

論文

Boeing 787용 SEMAS의 유체-구조 연계해석에 관한 연구

노경호*, 김진호*, 이재우*, 변영환*, 이성택**

Fluid-Structure Interaction Analysis of SEMAS for Boeing 787

Kyung-Ho Noh*, Jin-Ho Kim*, Jae-Woo Lee*, Yung-Hwan Byun*, and Sung Taick Lee**

ABSTRACT

SEMAS(Smart Electro-Mechanical Actuation System), which enhances the flight performance and interior comforts of the airplane is selected as the prime actuation device for the Boeing 787 Environmental Control System. In the present study, fluid-structure interaction analysis process that simultaneously considers interaction by structural deformation and the fluid dynamics has been established. The integrated analysis shows there is slight structure-deformation which causes no severe interference among the structural components.

Key Words : SEMAS(Smart Electro-Mechanical Actuation System), Fluid-Structure Interaction(유체-구조 상호작용), CFD(전산유체해석), FEM(유한요소법)

1. 서 론

항공기는 매우 복잡하고, 다양한 첨단기술의 부품들이 통합된 시스템으로서 만일 사고가 발생하게 되면 인명피해와 막대한 재산손실을 초래하므로 관련 시스템 및 부품은 내구성, 내열성, 내식성을 비롯한 첨단 재료 특성을 바탕으로, 임무수행을 위한 성능은 물론이고, 높은 수준의 신뢰성과 안전성이 확보되어야 한다.

최근에 개발 중인 Boeing 787(B 787) 항공기에 적용되는 환경제어용 SEMAS(Smart Electro-Mechanical Actuation System)는 항공기의 비행 성능 향상은 물론 승무원과 고객에 대한 쾌적성 제공이라는 인간중심의 설계 개념과 전자 및 계측장비의 채택이 갈수록 증대되고 있다. 이러한 실정을 고려하여 각종 장비가 최적의 환경 하에서 작동될

수 있도록 함으로써 항공기체에 대한 신뢰성을 한층 높이는 쪽으로 개발 방향이 확정되었으며, 구동방식으로는 기존의 유압식에서 전기식 구동장치를 활용한 Smart Actuation 및 Smart Actuation의 소형/경량화, 최첨단 인공지능화의 설계 개념이 채택되었다[1].

특히 B787 개발 사업에서 채택된 환경제어용 SEMAS 기술은 기존의 PCS 개발에 소요되는 각종 기술을 포함하면서 Sensing에 의한 Self Control 기술이 추가된 신개념 기술이므로 본 기술을 획득하게 되면 Rudder, Aileron, Elevator 등의 각종 구동시스템을 개발할 수 있는 능력 역시 확보할 수 있게 되므로 그 기술적인 파급효과는 매우 큰 것으로 평가받고 있다.

B787용 SEMAS의 설계 기술개발을 위해서는 전산해석과정이 필수적이다. 전산해석기술로는 유체해석과 구조해석이 있으며 첨단 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)기법과 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 이용한 전산구조해석을 사용하며, 단위 해석 기술들의 상호작용이 고려된 해석이 가능해야 한다. 특히 항

* 건국대학교 항공우주정보시스템공학과
연락처, E-mail : jwlee@konkuk.ac.kr
서울시 광진구 화양동 1번지

** (주)한화 항공우주사업부

공분야와 같이 유체와 구조 간의 상호 연관성이 높은 분야에서는 연계된 해석이 더욱 필요하다.

유체-구조 연계해석 FSI(Fluid-Structure Interaction)를 위해서는 다양한 연계해석 기법들이 연구되었으며[3], FSI해석을 위해서는 유체해석과 구조해석을 바탕으로 유체-구조 상호 연계해석이 가능해야 한다.

유체-구조 연계 해석과정은 다분야 통합 해석을 위한 여러 분야 연계해석에 이용될 수 있을 것이며, 본 연구에서는 상용 유한요소 해석프로그램인 ADINA(Ver.8.3)를 활용하여 기 설계된 B787의 SEMAS 기준형상에 대하여 작동 과정을 유체-구조 상호작용을 고려한 연계 해석을 통해 향후 SEMAS개발을 위한 설계를 수행하였다.

II. SEMAS의 기본 형상설계

SEMAS는 기존의 비행효율이 떨어지는 유압식 구동시스템 대신 전기식 구동장치를 사용한다. Smart Actuation System은 fail- operation, fail-safe 작동을 가능하게 설계하고 시스템의 문제를 스스로 감지하여 이를 통제하는 역할을 한다. 또한 잉여의 채널을 통해 지속적이고 정상적인 control이 가능하다. 다음의 표 1은 SEMAS의 설계 Baseline을 나타내고 있다.

표 1. SEMAS의 설계 Baseline

Diameter	3"(76.2mm)
Valve	Butterfly Valve
제어방식	Self control 페루프 제어
구동방식	전기-기계식 서보 구동
Actuator	Gear Train
Channel	Dual Channel
Redundancy	Velocity Summing Panel

설계된 SEMAS의 기본 설계형상은 fig.1과 같다[4].

직경이 3"인 밸브는 두께가 8.82mm인 플레이트(plate)가 유동을 조정하는 역할을 하며 밸브의 개폐시간은 1.8초이며 이 때 플레이트는 0°~90°까지의 각 변위를 갖는다. 밸브 개폐 시 최대 각속도는 45±5°/sec 이다.

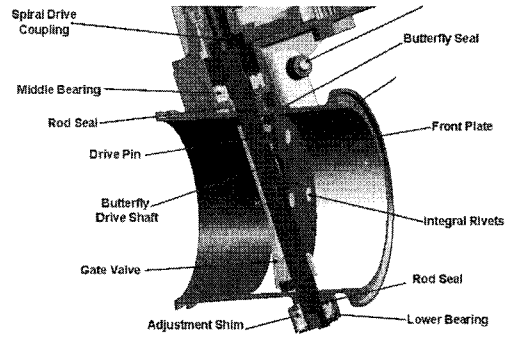


fig. 139 SEMAS의 기본 형상설계

III. 이론적 배경

1. 유체 지배 방정식

유동해석을 위한 지배 방정식은 다음과 같이 Navier-Stokes 방정식을 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 좌표계에서 ∂V 로 둘러싸인 임의의 부피 V 의 적분 형태로 나타낼 수 있다 [5].

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \bar{U} dV + \oint_{\partial V} [(\bar{v} - \bar{w})\bar{U} - \bar{G}] \cdot d\bar{s} = \int \bar{R} dV \quad (1)$$

위 식의 변수는 다음과 같이 정의 된다.

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho v \\ \rho E \\ \rho \phi \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \\ \tau \cdot v + k \nabla \theta \\ d_\phi \nabla \phi \\ d_\psi \nabla \psi \end{bmatrix}, \quad \bar{R} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{f}^b \\ S_\phi \cdot v + q^b \\ S_\phi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $\bar{\tau}$ 는 stress tensor로 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\tau} = -p\bar{I} + 2\mu\bar{e} + \lambda\bar{\nabla} \cdot \bar{v}\bar{I} \quad (3)$$

여기서 \bar{e} 는 strain tensor로 다음과 같다.

$$\bar{e} = \left[\bar{\nabla} \bar{v} + (\bar{\nabla} \bar{v})^T \right] / 2 \quad (4)$$

여기서, \bar{v} 는 속도 벡터, \bar{w} 는 이동격자(moving mesh)의 속도벡터, p 는 압력, ρ 는 밀도,

$E(= \bar{v} \cdot \bar{v} / 2 + e)$ 는 비에너지(specific energy), e 는 내부 에너지, θ 는 온도, μ 는 동역학적 점성 계수, λ 는 2차 점성계수, \bar{f}^B 는 유체 체적력(body force), κ 는 열전도율, q^B 는 비열, φ 는 대류-확산 방정식($d\varphi$ 와 $S\varphi$ 는 각각 확산계수와 source term)의 변수, 그리고 ψ 는 Laplace방정식($d\psi$ 는 확산 계수)의 변수를 나타낸다.

유체의 특성은 밀도, 압력, 그리고 온도에 따라 변하기 때문에 비압축성유체와 압축성유체로 분류되는데, 압축성유체의 경우 slightly compressible flows와 fully compressible flows로 나뉜다. 비압축성유체(incompressible flows)는 밀도가 일정하다고 가정하고 slightly compressible flows의 경우에는 $\rho = \rho_0(1 + p/\kappa)$ 로 정의된다. 여기서 κ 는 유체의 체적탄성계수, ρ_0 은 $p=0$ 에서의 밀도이다. Fully compressible flows의 경우에는 기체방정식이 적용되며, 압력은 $p = (C_p - C_v)\rho\theta$ 로 정의된다. 여기서 C_p 와 C_v 는 각각 정압비열(specific heat at constant pressure)과 정적비열(specific heat at constant volume)이다.

2. 유체-구조 연성(Fluid-Structure Interaction)

전산해석을 수행하기 위해 사용된 프로그램인 ADINA에서 유체와 구조는 interface를 통해 동시에 해석될 수 있으며 모든 물리량이 한 격자에서 다른 형태의 격자로 사상(mapping)될 수 있기 때문에 유체와 구조 모델에서 요소(element) 크기나 형태가 다양하게 사용될 수 있다.

1) Mapping Operators

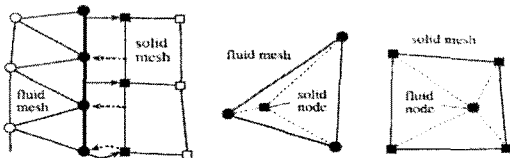


fig. 3. 유체-구조 격자 간 매핑 방법

N_f 와 N_s 를 유체 node와 구조 node로 정의하고 f 와 s 를 각각 node에서 정의된 물리적 양이라고 할 때 mapping operator는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{fs}: \{f_i | i \in N_f\} \rightarrow \{s_j | j \in N_s\} \quad (5)$$

$$M_{fs}: \{s_j | j \in N_s\} \rightarrow \{f_i | i \in N_f\} \quad (6)$$

여기서 \hat{f}_i 와 \hat{s}_j 는 보정된 값을 의미한다. Mapping operator는 original mesh에서 fast alternating digital tree algorithm을 사용하여 형성되며 유체와 구조의 격자가 다르기 때문에 M_{fs} 와 M_{fs}^{-1} 는 같지 않다.

2) Mechanical Coupling on Interface

유체-구조 상호작용을 고려한 연계해석에 있어 가장 중요한 요소는 경계면(interface) 조건의 정의 방법으로 유체-구조 경계면(fluid-structure interface)에서 traction equilibrium과 displacement compatibility의 조건이 만족되도록 설정되어야 한다.

Traction equilibrium은 유체와 구조의 stress가 interface의 수직방향을 따라 동일함을 의미하며 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{t}_f \cdot \bar{n} = \bar{t}_s \cdot \bar{n}(t, \bar{x}) \in (0, T] \times S \quad (7)$$

여기서, \bar{n} 은 유체-구조 경계면에 대한 수직방향 단위벡터를 의미한다.

Displacement compatibility는 경계면(interface)을 따라 유체와 구조의 변위가 동일함을 의미하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d_f = d_s \quad (t, \bar{x}) \in (0, T] \times S \quad (8)$$

3) Solution Procedure

SEMAS 형상을 해석을 하기 위한 유체-구조 연계(coupling) 전산해석은 전산유체역학 기법과 유한요소법을 동시에 활용하여 그림과 같은 과정으로 수행된다. 그림을 보면 유동해석을 통해 구조에 가해지는 하중을 구한 후 이를 바탕으로 구조해석을 수행한다.

구조해석을 통해 변형된 형상이 구해지면 이에 대한 유동해석을 다시 수행하기 위해 변형된 형상을 반영하여 변형된 격자를 재생성하고 유동해석을 다시 수행하는 과정을 반복적으로 거치게 된다.

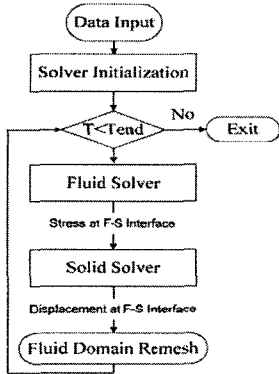


fig. 5. FSI해석을 위한 로드 맵(Road map)

IV. SEMAS형상에 대한 유체-구조 연계해석

빠른 속도의 작동유가 Actuator 내부로 유입되고 Self-Control에 의해 Disk가 회전을 하면서 Disk, Shaft, Pipe에 유체에 의한 구조적 변형이 발생한다. 이때 Disk 및 Actuator 내부는 유체, 구조물의 탄성력 그리고 관성력을 받게 되어 구조적 변형을 일으킨다. 이로 인해 유체의 유동이 바뀌게 되며 일반적인 강체 모델에 대한 해석 결과와 차이를 보이기 때문에 탄성 모델로의 해석이 필요하다[6].

유동해석에 필요한 부분은 밸브 몸체와 디스크, 그리고 축이기 때문에 해석을 필요로 하지 않는 기어와 모터부분은 전산 해석 형상에서 제외시켰다. 밸브 또한 격자구성 및 해석의 용이성을 위해 불필요한 부분을 단순화하여 전산해석 모델을 구성하였다. 디스크는 각각 5°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° 개방된 상태이며 디스크 표면과 입구의 압력차로 인한 역류를 피하기 위해 입구의 길이를 연장하였다[7].

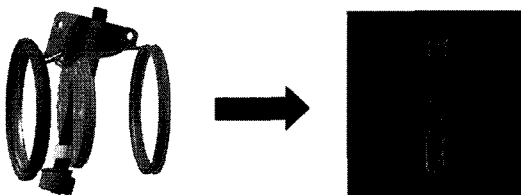


fig. 6. SEMAS기본 형상과 단순화된 형상

1. 유동해석 모델

Actuator 작동 시 내부의 압력 분포를 고찰하기 위해서 Navier-Stokes 방정식을 이용한 전산 해석을 수행하였다.

작동유의 밀도는 1.0345Kg/m³, 점성은 2.57×10⁻⁵이다.

fig. 7은 유동해석을 위한 격자계를 보여주고 있으며 약 80,000개의 격자를 갖는다.

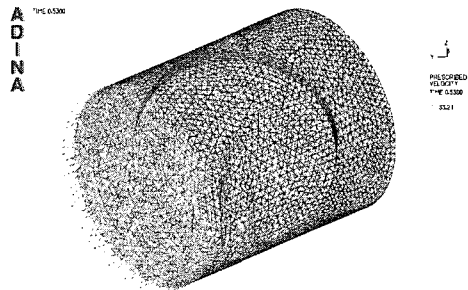


fig. 7. 유동해석을 위한 격자구성

유동해석을 하기 위해서 필요한 조건 인 압력 및 온도와 입구에서의 유동의 밀도, 속도, 시간당 단위면적으로 흐르는 유체의 양을 표2에 나타내었다.

표 2. 유동해석을 위한 초기조건

Inlet Pressure	139274.1N/m ²
Temperature	472.35K
Density	1.0345Kg/m ³
Velocity	112.805m/sec
Flux	0.532Kg/(m ² ·sec)
Outlet Pressure	118589.8N/m ²

2. 구조해석 모델

Actuator 구동 시 유체에 의한 구조적 변형을 파악하기 위해 fig. 8과 같이 약 12,000개의 격자를 갖는 격자계를 구성하였다.

구조해석을 위해 고려된 형상의 재질로는 Aluminum-alloy인 Al-T7075-T6이 선정되었으며 물성치는 표3과 같다.

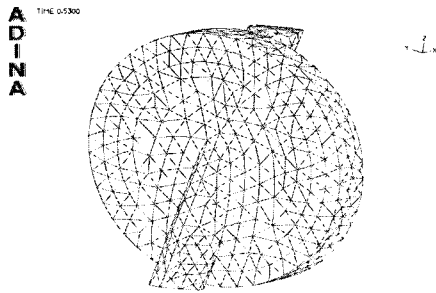


fig. 8. 구조해석을 위한 격자 구성

표 3. Al-T7075-T6의 물성치

	Aluminum-alloy(Al-7075-T6)
탄성계수 E(N/m ²)	7.2×10 ¹⁰
푸아송 비 ν	0.33
밀도 ρ (Kg/m ³)	2800
항복응력 σ (GPa)	0.324

3. 유체-구조(Fluid-Structure Interaction) 연계해석

앞서 구성된 격자계를 이용하여 유체-구조 연계해석을 수행하였다. 유동해석을 통하여 SEMAS 내부의 압력을 도출하고 구조해석을 수행한 후 다시 변형을 고려한 유동해석을 수행한다. 구조적으로 평형 상태에 이를 때까지 앞의 유동-구조연계해석을 반복 수행하게 된다[8]. fig. 9는 FSI해석을 위한 격자계를 나타낸다.

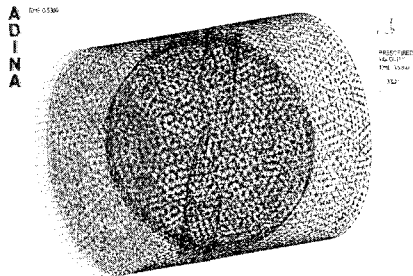


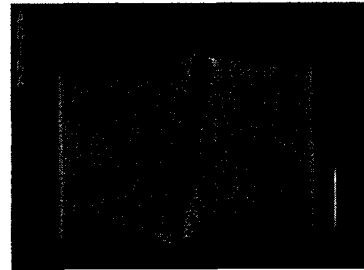
fig. 9. 유체-구조 연계해석 격자 구성

4. 유체-구조 연계해석 결과

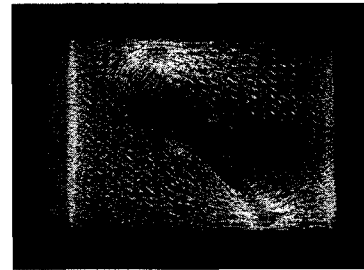
격자를 구성한 후 작동유의 물성치와 Disk, Shaft, Pipe의 재료 강성에 따른 구조 변형 특성을 알기위해 유체-구조 연계해석 수행하였고 그 결과는 다음과 같다.

fig. 10은 유체의 흐름을 벡터(vector)로 나타낸

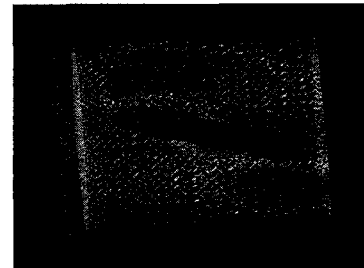
것으로 SEMAS가 개방을 시작하면서부터의 전체적인 유동장을 확인하였다. 디스크 양쪽 끝 부분에서 유동이 가속되는 데 이것이 디스크 변형에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.



(a) 5° 개방



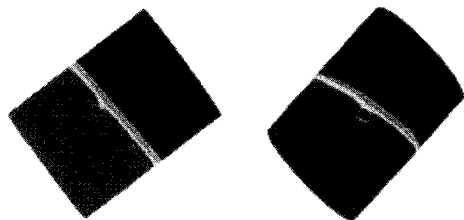
(b) 45° 개방



(c) 75° 개방

fig. 10. 전체적인 유동의 흐름

fig.11은 디스크가 개방되기 시작하면서의 압력 분포를 나타내는 그림으로 개방 초기의 고압이 점차 디스크가 개방되면서 낮아지는 것을 알 수 있었다.



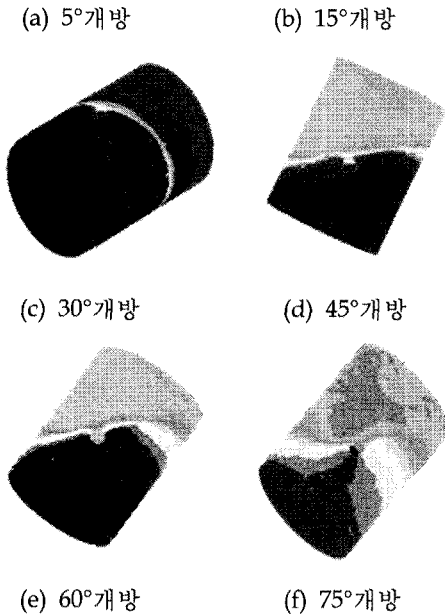
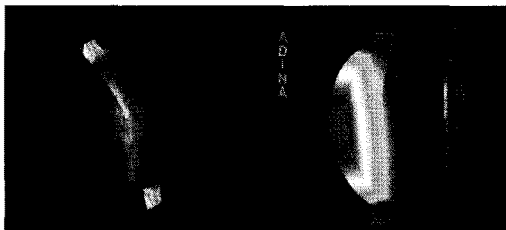


fig. 11. SEMAS 내부의 압력 분포

fig. 12는 Disk에서 최대 변형량을 나타낸다. 유체는 Disk의 끝부분에서 가장 많은 응력이 분포되는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 15°개방 (b) 30°개방

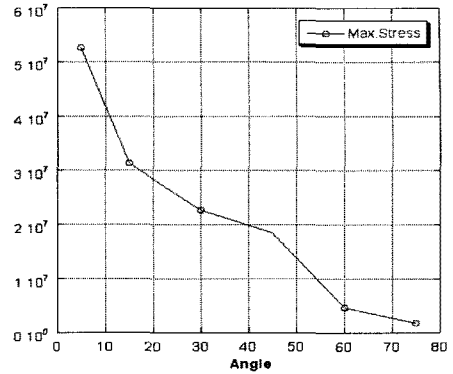


(c) 45°개방 (d) 60°개방

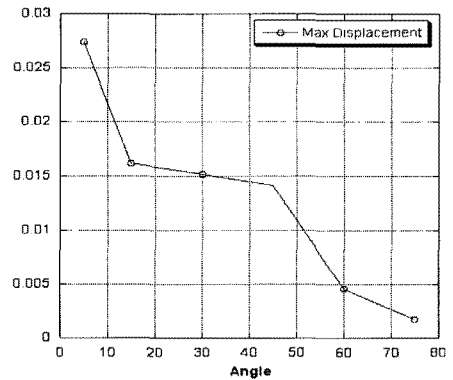
fig. 12. Disk에서 최대 변형량 분포

fig. 13은 Disk에 작용하는 최대 압력과 최대 변형량을 나타내고 있다. fig. 13에서와 같이 여러 번의 유체-구조 연계해석 수행 결과 개폐각 5°에서 가장 많은 압력이 발생하고 점차 개폐가 진행되면서 유체가 구조에 미치는 힘이 감소하는 것을 알 수 있다. 최대 변형량은 0.02745mm로

분석되었으며 SEMAS System에 간섭을 일으키지 않을 정도로 작은 변형이 발생하였고 최대응력이 Al-7075-T6의 항복강도 이하임을 알 수 있었다.



a) Max. Stress



b) Max. Deformation

fig. 13. Disk에 작용하는 압력과 변형량

V. 결론

본 연구에서는 3차원 Navier-Stokes 방정식과 유한요소법을 이용한 전산해석과정을 통한 해석을 수행하여 Actuator가 작동할 때의 유체-구조 연계 해석을 하였다.

유체-구조 연계해석과정을 통해서 Actuator가 개방을 시작할 때 압력이 유동의 흐름에 따라 크게 작용하는 것을 확인하였고 특히 Disk의 좌우 양 끝부분에서 큰 압력이 작용 하지만 그 값은 재료에 영향을 줄만큼 큰 수치가 아님을 알 수 있었다.

따라서 전체 운용 조건 내에서 변형량은 공차의 허용범위 내에 들었으며 SEMAS의 내부 구조물에 간섭을 일으키지 않는 것을 확인하였다.

후기

본 연구는 산업자원부의 항공우주기술개발사업 (과제명:B7E7용 SEMAS 개발) 으로 수행 되었으며 연구비를 지원해 주신 항공우주 기술조합에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) www.boeing.co.kr/press/press2.php?action=read&no=86
- 2) (주)한화 "SEMAS 2차년도 연구 보고서" (주)한화 2005.
- 3) Klaus-Jurgen Bathe, Hou Zhang, Shanhong Ji, "Finite element analysis of fluid fully coupled with structural interactions", *Computers & Structures*, 1999.
- 4) 이석순, 황영진, 김효진, "PC로 배우는 CATIA V5", 과학기술, 2002.
- 5) Hou Zhang et al., "Recent Development of Fluid-Structure Interaction Capabilities in the ADINA System, *Computers and Structures*, 2003.
- 6) 임중우, 권장혁, "다분야 통합 최적설계 기법을 이용한 날개 기본 형상설계", *항공우주학회지* 제30권 제1호, 2002. 2
- 7) ADINA R&D, Inc, "ADINA Theory and Modeling Guide, vols I ~ III" Watertown, 2002.
- 8) John T. Batina, Elizabeth M. Lee, William L. Kleb, Russ D. Rausch, "Unstructured -Grid methods development for unsteady aerodynamic and aeroelastic analyses", NASA TM-104143, 1991.