



그리드 환경에서 분산된 자원을 이용한 다단 로켓의 유동해석

Flow Analysis of Multi-stage Rocket using Heterogeneous Resources
based on Grid Environment고순흠¹⁾, *정명우*¹⁾, 김종암¹⁾, 노오현¹⁾, 이상산²⁾

Soon-Heum Ko, Myungwoo Jung, Chongam Kim, Oh-Hyun Rho, and Sangsan Lee

통신 기술의 비약적 발전에 힘입어 기존의 Parallel Computing만으로는 해석할 수 없었던 거대 규모의 문제를 원격지에 있는 고성능의 자원간 연동을 통해 해석하고자 하는 연구가 활발히 진행중이며, 이와 같은 개념을 Grid Computing이라 한다. 본 연구에서는 Grid 환경을 이용한 CFD 해석 방안에 초점을 맞추고 있으며, 이를 위하여 분산된 컴퓨팅 자원을 다양하게 조합하여 Grid 환경에서의 Load Balancing을 위한 병렬 효율에 대한 연구를 수행하였다. 그리고, 다양한 성능 테스트의 결과를 기반으로 Grid 환경에서 두 개의 보조 부스터를 가지는 병렬형 다단 로켓에 대한 유동 해석을 수행하였다.

1. 서론

Moore의 법칙에 따르면 컴퓨터의 속도는 18개월에 약 2배정도 빨라진다는 것이 알려져 있다. 이와 같은 컴퓨팅 성능의 비약적 발달에 맞추어 전산유체역학에서 해석대상의 규모는 매우 크게 확장되어 왔다. 그러나 현재 많은 해석대상은 국소 컴퓨터 자원만을 사용하여 해석하기에는 불가능할 정도의 거대한 컴퓨팅 파워를 필요로 한다. 그래서 하나의 대안으로서 '그리드'란 개념으로, 이중적인 컴퓨터자원을 이용하기 위해 연구가 진행중에 있다.[1, 2].

하지만, 그리드를 이용한 전산 해석은 기존에 해석 불가능하던 거대 규모의 문제를 해석할 수 있게 함은 명백하나, 원격지에 있는 컴퓨터 자원간의 통신시간과 비능률적인 작업 할당으로 인하여 병렬효율은 상대적으로 감소된다.

따라서 본 연구에서는 이중적인 컴퓨팅 자원 환경에서의 효과적인 유동해석에 초점을 맞춘다. 첫째로 이중적인 컴퓨터 자원간 병렬 성능을 테스트해 볼 것이며, 성능테스트 결과를 바탕으로 그리드 환경에서 2개의 부스터를 가진 로켓주위의 유동 해석을 위해 전체 작업량을 분배하도록 한다.

2. 지배방정식과 수치 해석자

2.1 지배방정식

지배방정식으로서 3차원 압축성 Euler방정식이 사용되었다. 일반적인 곡선좌표계(ξ, η, ζ)로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0$$

where

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho e \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho u v \\ \rho u w \\ (\rho e + p)u \end{pmatrix},$$

$$F = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho v u \\ \rho v^2 + p \\ \rho v w \\ (\rho e + p)v \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho w u \\ \rho w v \\ \rho w^2 + p \\ (\rho e + p)w \end{pmatrix}$$

2.2 수치 해석자

공간차분법으로서 AUSMPW+(modified Advection Upstream Splitting Method Press-based Weight function) 이 적용되었다.

1) 서울대학교 기계항공공학부 (151-742 서울시 관악구 신림동 Tel : 02-880-1903)

2) KISTI 슈퍼컴퓨팅 센터



AUSMPW+은 셀의 경계면에서 압력 가중함수를 적용시킴으로서 AUSM 과 AUSM+ 과 같은 해석자의 non-monotone pressure solutions을 제거하도록 디자인 되었다. 또한, 고차의 공간정확도를 위해 MUSCL(Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws) 이 사용되었다.

시간적분을 위하여는 LU-SGS(Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel) 기법이 사용되었다.

격자계로서는 Chimera overset 그리드 격자계가 2개의 부스터가 달린 로켓 형상에 적용에 되었다. 그리고 주로켓 주위의 격자는 주로켓에 달려 있는 핀의 묘사를 위해서 3개의 블록으로서 제작되었다.

3. 그리드를 이용한 유동해석

3.1 필요요건

그리드 환경에서의 유동 해석을 위해 message passing library와 같은 통신도구가 필요하다. 그리드 환경에서는 국부적 네트워크 환경으로 연결되어 있지 않은 기기들간의 통신을 위하여 각각의 컴퓨터 자원에 Globus[3]가 설치되어야 한다. 또 유동 해석 수행시 각 기기간의 경계 정보 교환을 위한 라이브러리로서 Globus를 사용하는 MPICH-G2[4]가 설치되어야 한다.

3.2 그리드망에서의 작업시의 유의점

그리드 환경에서, 특히 WAN(Wide Area Network)을 사용했을 때의 통신 속도는 로컬 클러스터 내부에서의 통신속도에 비해 엄청나게 느려진다. 따라서 유동해석에 있어서 보다 나은 성능을 위해 가장 느린 링크(WAN환경으로 연결되어 있는 기기간의 통신)의 사용을 줄이도록 할당되어야 한다.

그리고 그리드 환경이 이중적인 컴퓨팅 자원으로 구성되어졌을 때 성능저하는 모든 프로세서들에게 똑같은 양의 작업량을 할당함으로 야기될 수 있다. 그러므로 전체 작업은 컴퓨팅 자원의 성능을 고려하여 분산되어야 한다.

3.3 컴퓨팅 자원

3개의 이중적인 컴퓨팅 자원을 사용하여 그리드 환경에서 유동해석을 계산하였다. 모든 컴퓨팅 자원은 서울대학교 공력시뮬레이션 실험실에

서 사용되어지는 것이다. 그러므로 모든 자원은 LAN(Local Area Network)에 의해 통신을 한다. 각각의 자원에 Globus와 MPICH-G2를 설치하였다.

그림1 은 본 연구에서 사용한 그리드 환경의 컴퓨터 시스템을 보여주고 있다. 사용된 자원 중 SPM은 4개의 노드를 가진 로컬 클러스터이며 이외의 것들은 단일 PC이다. SPM의 각각의 노드는 P-III 933 MHz dual CPU 와 512MB RAM 로 구성되어 있다. 각각의 노드는 글로버스 툴킷을 사용하기 위해 실제 IP와 호스트 네임이 부여되어있다. 단일 PC인 fastcfd4는 로컬 클러스터의 제어를 위한 마스터 컴퓨터로서 사용되고 있으며, P-III 500MHz CPU 와 512MHz RAM 으로 구성되어있다. 그리고 또하나의 단일 PC로서 mana는 P-III 866MHz CPU 와 256MB RAM로 구성되어 있다.

4. 결 과

4.1 성능 테스트

작업의 효율적인 할당을 위해 이중적인 컴퓨팅 자원들을 다양하게 조합하여 병렬 성능을 테스트 해 보았다. 성능 테스트를 위해서 2개의 프로세서를 사용하는 간단한 포트란 프로그램을 제작하였다. 이 때 포트란 프로그램은 1)데이터 파일로부터 데이터를 읽는 파트, 2)간단한 계산 파트, 3)프로세서간의 통신 파트로 구성되어진다. 첫 번째 파트는 주로 메모리의 성능과 관련되어지고 두 번째 파트는 CPU, 그리고 세 번째 파트는 통신 스피드와 관련된다. 다양한 컴퓨팅 자원을 조합하여 성능을 테스트 결과는 표 1에 나타내었다.

첫 번째 테스트에서 전체 계산 시간이 Ref.의 테스트 결과 보다 약간 증가했음을 알 수 있다. 그리고 통신시간(파트3)은 약 2배정도 증가했으며 계산시간(파트2)은 약간 감소했다. 이것은 서로 다른 노드간에 작업이 할당되었을 때 계산은 약간 빨리지만 프로세서간의 통신에는 상당한 손실이 생김을 알 수 있다. 그것은 로컬 클러스터 내에서 내부 통신을 할 수 없는 MPICH-G2의 문제로부터 야기된다. 그러나 첫 번째 테스트의 자원 조합은 작업이 통신에서 작은 부분을 필요로 할 때 제시될 수 있다.

두 번째 테스트는 이중적인 컴퓨팅 자원인

SPM과 fastcfd4를 조합한 성능 테스트로, 그 결과를 표 1.2에 나타낸다. 전체 계산 시간은 성능이 낮은 fastcfd4에 의존적인 경향을 보이고 있다. 두 번째 테스트의 전체 계산시간은 첫 번째 경우와 비교하여 약 두 배 정도 걸림을 볼 수 있다. 표 1.2를 살펴보면 fastcfd4는 데이터를 읽어들이는 데 SPM에 비해 약 115% 정도 더 시간이 필요하지만 SPM과 fastcfd4간의 통신시간은 첫 번째 테스트의 결과에 비해 약 15% 정도 더 많은 시간이 소요함을 볼 수 있다. 이는 동일한 클러스터 내에서의 노드간 통신 역시 LAN-TCP를 사용하는 MPICH-G2의 특성상 동일한 LAN 환경 내에 있는 기기간의 통신 속도는 거의 같아지게 되기 때문이다.

두 번째 테스트에서 SPM의 통신시간은 약 167초 정도이다. 이것은 작업량의 불균형적 할당으로 인해 SPM이 fastcfd4가 통신을 할 준비가 될 때까지 기다리고 있음을 의미한다. 즉, SPM이 약 150초 정도 fastcfd4가 계산을 마칠 때까지 기다려야 한다는 것을 의미한다.

4.2 다단로켓의 유동해석

KSR-III(Korea Sounding Rocket) 주위의 유동장을 그리드 환경에서 해석하였다. 자유류 조건은 마하수 1.7 이며 받음각은 0°로 하였다. 6개의 프로세서가 병렬 처리에 사용되었고, 약 66,000개의 격자점을 각각의 프로세서에 할당하였다.

그리드 환경에서 유동해석의 결과와 수렴성은 로컬 클러스터에서의 실행결과와 동일하였다. 그림 2는 KSR-III의 압력 분포를 보여주고 있으며 Ref.[5]에서와 같은 결과가 나타나고 있다.

성능테스트를 위해 3개의 다른 컴퓨팅 자원을 조합하여 해석하였다. 그리드 환경에서의 해석 수행 결과는 그리드망을 이용하지 않고 동일한 자원을 이용한 경우의 결과와 비교해 보았다. SPM과 mana를 조합한 결과는 SPM만 사용했을 때와 비교하였다. 그리고 2개의 단일 PC 와 SPM의 조합은 fastcfd4와 같은 컴퓨터 성능을 가진 다른 로컬 클러스터인 mCluster의 성능테스트 결과와 비교해 보았다. 모든 경우에서 동일한 수의 격자점을 각각의 프로세서에 할당 하였다.

전체 유동 해석자는 4개의 파트로 나누어진다. 첫째는 변수를 정의 하고 RAM에 그리드 격자점

을 저장한다. 두 번째는 cell의 metric과 볼륨을 계산한다. 세 번째는 Chimera 격자계와 관련된 서브루틴을 포함하고 있다. 서브루틴은 hole과 fringe cell을 찾는 부분과 domain connectivity의 계산이 포함된다. 마지막으로 네 번째는 유동의 해석과 관련된다. 표 2는 계산시간의 분석 결과를 보여주고 있다.

표 2.1에 나타나는 것과 같이 로컬 클러스터 내의 프로세서만을 사용하여 해석을 수행하는 경우 그리드 환경에서의 계산에 소요되는 해석 시간이 더 좋지 않음을 알 수 있다. 이것은 4.1절에서 언급했듯이 통신 속도의 저하 때문이다.

두 번째 테스트에서 mana의 성능은 3.3절에서 언급한 것과 같이 SPM보다 좋지 않다. 그러므로 두 번째 경우에서 성능저하가 나타나는 것은 프로세서간의 작업량 불균형이 있기 때문이다.

세 번째 테스트는 흥미로운 결과를 나타내고 있다. 세 개의 다른 컴퓨팅 자원(SPM, mana, fastcfd4)이 조합되었을 때, 할당되는 작업량의 불균형에 의해 전체 해석에 소요되는 시간은 성능이 가장 나쁜 fastcfd4에 의존적일 수밖에 없다. 그러므로 mCluster를 이용한 해석 결과와 서로 다른 3개의 자원 조합에 의한 해석 결과를 비교했을 때 요구되는 계산시간은 같을 것이고, 통신에 소요되는 시간은 3개의 자원을 조합하는 경우 mCluster만을 이용하는 경우보다 증가할 것이다. 예상한 바와 같이 유동 해석 파트에서의 계산 시간은 그리드를 이용한 해석의 결과가 더 나빠졌으며, 이는 그리드망을 이용하는 경우의 통신 속도 감소로 인한 것이다. 그러나 Chimera 계산과 연관되는 파트 3에서는 세 가지의 다른 컴퓨팅 자원들의 조합을 이용한 해석이 상대적으로 적은 계산 시간을 소요했음을 보여주고 있다. 이는 domain connectivity의 계산에서 부적절한 작업량 분배로 인하여 나타나는 결과임을 예상할 수 있다. 실제로, hole과 fringe cell을 찾고, 각각의 fringe cell에 대한 donor cell을 찾는 Chimera 계산 부분에서는 상대적으로 주 격자계에 할당된 프로세서들이 훨씬 많은 일을 하고 있으며, 고성능을 가지는 SPM의 프로세서들을 주격자계에 할당함으로써 동일한 기종인 mCluster를 이용하는 해석에 의한 결과보다 상대적으로 나은 결과를 얻게 되었다. 위의 결과로부터 그리드망에서의 작업 수행시 더 좋은 성능을 얻기 위해서는 상대적으로 낮은 성능을 가진 자원에 좀 더 적은



양의 작업량을 할당하는 것이 필요함을 생각할 수 있다.

위의 표 2.3에 의한 결과와 관련하여 좀 더 자세한 결과를 알아보기 위하여 격자를 재분배하였다. 그러나, 상이한 두 개의 격자제를 연계하여 해석하는 Chimera 격자 기법의 특성과, 실제 해석에 사용된 프로세서 수의 한계로 인하여 현재 사용되는 격자와 동일한 격자를 사용하면서 단지 각 프로세서에 할당되는 격자를 재분배하는 것은 많은 어려움이 따르므로 격자를 새로 제작하고 각 기기의 성능을 고려하여 분배하는 방식을 사용하였다. 이 때 재제작된 격자는 현재 그리드망에 포함된 각각의 프로세서들의 성능을 고려하여 할당되는 작업 수행에 소요되는 시간이 동일하도록 제작되었다. 이를 위하여 표 1에서 성능테스트를 통해 얻은 결과를 이용하였다. 표 1에 제시한 바와 같이 SPM과 mana, fastcfd4는 각각 $\frac{1}{150} : \frac{1}{170} : \frac{1}{300}$ 의 속도 비율로 연산을 수행한다. 따라서 이와 같은 비율로 격자를 가지게끔 격자를 재제작하고, 분배하였다. 기존 격자의 변형을 위하여 주격자제는 기존에 제작된 격자와 동일한 격자를 사용하며 분할된 각각의 격자를 SPM의 각 노드에 분배하였으며, 부격자제는 원주 방향으로의 격자 수를 감소하고 mana 및 fastcfd4에 분배시키는 방법을 사용하였다. 이 때 각각의 프로세서에 할당되는 실제 격자수는 그림 3에 나타난다.

이 경우 본 격자 할당이 최적화 되었다면 1회 iteration당 계산속도는 SPM만을 사용하는 경우와 같아야 한다. 그리고, 격자가 변하였으므로 수렴성은 변하게 될 것이다. 그러나 수렴성의 변화는 결과에 영향을 미치지 않아야 할 것이며, 이로 인해 수렴이 늦어지는 일이 있다면 이 또한 문제가 될 것이다. 따라서 많은 주의가 따라야 할 것이다.

그림 4에는 변형된 격자에 의한 해석의 수렴 곡선과 기존의 격자를 나타낸다. 그림을 통해 알 수 있듯, 수렴 양상은 거의 동일하였으나, 수렴성에 약간의 차이가 나타났으며, 수렴 판정 기준인 오차항이 5차 이하로 떨어지기까지의 반복 계산 횟수는 원래의 격자의 1527회에서 변형된 격자에서는 1812회로 약간 줄어들었다.

또한, 변형된 격자를 사용한 해석시의 해석 시간을 표 3에 나타낸다. 수렴성이 약간 다르며, 격

자수의 감소로 Chimera 관련 계산량이 감소하므로 실제로 해석을 수행하는 데 걸린 시간은 다중간의 컴퓨터 자원 조합에서 해석했을 때 더 빠른 결과를 나타내게 된다. 하지만, 유동 해석 파트에서 1회 iteration당 해석에 소요된 계산 시간을 살펴보면 SPM에서 수행한 원래 격자에서의 해석 시간은 $(3506.64/1827)=1.91934$ 였던 데 반해 재제작된 격자에서는 $(3536.52/1812)=1.95172$ 로 미세하게 증가한 계산시간을 보이며, 이는 fastcfd4와의 통신시에 상대적으로 낮은 통신 속도를 보이던 표 1에서의 결과와 같은 영향으로 생각할 수 있어 결론적으로는 효과적인 작업 분배가 이루어졌음을 생각할 수 있다.

5. 결론

그리드의 효율적인 사용을 위해 다양한 성능 테스트가 수행되었고, 성능테스트 결과로부터 이종적인 컴퓨팅 환경에서 최적화된 작업 분배의 필요성이 나타났다. 우선적으로 전체 작업은 사용할 자원의 용량을 고려하여 할당되어야 한다. 그리고 전체의 작업은 자원간의 통신을 최소화해야만 한다. 성능테스트 결과에 기초하여 다단 로켓주위의 유동은 그리드 환경에서 해석되었고 계산 시간은 컴퓨팅 자원간의 다양한 조합을 하여 비교하였다. 또한, 이종적 자원의 사용시 최적화된 작업 할당을 위하여 격자를 재제작하여 해석을 수행하였으며, 이 경우 총 해석에 소요된 해석 시간은 동종의 자원을 사용하는 경우의 해석 수행 시간과 거의 동일한 것으로 나타났다. 하지만, 격자의 변화에 의하여 최적화된 재분배를 이룬 것이므로 이는 수렴성과 해석 결과의 동일성에 영향을 미칠 수 있으며, 따라서 동일한 격자를 사용하는 경우의 격자 재분배에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다.

Acknowledgement

The present work is supported by Korea Institute of Science and Technology Information. Authors are grateful for their supports in many respects.

References

- [1] W. E. Johnston, D. Gannon and B. Nitzberg, "Information Power Grid

Implementation Plan: Research, Development, and Testbeds for High Performance, Widely Distributed, Collaborative, Computing and Information Systems Supporting Science and Engineering NASA Ames Research Center, Version 2.0 (2001)

[2] M. M. Resch, "Metacomputing in High Performance Computing Center", IEEE 0-7659-0771-9/00, pp. 165-172 (2000)

[3] <http://www.globus.org>

[4] <http://www3.niu.edu/mp/>

[5] 고순홍, 최성진, 김종암, 노오현, 박정주, "병렬화된 Chimera 격자 기법을 이용한 다단 로켓의 단분리 운동 해석", 한국전산유체공학회 춘계 학술대회 논문집(2002)

Table 1 Result of Performance Test

Ref : Between 2 CPUs in the same node of SPM

	CPU 1	CPU 2
Total Time	145.816637	145.819492
Part 1	119.667251	119.37415
Part 2	17.8019871	17.7258871
Part 3	6.678913	7.04711699

1.1 Between 2 CPUs in the different node of SPM

	Node 1	Node 2
Total Time	151.197318	151.184658
Part 1	119.04567	119.001909
Part 2	14.703642	15.082462
Part 3	15.723526	15.393719

1.2 In the heterogeneous computing resources (SPM and fastcfd4)

	SPM	fastcfd4
Total Time	303.59287	305.59926
Part 1	119.625762	258.15888
Part 2	14.8084	26.09995
Part 3	167.5189	17.68841

Table 2 Result of Computation Time

2.1 Performance of SPM in the Grid and in local network

	In The Grid	In Local Network
Total Time	4197.6232	4119.4244
Part 1	1.23502696	1.32605994
Part 2	0.191166043	0.18948102
Part 3	689.412114	646.42169
Part 4	3506.63967	3471.32874

2.2 Cooperation of SPM with mana

	SPM In The Grid	SPM & mana
Total Time	4197.6232	4406.8810
Part 1	1.23502696	1.26062799
Part 2	0.191166043	0.204951048
Part 3	689.412114	667.533023
Part 4	3506.63967	3737.73709

2.3 Cooperation of SPM, mana and fastcfd4

	mCluster	Cooperation of 3 Resources
Total Time	6301.8028	5839.6771
Part 1	3.90151799	1.28516901
Part 2	0.28568399	0.167994022
Part 3	1169.79942	688.741289
Part 4	5127.45414	5149.33069

Table 3 Comparison of Computation Time

	Original Mesh (SPM)	Modified Mesh (Heterogeneous Resources)
Total Time	4197.6232	4053.24531
Part 1	1.23502696	1.29525995
Part 2	0.191166043	0.170121074
Part 3	689.412114	515.128113
Part 4	3506.63967	3536.51568

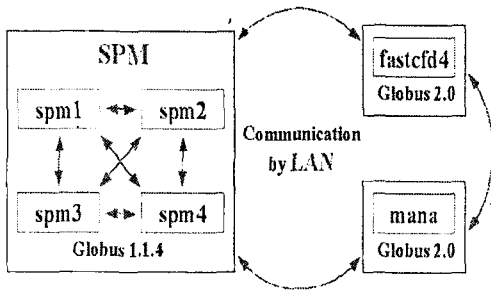


Fig 1. Composition of the local Grid

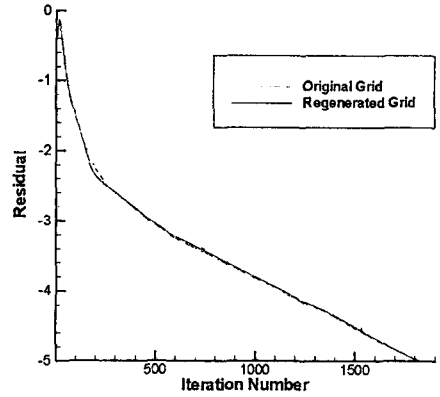


Fig 4. Residual History

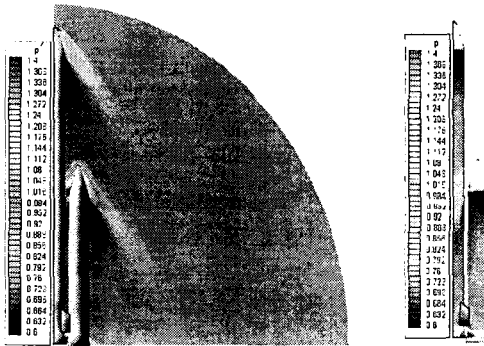
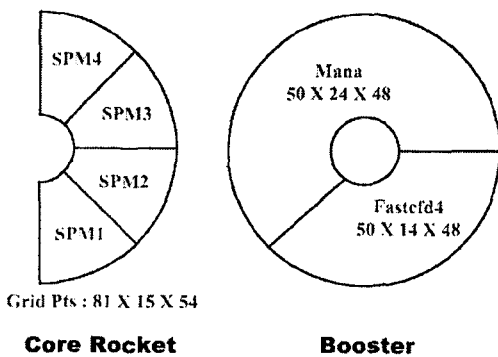


Fig 2. Pressure Contour of KSR-III



Core Rocket

Booster

Fig 3. Distirbution of Regenerated Mesh