

슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터)의 철도산업에서의 활용
- 병렬처리기법을 이용한 화재유동해석 -

Application of Supercomputers(Cluster computers) to Railway Industry
- Fire-Driven Flow Simulation using Parallel Computational Method -

김학범† 장용준* 이창현** 정우성***
Kim, Hag-Beom† · Jang, Yong-Jun* · Lee, Chang-Hyun** · Jung, Woo-Sung***

Key Words: Super computers(Cluster computers), Parallel Computational method, FDS, MPI

ABSTRACT

Thanks to the recent development of computing technology, the various forms of high-performance computers are available. Among them, the parallel-clustering CPU machines are realized for the high performance computing. These supercomputers (cluster computers) can be applied to various industries due to the advantages of lower price. Especially in the field of numerical flow simulation, use of supercomputers can produce results quickly, and various engineering problems can be reviewed effectively case by case. In this paper, an application of supercomputers (cluster computers) were examined for railroad industry of fire flow simulation by using parallel computational method. It make sure that the supercomputers are very useful tools for railroad engineering.

국문요약

최근의 컴퓨터의 발달에 힘입어, 다양한 형태의 고성능의 컴퓨터가 출현하고 있다. 그 중 PC급의 CPU를 병렬 클러스터로 구성하여 고성능을 실현하고 있다. 이러한 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터)는 저비용으로 고성능을 낼 수 있어 다양한 산업에서 적용되고 있다. 특히 전산모사분야에서는 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터)를 이용하여 빠른 계산결과를 획득할 수 있어, 다양한 공학적 검토를 효율적으로 하고 있다. 본 논문에서는 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터)를 활용하여 철도산업에의 적용된 사례로 병렬처리기법을 이용한 화재해석을 상세히 소개하고, 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터)가 철도산업에의 공학적 검토에 매우 유용한 장비임을 보였다.

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 철도환경연구실
E-mail : kimhb31@krri.re.kr
TEL : (031)460-5676 FAX : (031)460-5319

* 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀, 선임연구원

** 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀, 연구원

*** 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀, 책임연구원

1. 서론

에니악(ENIAC)이 처음 발명된 이후로 현재의 슈퍼컴퓨터까지 매우 빠른 속도로 개발되어 왔다. 또한 다양한 형태의 고성능 컴퓨터가 출현하고 있으며, 그 중 PC급의 CPU를 병렬 클러스터로 구성하여 저가의 비용으로 고성능을 실현하고 있다. 이에 따라 수많은 산업 분야에서 클러스터 컴퓨터를 이용하기 시작하였다. 특히 전산모사분야에서는 프로세서의 발달에 비례하여 급속도로 발전해 왔으며, 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터)를 이용하여 빠른 계산결과를 획득할 수 있어 다양한 공학적 검토를 효율적으로 하고 있다. 본 논문에서는 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터)를 활용하여 철도산업에의 적용된 사례로 병렬처리기법을 이용한 화재해석을 상세히 소개하고, 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터)가 철도산업에의 공학적 검토에 유용한 장비임을 보이고자 한다.

2. 본 문

2.1 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터)의 개념 및 MPI

2.1.1 슈퍼 컴퓨터(클러스터 컴퓨터)의 의미

과거에는 슈퍼컴퓨터와 범용 공학컴퓨터와 구별이 확연히 되었으나 현재는 프로세서의 발달로 그 경계가 모호해지고 있다. 따라서 오직 순수한 계산속도 성능만을 비교하여 Global TOP List에 들면 슈퍼컴퓨터라고 일컫는다. 그러나 본 연구에서는 Global TOP 수준의 슈퍼컴퓨터는 아니지만, 병렬처리기법을 사용하여 범용 공학 컴퓨터보다 상대적으로 매우 빠른 계산속도와 대규모의 모델을 수용할 수 있는 대용량의 메모리 성능을 보유한 클러스터 컴퓨터를 슈퍼컴퓨터라고 정의하고자 한다.

클러스터 컴퓨터는 기 언급되었듯이 병렬처리기법(Parallel Calculation Method)을 사용하는 컴퓨터로서 여러 개의 프로세서를 동시에 이용하여 하나의 시스템으로 사용이 가능한 컴퓨터이다. 즉 여러 개의 CPU나 여러 독립된 컴퓨터를 전산망으로 묶어 사용하나, 하나의 시스템으로 사용이 가능해야 하고, 동시에 계산 영역을 나눌 수 있어야 한다.[1]

2.1.2 컴퓨터 처리 속도 단위

CPU의 처리 속도 성능을 알기 위해서는 기본적인 용어에 대하여 이해하여야 한다. 먼저 노드(node)는 네트워크상에서 연결되는 각 단말기의 단위이다. Core는 계산을 수행하는 프로세서 칩의 단위이다. 과거에는 1개의 컴퓨터에 1개의 CPU가 설치되어 계산을 하였기 때문에 1노드(node) = 1CPU = 1Core 였고 동일한 의미로 사용되었다. 현재는 1개의 컴퓨터에 여러 개의 CPU가 설치될 수 있으며, CPU 내부에도 Dual Core에서 Quad Core라 하여 여러 개의 Core가 존재한다. 따라서 현재는 1노드 (node) ≠ 1CPU ≠ 1Core 이므로 각 용어를 구별하여 사용하여야 한다. 컴퓨터의 처리속도는 총 Core수를 감안하여야 한다. CPU clock 속도에 사용되는 단위는 Hz이며 이는 프로세서의 1초당 동작주기를 의미한다. CPU의 연산 성능을 나타내는 단위는 Flops를 사용하는데, N×N 행렬 A로 구성된 연립방정식 Ax=b의 해를 구하는 성능을 Flops(Floating-point operations per second : Wikipedia참조)로 표시되며, 계산은 다음 식 (1)과 같다

$$\text{Flops} = \text{Hz}(1\text{Core clock속도}) \times \text{Core수} \quad \text{-----} \quad \text{식 (1)}$$

따라서 식(1)을 인텔 Xeon Dual CPU에 적용하면, Dual Core CPU 3.0GHz는 2Core × 3.0GHz = 6GFlops가 된다. 이론적으로 CPU와 메모리간의 효율저하가 없고 노드 (node)내부의 데이터처리 관련 효율저하가 없고 모든 Core가 동일한 계산처리속도성능을 유지하고 있다고 가정하면, 한 노드 (node)의 최대 연산처리 성능은 식(2)로 된다.

$$\text{노드 (node) 연산처리 성능} = \text{CPU수} \times \text{CPU clock속도} \times \text{Core수} \quad \text{-----} \quad \text{식 (2)}$$

2.1.3 병렬처리기법 및 MPI

병렬처리기법이란 하나의 프로그램을 여러 개의 프로세서로 분산시켜 동시에 계산처리 하는 기법이다. 이러한 병렬처리기법을 구현하는 소프트웨어로는 표 1과 같다.[2]

표 1 병렬처리용 소프트웨어

	소프트웨어 명
1	CPS(Cooperative Processes Software)
2	ISIS
3	Linda
4	ParaScope & FORTRAN D
5	ParaSoft Express
6	P4
7	MPI
8	PVM
9	OpenMP

슈퍼 컴퓨터(클러스터 컴퓨터)에서는 PVM과 MPI가 주로 사용되고 있으며, MPI중에는 MPICH와 LAM-MPI가 많이 사용된다. OS가 Windows 경우 MPICH가 주로 이용되고 있다. 본 연구에서는 MPI중 LAM-MPI를 사용하여 슈퍼 컴퓨터(클러스터 컴퓨터)에 적용하였다.

2.2 슈퍼 컴퓨터 (클러스터 컴퓨터) 구성

그림 1은 슈퍼 컴퓨터(클러스터 컴퓨터)의 구성을 나타낸 것이다. 클러스터는 기본적으로 Computing 노드 (node)와 Login 및 Management 노드 (node), NFS 노드 (node), Storage로 구성되어 있는데 통상 Login/Management 노드 (node)를 Head 노드 (node)라고 부른다. 본 연구를 위해 구성된 장비도 Head 노드 (node)와 계산을 위한 Computing 노드 (node)로 구성되었다. 별도의 Storage는 없다. 1~6노드 (node)의 CPU는 인텔 Dual-Core Xeon 7120M 모델을 사용하였으며, 7~10 노드 (node)는 인텔 Quad-Core Xeon B5450 모델을 사용하였다. 따라서 Head 노드 (node)까지 포함하여 총 64Core로 구성되었다. 각 노드 (node)의 운영체제는 Linux이다.

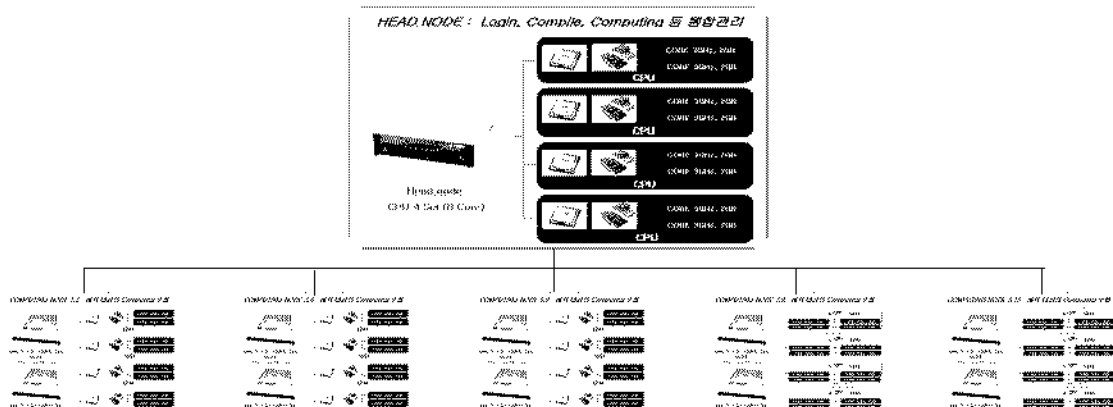


그림 1 슈퍼 컴퓨터 (클러스터 컴퓨터) 구성

그림 2는 본 연구에 사용된 슈퍼 컴퓨터(클러스터 컴퓨터)에서 pload 명령어를 사용하여 각 노드 (node)의 부하가 화면에 출력된 내용이다. 그림에서 보는 바와 같이 원활히 작동됨을 알 수 있다.

```
[kimhb31@node000 ~]$ pload
node001:      6:51 up 28 days,  9:36,  1 user,  load average: 2.79, 2.90, 2.88
node002:      5:21 up 28 days,  9:37,  0 users, load average: 0.68, 0.68, 0.67
node003:      9:12 up 28 days,  9:37,  0 users, load average: 1.79, 1.82, 1.88
node004:      8:52 up 28 days,  9:37,  1 user,  load average: 2.57, 2.84, 2.94
node005:      2:50 up 28 days,  9:35,  0 users, load average: 1.09, 0.97, 0.93
node006:      0:18 up 28 days,  9:35,  0 users, load average: 1.52, 1.47, 1.49
node007:      7:24 up  3:40,  1 user,  load average: 2.77, 3.97, 4.37
node008:      2:59 up  3:40,  1 user,  load average: 12.02, 12.70, 13.10
node009:      5:22 up  3:37,  1 user,  load average: 12.13, 9.68, 8.78
node010:      2:24 up  3:40,  1 user,  load average: 9.54, 7.06, 5.88
[kimhb31@node000 ~]$
```

그림 2 클러스터 동작시 각 노드 (node)에 걸리는 부하

2.3 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터) 적용을 위한 시스템설정

2.3.1 FDS code 특징

본 연구에 사용된 소프트웨어는 FDS code이다. FDS code는 NIST(USA)에서 개발한 OPEN Source S/W이다. 화재해석에는 Zone모델과 Field모델로 구별된다. Zone모델은 1D 해석분야로서 최근까지도 화재관련 엔지니어에게 유용하게 쓰이는 방식이다. Field모델은 CFD(Computational Fluids Dynamics)의 분야로서 과거에는 계산량이 많아 거대규모의 대상에 대한 예측에서는 어려움이 있었으나 최근의 컴퓨터 발달과 더불어 급속한 발전을 이루고 있다. FDS code는 Field 모델로서 해석에 대한 세세한 정보를 제공하므로 화재예측에 많은 각광을 받고 있다. 특히 FDS code는 난류에 대하여 LES와 DNS을 적용할 수 있고, 연소모델, 스프링클러, 복사모델 등을 설정할 수 있다. 그러나 FDS에서 사용되고 있는 모델들이 대규모 컴퓨터자원을 요구하고 있어, 해석대상이 대규모일 경우 단독 PC나 W/S의 장비에서는 격자를 충분히 사용하기가 쉽지 않다.

2.3.2 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터) 구동 전 시스템 설정

FDS는 Source는 NIST 홈페이지에서 Download할 수 있으나, 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터)에 적용하기 위해서는 해당 장비의 시스템에 적합한 실행파일을 생성해야 하므로 Source를 직접 컴파일 하여야 한다. 본 연구에 사용된 컴파일러는 인텔(fortran, C)을 사용하였다. 그림 3은 그림 2의 클러스터 장비의 환경에 맞춘 컴파일 명령어의 사례를 보인 것이며, 이러한 컴파일 명령어를 배치파일 형태로 작성되고 작성된 파일은 "make" 명령어를 이용하여 실행한다.

```
FFLAGS = -O3 -axP -ip -vec_report0 -i-static -heap_arrays
CFLAGS = -O -Dpp_noappend -Dpp_OSX
FCOMPL = mpif77
CCOMPL = mpicc
```

그림 3 컴파일 Option 사례

각 노드 (node) 및 core에 계산 영역이 할당되도록 하기 위해서는 클러스터 장비에 MPI를 구동하여야 하는데 LAM-MPI에서는 "lamboot" 명령어를 이용한다. 그림 4는 "lamboot"를 실행하였을 때의 화면이다.

```
[kimhb31@node007 fds52]$ lamboot -v ./m

LAM 7.0.6/MPI 2 C++/ROMIO - Indiana University

n-1<6761> ssi:boot:base:linear: booting n0 (node007)
n-1<6761> ssi:boot:base:linear: booting n1 (node008)
n-1<6761> ssi:boot:base:linear: finished
```

그림 4 lamboot 실행시 화면

MPI까지 모든 시스템 설정이 완료되면, FDS code를 실행할 수 있다. 실행 명령어는, 예를 들어 FDS의 Input file이 job_name.fds이고 실행파일은 fds5이며, input file에서 mesh block을 5개 영역으로 나누었다고 가정하면, 명령어는 다음과 같다.[3]

```
mpirun -np 5 fds5 job_name.fds
```

그림 5 클러스터에서의 FDS 실행

2.3.3 격자 분할법

FDS code에서는 각 노드 (node)나 core에 할당하기 위해서는 분할된 격자를 input file에서 미리 설정해야 한다. 본 연구에서는 41개의 영역으로 나누었으며, FDS v5.02를 사용하여 계산을 수행하였다. FDS v5.0x까지는 영역 분할된 곳에서 다양한 크기의 격자의 중첩이 허용되었으나, 최근의 FDS v5.2x 상위 버전에서는 다음 그림과 같이 격자 분할시 매우 엄격해져 주의가 필요하다.[3]

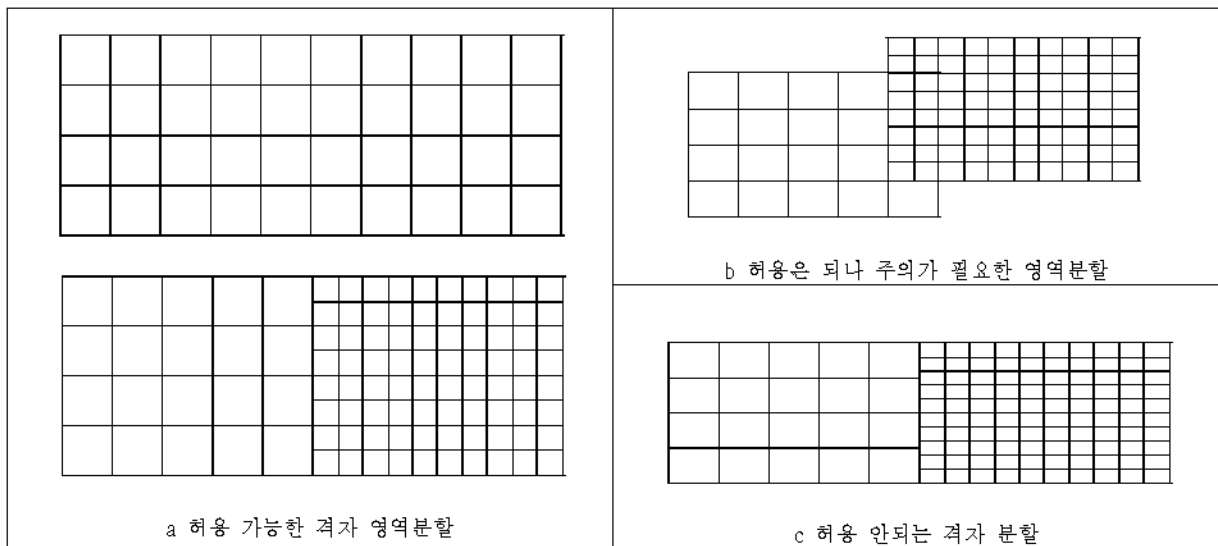


그림 6 FDS v5.2x 상위 버전에서의 격자 영역 분할 및 접합면 주의 사항

2.4 철도산업 적용 (화재해석)

그림 7 ~ 11 은 대심도 지하역사에 대한 화재해석을 수행한 것으로 해석결과는 Post Processor인 Smokeview(NIST, USA 개발)과 TECPLOT으로 변환하여 나타내었다. 그림 12는 본 해석에 적용한 FDS code의 input file의 일부 내용을 나타낸 것으로 클러스터에서 병렬처리방법으로 계산을 수행 할 수 있도록 41개의 영역으로 격자를 나누는 것이다. 그림 7의 형상은 길이 365m, 폭23.5m, 깊이 47m 이고 총 격자규모는 대략 10,369,526개이다. 이처럼 철도 시설에는 대부분 거대규모의 형상을 가지고 있기 때문에 기존의 공학용의 범용 컴퓨터로는 화재안전 분석에 한계가 있다. 따라서 승강장 같은 일부 형상만 해석을 전개하고, 실물 실험데이터를 이용하여 보완하는 형태였다.[4] 그러나 본 연구에서는 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터)를 이용하여 그림 8 ~ 11에서 보는 바와 같이 철도시설의 전체 시뮬레이션이 가능하게 되었으며, 특히 화재에 의한 열 및 연기의 거동에 대하여 상세한 내용과 통합적인 내용으로 공학적 분석이 가능하게 되었다.

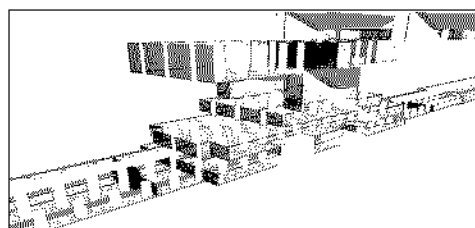


그림 7 FDS 모델링

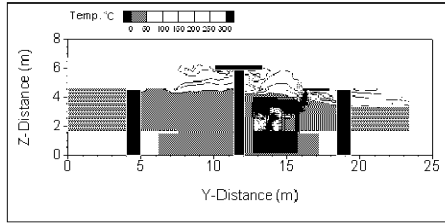


그림 8 승강장 단면에서의 온도 분포도
(X = 85m, 600sec, TECPLOT)

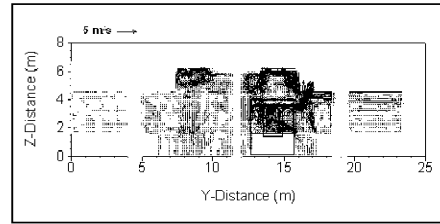


그림 9 승강장 단면에서의 속도벡터도
(X = 85m, 600sec, TECPLOT)



그림 10 화재 발생후 연기분포 (Y=14.04m, 600sec, Smokeview)

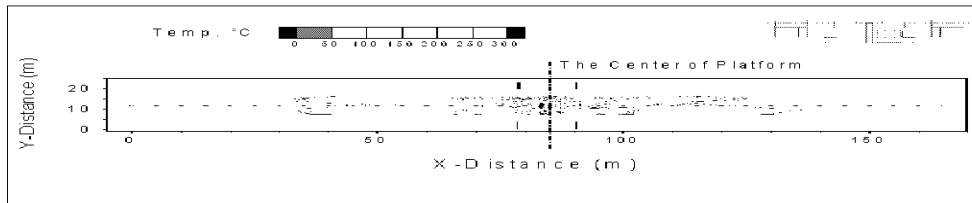


그림 11 승강장 온도분포 (Z=5.8m, 600 sec, TECPLOT)

```
&MESH ID='SUNG01', IJK=125 ,72 ,12 ,XB=0.00 ,165.00 ,6.17 ,17.23 ,0.00 ,1.62 /
&MESH ID='SUNG02', IJK=360 ,27 ,20 ,XB=0.00 ,50.00 ,2.83 ,7.00 ,1.62 ,4.52 /
&MESH ID='SUNG03', IJK=360 ,4 ,20 ,XB=0.00 ,50.00 ,7.00 ,7.60 ,1.62 ,4.52 /
&MESH ID='SUNG04', IJK=360 ,54 ,20 ,XB=0.00 ,50.00 ,7.60 ,15.80 ,1.62 ,4.52 /
&MESH ID='SUNG05', IJK=360 ,4 ,20 ,XB=0.00 ,50.00 ,15.80 ,16.40 ,1.62 ,4.52 /
&MESH ID='SUNG06', IJK=360 ,27 ,20 ,XB=0.00 ,50.00 ,16.40 ,20.57 ,1.62 ,4.52 /
&MESH ID='SUNG07', IJK=450 ,48 ,20 ,XB=50.00 ,115.00 ,0.00 ,7.00 ,1.62 ,4.52 /
&MESH ID='SUNG08', IJK=450 ,4 ,20 ,XB=50.00 ,115.00 ,7.00 ,7.60 ,1.62 ,4.52 /
&MESH ID='SUNG09', IJK=450 ,54 ,20 ,XB=50.00 ,115.00 ,7.60 ,15.80 ,1.62 ,4.52 /
&MESH ID='SUNG10', IJK=450 ,4 ,20 ,XB=50.00 ,115.00 ,15.80 ,16.40 ,1.62 ,4.52 /
&MESH ID='SUNG11', IJK=450 ,48 ,20 ,XB=50.00 ,115.00 ,16.40 ,23.40 ,1.62 ,4.52 /
&MESH ID='SUNG12', IJK=360 ,27 ,20 ,XB=115.00 ,165.00 ,2.83 ,7.00 ,1.62 ,4.52 /
&MESH ID='SUNG13', IJK=360 ,4 ,20 ,XB=115.00 ,165.00 ,7.00 ,7.60 ,1.62 ,4.52 /
&MESH ID='SUNG14', IJK=360 ,54 ,20 ,XB=115.00 ,165.00 ,7.60 ,15.80 ,1.62 ,4.52 /
&MESH ID='SUNG15', IJK=360 ,4 ,20 ,XB=115.00 ,165.00 ,15.80 ,16.40 ,1.62 ,4.52 /
&MESH ID='SUNG16', IJK=360 ,27 ,20 ,XB=115.00 ,165.00 ,16.40 ,20.57 ,1.62 ,4.52 /
&MESH ID='SUNG17', IJK=1125 ,60 ,12 ,XB=0.00 ,165.00 ,7.37 ,16.03 ,4.52 ,6.20 /
&MESH ID='SUNG18', IJK=300 ,24 ,17 ,XB=52.50 ,112.50 ,0.00 ,4.50 ,6.70 ,10.07 /
&MESH ID='SUNG19', IJK=300 ,24 ,17 ,XB=52.50 ,112.50 ,18.90 ,23.40 ,6.70 ,10.07 /
&MESH ID='SUNG20', IJK=324 ,72 ,17 ,XB=50.00 ,115.00 ,4.50 ,18.90 ,6.70 ,10.07 /
&MESH ID='SUNG21', IJK=180 ,120 ,17 ,XB=65.00 ,100.00 ,0.00 ,23.40 ,11.70 ,15.07 /
&MESH ID='SUNG22', IJK=125 ,72 ,35 ,XB=50.00 ,75.00 ,4.50 ,18.90 ,24.20 ,31.17 /
&MESH ID='SUNG23', IJK=25 ,64 ,35 ,XB=75.00 ,80.00 ,5.62 ,18.90 ,24.20 ,31.17 /
&MESH ID='SUNG24', IJK=25 ,90 ,35 ,XB=80.00 ,85.00 ,5.62 ,23.40 ,24.20 ,31.17 /
&MESH ID='SUNG25', IJK=25 ,96 ,35 ,XB=85.00 ,90.00 ,4.50 ,23.40 ,24.20 ,31.17 /
&MESH ID='SUNG26', IJK=125 ,120 ,35 ,XB=90.00 ,115.00 ,0.00 ,23.40 ,24.20 ,31.17 /
&MESH ID='SUNG27', IJK=100 ,45 ,17 ,XB=40.00 ,60.00 ,6.80 ,16.04 ,31.17 ,34.48 /
&MESH ID='SUNG28', IJK=50 ,150 ,17 ,XB=30.00 ,40.00 ,-7.10 ,23.40 ,31.17 ,34.48 /
&MESH ID='SUNG29', IJK=324 ,16 ,50 ,XB=0.00 ,65.00 ,-10.30 ,-7.10 ,31.17 ,41.17 /
&MESH ID='SUNG30', IJK=324 ,16 ,50 ,XB=0.00 ,65.00 ,23.40 ,26.60 ,31.17 ,41.17 /
&MESH ID='SUNG31', IJK=50 ,20 ,12 ,XB=70.00 ,80.00 ,0.00 ,4.00 ,4.52 ,6.70 /
&MESH ID='SUNG32', IJK=50 ,20 ,12 ,XB=70.00 ,80.00 ,19.40 ,23.40 ,4.52 ,6.70 /
&MESH ID='SUNG33', IJK=50 ,20 ,12 ,XB=90.00 ,100.00 ,0.00 ,4.00 ,4.52 ,6.70 /
&MESH ID='SUNG34', IJK=50 ,20 ,12 ,XB=90.00 ,100.00 ,19.40 ,23.40 ,4.52 ,6.70 /
&MESH ID='SUNG35', IJK=25 ,20 ,8 ,XB=70.00 ,75.00 ,0.00 ,4.00 ,10.07 ,11.70 /
&MESH ID='SUNG36', IJK=25 ,20 ,8 ,XB=70.00 ,75.00 ,19.40 ,23.40 ,10.07 ,11.70 /
&MESH ID='SUNG37', IJK=50 ,36 ,8 ,XB=80.00 ,90.00 ,3.10 ,15.30 ,10.07 ,11.70 /
&MESH ID='SUNG38', IJK=95 ,20 ,45 ,XB=76.00 ,95.00 ,0.00 ,4.00 ,15.07 ,24.20 /
&MESH ID='SUNG39', IJK=95 ,20 ,45 ,XB=76.00 ,95.00 ,19.40 ,23.40 ,15.07 ,24.20 /
&MESH ID='SUNG40', IJK=500 ,77 ,32 ,XB=-100.00 ,0.00 ,4.00 ,19.40 ,0.00 ,6.20 /
&MESH ID='SUNG41', IJK=500 ,77 ,32 ,XB=165.00 ,265.00 ,4.00 ,19.40 ,0.00 ,6.20 /
```

그림 12 FDS input file중 격자분할 내용

그림 13은 그림 7의 모델을 화재 발생후 50초까지 열, 연기 거동의 계산 소요시간을 나타낸 것으로서 사용되는 core수가 증가 될수록 계산 소요시간이 단축됨을 알 수 있다. 본 내용을 통해서 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터)를 사용하면 계산에 소요되는 시간 비용이 저감 될 것으로 기대된다.

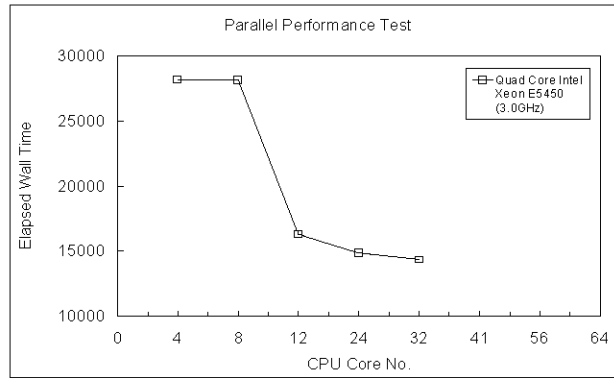


그림 13 Core 수에 따른 계산소요 시간 비교

3. 결론

본 논문에서는 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터)를 구성내용과, 병렬처리기법을 이용한 화재해석 적용까지의 시스템 적용 내용을 상세히 다루었다. 또한 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터)를 이용하여 화재해석을 적용하고, 계산 소요시간이 단축되었으며, 이를 통하여, 철도산업의 화재안전 분석시 전체 시스템 관점에서 화재해석을 수행함으로써 통합적인 관점의 공학적 검토를 수행 할 수 있었으며, 슈퍼컴퓨터(클러스터 컴퓨터)가 철도산업에 유용하게 적용됨을 보였다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원의 철도중합안전기술개발사업중 “철도화재 안전성능 평가 및 사고방지 기술개발”과제의 지원에 의하여 수행된 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. "TERA HPC Cluster Administrator Guide " (주)TERA TEC
2. 김학규 (2000년), “병렬처리 기법을 이용한 CFD해석의 가속화”, 석사학위논문
3. Kevin McGrattan, Bryan Klein, (2008) “Fire Dynamics Simulator (Version5) User Guide”, NIST
4. 박원희, 김동현, 장희철, 김태국(2006), “지하철 역사 승강장 화재발생시 열/연기 거동 분석을 위한 실험 및 수치연구(II) -수치적 접근-”, 한국화재소방학회 논문지, 제20권, 제3호, PP 15-20
5. 장용준, 김학범, 이창현, 정우성(2008), “대심도 지하역사에서의 화재시 플랫폼 스크린 도어에 의한 열, 연기거동 영향 분석”, 대한기계학회, 추계학술대회