

# SEMAS형상에 대한 유체-구조 연계 해석 연구

## Integrated Analysis of SEMAS by Considering Fluid-Structure Interaction

노경호\*, 최성락, 지영무, 이재우, 변영환(건국대학교), 김치봉, 이성택((주)한화)

### 1. 서론

#### 1.1 연구배경 및 목표

최근의 민항기 시장은 전 세계의 일일 생활권과 각 국가 간의 경제 교류 확대, 그리고 세계화 추세에 따라 운용기 시장이 침체되고 있는 것과는 달리 연간 5~7%의 성장이 지속될 것으로 예상되고 있다. [1]

민항기 시장의 꾸준한 상승의 한 원인으로 자본주의의 시장원리를 채택한 러시아와 중국의 급속한 경제 성장을 들 수 있으며, 특히 세계 최대의 항공기 재작업체인 미국 보잉사가 오는 2008년 베이징 올림픽을 겨냥하여 중형급 최신 기종인 Boeing 787 여객기를 중국과 공동 생산하여 오는 2008년 베이징 올림픽에 맞춰 운항하기로 결정하는 등 세계적으로 24개 회사에서 총 200대의 제안서를 받게 되면서 그 수요가 가시화 되고 있다.[2]

Boeing사의 787여객기 설계개념은 인간중심의 쾌적성을 고려한 인간공학적 설계 개념과 기존 기술 대비 효율을 극대화 시킬 수 있는 설계 기법을 집목시킨 것으로 압축되었다.

특히 최근에 개발 추진 중인 Boeing 787 항공기에 적용되는 환경제어용 SEMAS(Smart Electro-Mechanical Actuation System)는 항공기의 비행성능 향상은 물론 승무원과 고객에 대한 쾌적성 제공이라는 인간중심의 설계 개념과 갈수록 전자 및 계측장비의 채택이 증대되고 있는 실정을 고려하여 각종 장비가 최적의 환경 하에서 작동될 수 있도록 함으로써 항공기체에 대한 신뢰성을 한층 높이는 쪽으로 개발 방향이 확정되었으며, 구동 방식은 기존의 유압식에서 전기식 구동장치를 활용한 Smart Actuation 및 Smart Actuation의 소형/경량화, 최첨단 인공지능화의 설계 개념을 채택하였다.

Boeing 787용 SEMAS의 설계 기술개발을 위해서는 전산해석과정이 필수적이다. 핵심전산해석기술로는 유체해석과 구조해석이 있으며 첨단 전산유체역학(Computational Fluid

Dynamics, CFD)기법과 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 이용한 진단구조해석을 사용하며, 단위 해석 기술들의 상호작용이 고려되어야 한다.

유체-구조 연계해석FSI(Fluid-Structure Interaction)을 위해서는 다양한 연계해석 기법들이 연구되었으며, FSI를 위한 상용소프트웨어가 개발 되었다.[3]. FSI를 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 기 설계된 B787의 SEMAS 기준형상에 대하여 작동 과정을 유체-구조 연계 해석을 통해 변형을 고려한 해석 결과를 제시하고자 한다.

#### 1.2 SEMAS의 기본 형상설계

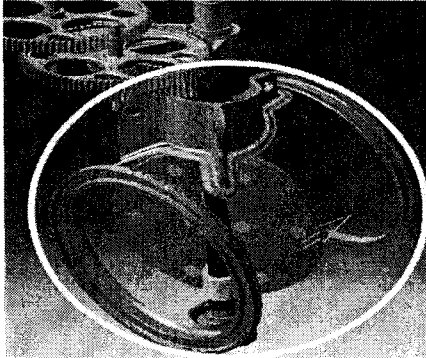
SEMAS는 기존의 비행효율이 떨어지는 유압식 구동시스템 대신 전기식 구동장치를 사용한다. Smart Actuation System은 fail-operation, fail-safe 작동을 가능하게 설계하고 시스템의 문제를 스스로 감지하여 이를 통제하는 역할을 한다. 또한 잉여의 채널을 통해 지속적이고 정상적인 control이 가능하다. 다음의 표 1은 SEMAS의 설계 Baseline을 나타내고 있다.

설계된 SEMAS의 기본 설계형상은 그림1과 같다.[4]

Actuator의 밸브의 개폐시간은 1.8초이며 이때 Disk는 0°~90°까지의 각 변위를 갖는다. 밸브 개폐시 최대 각속도는 45±5°/sec 이다.

[표 1] SEMAS의 설계 Baseline

제어방식	Self control 페루프 제어
구동방식	전기-기계식 서보 구동
Actuator	Ball-screw Actuator
Channel	Dual Channel
Redundancy	Velocity Summing Panel



<그림 1> SEMAS의 기본 설계 형상

2. SEMAS 전산해석 형상 및 방법

2.1 High Fidelity Code를 이용한 SEMAS의 유체-구조 해석

빠른 속도의 작동유가 Actuator 내부로 유입되고 Self-Control에 의해 Disk가 회전을 하면서 Disk, Shaft, Pipe에 유체에 의한 구조적 변형이 발생한다. 이 때 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[5].

해석의 편의를 위해서 유체의 영향을 받지 않는 부분인 Disk, Shaft, Pipe 이외의 부분은 해석형상에서 제외하였고, Disk와 Shaft의 형상을 단순화 하여 전산해석 모델을 구성하였다.[6]

2.2 유동해석 모델

Actuator 작동 시 내부의 압력 분포를 고찰하기 위해서 아래의 3차원 Navier-Stokes 방정식을 이용한 전산해석을 수행하였다.

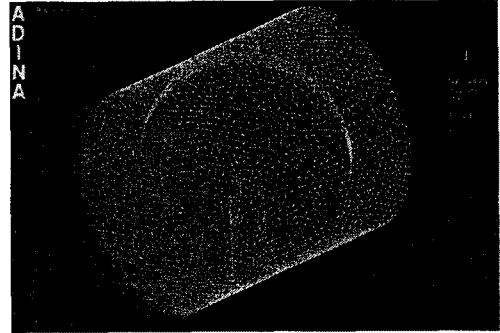
$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V U \, dV + \oint_{\partial V} [(v \cdot w)U - G] \cdot dS = \int_V R \, dV$$

위 식에서 각 플럭스 벡터들은 다음과 같이 정의된다.[7]

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

작동유의 밀도는 0.746Kg/m, 점성은 2.57\*10<sup>-5</sup>이다.

<그림 3>에는 유동해석을 위한 격자계를 보여주고 있으며 약 80,000개의 격자를 갖는다.



<그림 2> 유동해석을 위한 격자구성

유동해석을 위한 초기조건 및 유동조건을 표2에 나타내었다.

[표 2] 유동해석을 위한 초기조건 및 유동조건

Inlet Pressure	139274.1N/m <sup>2</sup>
Temperature	472.35K
Density	1.0345 Kg/m <sup>3</sup>
Velocity	112.805 m/sec
Flux	0.532 Kg/sec

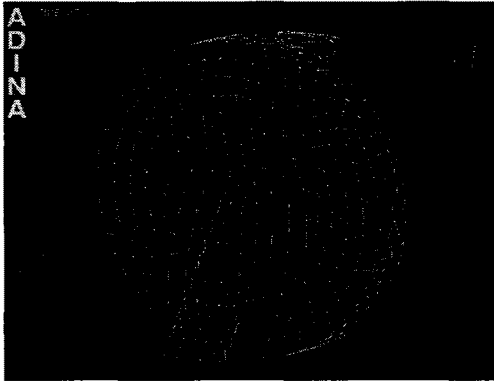
2.3 구조해석 모델

Actuator 구동 시 유체에 의한 구조적 변형을 파악하기 위해 그림 4와 같이 약 12,000개의 격자를 갖는 격자계를 구성하였다.

구조해석을 위해 고려된 형상의 재질로는 Aluminum-alloy인 Al-T7075-T6이 사용되었고 물성치는 다음의 표와 같다.

[표 3] Al-T7075-T6의 물성치

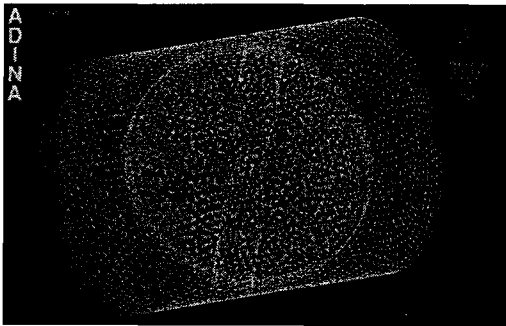
	Aluminum-alloy(Al-7075-T6)
탄성계수 E(N/m <sup>2</sup> )	7.2×10 <sup>10</sup>
푸아송 비 ν	0.33
밀도 ρ(Kg/m <sup>3</sup> )	2800
항복응력 σ(GPa)	0.324



<그림 3> 구조해석을 위한 격자 구성

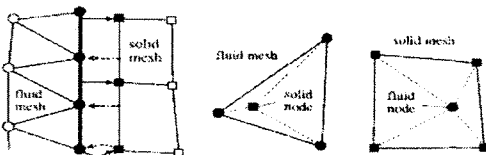
**2.4 유체-구조(Fluid-Structure Interaction)연계해석**  
 앞서 구성된 격자계를 이용하여 유체-구조 연계해석을 수행하였다.

유동해석을 통하여 SEMAS 내부의 압력을 도출하고 구조해석을 수행한 후 다시 변형을 고려한 유동해석을 수행한다. 구조적으로 평형 상태에 이를 때 까지 앞의 유동-구조연계해석을 반복 수행하게 된다[8].



<그림 4> 유체-구조 연계해석 격자 구성

ADINA에서의 유체-구조해석은 각각의 Interface를 통해 couple되어 있고, 모든 물리적인 값들은 격자에서 다른 격자로 같은 변수값을 interpolate과정을 통해 매핑(mapping)된다.[7]

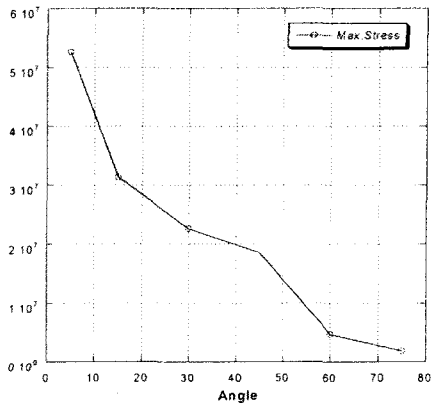


<그림 5> 유체-구조 격자간 매핑 방법

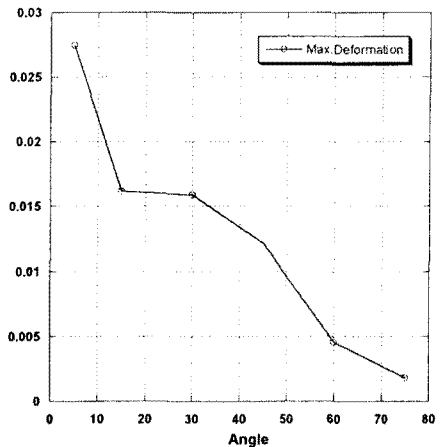
**3. 유체-구조 연계해석 결과**

<그림 2-4>와 같이 격자를 구성한 후 작동유의 물성치와 Disk, Shaft, Pipe의 재료 강성에 따른 구조 변형 특성을 유체-구조 연계해석 수행하였다.

<그림 6>은 Disk에 작용하는 최대 압력과 최대 변형량을 나타내고 있다. 그림 6에서와 같이 여러 번의 유체-구조 연계해석 수행 결과 구조의 변형이 작다는 것을 알 수 있다. 또한 Actuator가 개폐를 시작할 때 가장 많은 압력이 발생하고 점차 개폐가 진행되면서 유체가 구조에 미치는 힘은 감소하는 것을 알 수 있다. 최대 변형량은 SEMAS System에 간섭을 일으키지 않는 정도로 작은 변형이 발생하는 것을 확인하였다.



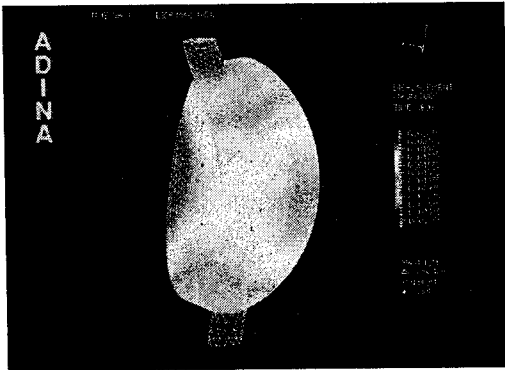
a) Max. Stress



b) Max. Deformation

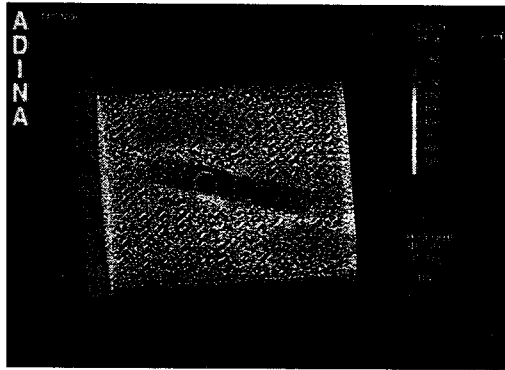
<그림 6> Disk에 작용하는 압력과 변형량

<그림 7>은 Disk에서 최대 변형량을 나타낸다. 유체는 Disk의 끝부분에서 가장 많은 응력이 분포되는 것을 확인할 수 있었다.



<그림 7> Disk의 Deformation(60°)

<그림 8>은 Vector plot를 통한 전체적인 유동장을 나타낸다.



<그림 8> 전체적인 유동의 흐름(75°)

SEMAS에 작용하는 최대 응력은 0.0526GPa로 현재 두께에서는 모두 항복응력(Yield Stress)에는 미치지 않았다.

#### 4. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 ADINA를 이용하여 3차원 Navier-Stokes 방정식을 이용한 전산해석을 수행하여 Actuator가 작동할 때의 유체-구조 연계 해석을 수행하였다.

유체-구조 연계해석의 해석과정을 통해서 수렴된 해를 얻었고 Actuator가 개방을 시작할 때 압력이 유동의 흐름에 따라 크게 작용하였다. 특히 Disk의 좌우 양 끝부분에서 큰 압력이 작용 하는 것을 확인하였다.

또한 변형량을 고려했을 때 SEMAS의 내부 구조물에 간섭을 일으키지 않는 것을 확인하였다.

#### 후기

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

#### 참고문헌

- [1] 안영수, "2004년 산업자원백서", 산업자원부, 2005. 6
- [2] www.boeing.com
- [3] Klaus-Jurgen Bathe, Hou Zhang, Shanhong Ji, "Finite element analysis of fluid fully coupled with structural interactions", *Computers & Structures*, 1999.
- [4] 이석순, 황영진, 김호진, "PC로 배우는 CATIA V5", 과학기술, 2002.
- [5] 임종우, 권장혁, "다분야 통합 최적설계 기법을 이용한 날개 기본 형상설계", *항공우주학회지* 제30권 제1호, 2002. 2
- [6] ADINA R&D, Inc, "ADINA Theory and Modeling Guide, vols I ~ III" Watertown, 2002.
- [7] Hou Zhang, Xiaoli Zhang, Shanhong Ji, Yanhu Guo, Gustavo Ledezma, Nagi Elabbasi, Hugues deCougny "Recent development of fluid-structure interaction capabilities in the ADINA system" *Computers & Structures*, 2003.
- [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.