



KISTI 슈퍼컴퓨팅 센터에서 수행중인 테라플롭스 클러스터 구축 및 개발에 관한 연구

*홍 정우*¹ 박형우*¹ 이상산*²

A project on building Tflops cluster at KISTI Supercomputing Center

Jeong Woo Hong, Hyungwoo Park and Sangsan Lee

A project has been initiated at KISTI Supercomputing Center at year 1999 to build a Tflops cluster in order to support newly emerging demands for larger scale parallel computing resources. As a supportive substitute of traditional supercomputers, the cluster systems are expected to play important role in supporting diversified computational needs. In this paper, KISTI Supercomputing Center's working status of building Tflops cluster system and future plans.

Key Words: 클러스터(Cluster), 그리드 컴퓨팅(Grid Computing), 테라플롭스(Tflops)

1. 서 론

PC급 컴퓨터들을 네트워크로 연결하여 슈퍼컴퓨팅 분야의 문제를 해결하려고 하는 클러스터 컴퓨팅의 시도는 그 뛰어난 가격대비성능으로 인해 커다란 주목을 받고 있다. 하지만 클러스터 컴퓨팅을 하기 위해 필요로 하는 일반적인 접근 방법과 클러스터 컴퓨팅을 위해 통상 사용되어지는 방법론들이 또 다른 이로운 점들을 제공함으로써 최근 주목받고 있는 분야들에 기본적인 컴퓨팅 방법론으로 자리 잡아 가고 있다.

클러스터 컴퓨팅이라는 방법론은 항상 있어왔던 연구비 부족이라는 해결하기 쉽지 않은 문제에 대한 경감책으로써, 특정한 분야의 문제들에 대해 저렴하고 효과적인 하드웨어적인 해결책이 되어주는 것 이외에 이를 위한 일반적인 사용자

환경으로 사용되는 Linux라는 공개/무료 OS가 흔히 접할 수 있는 거의 모든 종류의 컴퓨터에 이식되어 있고, 이에 따라 Linux 환경에서 개발된 프로그램 코드들이 Linux를 쓰는 다른 기계로 이식이 필요할 때 그 노력이 극히 감소된다는 점이 파생되어 또 다른 커다란 이점으로 작용하고 있다. 이는 여러 응용분야에서 수십 년간 사용되어오는 레거시코드들을 지속적으로 새로운 구조의 하드웨어에 이식할 때 드는 비용을 줄여주고, 다른 연구집단간의 공동연구에 흔히 발생하는 프로그램 코드 공유시에 발생하는 문제들에 상대적으로 좋은 조건을 마련하여 준다. 이런 장점들은 클러스터가 전통적인 분야 이외에 NT, MT, BT, ET 등 최근, 미래 산업으로 주목받고 있는 분야에서 주목받는 컴퓨팅 방법론이 되어 가도록 만들고 있으며, 이러한 예는 미국 NCSA, 영국의 ERCIM등의 활동에서 쉽게 찾을 수 있다.[1][3]

한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅센터에서는 이러한 움직임을 적절히 지원하기 위하여 1999년 파일럿 시스템 구축 등을 시작으로 클러

*¹ 한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅센터

*² 정회원, 한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅센터

스터 구축에 관한 기술 개발 연구를 수행해 오고 있으며, 개발된 기술을 확대 적용시켜 현재 운영되고 있고 2002년에 퇴역할 예정으로 있는 CrayT3E를 대체할 Tflops급 시스템을 구축하고 운영할 수 있는 기술 개발을 주제로 하는 연구를 수행하고 있다.[2] 본 논문에서는 이러한 계획과 수행해 온 연구결과와 현재 진행상황 등을 소개하고자 한다.

2. 테라클러스터 개발 계획

1999년도에 시작된 Tflops급 클러스터 구축을 위한 관련 연구는 초기 16노드 시스템을 FastEthernet을 기반으로 시험 구축한 것을 시작으로 한다. 이는 이미 1996년과 1997년에 슈퍼컴퓨팅센터에서 수행하였던 '벡터-병렬 슈퍼컴퓨팅 환경에서의 응용코드 최적화 기술개발연구'와 '병렬처리 시스템 활용 기술 개발연구'등을 통해 다수의 워크스테이션급 장비들을 네트

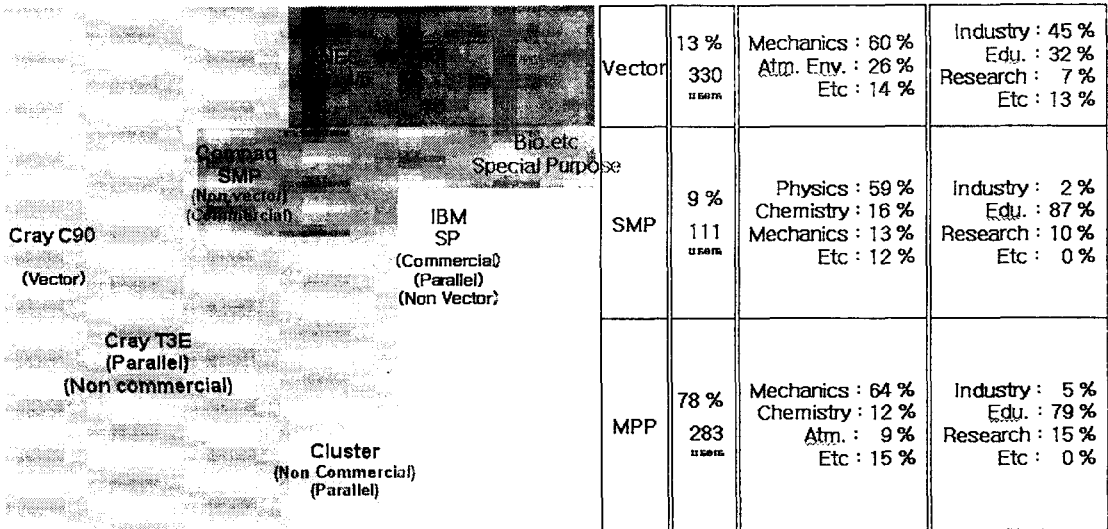
1999년	16CPU prototype개발
2000년	64+CPU,Node시스템 & 응용분야별 시험
2001년	128+CPU,Node시스템 개발 & 응용지원
2002년	256+CPU,Node시스템 개발 & 시스템 운영 체계화, CrayT3E migration 서비스
2003년	CrayT3E 대체 서비스 시작

표 1. 연차별 개발 계획

워크로 연결하여 특정응용분야에 대해 우수한 계산결과를 얻을 수 있다는 센터 자체의 실경험과 기타 관련 학회등의 연구결과등을 그 기반으로 하고 있다.[4][5][6] 본 연구의 연차별 계획은 2003년까지 정상적인 CrayT3E 대체가 가능한 Tflops급 시스템의 개발과 구축이 가능하도록 단계별 접근 방법을 취하고 있다. 클러스터 컴퓨팅 자원의 개발/확보 계획은 그림 1에서 살펴볼 수 있듯이 슈퍼컴퓨팅센터가 묵시적으로 추진해온 응용분야별 최적 지원 환경 제공 계획과

Supercomputing Center's resource plan

with system usage analysis (Year 2000)



1993 1997 2000 2001 2002 2003 Arch. User % & # Application % User Affiliation %

Analysis based on Year 2000's usage statistics
by : Jeon, Hoon Supercomputing Development Dept. J.Hen, Ingh Supercomputing Operation Dept.

그림 1. 슈퍼컴퓨팅 분야별 수요와 연차별 자원 운영 계획

관계한다. 1997년에 CrayT3E 기종의 도입으로부터 있어온 다기종 컴퓨팅 환경을 통한 사용자 지원 체제는 사용자 코드의 특성과 요구에 따라 다른 구조와 특징을 지니는 자원을 선호하는 형태로 그 사용의 양태를 보이고 있고, 새로 선호되는 계산의 형태와 규모를 지원하기 위한 계획을 필요로 하고 있다. 더욱이 주목할 점은 미국에서 매년 개최되는 SuperComputing conference에서의 분야별 응용 연구 동향등에서 각 응용분야의 대표적인 문제들에 접근하기 위한 계산 규모와 형태가 기존에 보유하고 있던 자원을 거의 독점적으로 활용하여야 할 수준의 연구들이 늘어나고 있다는 등이 클러스터 구축 계획의 논지를 더하고 있다. 슈퍼컴퓨팅센터에서는 2001년10월 현재 설치가 진행중인 슈퍼컴퓨터 3호기 형태의 고가의 컴퓨팅 자원은 여러 사용자가 공유하는 형태로 운영할 것이며, 이런 상용 장비들에 비하여 비록 안정성과 편리성에서 문제를 가지고 있으나 큰 비용으로 대규모 자원을 제공할 수 있는 클러스터 컴퓨팅 자원을 국가차원 혹은 연구원 차원에서 전략적인 지원

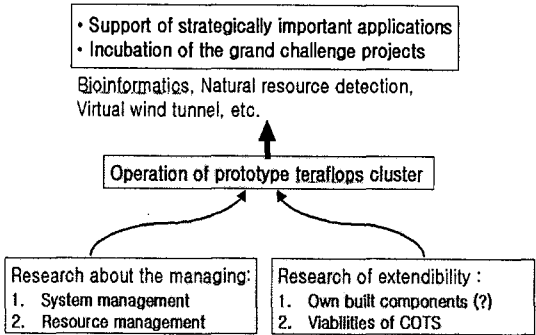


그림 3. 테라클러스터개발 연구 (2001년)

이 필요한 분야에 확보 가능한 자원을 독점적으로 제공하여 이러한 수요를 충족시키려는 자원 운영 계획을 가지고 있다.

이러한 계획을 충족시키기 위하여 슈퍼컴퓨팅 센터에서는 2000년도의 연구 주제로써 구조해석, CFD, 물리, 화학, 기계 등, 슈퍼컴퓨팅 사용자 분포가 높은 주요 5개 분야의 사용자 코드들에서 병렬처리가 가능하며 사용 빈도가 높은 대표적인 코드들에 대한 성능시험을, 다양한 구조

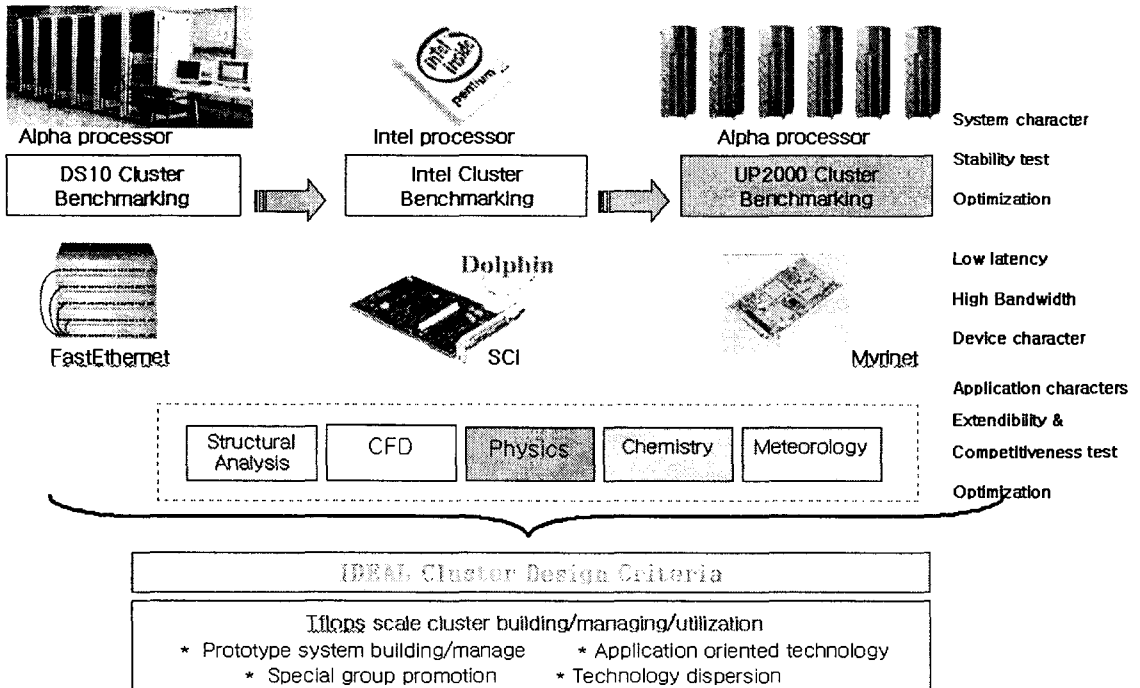


그림 2. 테라클러스터 개발 계획(2000년)



의 클러스터에 대해 실시하고 이를 근거로 각 응용분야의 알고리즘에 따라 최적인 클러스터 구축 기술을 확보하는 연구를 수행하였다.(그림 2) 2000년에 테스트에 사용된 장비들의 구성은 Intel PIII, Alpha, AMD 등의 CPU와 3종의 FastEthernet, Myrinet[7], SCI[8]등의 COTS(Commodity Off The Shelf)로 구성되어 있다. 이 연구의 결과를 활용한 2001년도의 연구는, 특정 응용분야(구조해석 및 CFD)의 지원을 위해 최적화한 클러스터 시스템의 개발·구축과 대규모 클러스터 관리 프로그램의 개발이

라는 클러스터 자체의 구축 방법론에 대한 연구와 COTS를 기반으로 하는 클러스터의 성능을 한단계 더 최적화 시킬 수 있는 방안으로써의 자체 하드웨어 개발로 나누어 수행하고 있다. 2001년의 연구 주제들 중 자체 하드웨어 개발은 현재 FPGA(Field Programmable Gate Array)를 사용하는 계산 가속기 보드의 개발이라는 방향으로 연구를 진행하고 있으며, 이는 특정 응용문제를 위한 라이브러리등을 하드웨어로 구현하여 COTS장비의 성능을 증폭하는 형태의 접근이다.

응용분야	간략한 특성
열유체	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 다양한 구조의 기기에서 성능을 발휘 ◦ Hard disk보다는 모든 계산을 메모리 상에서 계산하는 편이며, 같은 경제적 여건일 경우 기타 장비 재원에 비하여 빠른 CPU를 선호 ◦ 네트워크 성능에 민감한편
구조	<p>[1] Explicit 문제</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ CPU 성능과 통신 속도가 공히 중요. ◦ Hard disk보다는 모든 계산을 메모리 상에서 계산하는 편이며, 같은 경제적 여건일 경우 기타 장비 재원에 비하여 빠른 CPU 선호 ◦ 네트워크 성능에 민감. <p>[2] Implicit 문제</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 대용량 메모리(부족 분은 Disk사용) ◦ 대용량 고속 I/O선호, 병렬 계산시 CPU별 독립된 disk선호 ◦ 병렬 특성이 나쁨(통신이 많음, Load Balancing이 불편함) ◦ 실제 병렬형태의 Solver가 흔하지 않음
기상	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 네트워크 성능에 민감 ◦ 계산 결과 보관에 따른 대용량의 I/O 선호
물리	<p>[1]몬테칼로 코드 : 네트워크 성능에 민감</p> <p>[2]Ab TB 코드 : I/O, 메모리보다는 CPU 성능을 선호</p>
화학	<p>[1] 분자동역학(Molecular Dynamics; MD):</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ CPU 성능과 통신 속도가 중요 ◦ 메모리 크기, I/O 용량 및 속도는 중요하지 않음 (참고) 128MB 메모리와 4GB 디스크면 충분. 단, 계산 결과로서 output이 발생하므로 scratch disk보다는 저장용 디스크 필요. <p>[2] 양자화학(ab initio 계산)</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ CPU 성능, 통신 속도, 메모리 크기, I/O 용량/속도 모두 중요 ◦ ChemIO, Global Array, 자체 통신 기능 등 다양한 방법으로 접근 시도 (참고) 현재 화학분야에서 가장 많이 사용하고 있고 앞으로 Bio등의 분야에서 사용자가 폭발적으로 증가할 추세이므로 Vector, SMP 에서 뿐만 아니라 cluster 환경에서도 사용하지 않을 수 없음. CPU당 512MB 메모리와 18-36GB의 하드디스크 공간이면 현재 상황에서 긍정적인 사양임

표 2. 응용 분야별 코드 특성 요약



3. 실험과 제안

Tflops급 클러스터에 필요한 요구사항과 실제 응용분야별 특성을 파악하기 위해서 실시한 실험에 사용된 코드들의 특성은 표 2에 나타나 있으며, 표 3은 실험에 사용된 장비들의 구성이다. 실험을 통해 분야별 연구자들이 보고서를 통해 제시한 실험의 분석과 제안은 다음과 같다. [9]

▷ 구조해석 : 성능 시험에 사용된 형태의 외연적 시간적분법을 사용하는 구조해석 응용 프로그램에서는 네트워크의 성능이 전체 시스템 성능에 끼치는 영향이 크며, 클러스터 분산된 디스크 구조는 시험에 사용된 구조해석 분야의 응용 프로그램에서 주기적으로 출력하게 되는 내용을 여러 개의 디스크로 분산하여 출력할 수 있도록 함으로써 단일 공유디스크를 쓰는 Cray T3E에 비해 훨씬 유리한 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 디스크의 존재는 실험에 사용한 외연적 시간적분법뿐만 아니라 구조해석 분야의 다른 대부분의 문제에 대해서도 병렬성능을 제대로 내기 위해 반드시 필요한 사항이다.

▷ 물리 : 물리분야에서 클러스터를 활용하는 대표적인 코드 Quenched MC, FullQCD, ABPW를 사용하여 성능시험을 하였다. 실험 전체를 통해 통신성능보다는 단일 CPU 성능에 크게 의존하는 Quenched MC의 경우는 모든 경우에서 확장성이 가장 우수하였고, 실제 성능은 Zion UP2000 클러스터가 T3E에 비하여 5~6배정도 더 우수하였다. 또한 통신량이 비교적 많은 FullQCD의 경우 대역폭이 Zion UP2000에서 가장 우수한 확장성을 보여 주었다. 한편 global 통신량이 많은 FFT를 많이 사용하는 ABPW의 경우 Zion UP2000클러스터서는 32노드까지의 확장성을 보여주고 있는 반면 통신대역폭이 낮은 DS10 클러스터는 16노드에서 확장성이 떨어짐을 알 수 있었다. 전체적으로 이번 실험에 사용한 물리코드는 통신 성능이 우수한 Zion UP2000 클러스터에서 매우 우수한 성능을 보여 주었다. 이러한 결과를 네트워크 성능실험 자료와 비교하면 응용프로그램에 사용된 통신 루

틴의 성능에 따라서 프로그램의 확장성이 제약을 받는 것을 알 수 있다. 따라서, 이러한 제약 조건으로 작용하는 네트워크 부분의 프로그래밍 방식을 개선하면 클러스터 형태의 계산자원을 적절히 이용할 수 있을 것이며, 특히 적정 규모로 분할 활용할 경우 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

▷ 열유체 : 열유체 부분의 응용프로그램들 중 정렬적자계를 사용한 실험코드의 방법론은 실험에 사용된 4개 시스템에 대해 매우 우수한 성능을 보였다. 특히, 큰 문제의 경우에도 Fast Ethernet을 사용하는 환경에서도 적절한 프로그래밍 기법만을 사용할 경우 매우 우수한 성능을 보였다. 이는 실험실 단위에서 클러스터를 구축할 경우 시스템 확장에 대한 가이드라인을 제공할 것이라 생각된다. 그러나, 향후 Tera Flops급 시스템을 구성하고 CrayT3E를 대체하기 위해서는 보다 Myrinet 또는 SCI등의 우수한 네트워크 장비가 필수적이다.

▷ 화학 : 계산 화학부분의 프로그램, 특히 양자 화학 프로그램의 경우 병렬화가 힘들뿐더러 이미 병렬화 된 프로그램이 있다고 하더라도 병렬 성능이 떨어지는 것으로 알려져 왔다. 그러나, 이번 벤치마크에서 한 가지 가능성을 발견할 수 있었다. 노드마다 CPU, 메모리, 디스크 저장장치, 그리고 노드간의 통신, 이 네 가지의 처리 속도 또는 용량이 조화를 이룰 때 고성능의 연산능력, 막대한 양의 메모리와 임시 디스크 공간이 필요하면서도 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 MP2 수준의 계산을 상당히 효율적으로 수행할 수 있다는 점이다. 각 노드에서 발생하는 병렬 입출력이 상당한 시간을 소비한다는 점을 감안한다면 DS10 64노드의 벤치마크결과를 바탕으로 예측할 때 적어도 128노드까지는 실용적으로 사용할 수 있다는 결론을 내릴 수 있다. 이것은 모든 크기(basis function의 수)의 MP2 계산에 적용되는 것은 아니고 Medium Scale MP2 Energy와 Large Scale MP2 Energy 계산에서 밝혀졌듯이 계산의 크기가 일정수준을 넘을 때에만 해당된다. 근래 많은 연구자들이 CPU의 속도, 임시저장 디스크의 크

	CPU	OS	네트워크			CPU 수	협력사
			종류	Latency [Pingpong] (μ sec)	Bandwidth [peak] (Mbyte/sec)		
DS10	466MHz EV6 알파프로세서	Linux (kernel2.2.0)	Fast Ethernet	140	8.9	64+1	Linux 1/ Compaq Korea
UP2000	667MHz EV6 알파프로세서	"	Myrinet	13	139.7	64+1	Zion/ Samsung Electron/ Samsung Corp
Intel III(s)	667MHz Pentium III 인텔프로세서 Tyon Thunder 2500	"	SCI 33MHz/32bit	6	24.93	16+1	Scali/ Dolphin
Intel III(m)	667MHz Pentium III 인텔프로세서 Tyon Thunder 2500	"	Myrinet 66MHz/64bit M2L-PCI64B-2/2MB 모델	11	141.7	16+1	Samsung Corp
Cray T3E	450MHz EV5 알파프로세서	Unicos/MK	3D Torus	13	157	128	

* Latency와 Bandwidth는 PMB[1]측정 결과임

표 3. 실험 장비 사양

기, 사용 가능한 메모리의 한계 때문에 원하는 크기의 계산을 수행하지 못하고 있다. 그러나 클러스터 형태의 자원은 이런 한계를 극복 할 수 있는 답을 줄 수 있으며, 특히 계산의 크기가 더욱 커질 경우 Myrinet등의 장비를 사용하여 네트워크 성능을 개선할 경우 512노드 이상으로 확장 가능할 것으로 판단된다.

▷ Bioinformatics(Sequencing) : 유전체 해석 분야의 응용프로그램인 FASTA코드중 pv3compsw를 사용하여 벤치마킹을 하였다. 벤치마킹 결과를 볼 때 오히려 IntelPIII-667을 사용한 장비가 더 짧은 반환시간을 나타낸다. 이것은 이 분야의 문제가 정수연산을 주로 하는 점과 프로그램 코드가 alpha CPU에 최적화 되지 않았기 때문인 것으로 추정된다. 따라서, 소수연산을 주로 할 경우에는 다른 응용분야의

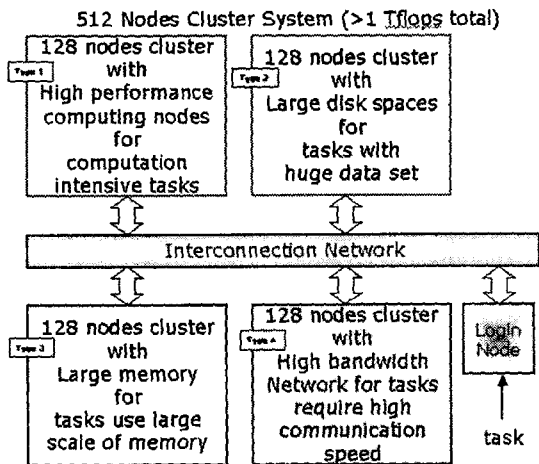
예에서 볼 수 있듯이 이 분야의 코드도 더 우수한 성능을 낼 것이라 추정할 수 있다. Bioinformatics분야의 응용들 중 특히 sequencing과 관련된 사항들에 국한할 경우, 메모리 확장성을 고려하지 않을 경우 Intel CPU를 채택한 클러스터의 활용이 용이할 것으로 판단된다. 이는 이 분야의 코드들이 특별히 최적화되어지지 않고 사용되어진다는 점이 근본적인 다른 이유로 언급되어질 수 있겠다. Sequencing부문에 대하여서는 병렬기법을 도입하고 있지만 계산노드수의 증가에 걸맞는 속도 향상을 얻지는 못하고 있으므로, 대규모 클러스터의 활용은 하드웨어 구성에 따른 속도 증가를 적절히 이용할 수 있는 규모로 분산하여 활용할 수 있는 운영에 더욱 중점을 둘 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 클러스터 설계

지난해 수행한 연구를 통하여 설계한 테라급 클러스터 시스템은 그 응용분야에 따른 요구사항을 충족할 수 있도록 설계되었다. 그림 4의 도식을 통해 살펴 볼 수 있는 테라클러스터의 구성은 다른 성격을 지니는 응용문제의 요구사항에 가장 적절한 자원을 할당할 수 있는 구조의 다른 사양을 가진 "Cluster over Cluster"의 형태를 띤다.

Tera-Cluster Final System

KISTI Supercomputing Center (Year 2003 plan)



Tera-Cluster replaces with Gray T3E by 2003

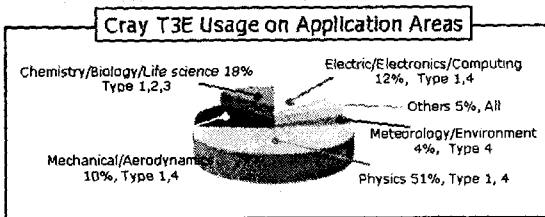


그림 4 테라 클러스터 시스템 구성도

테라클러스터 시스템을 구축하기 위한 전단계 연구로서 구축중인 테라클러스터 기반(Prototype) 시스템은 Myrinet 등을 장착한 128개 계산노드 규모의 클러스터 시스템으로 구조 해석 문제들 중 탄성과 해석, 일반적인 열유체 문제, Bioinformatics분야의 sequencing문제 등을 지원할 수 있는 구조로 설계되었다. 1차 시스템을 활용할 계획으로 있는 탄성과 해석 등의

Tera-Cluster Prototype

KISTI Supercomputing Center (Year 2001 plan)

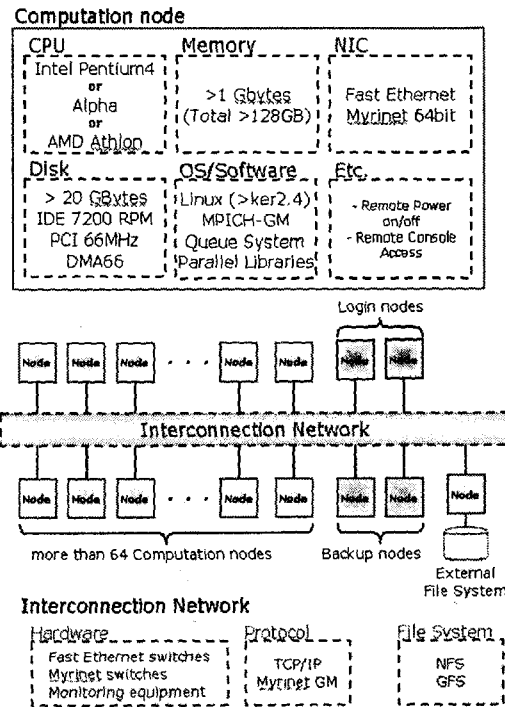


그림 6. 테라클러스터 기반(Prototype) 시스템 문제는 그 결과가 실용적인 의미를 갖기 위해서는 거대규모의 메모리 등을 요구하며, 이의 부족 문제를 해결하기 위하여 디스크에 많은 접근을 하며, 내부에 주요 루틴으로 사용하는 LU decomposition문제를 해결하기 위해 네트워크에도 큰 부하를 만들어 낸다. 표 4에서 현재 진행 중인 테라클러스터 기반(prototype)시스템의 사양을 살펴 볼 수 있다.

CPU	Intel PIV 1.7Ghz * 1
HDD	ATA100 30Gbyte
Memory	128Mbyte/node
Connection	Myrinet
Shared Disk	1Tbyte
OS	Linux Kernel 2.4 +
Supposed Rpeak	165Gflops

표 4. 구축 예정 클러스터 (prototype) 시스템

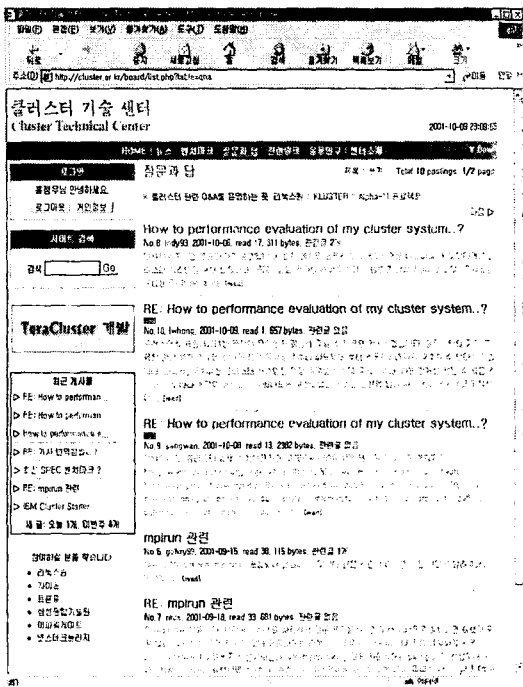


그림 6. 클러스터 기술센터
<http://cluster.or.kr>

5. 결론 및 향후 연구 계획

클러스터 컴퓨팅에 대한 요구는 그것이 제공하여 줄 수 있는 장점 등으로 인해 기본적인 컴퓨팅방법론으로 더욱 각광을 받을 것으로 판단되어지고 있다. 슈퍼컴퓨팅센터에서는 이러한 연구 방법론의 변화에 적절히 대응하기 위하여 지속적인 지원노력을 유지해 나갈 것이다. 또한, 일반 사용자들이 직접 클러스터를 구축하는 등을 통하여 작은 규모의 클러스터 컴퓨팅 환경을 확보하고 선행연구를 수행한 후 그 결과를 슈퍼컴퓨팅 센터가 지원하는 대규모 환경에 적용할 수 있는 체제를 구축해 나갈 예정이다. 이를 돕기 위해 클러스터 컴퓨팅 기술의 확산과 교류를 목적으로 하는 '클러스터기술센터'(그림 6)라는 명칭의 웹서비스를 운영하고 있다.

슈퍼컴퓨팅센터에서는 여기에 더해 기존형태의 슈퍼컴퓨팅서비스 환경과 더불어 클러스터 컴퓨팅의 미래가 현재 주목을 얻어가고 있는 그리드 컴퓨팅 환경의 일부분으로서 자리 잡을 것으로 기대하고, 이를 위해 현재 구축하고 있는

클러스터 시스템 및 제반 연구의 방향을 그리드 컴퓨팅의 요구에 부합하도록 변화시켜 나갈 계획이다.

6. 후기

본 연구는 2001년도 슈퍼컴퓨팅기반개발 연구 사업의 일환으로 이루어진 것이며, 이러한 연구가 결과를 낼 수 있게 지난해 연구에 도움을 주신 컴팩 코리아(주), 리눅스원(주), 삼성 전자(주), 삼성물산(주), 자이온(주)등에 감사드립니다. 또한, 각 응용분야를 담당하신 전/현 슈퍼컴퓨팅센터 소속의 김정호 박사, 이상주 박사, 이흥석 박사, 조금원 박사, 김경수씨 등에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] <http://www.ncsa.edu/>
- [2] 슈퍼컴퓨팅센터 사업보고서, 2000. 12.
- [3] <http://www.ercim.org/>
- [4] 박찬성, 김중권, 김태우, 유창열, 홍정우, 이용주, "벡터-병렬 슈퍼컴퓨팅 환경에서의 응용 코드 최적화기술 개발", 시스템공학연구소 과제보고서, K20070, 1996.12.
- [5] 조민수, 문경덕, 홍정우, 이영주, 곽호상, 고덕곤, 김성호, 강남숙, "병렬 처리 시스템 활용 기술 개발 연구", 시스템공학연구소 과제보고서, 7C97901-001-653-F, 1997.12.
- [6] SC1996, proceedings
- [7] <http://www.myricom.com/>
- [8] <http://www.dolphinics.com/>
- [9] 이상산, 조민수, 김정호, 이상주, 이흥석, 조금원, 김경수, 홍정우, "CrayT3E 대안 및 응용 분야 최적 테라클러스터 개발(1차년도)", 한국과학기술정보연구원, 슈퍼컴퓨팅센터, 기술문서, TR00-0410-004, 2001.3.