



Aha, CST and CFD !

김 승 조,^{*1} 김 민 기,² 문 종 근²

S.J. Kim,^{*1} M.K. Kim² and J.K. Moon²

This paper presents the state of the art of computational structures technology(CST) and comparison of two computational mechanics - CST and CFD, to the CFD engineers. Classical mechanics is based on the five classical axioms which describe the motion and behaviors of the continuum materials like solid structures and fluids. Computational structures technology uses the finite element method to solve the governing equation, whereas finite volume method is generally used in CFD. A few famous commercial structural analysis programs and DIAMOND/IPSAP will be introduced. DIAMOND/IPSAP is the efficient parallel structural analysis package developed by our research team. DIAMOND/IPSAP shows the better performance than the commercial structural analysis software not only in the parallel computing environments but also in a single computer.

Key Words : 전산구조역학(CST), 전산유체역학(CFD), 연속체방정식, 유한요소법

기호 설명

ρ : 밀도
 u : 변위 벡터
 v : 속도 벡터
 a : 가속도 벡터
 σ : 응력 텐서(stress tensor)
 ϵ : 변형률 텐서(strain tensor)
 e : 단위질량당 내부 에너지
 p : 압력
 S : 점성응력 텐서
 F : 변형 텐서(deformation gradient tensor)
 J : 변형 텐서의 행렬식
 D : 속도변형률 텐서(rate of strain tensor)
 E : 응력-변형률 탄성계수 텐서
 b : 체적력 벡터(body force vector)
 q : Fourier 열유속 벡터
 r : 복사열로 인한 source term
 κ : 열전달계수
 μ : 절대점성계수
 T : 온도

1 교수, 서울대학교 기계항공공학부, 비행체특화연구센터

2 서울대학교 기계항공공학부

* Corresponding author, E-mail: sjkim@snu.ac.kr



1. 서론

컴퓨터가 등장하면서 복잡하고 많은 시간과 비용이 들어가는 실험 대신 이들을 컴퓨터 계산으로 모사하기 위한 전산역학이라는 새로운 학문분야가 생겨났다. 컴퓨터 하드웨어의 발전과 더불어 그 분야가 확대되면서 이들의 중요성 역시 날로 높아지고 있다. 전산역학 가운데 중요한 두 분야인 전산유체역학과 전산구조역학은 모두 연속체의 운동을 서술하는 편미분방정식을 푸는 점에서 그 근본이 동일하지만 방정식의 구체적인 형태나 수치기법은 상당히 다르다. 그러하기에 결과적으로 연속체운동방정식을 모사한다는 공통점이 있음에도 불구하고 서로에 대한 이해가 부족한 것이 사실이다. 따라서 본 논문에서는 전산유체역학 엔지니어들을 위하여 전산구조해석의 소개 및 연구 동향, 전산유체역학과의 비교, 유명 구조해석 프로그램 소개 및 본 연구실에서 개발한 구조해석 패키지 DIAMOND/IPSAP에 대해 설명하고자 한다.

2. 고전역학 5대 연속방정식

2.1 고전역학 5대 연속방정식

고전역학에는 질량보존 및 역학의 기본 원리를 서술한 다섯 개의 공리가 존재한다.

1. 질량보존의 법칙
2. 선운동량 보존 법칙
3. 각운동량 보존 법칙
4. 열역학 제 1법칙
5. 열역학 제 2법칙

이들 5대 원칙을 연속체에 적용하면 다음과 같은 5개의 미분방정식 및 부등식이 나오게 된다[1].

$$\rho J = \rho_0 \quad (1)$$

$$\rho a = \nabla \cdot \sigma + \rho b \quad (2)$$

$$\sigma^T = \sigma \quad (3)$$

$$\rho \dot{e} = -\nabla \cdot q + \rho r + tr(\sigma D) \quad (4)$$

$$\rho \dot{\eta} + \nabla \cdot \left(\frac{q}{\theta} \right) - \frac{r}{\theta} \geq 0 \quad (5)$$

위의 방정식들은 모두 재료의 입자를 기준으로 한 변수들이고 이를 라그랑지안(Lagrangian) 혹은 재료(material) 기반 장(field) 방정식이라고 부른다. 한편으로 고정된 공간좌표 위에서 동일한 의미의 연속방정식을 유도할 수도 있고 이를 오일러리안(Eulerian) 기반 장 방정식이라고 부른다.

그리고 (2)와 (4)의 시간에 대한 미분 역시 재료의 입자를 기준으로 하며 모든 물리량 x 에 대해 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\dot{x} = \frac{Dx}{Dt} = \frac{\partial x}{\partial t} + v \cdot \nabla x \quad (6)$$

라그랑지안 기반으로 연속방정식을 이산화할 경우 모든 물리량이 격자의 노드에 분포하고 격자계 자체가 속도장에 맞게 변하기 때문에 질량보존은 자동으로 만족하게 된다. 그리고 오일러리안 격자계에 비해 식 (6)의 시간미분을 쉽게 처리할 수 있다는 장점이 있지만, 격자계의 변형이나 회전이 매우 클 때는 적합하지 않기에 주로 고체의 연속방정식 해석에 한정되어 사용된다. 반면에 오일러리안 격자계는 질량보존이 강한 제약조건으로 작용하는 데에다가 식 (6)의 대류항을 정확히 계산하기 쉽지 않다는



문제점이 있지만, 공간좌표를 물리량의 기준으로 삼으므로 고정된 격자계를 사용할 수 있기에 유동현상이 포함된 시스템에 주로 사용된다.

2.2 유동방정식

라그랑지안 관점의 질량보존 법칙 (1)은 시간에 대한 미분이 들어있지 않다. 이를 시간에 대한 미분 (6)을 양변에 취하고 오일러리안 관점에서 식을 기술하면 아래와 같이 된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (7)$$

그리고 응력 σ 및 열유속 q 를 물질에 따라 어떻게 놓느냐에 따라서 방정식 (2)와 (4)의 형태가 결정된다. 이렇게 응력이나 열유속을 정의하는 방정식을 구성방정식(constitutive equation)이라고 부른다. 응력을 결정짓는 인자로는 변형률을 포함하여 속도장, 내부에너지 등 여러 가지가 있다. 고체의 경우 탄소성을 포함한 비선형 해석은 그 형태가 무척 복잡하다. 그러나 선형 재료로 논의를 단순화시키면 응력은 변형률의 선형 관계식 (8)로 적용할 수 있다.

$$\sigma = E\epsilon \quad (8)$$

E 는 응력-변형률 관계를 정의하는 4차 텐서이다. 만일 좌표계에 등방적인(homogeneous) 재료의 경우 응력-변형률 탄성계수 텐서는 2개의 물리량으로 요약할 수 있다. 한편 유동장의 경우 응력은 주로 압력과 속도장의 영향을 받게 되며 아래의 관계식을 적용할 수 있다.

$$\sigma = -pI + S = -pI + C(\dot{\epsilon}) = -pI + C(D) \quad (9)$$

뉴턴유체(Newtonian fluid)의 경우 점성응력 S 는 Stokes의 가정을 통해, 절대점성계수 μ 라는 단일한 물리량에 의해 지배되며 압력과 속도변형률 텐서를 통해 아래와 같이 서술할 수 있다[2].

$$\sigma = -\left(p + \frac{2}{3}\mu \text{tr}(D)\right)I + 2\mu D \quad (10)$$

속도변형률 텐서 D 는 식 (3)의 조건에 의해 대칭텐서로서 표현해야 한다.

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

압력과 내부에너지, 밀도와와의 관계를 정의하는 상태방정식을 생각할 수 있다. 비압축성 유체의 경우 밀도가 항상 일정하고 압력과 내부에너지는 무관하다. 반면 유체를 이상기체로 가정할 경우 기체상수 R 를 도입하여 아래의 관계가 성립한다.

$$p = \rho RT \quad (12)$$

한편 단위질량당 내부에너지를 절대온도와 비열의 곱으로 단순화하고 전도에 의한 열유속벡터는 일반적으로 다음의 식이 성립하므로,

$$q = -\kappa \nabla T \quad (13)$$



전체 에너지 보존식 (4)는 아래와 같이 된다.

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \kappa \nabla^2 T + \sigma : D + \rho r \quad (14)$$

이상을 종합하여 유체역학에 적용되는 지배방정식을 나타내면 아래와 같다. 전체 응력 성분을 압력 p 와 점성에 의한 항 S 로 구분하고 여기에 구성방정식 및 상태방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\rho_t + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (15)$$

$$\rho(v_t + v \cdot \nabla v) = -\nabla p + \nabla \cdot S + \rho b \quad (16)$$

$$S^T = S \quad (17)$$

$$\rho C_p (T_t + v \cdot \nabla T) = \kappa \nabla^2 T + \rho r + \text{tr}(\sigma D) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= -pI + S \\ S &= S(D, T) \\ p &= p(T, \rho) \end{aligned} \quad (19)$$

널리 사용되는 비압축성 뉴턴유체의 경우 아래와 같은 포물선형 편미방으로 쓰일 수 있다.

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (20)$$

$$\rho(v_t + v \cdot \nabla v) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho b \quad (21)$$

$$\rho C_p (T_t + v \cdot \nabla T) = \kappa \nabla^2 T + \rho r + \sigma : D \quad (22)$$

2.3 구조동역학 지배방정식

앞서 기술했다시피 라그랑지안 기반 구조동역학 문제에서는 질량보존의 법칙 (1)은 자동으로 만족한다. 논의를 간단하게 하기 위해 상태방정식에서 응력을 결정하는 인자가 오직 변형률이고 선형으로 가정할 경우 식 (8)의 관계로 단순화할 수 있다. 응력 텐서 σ 및 변형률 텐서 ϵ 가 모두 대칭이므로 탄성계수 텐서 E 역시 대칭이어야 한다. 유동장과 다르게 응력을 결정짓는 가장 큰 요소는 변위를 공간에 대해 미분한 변형률이다.

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (23)$$

라그랑지안 기반 구조동역학 방정식은 아래와 같다.

$$\rho a = \nabla \cdot \sigma + \rho b + f_{ext} \quad (24)$$

$$\sigma^T = \sigma \quad (25)$$



$$\sigma = S(\epsilon, e, \dots) \quad (26)$$

유동해석과 다르게 구조해석의 경우 아래와 같은 평형상태에 대한 해를 구하는 것이 가장 많으며 시간영역의 해는 주로 충돌, 충격해석 시에 국한되어 사용된다.

$$\nabla \cdot \sigma = \rho b + f_{ext} \quad (27)$$

$$\sigma^T = \sigma \quad (28)$$

구조동역학에서 중요시되는 또 다른 하나는 바로 구조물의 고유치 해(eigensolution)이다. 주기적인 운동을 하는 기계나 구조물에서 고유치는 구조물의 안전성을 결정짓는 매우 큰 요소이기에 구조물의 고유해는 구하는 일은 무척 중요한 일이다. 구조물의 고유치를 ω , 고유벡터를 u_e 로 놓을 때 아래와 같은 0이 아닌 고유벡터와 그에 대응하는 고유치를 구하는 것이다.

$$u = u_e e^{i\omega t}, \quad u_e \neq 0 \quad (29)$$

$$(-\omega^2 M + K)u_e = 0 \quad (30)$$

3. 수치해석 기법

2장의 연속체 운동방정식을 푸는 수치적인 기법으로는 크게 유한차분법, 유한체적법, 유한요소법 등이 있다. 유동방정식의 경우 세 가지 수치 기법 모두가 널리 사용되는 데 비해 구조문제의 경우 유한요소법만이 사용된다. 이번 장에서는 세 가지 수치기법에 대한 간략한 설명과 그 특징을 서술하겠다.

3.1 유한차분법

유한차분법에 의한 미분방정식 풀이는 이해하기 무척 쉽고 직관적이다. 하지만 복잡한 격자계에 적용이 쉽지 않고 보존식을 만족하지 않는다는 점에서 그 사용처는 제한적이다. 다만 직교격자계 등의 단순한 문제에서는 지금도 널리 사용되고 있다. 미분방정식의 해는 이산화된 공간상의 노드 점의 값들로 근사화되며 아래는 1, 2차 공간미분에 대한 유한차분의 예이다.

$$u \approx u_i$$

$$u' = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2h} : \text{central difference} \quad (31)$$

$$u' = \frac{u_{i+1} - u_i}{h} : \text{forward difference}$$

$$u' = \frac{u_i - u_{i-1}}{h} : \text{backward difference}$$

$$u'' = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{h^2} \quad (32)$$

3.2 유한체적법

유한체적법은 유동장 해석에서 가장 널리 사용되는 수치기법이다. 앞의 유한차분법과 달리 유한체적법은 제어체적(control volume) 개념을 수치해석에 도입하여 각 제어체적의 보존식을 만족시키는 방정식의 해를 구하게 된다. 유동장에서 일반적으로 등장하는 수송방정식(transport equation)의 경우 각 제어체적에 다음의 보존식에 적분을 취하면 아래와 같다[2].



$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \phi dV + \int_{\partial\Omega} \rho \phi v \cdot n dS = \int_{\partial\Omega} \Gamma \nabla \phi \cdot n dS + \int_{\Omega} f_s dV \quad (33)$$

여기서 ϕ 는 임의의 물리량이고 두 번째 항은 대류(convection)에 의한 수송, 세 번째 항은 확산(diffusion)에 의한 항이고 마지막은 기타 소스(source)항이다. 두 번째 항에서 제어체적 사이의 물리량을 계산하기 위해 중앙차분법(central difference), 풍상차분법(upwind difference) 등의 다양한 기법들이 나와 있다. 중앙차분법은 수치적으로 정확하지만 불안정성을 내포하고 있으며, 풍상차분법은 수치적 안정성이 뛰어나지만 정확도가 낮아 가상 확산(false diffusion)이라는 오차가 생긴다. 수치적으로 안정하면서도 정확도가 높은 차분법을 고안하기 위해 지금도 많은 연구가 진행 중에 있다.

3.3 유한요소법

유한요소법은 구조물 해석을 위해 고안되었으며 이후 많은 발전을 거쳐서 유동해석을 포함한 여러 분야의 편미분방정식 해법에 많이 사용되고 있다. 원래 방정식에 임의의 테스트 함수를 곱한 뒤 적분을 취한 범함수가 최소가 되는 해가 바로 방정식의 해가 된다. 이 방법의 장점은 원래 방정식보다 수학적으로 더 넓은 범위에서 해를 구하기 때문에 재료의 불연속성이나 집중 하중 등을 용이하게 처리할 수 있다는 것이다. 간단한 타원형 방정식을 예로 들어보자.

$$-\nabla \cdot (k \nabla u) + bu = f \quad (34)$$

위의 방정식에 임의의 함수 v 를 곱한 뒤 적분을 취하고 확산항에 발산정리를 적용하여 정리하면 아래와 같이 된다[3].

$$\int_{\Omega} (k \nabla u \cdot \nabla v + buv) dV = \int_{\Omega} f v dV + BC \quad (35)$$

v 는 임의의 함수이므로 식 (35)을 만족시키는 해는 바로 (34)의 해가 된다. 하지만 식 (35)의 해는 1차 미분의 제곱이 적분가능한 함수공간에서 찾을 수 있으므로 수학적 제약이 (34)에 비해 훨씬 약해졌다고 볼 수 있고 이러한 형태를 약형(weak form)이라고 부른다.

유한차원에서 해를 찾기 위해 해 u 와 테스트 함수 v 를 아래의 기저함수(basis function)의 선형 합이라고 가정한다.

$$\begin{aligned} u &= \sum_{j=1}^N u_j \theta_j \\ v &= \sum_{i=1}^N v_i \theta_i \end{aligned} \quad (36)$$

식 (36)를 (35)에 대입하고 정리하면 아래와 같은 등식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=1}^N v_i \left[\sum_{j=1}^N K_{ij} u_j - F_i \right] = 0 \quad (37)$$

v_i 는 임의의 수이므로 위 등식은 아래의 선형방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} K_{ij} u_j &= F_i \\ K_{ij} &= \int_{\Omega} k \nabla \theta_i \cdot \nabla \theta_j + b \theta_i \theta_j dV \\ F_i &= \int_{\Omega} f \theta_i dV \end{aligned} \quad (38)$$



식 (34)에서 K, F 를 순서대로 강성행렬, 하중벡터라고 부른다. 보통 강성행렬 K 는 대칭 양행렬이라는 특징이 있기에 비대칭 행렬보다 계산시간 및 저장공간에서 큰 이점이 있다.

위의 예를 식 (27)의 정적문제에 적용해 보자. 2차원의 경우 응력, 변형률, 미지수(변위)는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}, \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \tag{39}$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad \epsilon = Du, \quad \sigma = E\epsilon = EDu \tag{40}$$

$$\nabla \cdot \sigma = D^T \sigma = D^T EDu = f_{ext} \tag{41}$$

식 (41)에 약형을 취하여 정리하면 아래와 같은 유한요소 강성행렬과 하중벡터를 얻는다.

$$K = \int_{\Omega} (D\Theta)^T ED\Theta dV \tag{42}$$

$$F = \int_{\Omega} \Theta^T f_{ext} dV$$

3.4 전산역학 분야 요약 비교

앞선 2,3 장의 내용을 요약하면 두 가지 전산역학 분야는 Table 1로 요약할 수 있다.

Table 1 Comparison of CST and CFD

	전산유체역학(CFD)	전산구조역학(CST)
지배방정식	Eulerian	Lagrangian Eulerian
미지수	속도, 압력	변위, 응력
수치기법	유한체적법 유한차분법 유한요소법	유한요소법
수학적특성	포물선형(비압축성) 쌍곡선형(압축성, 공간)	타원형(정적) 쌍곡선형(동적, 시간)

4. 유한 요소 구조해석 기술

구조해석 도구로서의 유한요소 해석법은 항공기, 자동차, 선박 등의 대형구조물의 경우 해석의 결과가 제품의 구조안전성을 확인하는 기준으로 사용될 정도로 공인되고 있으며 조그만 기계 부품, 가전 제품 등의 설계 제작에도 필수적으로 활용되고 있다. 이와 같은 연산환경을 바탕으로 한 공학기술분야의 눈부신 발전에 따라 점점 대형화되고 정교해지는 복잡한 구조물의 효율적 설계 해석을 위해 초대형 고정밀 유한요소 구조해석 기술의 필요성이 그 어느 때 보다도 강조되고 있다.



4.1 대형 병렬 소프트웨어 개발 연구

Salinas 프로젝트[4]는 미국 에너지성의 ASCI (Accelerated Strategic Computing Initiative) 프로젝트의 일환으로, 1억 에서 수십억 에 이르는 자유도를 필요로 하는 매우 복잡한 구조물의 응력, 진동, 과도응답 동역학 문제등의 유한요소 모델에 대한 확장성이 강한 계산 도구의 제공을 목적으로 한다. Salinas는 프로그램의 이식성검토를 시작으로 하여, 1999년까지 ASCI Red 시스템의 1,000개의 CPU에서 병렬 확장성(Scalability) 검증을 시작하였고, 현재 ASCI Red의 2,940개의 CPU에서 292,5Gflop/s로 총 CPU 효율의 30%의 성능 얻고 있다. 또한 일본의 Adventure 프로젝트[5]의 경우, JSPS(Japan Society for the Promotion of Science)에서 주관하는 RFTF (Research for the Future Program) 프로그램의 하나로 1997 ~ 2002년까지 추진되었다. Adventure 프로젝트는 1,000만 에서 1억 미지수 수준의 초대형 구조해석 문제를 1시간에서 하루 이내에 해결하는 것을 목표로 하여, 잘 알려진 슈퍼컴퓨터인 Earth simulator를 통해 100만 자유도인 핵 압력 용기 모델을 5.1Tflops의 성능으로 8.5분에 수행하였다. Adventure에는 병렬 구조 해석 알고리즘부터 Pre/Post 처리 루틴, 가시화 소프트웨어까지 모두 개발을 하고 있으며, 웹을 통해서 계속 업데이트 버전을 공개하는 등 지속적인 연구가 이루어지고 있다.

4.2 주요 구조해석 상용 프로그램

NASTRAN, ANSYS, ABAQUS 등의 프로그램들은 모두 수 십 년의 역사를 통해 오랜 기간 개발되어온 상용 프로그램으로 컴퓨터 이용 설계(CAE)분야에서 전 세계적으로 항공, 자동차, 일반기계, 의학, 생명공학, 철도, 전기기계 분야 등 다양한 분야의 설계에 응용되고 있다.

NASTRAN의 경우, 1960년대 초 미 항공우주국(NASA)에서 우주선의 구조 해석을 위해 개발한 구조 해석 프로그램에서 출발하여 지난 30여 년 간의 연구 개발을 통하여 대다수 산업 분야의 표준 해석 시스템으로 자리매김한 범용 유한요소 해석 프로그램이다. 특히 MSC.NASTRAN의 경우 약 100만 줄의 Source로 이루어져 있으며, 이를 사용자들이 쉽게 이용할 수 있도록 기능별로 모듈화 되어 있으며, 또한 모든 해석 결과는 약 5,000개의 엄격한 유한요소 패치테스트를 거쳐, 최상의 신뢰성을 보장하고 있다.

ABAQUS의 경우, 사용자들에게 통합된 유한 요소 해석 환경을 제공하기 위하여 선형, 비선형, 충돌 및 다물체 동역학 문제들에 대한 해석 결과를 제공하고 있다.

또한 ANSYS의 경우, 구조, 진동, 열전달, 전자기, 압전, 음향, 열유체, 충돌낙하까지의 넓은 해석기능을 Pre-/Post & Solver 일체형으로 제공하고 있으며, 특히 자기장-구조, 자기장-열, 자기장-유동 등의 다양한 연계해석 분야에서 독자적인 기술과 노하우를 가지고 있다. 이외에도 LS-DYNA와 PAM/CRASH는 충돌 해석 분야에서 우수한 성능을 바탕으로 대부분의 자동차 개발 업체에서 사용되고 있다.

그렇지만 이들 구조해석 프로그램 패키지들은 대부분 종전에는 CRAY등의 벡터형 중앙 집중식 슈퍼컴퓨터가 지배적이었던 시절에 개발되었기에 역사성에 기인한 전통성(Heritage)과 이에 따른 과감한 알고리즘 변경의 어려움 등으로 병렬 성능 향상에 어려운 점이 많은 것도 사실이다. 일례로, ABAQUS의 경우 1CPU에 대한 해석 성능은 최신 알고리즘을 가진 프로그램에 버금가지만, 8개 이상의 CPU를 사용할 경우 병렬 효율 성능에 한계를 가지고 있는 것이 잘 알려져 있다. 이들 소프트웨어들은 오랜 연구개발 기간으로 인하여 다양한 알고리즘과 풍부한 해석기능을 갖추고 있으나, 병렬 성능이 중요해지는 앞으로의 컴퓨팅 패러다임 환경에서는 오히려 제약사항이 되고 있는 것이다. 이는 고성능 계산 자원을 구비하고도 소프트웨어의 성능 문제로 인하여 기대했던 성과만큼 얻기 어렵다는 것을 의미한다. 특히 요즘 CPU 발전 추세는 PC수준에서도 발열과 소비전력의 문제로 멀티코어 등의 단일 연산 유닛 내부에서조차 병렬화를 구현하고 있다는 점이다.

4.3 고성능 병렬 구조 해석 프로그램, IPSAP과 전후처리 프로그램, DIAMOND/IPSAP

본 연구팀에서 개발한 IPSAP은 Internet Parallel Structural Analysis Program의 약자로서 10여 년 전부터 연구 개발이 시작되었으며, 분산 병렬 환경에서 유한요소 기반의 제반 구조 역학 문제를 효율적으로 풀 수 있도록 만들어진 프로그램이다. 이 프로그램의 핵심사항으로써 병렬 환경에 적합한 효율적인 병렬 다중 프론트 해법이 개발되었고 이를 이용하여 1억 미지수 수준의 구조 모델을 다룰 수 있는 능력을 보유하고 있다. 이러한 IPSAP 구조해석 프로그램은 병렬 계산 환경에서의 우수한 계산 성능뿐만 아니라 단일 계산 환경에서도 최고의 프로그램 속도를 구현할 수 있도록 프로그램 최적화가 이루어져 있다.

하지만 개발 초기 IPSAP은 리눅스 시스템을 기반으로 콘솔창에서 해석 명령을 직접 입력을 하는 방식으로 개발되었기 때문에 현재 윈도우 운영체제에 익숙한 사용자 입장에서는 쉽게 접근하기가 용이하지 않았다. 마찬가지로 IPSAP 전용의 입력 파일



을 생성하기 위한 전처리 및 해석 결과를 볼 수 있는 후처리가 개발되지 않았다. 이에 사용자 편의성을 갖춘 IPSAP 전용의 전후처리 소프트웨어인 DIAMOND/IPSAP의 개발이 이루어졌다.

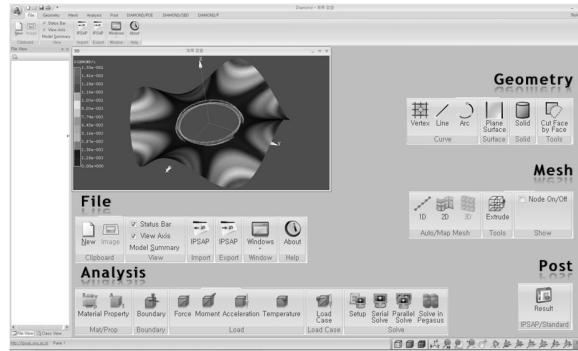


Fig. 1 Main Frame of DIAMOND/IPSAP

4.4 계산 성능 평가

IPSAP 성능 분석은 단일 프로세서에서의 평가 비교와 병렬 환경에서의 평가를 병행하였다. 단일 프로세서에서의 평가는 NASTRAN 2004와 ABAQUS ver6.4 와 선형 정적 해석 결과의 비교를 통하여 이루어졌다. 성능 평가를 위해서 3차원 형상을 가지는 간단한 구조물에 대하여 solid 요소를 통한 모델링을 하였으며, Fig. 3에 나타난 것과 같다. 계산 자원으로는 최신 컴퓨터 OS인 Windows Compute Cluster Server에서 계산을 수행한 결과이며, IPSAP의 계산 성능이 작게는 2배, 많게는 10배 이상 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 10배 이상 계산 시간이 발생하는 것은 예제로 계산한 문제의 특수성에 의한 것이며, 평균적인 결과는 아니지만, 전반적으로 IPSAP의 계산 성능이 우수하게 나타나고 있다.

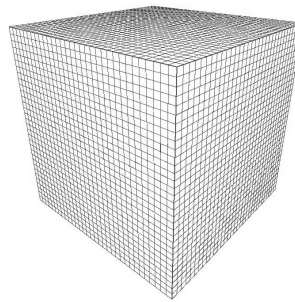


Fig. 2 32x32x32 Hexagonal Element (DOFs = 107,811)

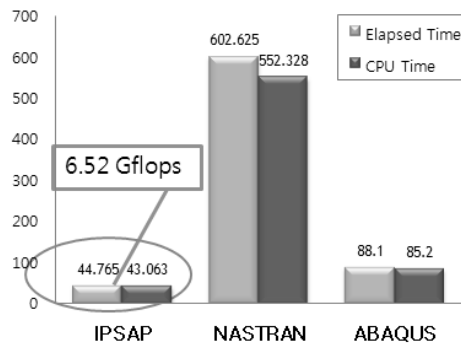


Fig. 3 계산 성능 비교(계산 환경 : Windows Compute Cluster Server, Intel Core2Duo 2.66GHz, 8GB Memory)

병렬 성능 평가를 위한 시스템으로는 본 연구실에서 운영하고 있는 PEGASUS 클러스터 시스템을 이용하였다. PEGASUS 시스템은 Xeon 2.2~3.0 GHz 프로세서로 이루어져 있다. Fig. 4는 2차원적 구조에 대하여 IPSAP의 선형 정적 해석 병렬 확장성을 PEGASUS 시스템에서 평가한 것이다. 병렬 확장성의 평가를 위하여 해석한 문제의 크기를 프로세서 개수에 따라 증가시키므로써 각각의 프로세서에 할당되는 계산량을 비슷한 수준으로 유지하였다. 병렬 계산 성능은 그림에서 알 수 있는 바와 같이 CPU 개수가 256개에서 병렬 성능은 떨어지지만 지속적으로 병렬 성능이 향상되고 있음을 확인할 수 있었다.

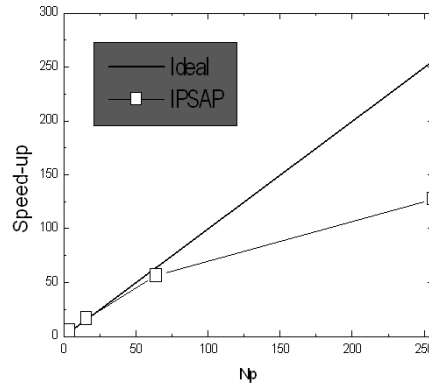


Fig. 4 IPSAP 선형 정적 해석 병렬 확장성 (2D topology)

5. 결 론

본 논문에서는 전산역학의 두 분야인 전산구조역학과 전산유체역학에 대해 살펴보았다. 두 기법 모두 동일한 연속체 미분방정식을 풀지만 방정식의 수학적 형태와 해석을 위한 수치기법 및 수학적 배경에는 두 분야가 차이가 있음을 보였다. 그리고 전산구조역학의 기본이론인 유한요소법과 여타 수치기법과의 차이를 설명하였다. 실제 구조해석 분야에서 유명한 상용해석코드들의 특징과 장단점을 언급하였고 본 연구실에서 개발한 구조해석 패키지인 DIAMOND/IPSAP을 소개하였다. 특히 DIAMOND/IPSAP은 최근의 컴퓨팅 환경에 맞추어서 병렬 구조해석은 물론이고 단일 컴퓨터에서도 다른 상용해석소프트웨어보다 뛰어난 성능을 보이는 것을 입증하였다.

후 기

본 논문은 서울대 항공우주신기술 연구소를 통해 계약한 한국과학재단 국가지정연구실 사업(R0A-2006-000-10178-0)의 지원을 받아 수행하였기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 1981, Gurtin, M.E., *An Introduction to Continuum Mechanics*, Academic Press.
- [2] 2002, Ferziger, J.H. and Peric, M., *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer.
- [3] 1981, Becker, Carey and Oden, *Finite Element - An Introduction*, Prentice Hall.
- [4] 2000, Bhardwaj, M., Day, D., Farhat, C., Lesoinne, M., Pierson, K. and Rixen, D., "Application of the FETI method to ASCII problems - scalability results on one thousand processors and discussion of highly heterogeneous problems," *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, Vol.47, pp.513-535.
- [5] 2001, *ADVENTURE User's Manual*, ver 0.81.