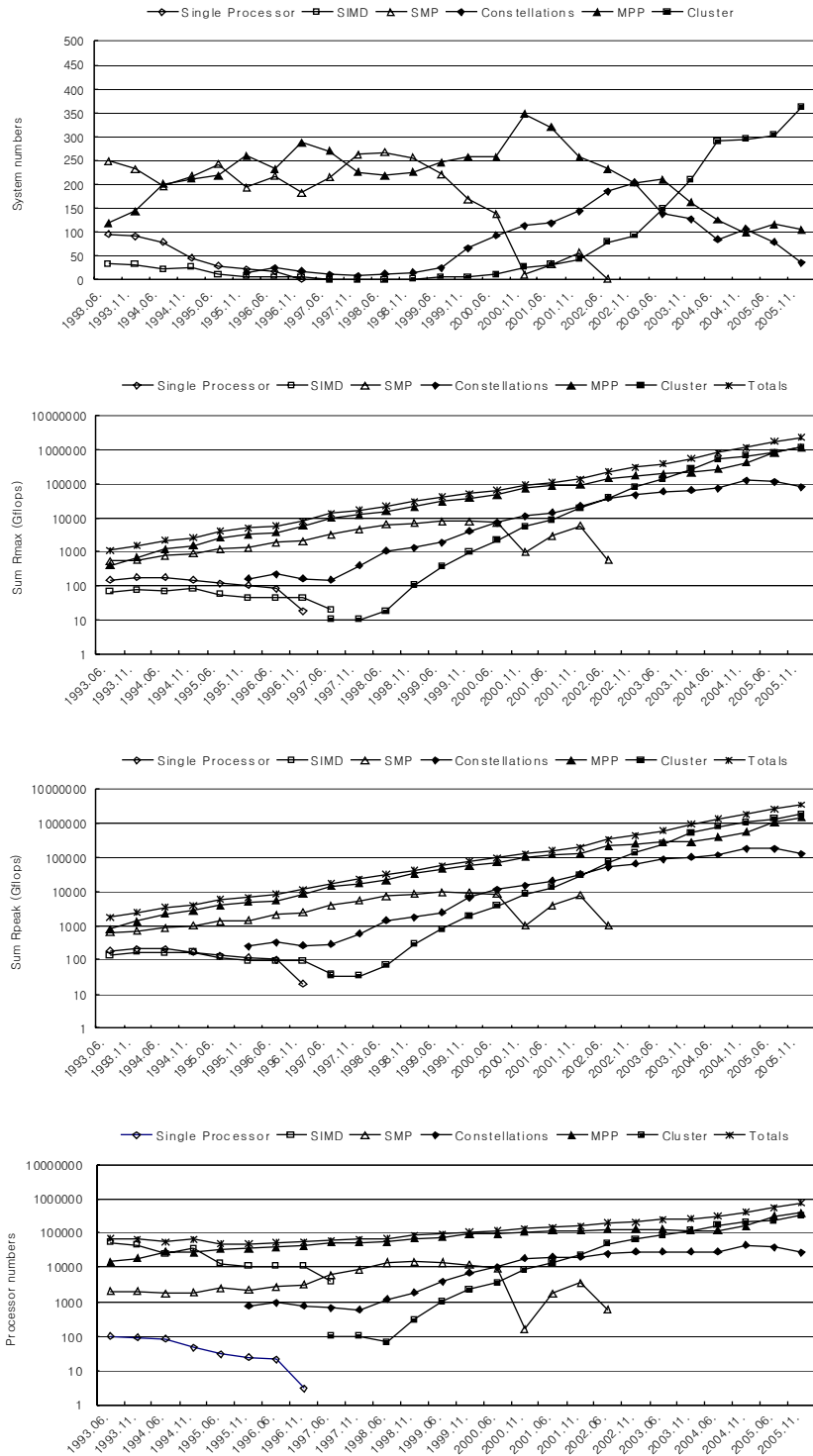


Fig. 2. Same as in Fig. 1 but for the system architecture.

3. 분석결과

3.1 프로세서 아키텍처와 시스템 아키텍처의 특징

지난 13년간 발표된 Top500 목록에서 WCR 분야로 분류된 슈퍼컴퓨터 기종을 프로세서와 시스템 아키텍처 유형에 따라서 구분하면 Table 3과 같다. 대표적인 슈퍼컴퓨터 제조업체로 Cray, Fujitsu, HP, IBM, NEC, SGI 등이 있는데, WCR 분야에서 활용된 슈퍼컴퓨터를 보면 Fujitsu와 NEC의 벡터 프로세서 시스템, HP, IBM, 그리고 SGI의 스칼라 프로세서 시스템, Cray와 Hitachi의 벡터와 스칼라 시스템이 다양하게 이용되어 왔다. 이들 이외에, MasPar, TMC, HPTi가 제작 공급한 시스템이나 자체적으로 제작한 시스템이 이용된 경우도 있다. 시스템 아키텍처로 구분할 때, NEC SX-4/SX-5 시리즈, SGI의 Origin 2000 시리즈는 SMP 또는 성운으로 분류되고 있는데, 이것은

Top500 슈퍼컴퓨터 사이트에서 이들 시스템이 단일 노드로 구성되었으면 SMP로, 2개 노드 이상으로 구성되었으면 성운으로 분류하고 있기 때문이다. WCR 분야에서는 단일 프로세서 시스템이나 SIMD 시스템을 보유하고 있던 기관이 거의 없었는데, 1995년 이전에 INPE가 단일 프로세서 시스템인 NEC의 SX-3/12R을, GSFC가 1993년에 SIMD 시스템인 MasPar MP-1216을 보유하고 있던 것이 전부라 할 수 있다.

Table 4는 23개 분석대상 기관의 과거와 현재 보유 시스템의 특징을 기관별, 시스템 아키텍처별, 프로세서 아키텍처별로 정리한 것이다. 현재 벡터와 스칼라로만 구분되고 있는 프로세서 아키텍처로 분류된 결과를 보면 각 기관이 선호하는 프로세서 아키텍처가 뚜렷하여, 지난 13년간 BOM, ESC, INM, JMA, MRI-JMA, Meteo-France, TCWB, MSC, DMI의 9개 기관은 벡터 프로세서 시스템만 보유하고 있으며, 이와는 반대로 CMA, FSL, NCEP의 3개 기관은 스칼라 프로

Table 3. Processor and system architectural classifications of the supercomputers used in the weather and climate research and weather forecasting areas from 1993 to 2005.

System Architecture	Processor Architecture	
	Vector	Scalar
Single Processor	Cray Y-MP C92A NEC SX-3/12, SX-3/14	None
SIMD (Single-Instruction Multiple-Data)	None	MasPar MP-1216
SMP (Symmetric Multi Processing)	Cray 2s, Cray3 series Cray J90, C90, T90 series Hitachi S-3800 NEC SX-3/44 NEC SX-4/8, SX-4/16, SX-4/32 NEC SX-5/16A	HP C3880 SGI Power Challenge SGI Origin 2000 series
Constellations	NEC SX-4/64, SX-4/128 NEC SX-5/24, SX-5/28, SX-5/32	HP AlphaServer 4100 SGI Origin 2000 series
MPP (Massively Parallel Processing)	Cray X1, X1E Fujitsu VPP300 series Fujitsu VPP700 series Fujitsu VPP5000 series NEC Earth Simulator NEC SX-6/64, SX-6/128	TMC CM-5/32 MasPar MP1 Cray T3D, T3E series Hitachi SR8000 series IBM SP1, SP2, SP Power series IBM pSeries 690, 655, p5 series IBM eServer Blue Gene solution SGI Origin 3000 series
Cluster	None	HPTi ACL series HPTi Aspen Systems Duel Xeon IBM xSeries Xeon IBM eServer Opeteron Self-Made P4-Xeon

Table 4. Preferences for processor architecture and system architecture in each institute from 1993 to 2005.

Continent	Institute	Processor Architecture		System Architecture				
		Vector	Scalar	SIMD	SMP	Constellation	MPP	Cluster
Asia-Oceania	BOM	●			●	●		
	CMA		●				●	
	ESC	●					●	
	JMA	●					●	
	KMA	●	●		●	●	●	
	MRI-JMA	●					●	
	TCWB	●			●		●	
Americas	AFWA		●				●	●
	FNMOC	●	●		●		●	
	FSL		●					●
	GFDL	●	●		●	●	●	
	GSFC	●	●	●	●			
	INM	●			●		●	
	MSC	●				●	●	
	NAVOCEANO	●	●		●	●	●	
	NCAR	●	●		●	●	●	●
NCEP		●		●		●		
Europe	DKRZ	●	●		●		●	
	DMI	●			●		●	
	DWD	●	●		●		●	
	ECMWF	●	●		●		●	
	Meteo-France	●			●		●	
	UKMO	●	●		●		●	

세서 시스템만 보유하였다. DKRZ, DWD, ECMWF, FNMOC, GFDL, GSFC, KMA, NAVOCEANO, NCAR, UKMO는 벡터와 스칼라 프로세서 시스템을 번갈아 또는 동시에 보유하였다. 시스템 아키텍처로 분류된 결과를 보면, 지금까지 SIMD 시스템을 보유했

던 기관은 1993년에 MasPar MP-1216을 보유했던 GSFC 한 개 기관뿐이다. 그리고 두 노트 이상의 SMP로 정의되는 성운 시스템은 BOM, GFDL, KMA, MSC, NAVOCEANO, NCAR의 6개 기관에서만 활용되었고 (Table 5), 역시 1997년 6월의 Top500 목록에

Table 5. Constellation systems used in the weather and climate research and weather forecasting areas from 1993 to 2005.

Institute	System	Proc.	Rmax (GF)	Rpeak (GF)	Top500 List
BOM	NEC SX-5/32M2	32	241.4	256.0	'00.11.~'02.11.
GFDL	SGI Origin3000 400MHz	896	151.2	716.8	'01.06.~'01.11.
KMA	NEC SX-5/24M2	24	181.0	192.0	'00.06.~'00.11.
	NEC SX-5/28M2	28	212.0	224.0	'01.06.~'02.11.
MSC	NEC SX-4/64M2	64	122.0	128.0	'06.06.~'01.11.
	NEC SX-5/32M2	32	241.4	256.0	'00.06.~'02.11.
NAVOCEANO	SGI POWER CHALLENGEarray	36	8.5	12.9	'97.06.
	SGI Origin2000	256	76.9	99.8	'00.06.~'00.11.
NCAR	HP AlphaServer 4100	32	17.9	39.2	'98.06.~'98.11.

처음 등재되기 시작한 클러스터 시스템을 WCR 분야에서 보유했던 기관은 FNMO, FSL, NCAR의 3개 기관에서만 활용되었다 (Table 6). 각 기관별 슈퍼컴퓨터 제조업체에 대한 선호도는 Table 7에 보인 바와 같다.

3.2 프로세서 개수

지금부터 20 여년 전인 1984년에 Hoffmann 교수의 제안으로 시작된 기상분야에서의 병렬 프로세서 활용 워크숍에서는 4개 이하의 프로세서를 어떻게 활용

할 것인지가 주된 관심이었는데 (Hoffmann, 2002), 지금은 시스템 아키텍처에 따라서 수십 개에서 수천 개의 프로세서로 다양하게 구성된 슈퍼컴퓨터가 이용되고 있다. Fig. 3은 각 기관의 이용 가능한 프로세서 개수의 변화 역사를 보인 것인데 GSFC는 대부분의 기관이 100개 미만의 프로세서를 이용하고 있을 때 이미 1,000개가 넘는 프로세서 장착 시스템을 사용하고 있었고, 1998년을 전후하여 WCR 분야에서 스칼라 시스템의 대수가 벡터 시스템의 대수보다 많아지면서 (조민수와 박혜선, 2005) 프로세서 개수가 1,000개를 넘어 가는

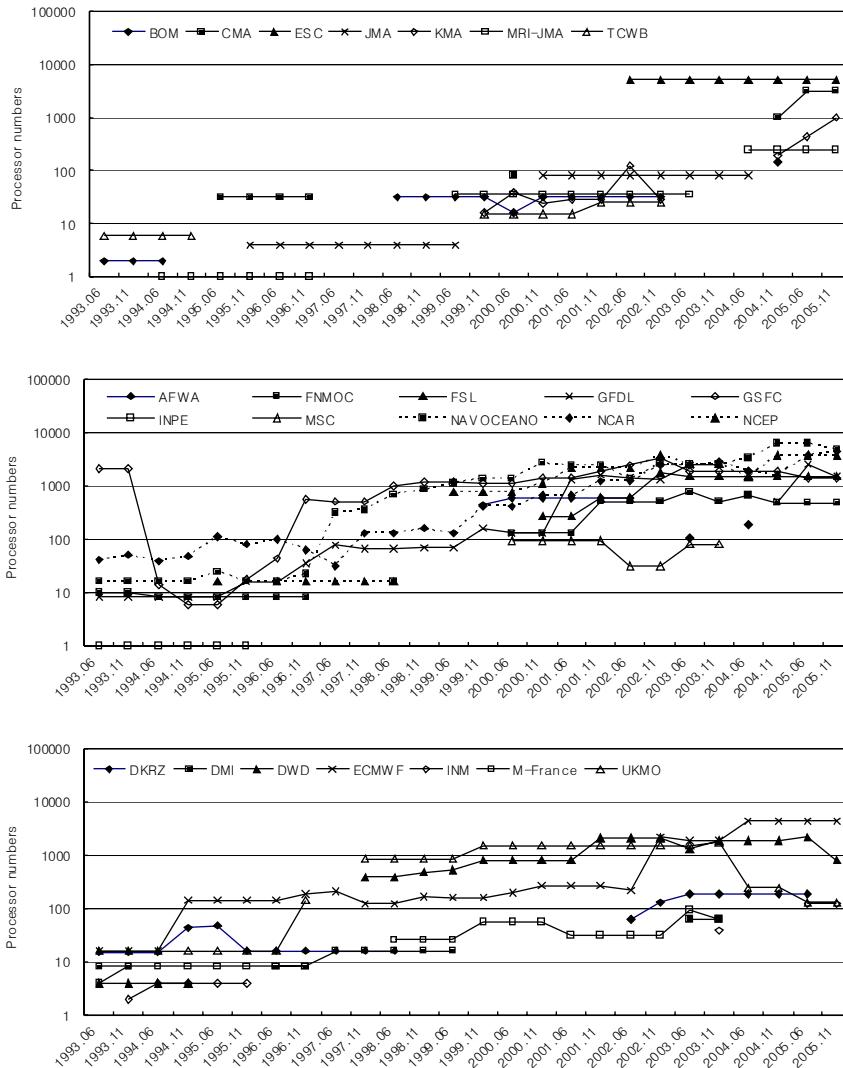


Fig. 3. History of the processor number in each institute. The upper panel is for the institutes located in Asia-Oceanian continent, the middle is for Americas, and the lower is for Europe, respectively.

Table 6. Cluster systems used in the weather and climate research and weather forecasting areas from 1993 to 2005.

Institute	System	Proc.	Rmax (GF)	Rpeak (GF)	Top500 List
FNMOC	IBM xSeries Xeon 2.8GHz-Myrinet	478	1649.7	2676.8	'04.06.~'05.11.
	HPTi ACL-276 667 MHz	276	196.0	368.0	'00.11.~'01.06.
FSL	HPTi ACL-580	580	442.7	841.0	'01.11.~'02.06.
	HPTi AS, Dual Xeon 2.2GHz-Myrinet2000	1536	3337.0	6758.0	'02.11.~'05.11.
	HPTi ACL-284	284	216.0	411.8	'02.11.
NCAR	IBM eServer Opteron 2.2GHz-Myrinet	256	769.4	1126.4	'04.06.

Table 7. Preferences for vendor in each institute.

Continent / Site		Vendor	Cray	Fujitsu	Hitachi	HP	IBM	NEC	SGI	Self made	Etc.
Asia-Oceania	BOM		●					●			
	CMA						●				
	ESC							●			
	JMA				●						
	KMA		●			●		●			
	MRI-JMA				●			●			
	TCWB		●	●							
Americas	AFWA						●				
	FNMOC		●				●		●		
	FSL										HPTi
	GFDL		●						●		
	GSFC		●			●	●		●	●	MasPar
	INM		●								
	MSC							●			
	NAVOCEANO		●				●		●		
	NCAR		●			●	●		●		TMC
	NCEP						●				
Europe	DKRZ		●			●		●			
	DMI					●		●			
	DWD		●				●				
	ECMWF		●	●			●				
	Meteo-France		●	●							
	UKMO		●					●			

기관의 수가 늘어나고 있다. WCR 분야에서 제26차 Top500 목록에 포함된 기관수는 16개인데 이 가운데 9개 기관이 1,000개 이상의 프로세서를 이용하고 있다.

3.3 사이트 효율성

Top500 슈퍼컴퓨터 사이트는 자체 데이터베이스 시스템을 통해 다양한 자료를 제공하고 있는데, 사이트 효율성 자료도 그 중의 하나이다. 사이트 효율성은 각

사이트가 보유한 슈퍼컴퓨터의 이론 성능과 실제 성능의 비를 백분율로 나타낸 것이다. Table 8은 Top500 슈퍼컴퓨터 사이트가 제공하는 사이트 역사 총괄표의 한 사례를 보인 것으로, 대상 사이트는 KMA이다. KMA는 14차 Top500 목록부터 등장하고 있는데, KMA의 사이트 효율성은 82.90% (최저값), 96.09% (최고값) 사이에서 변하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4 에서 Fig. 6 까지는 23개 분석 대상 기관의 사이트 효율성 추이를 실제 성능과 이론 성능의 추이와

함께 보인 것이다. Table 9는 Fig. 4에서 Fig. 6 까지 나타나는 특징을 요약한 것으로, 각 기관의 사이트 효율성을 최저값, 최고값, 최근값, 평균값을 제공하고 있다. 각 기관의 평균값으로 비교했을 때 사이트 효율성이 가장 낮은 기관은 FSL (50.69%)이며, 가장 높은 기관

은 MSC (95.10%)이다. FSL의 사이트 효율성이 낮은 이유는 다른 기관과 달리 FSL은 스칼라 프로세서 장착 클러스터 시스템 (Table 6 참조)만을 보유해 왔기 때문이다. 반대로 MSC의 사이트 효율성이 높은 이유는 이론 성능 대비 실제 성능 효율이 스칼라 프로세서

Table 8. Site history of the KMA in the Top500 list.

List	Systems	Highest Ranking	Sum Rmax (GFlops)	Sum Rpeak (GFlops)	Site Efficiency(%)
26	1	16	15706.00	18442.00	85.16
25	2	80	5971.25	6962.56	85.76
24	1	87	2188.15	2406.40	90.93
20	1	354	212.00	224.00	94.64
19	2	252	360.80	435.20	82.90
18	1	142	212.00	224.00	94.64
17	1	112	212.00	224.00	94.64
16	1	100	181.00	192.00	94.27
15	2	73	304.00	320.00	95.00
14	1	76	123.00	128.00	96.09

Table 9. Summary of the site efficiency in each institute.

Continent / Site		Site Efficiency		Minimum value		Maximum value		Latest value		Mean value
		S. E. (%)	Top500 List	S. E. (%)	Top500 List	S. E. (%)	TOP500 List	S. E. (%)		
Asia-Oceania	BOM	88.09	2~3	98.09	24	98.09	24	94.16		
	CMA	16.15	24	77.19	8	47.38	26	59.13		
	ESC	87.55	19~26	87.55	19~26	87.55	26	87.55		
	JMA	88.75	6~13	90.01	16~23	90.01	23	89.38		
	KMA	82.90	19	96.09	14	85.16	26	91.40		
	MRI-JMA	88.54	13~21	96.55	23~26	96.55	26	91.48		
	TCWB	82.50	1~4	96.67	18~20	96.67	20	91.47		
Americas	AFWA	46.18	14	64.84	16~19	63.82	23	60.29		
	FNMOG	61.63	24~26	89.92	1~2	61.63	26	80.84		
	FSL	49.38	21~26	53.26	16~17	49.38	26	50.69		
	GFDL	23.99	17	93.39	26	93.39	26	73.02		
	GSFC	55.14	15	85.82	7	77.73	26	71.51		
	INM	82.99	25~26	91.48	22	82.99	26	86.39		
	MSC	94.30	19~20	96.39	21~22	96.39	22	95.10		
	NA VOCEANO	52.43	26	89.91	1~4, 6~7	52.43	26	71.55		
	NCAR	50.29	24	80.38	13	69.23	26	65.42		
NCEP	50.51	23	71.20	16~19	54.18	26	59.61			
Europe	DKRZ	79.01	1~2	96.72	19	96.61	25	90.57		
	DMI	83.33	1~2	97.19	10~13	96.72	22	94.25		
	DWD	63.75	10	87.19	26	87.19	26	70.60		
	ECMWF	51.28	21~22	90.48	9	55.88	26	77.23		
	Meteo-France	72.27	1	96.10	17~20	91.63	22	90.54		
	UKMO	56.92	10	98.49	25~26	98.49	26	78.84		

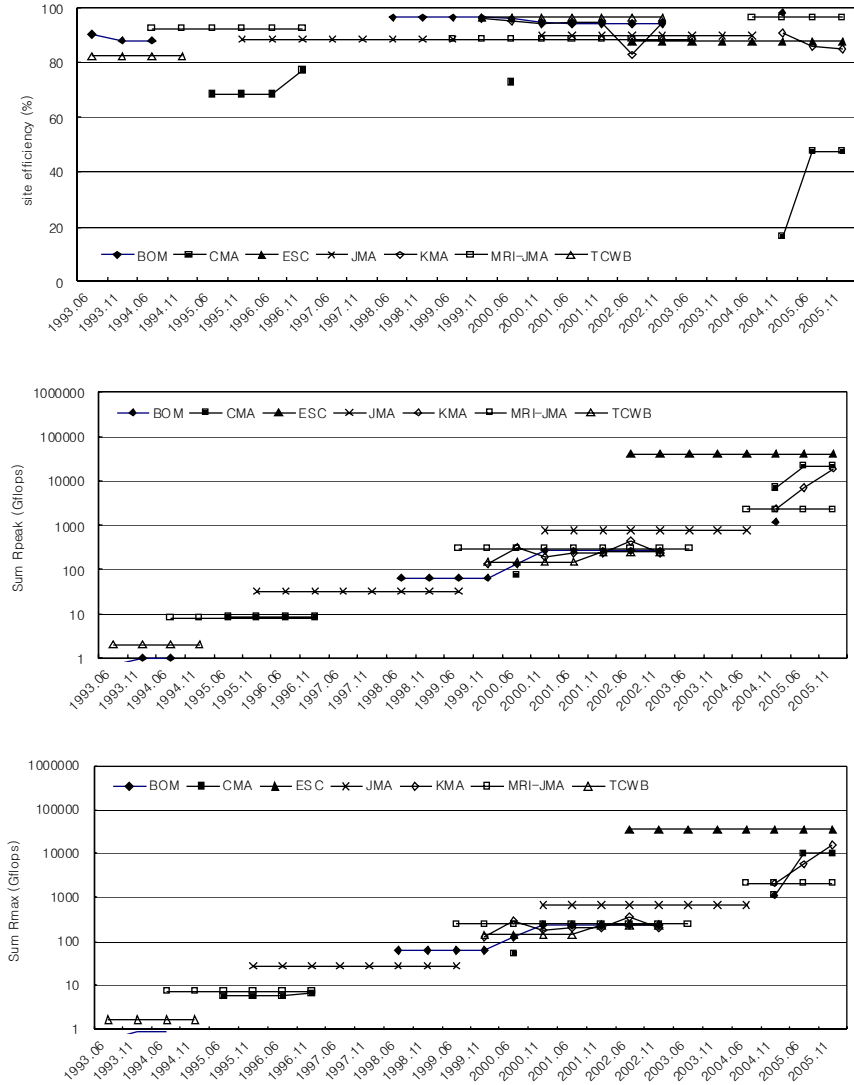


Fig. 4. History of site efficiency (the upper panel), theoretical performance (the middle), and real performance (the lower) in the institutions located in the Asia-Oceanic continent.

보다 우수한 벡터 프로세서 장착의 성운 시스템 (NEC SX-4/64M2, SX-5/32M2)과 MPP 시스템 (NEC SX-6/80M10)만을 보유해 왔기 때문이다. 평균값이 60%를 넘지 않는 기관은 CMA, FSL, NCEP의 3개 기관이며, 90%를 넘는 기관은 BOM, DKRZ, DMI, KMA, Meteo-France, MRI-JMA, MSC, TCWB의 8개 기관이다. 가장 낮은 사이트 효율성은 24차 Top500 목록 (2004년 11월 발표)에 CMA의 16.15%인데, 당시 도입한 IBM pSeries 655 1.7GHz 시스템을 충분히 최저

화시키지 못했었기 때문인 것으로 추정된다. 이러한 추정은 동일 시스템에 프로세서 개수만 확장시킨 이듬해에는 47.38%의 효율성을 보이고 있는 사실로부터 유추 가능하다. 가장 최근인 26차 Top500 목록을 기준으로 최고의 사이트 효율성은 UKMO의 98.49%인데, 이 값은 UKMO가 현재 NEC SX-8/248M31 단일 시스템만 운영하고 있기 때문에 이 시스템의 효율성이 그대로 반영된 값이다. 반대로 최저값은 CMA의 47.38%이다.

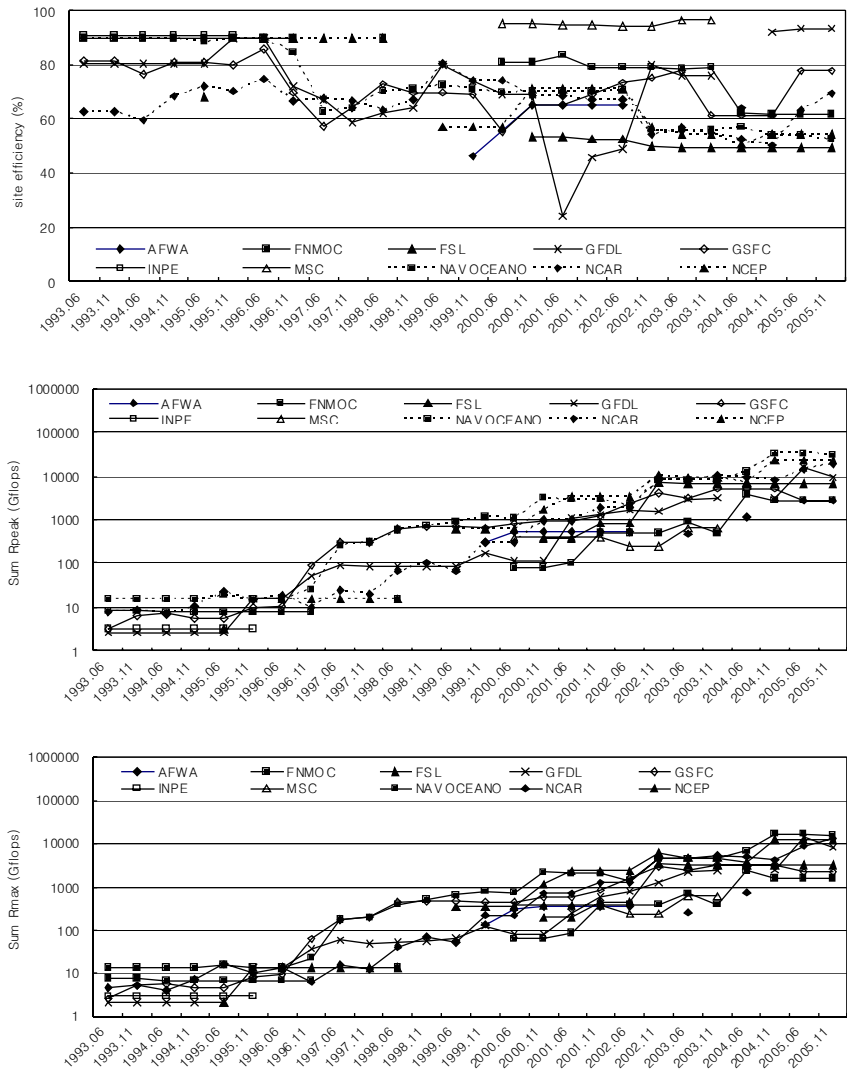


Fig. 5. Same as in Fig. 4 but for the Americas.

4. 결과 요약 및 제언

무어의 법칙을 따르는 단일 프로세서의 성능 향상과 여러 개의 프로세서를 하나의 시스템으로 구성하는 고성능컴퓨터 제조 기술의 발전은 컴퓨터의 성능 향상에 크게 기여하였다. 1946년에 인류 최초의 전자식 컴퓨터 에니악을 이용한 날씨 예측 실험이 수행된 이후로 기상과 기후 예보 분야에서 컴퓨터는 없어서는 안 될 매우 중요한 도구가 되었으며, 컴퓨터의 성능 향상과 더불어 예측 기술도 발전하여 왔다. Palmer는 기상

과 기후 예보 분야에 일대 혁명이 진행되고 있고, 그것이 가능한 이유로 기상과 기후의 예측성에 대한 우리의 지식이 이론적으로 고도화되었다는 사실과 슈퍼컴퓨터 기술이 놀라운 발전을 이루었기 때문이라고 언급한 바 있다 (Palmer, 2002).

이 연구는 기상과 기후 예보 분야의 예측성 향상에 절대적인 기여를 하고 있는 슈퍼컴퓨터를 기상과 기후 연구 및 기상 예보 기관이 지금까지 어떤 방향으로, 어떤 종류의 시스템을, 어느 정도의 규모와 효율성 높은 시스템으로 확보하고 이용해 왔는지를 조사하여 각 기

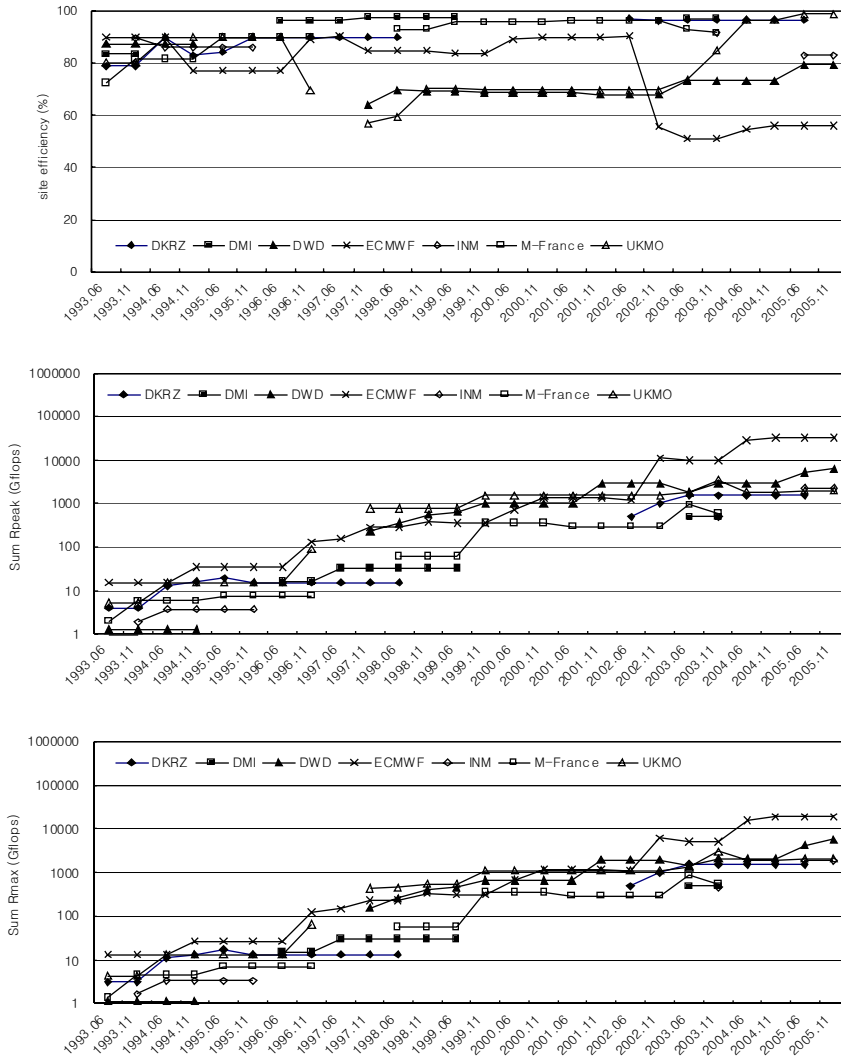


Fig. 6. Same as in Fig. 4 but for the European continent.

관의 과거 슈퍼컴퓨터 보유 역사를 통해서 현재를 이해하고 미래를 예측할 목적으로 추진되었다. 이 논문에는 Top500 목록과 Top500 슈퍼컴퓨터 사이트에서 제공되는 각종 통계 자료를 이용하여 분석 조건에 부합하는 23개 기관만을 선정하여 프로세서 아키텍처, 시스템 아키텍처, 프로세서 개수, 사이트 효율성 등 보유 슈퍼컴퓨터의 특성을 파악할 수 있는 기본 요소를 선정하여 비교 분석한 결과가 제시되고 있다.

프로세서 아키텍처와 시스템 아키텍처를 분석한 결과 중 대표적인 내용은 다음과 같다. (1) SIMD 프로세서 시스템은 1993년에 GSFC가 MasPar MP-1216을 보유했

던 것이 전부이고, BOM, ESC, INM, JMA, MRI-JMA, Meteo-France, TCWB, MSC, DMI의 9개 기관은 벡터 프로세서 시스템만, 반대로 CMA, FSL, NCEP의 3개 기관은 스칼라 프로세서 시스템만 보유하고 있다 (Table 4). (2) 성운 시스템은 BOM, GFDL, KMA, MSC, NAVOCEANO, NCAR의 6개 기관에서만 보유하고, 시스템 구성에는 NEC SX-4와 SX-5, SGI Origin2000과 Origin3000, SGI POWER CHALLENGEarray, 그리고 HP AlphaServer 4100의 3개 업체 6 종류가 활용되었다 (Table 5). 한편, 클러스터 시스템은 FNOC, FSL, NCAR의 3개 기관에서만 보유하고, 시스템 구성에는

HPTi ACL 시리즈와 Aspen 시스템 듀얼 Xeon 2.2GHz, 그리고 IBM xSeries Xeon 2.8GHz와 eServer Opteron 2.2GHz의 2개 업체 4 종류가 활용되었다 (Table 6).

프로세서 개수 및 사이트 효율성을 분석한 결과 중 대표적인 내용은 다음과 같다. (1) 1993년에 GSFC의 SIMD 시스템인 MasPar MP-1216가 2,048개의 프로세서로 구성된 것을 제외하면, 1998년 11월 이전에는 프로세서 개수가 1,000개를 넘어 가는 기관이 없었다. 2005년 11월 기준으로 여러 시스템을 운영하고 있는 기관일지라도 확보한 프로세서의 총 개수가 10,000개가 넘어 가는 경우는 없다(Fig. 3). 현재 이 분야 최고는 총 5,120개의 프로세서로 구성되어 있는 ESC의 지구 시뮬레이터이다 (TOP500, 2006c). (2) 평균값으로 비교했을 때 사이트 효율성이 가장 낮은 기관은 스칼라 프로세서 장착 클러스터 시스템만을 보유해 온 FSL (50.69%)이며, 반대로 가장 높은 기관은 벡터 프로세서 장착 시스템만 보유해 온 MSC (95.10%)이다 (Table 6). 평균값이 60%를 넘지 않는 기관은 CMA, FSL, NCEP의 3개 기관이며, 90%를 넘는 기관은 BOM, DKRZ, DMI, KMA, Meteo-France, MRI-JMA, MSC, TCWB의 8개 기관이다. 8개 기관 가운데 KMA를 제외한 7개 기관은 지난 13년간 벡터 시스템만을 도입한 기관이다. 사이트 효율성 최저값은 CMA의 16.15% (24차 Top500목록; TOP500, 2006a 참조)이고, 반대로 최고값은 UKMO의 98.49% (26차 Top500 목록; TOP500, 2006a 참조)이다. 2005년 11월 기준으로 사이트 효율성이 가장 낮은 기관은 CMA의 47.38%이다 (Table 9).

각 기관의 예측 모델의 특성은 개발 당시에 어떤 시스템을 보유하고 있으며, 차기 시스템이 어떤 특성을 가지게 될 것인지에 크게 영향을 받는다. 한 예로서, 1990년대에 벡터 시스템 (Cray Y-MP C90)에서 스칼라 시스템 (Cray T3E)으로의 변화를 추구하다가 2002년에 다시 벡터 시스템 (NEC SX-6)으로 바꾼 UKMO에서 기상 예보와 기후 예측에 이용되고 있는 수치모델 UM (unified model)의 개발 역사를 보면, 처음에는 Cray 벡터 프로세서의 공유 메모리 시스템에 최적화되어 순차 코드로 개발되었다가 Cray 스칼라 프로세서의 분산 메모리 시스템이 도입되었을 때에는 분산 메모리 환경에 맞도록 코드 병렬화 및 스칼라 프로세서 최적화가 진행되었고 다시 NEC 벡터 시스템이 도입되면서 벡터 프로세서 최적화가 추진되었다. Cray T3E에 대한 최적화를 추진하는 과정에서는 향후 벡터 시스템의 도입 가능성을 열어 두기 위하여 캐시 기반

최적화는 전략적으로 피하였다 (Burton, 2002). 이 연구를 통해서 제공되는 정보는 자체적으로 예측 모델을 개발하는 경우는 물론이고 다른 기관에서 개발된 예측 모델을 활용하고자 하는 경우에도 예측 모델의 특성을 이해하고 개발 전략을 수립하는 데 유용한 정보가 될 것으로 기대한다. 향후 분석에서는 UKMO의 사례와 같이 각 기관의 기상 및 기후 예측 모델의 전산적 특성이 보유 슈퍼컴퓨터의 특성과 어떻게 연관되어 있는지를 비교 분석하고자 한다.

참고문헌

- 조민수, 박혜선, 2005: 기상 및 기후 연구 분야의 슈퍼컴퓨터 보유 추이 분석. *대기*, **15**, 119-127.
- Burton, P., 2002: Vector returns: a new supercomputer for the Met Office. *Proc. 10th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, 19-28.
- Ford, R. W., and P. M. Burton, 2000: OpenMP in the physics proton of the Met Office model. *Proc. 9th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, 164-176.
- Foster, I., 1995: *Designing and Building Parallel Programs*. Addison-Wesley, 379pp.
- Hamrud, M., S. Saarinen, and D. Salmond, 2002: Implementation of the IFS on a Highly Parallel Scalar System. *Proc. 10th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, 74-87.
- Hoffman, G.-R., 2002: From Megaflops to Teraflops. *Proc. 10th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, 196-203.
- ISC, 2006: International Supercomputer Conference ISC2006. [Available online from <http://www.supercomp.de/>.]
- MacDonald, A. E., 2000: The role of advanced computing in future weather prediction. *Proc. 9th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, 240-250.
- Palmer, T. N., 2002: Predictability of weather and climate: From theory to practice-from days to decades. *Proc. 10th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, 1-18.
- Petit, A., R. C. Whaley, J. Dongarra, and A. Cleary, 2004: HPL - A Portable Implementation of the High-Performance Linpack Benchmark for Distributed-Memory Computers. Innovative Computing Laboratory, University of Tennessee. [Available online from <http://www.netlib.org/benchmark/hpl/>.]
- SC, 2006: SC06 - International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis. [Available online from <http://sc06.supercomputing.org/>.]
- Shingu, S. H. Fuchigami and M. Yamada, 2002: Vector

- Paralle programming and performance of a Spectral Atmospheric Model on the Earth Simulator. *Proc. 10th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, 29-46.
- TOP500, 2006a: TOP500 List Archive. [Available online from <http://www.top500.org/main/archive.php>.]
- _____, 2006b: TOP500 Supercomputer Sites. [Available on- line from <http://www.top500.org/>.]
- _____, 2006c: TOP500 List for November 2005. [Available online from <http://www.top500.org/lists/2005/11/>.]
- Wadleigh, K. R., and I. L. Crawford, 2000: *Software Optimization for High Performance Computing*. Prentice Hall International, Inc., 377pp.

약자 풀이

AES	Atmospheric Environment Service
AFWA	Air Force Weather Agency
AGB	Amt fuer Geoinformationswesen der Bundeswehr
BOM	Bureau of Meteorology
CMA	China Meteorological Administration
DKRZ	Deutsches Klimarechenzentrum
DMI	Danish Meteorological Institute
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECMWF	European Medium Range Weather Forecast
ESC	Earth Simulator Center
FMI	Finland Meteorological Institute
FNMOG	Fleet Numerical Meteorology and Oceanography
FSL	Forecast Systems Laboratory
GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GSFC	Goddard Space Flight Center
INM	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	National Institute for Space Research
JMA	Japan Meteorological Agency
KMA	Korea Meteorological Administration
MRI	Meteorological Research Institute
MSC	Meteorological Service of Canada
NAVOCEANO	Naval Oceanographic Office
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NIWAR	National Institute for Water and Atmospheric Research
NOAA	National Oceanic & Atmospheric Administration
NPSF	Navy POPS Supercomputing Facility
TCWB	Taiwan Central Weather Bureau
UKMO	United Kingdom Meteorological Office