

〈논 문〉

## 범용 패키지의 결합을 통한 구조-유체 상호 작용 해석 기법

Applications of General-Purpose Packages for Fluid-Structure  
Interaction Problems

홍 진 숙\* · 신 구 균\*

Chin-Suk Hong and Ku-Kyun Shin

(1996년 7월 25일 접수; 1997년 6월 13일 심사완료)

**Key Words :** Fluid-Structure Interaction Problem(유체-구조 상호 작용 문제), Finite Element Method(유한요소법), Boundary Element Method(경계요소법), FE/BE coupling method(유한요소/ 경계요소 결합해법), Mass Matrix(질량행렬), Stiffness Matrix(강성행렬), Fluid Influence Matrix(유체 영향행렬), Impedance Matrix(임피던스 행렬), Transformation Matrix(변환행렬)

### ABSTRACT

Recently, many general-purpose packages for fluid-structure interaction problems have been announced. However, they have a lot of limitations to model structures in the fluid-structure interaction problems reasonably. Utilizing general-purpose packages such as MSC/NASTRAN and SYSNOISE, in this paper, a method to solve the radiation or scattering problems with some accuracy in the fluid-structure interaction problems was developed. Using a simple model, the results from the presented method here are compared with those from SYSNOISE. The result shows quite a good agreement between the two methods. The problems, which could not be solved by SYSNOISE, were tried to solve with the presented method and results were presented. It was proved that this method could be safely used to solve fluid-structure interaction problems.

### 1. 서 론

유체-구조 상호 작용 문제 (fluid-structure interaction problem)는 일반적으로 물수 또는 반물수된 3 차원 임의형상을 갖는 탄성체가 어떤 하중으로 가진 될 때 원음장에서의 방사음압(radiated pressure)을 계산하는 문제와 탄성체로 입사되는 음파가 산란되어 생성된 음장에서의 산란음압(scattered pressure)을 계산하는 문제로 구분된다. 또한 경우에 따라서는 두가지 형태의 음장에 놓여 있는 구조물의 변위, 속도, 가속도 및 내부의 응력파(stress wave) 또는 해석결과를 물리적 현상에 더욱 가깝게 이해하기 위

해서 여러 가지 형태의 물리량에 관하여 관심을 가질 수 있다.

이런 문제의 해법은 통상 구조를 유한요소(finite element) 모델링하고 유체의 모델과 적절히 결합하는 방법이다. 유체를 모델링하는 방법으로는 유한요소법(finite element method), 경계요소법(boundary element method), 반 이론적 방법(semi-analytical method), 전달행렬법(transfer matrix method) 등을 사용한다. 이들은 각각 나름 대로의 한계를 갖고 있으면서 서로 보완적인 역할을 하기도 한다<sup>(1~4)</sup>.

구조만을 고려한다면 유한요소법을 이용한 범용 패키지(package)는 아주 많은 분야에서 이용하고 있으며, 유체만을 고려한 경계요소법 및 기타 방법을 근간으로한 패키지들이 최근들어 범용화되어 알려 지기 시작했다. 경계요소법을 이용하여 음향해

\*정회원, 국방과학연구소 2-1-5

석 및 유체-구조 상호 작용을 고려한 음향, 구조 해석용으로 상용화된 대표적인 예가 벨지음 NIT사의 SYSNOISE와 미국 AAC사의 COMET/Acoustics이다. 이들이 갖고 있는 구조-유체 상호 작용 문제의 해석 기능은 다양 하지만 일반적으로 공학에서 관심있는 문제를 좀 더 상세하게 모델링 하고자 할 때 구조 요소가 부족함이 대두된다. 뿐만 아니라 이상의 범용 패키지들이 음향 해석에 중점을 두고 있으므로 구조 응답의 자료 복원 능력은 매우 부족한 편이다<sup>(5~6)</sup>.

본 연구에서는 이 문제점을 극복하고자 구조는 유한요소법을 근간으로한 구조해석용 범용 패키지인 MSC/NASTRAN을 이용하고 유체는 경계요소법을 근간으로한 음향계 해석용 범용 패키지인 SYSNOISE를 이용하여 모델링한 후 각각의 특성치를 추출하여 결합함으로서 결합계 해석을 가능하게 하였다. 우선 두 패키지의 지배방정식으로부터 결합계의 지배방정식을 정식화<sup>(7)</sup>한 후, 각각의 범용패키지로 부터 특성행렬의 추출방법과 결합 방안을 제시하였다. 결합에 필요한 거대 행렬(big matrix)의 계산을 수행하기 위해 MSC/NASTRAN DMAP Alter를 작성하여 제시하였다.

본 연구에서 제시한 방법의 타당성을 입증하기 위하여 SYSNOISE만을 이용하여 유체-구조 상호 작용 해석이 가능한 사각 cavity 모델에 대하여 범용 패키지의 해석 결과와 본 연구에서 제시한 방법으로부터의 결과를 비교하였으며, 이 방법을 이용하여 각각의 범용 패키지에서 해석할 수 없는 간단한 문제를 택하여 해석 하여 그 기능과 유용성을 설명하였다.

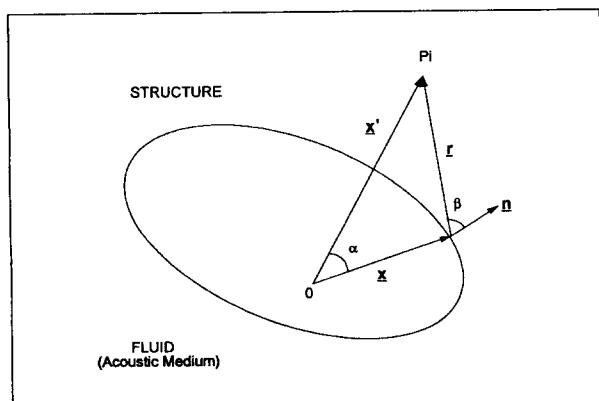


Fig. 1 Schematic diagram of model with fluid-structure interaction

## 2. 이론

Fig. 1과 같이 임의 형상을 갖는 3차원 탄성체가 음향매질 속에 놓여 있고 그 구조물에 조화하중 또는 입사되는 압력파가 주어질 때 구조물의 유한요소 모델링은 이산화된 지배방정식으로 다음과 같이 주어진다.

$$[-\omega^2 M + j\omega B + K] u = F - GA p \quad (1)$$

또는

$$Zv = F - GA p \quad (2)$$

여기서,  $M$ ,  $B$ ,  $K$  그리고  $Z$ 는 구조물의 질량, 감쇠, 강성 및 임피던스 행렬( $s \times s$ )를 각각 나타내며 임피던스 행렬은 질량, 감쇠 및 강성 행렬의 다음과 같은 관계로 주어진다.

$$Z = \frac{[-\omega^2 M + j\omega B + K]}{j\omega} \quad (3)$$

$u$ 와  $v$ 는 구조물의 모든 자유도(degree of freedom, DOF)에 해당하는 변위 및 속도 벡터( $s \times 1$ )의 복소진폭(complex amplitude)으로서 정해진 좌표계상에 표시한 것이다.  $F$ 는 구조물을 가진하는 조화하중벡터( $s \times 1$ )의 복소진폭이고,  $G$ 는 구조물이 음향매질과 접하는 면(wet surface, 방사면)에 있는 절점들의 외향 단위 법선 하중(outwardly unit normal force)을 해석을 위해 정해진 좌표계의 성분으로 모든 절점의 힘으로 변환하는 기능을 가진 행렬( $s \times f$ )이며  $A$ 는 방사면의 각 요소의 면적을 대각요소의 값으로 갖는 대각행렬( $f \times f$ )이다.  $p$ 는 방사면에 가해지는 전체 유체 압력(입사압력+산란압력)의 복소진폭이다. 식 (1)의 양변으로부터 약분된 시간조화함수는  $\exp(j\omega t)$ 로 표시되고  $\omega$ 는 각주파수이며  $j = \sqrt{-1}$ 이다. 각 행렬의 크기를 표시하는  $s$  및  $f$ 는 각각 구조물의 자유도와 유체의 자유도(=방사면의 절점수)를 나타낸다.

구조물을 둘러싸고 있는 유체 즉 음향매질의 내부의 음압은 헤름홀즈 방정식

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (4)$$

을 만족한다. 여기서  $k = \omega/c$ 는 파수이며  $c$ 는 음속이다. 방사면이 곡면으로 연속되어있을 때 음압은 헤름홀즈 적분방정식의 해로서 주어지고 방사면을 경계요소로 분할, 유체를 모델링 하여 정식화 하면 방사면의 음압과 법선방향 속도성분과의 관계가 식 (5)와 같이 주어진다.

$$Ep = Cv_n + p_I \quad (5)$$

여기서  $E$  와  $C$ 는 유체의 Influence Matrix로서 주파수에 의존하고 가장 일반적인 행렬( $f \times f$ , complex, fully-populated, non-symmetric frequency dependent matrix)이다.

구조-유체 결합계를 지배하는 행렬 방정식은 식 (1)과 식 (5)를 결합하여 얻을 수 있다. 범선방향의 속도를 해석을 위해 정한 좌표계로 변환하면 식 (1)에서 정의한 행렬  $G$ 를 그대로 사용할 수 있으므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_n = G^T v \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하면 식 (5)는 다음과 같다.

$$p = E^{-1} Cv_n + E^{-1} p_I \quad (7)$$

식 (7)을 식 (1)에 대입하여 구조-유체 결합계의 구조변수 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & [-\omega^2(M + M_A) + j\omega(B + B_A) + K] u \\ & = F - E^{-1} p_I \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $M_A$ 와  $B_A$ 는 각각 부가질량 행렬, 부가감쇠 행렬라고 하고 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$M_A = \frac{\text{Real}(jGAE^{-1}CG^T)}{\omega} \quad (9)$$

$$B_A = \text{Imag}(-jGAE^{-1}CG^T) \quad (10)$$

같은 방법으로, 구조-유체 결합계의 지배방정식을

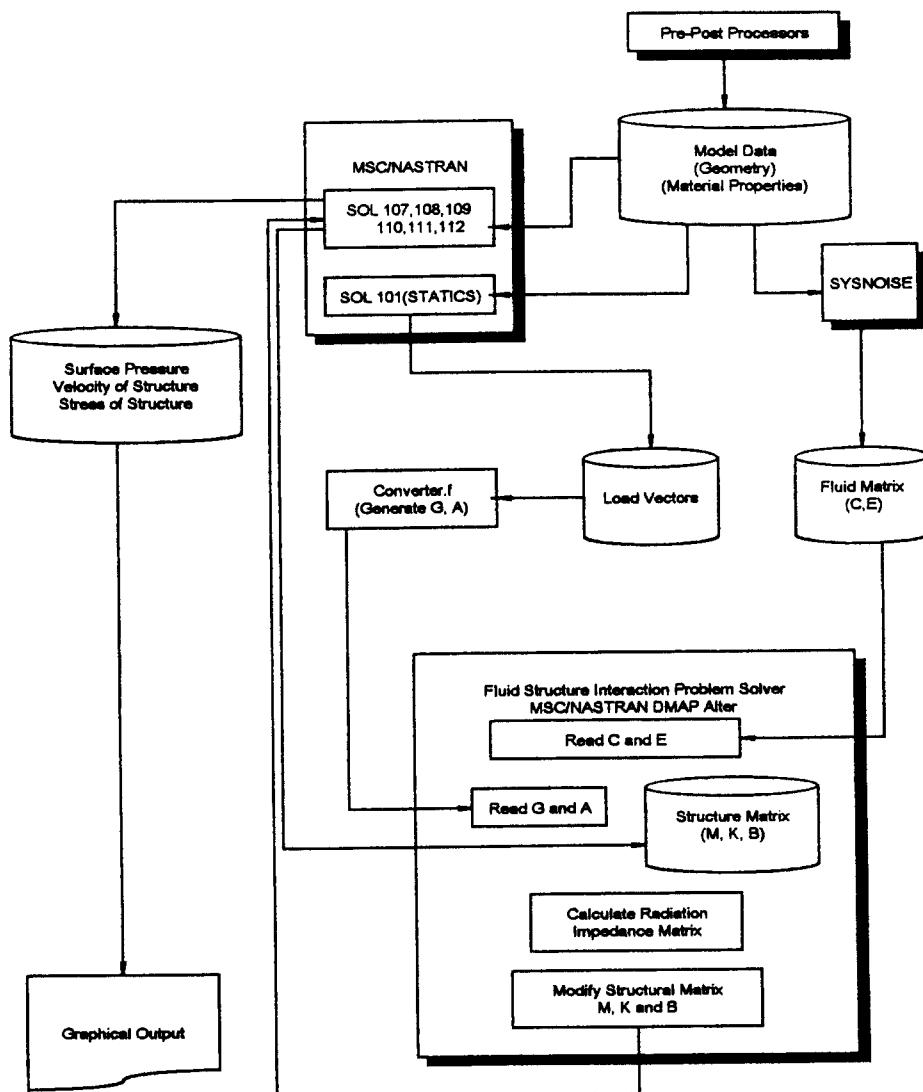


Fig. 2 Procedure of the coupling general purpose packages

유체변수 방정식으로 표현할 수 있다. 식 (1)을 변위벡터  $u$ 에 관한식으로 쓴 후 법선방향 속도벡터  $v_n = j\omega G^T u$ 를 얻어 식 (5)에 대입하면 식 (11)과 같이 얻을 수 있다.

$$H\hat{p} = Q + p_I \quad (11)$$

여기서

$$H = E + CG^T Z^{-1} GA \quad (12)$$

$$Q = CG^T Z^{-1} F \quad (13)$$

이다.

식 (1)과 식 (11)를 풀게 되면 구조물의 거동을 완전히 알게 된 것이며, 때로는 응력이나 변형율 등과 같이 관심있는 결과로 변환하여 해석할 수 있다. 뿐만 아니라 방사면의 음향학적 경계치인 음압과 법선방향 속도를 모두 얻었으므로 유체내의 임의 점에서 음압을 방사면 외부에서 만족하는 헤름홀즈 적분방정식(Surface Helmholtz Integral Equation)을 이산화(descretization)하여 식 (5)의 형태로 얻고 그식을 풀면 음장에서의 여러가지 형태의 결과를 얻을 수 있게 된다.

### 3. 범용 패키지의 이용

#### 3.1 개요

본 연구에서 이용하는 범용 패키지는 음향계의 특성치( $C, E$ ) 계산을 위하여 SYSNOISE를 이용하고 구조계의 특성치( $M, B, K$ ) 계산, 결합 및 결합계 계산을 위하여 MSC/NASTRAN을 이용하였다.

Fig. 2에 범용 패키지를 이용한 해석 절차를 보이고 있다. 해석 하고자 하는 구조를 모델링하고 접수부(wet points)를 추출하여 SYSNOISE에 해석모델로 입력한다. 여기서 유체 영향 행렬(fluid influence matrix)을 구하고 이를 DMAP Alter로 수정된 MSC/NASTRAN 해석 모듈을 이용하여 해석한다. 이 과정에서 구조 및 유체계를 결합하는데 중요한 역할을 하는 변환행렬 및 면적행렬은 결합에 앞서 MSC/NASTRAN의 정역학 해석 모듈(SOL 101)을 이용하여 계산된다. 아래 절에서 각 행렬을 계산하는 구체적인 방법을 설명하였다.

#### 3.2 SYSNOISE 유체영향행렬

##### (1) 유체영향행렬; $E, C$

유체-구조 상호 작용 문제에서 유체의 효과를 고려하기 위해 제 2 장에서 설명한 바와 같은 정식화 방법을 사용하였다. 식 (5)에 나타난 유체 영향 행

렬인  $E$  및  $C$  행렬은 주파수와 요소분할된 방사면의 기하학적 형상 및 매질의 특성치에만 의존하므로 구조의 거동과 별개의 문제로 얻을 수 있다. SYSNOISE에는 이 행렬의 계산 및 출력을 해석의 한 항목으로 포함되어 있으며 ANALYSIS/COMPUTE... 명령어에 의해 수행되고 출력된 결과는 이미 정의된 형식(SYSNOISE FREE FORMAT)으로 되어 있다.

##### (2) 방사 임피던스 행렬; $Z_A$

SYSNOISE에서 OPTION BEM COUPLED인 경우 구조-유체 상호작용의 효과는 방사 임피던스(radiation impedance matrix)로 표현된다. 이 행렬 역시 방사면의 기하학적 형상, 주파수 및 유체의 특성치에만 의존하며 구조물의 구속되지 않은 각 자유도에 대한 값으로 할당되어 있으며 유체의 영향으로 발생되는 부가질량행렬 및 부가감쇠행렬의 항으로 식 (14)와 같이 구성되어 있다.

$$Z_A = M_A + jB_A \quad (14)$$

SYSNOISE에는 이 행렬의 계산 및 출력을 해석의 한 항목으로 포함되어 있으며 ANALYSIS/COMPUTE... 명령어에 의해 수행되고 출력된 결과는 이미 정의된 형식(SYSNOISE FREE FORMAT)으로 되어 있다.

#### 3.3 행렬의 계산 및 활용

유체-구조 상호 작용이 있는 구조물의 응답 및 음장을 구하기 위하여 제 2 장에서 언급한 식 (8)과 식 (11)을 이용하면 된다. 이 식들에서 보이는 구조의 특성행렬인 질량, 강성 그리고 감쇠 행렬과 유체 영향행렬인  $E, C$ , 그리고 기하학적 변환행렬  $G$  및 방사면의 면적행렬  $A$ 를 알면 해를 구할 수 있다. 또, 식 (8), 식 (11) 및 식 (14)를 이용할 수도 있는데 이 경우는 방사임피던스 행렬을 이용하여 구조물 응답 및 음장을 구하는 과정이다.

변환행렬과 방사면의 면적행렬은 범용 구조해석 프로그램을 이용하면 쉽게 얻을 수 있다. 구조물의 유한요소 모델의 방사면에 외향의 단위 법선 방향 압력(outwardly unit normal pressure)을 가하여 정역학 문제를 풀어 각 방사면 절점에 대응되는 하중 벡터(load vector)를 구하면 방사면 절점  $i$ 의 하중 벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$L_i = \{ l_{ix}, l_{iy}, l_{iz}, 0, 0, 0 \}^T, i=1, 2, \dots, f \quad (15)$$

식 (15)는 요소면에 가해진 압력을 절점에 대한 등가의 값으로 표현했으므로 해당 절점에 대응되는 등가면적은 하중벡터의 크기로 주어진다. 즉,

$$A(i, j) = \sqrt{l_{ix}^2 + l_{iy}^2 + l_{iz}^2} \delta_{ij}, \quad i, j = 1, 2, \dots, f \quad (16)$$

여기서  $\delta_{ij}$ 는 Dirac delta함수이다. 또한 수치적인 관점에서 식 (15)는 요소의 법선방향의 값을 해석좌표에 대한 값으로 표현한 값이므로 변환행렬  $G(s \times f)$  역시 하중벡터로부터 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$G = [g_1, g_2, \dots, g_f], \quad (17)$$

여기서

$$g_i = \{g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{i2}, \dots, g_{in}\}^T, \quad n=s/6, \quad (18)$$

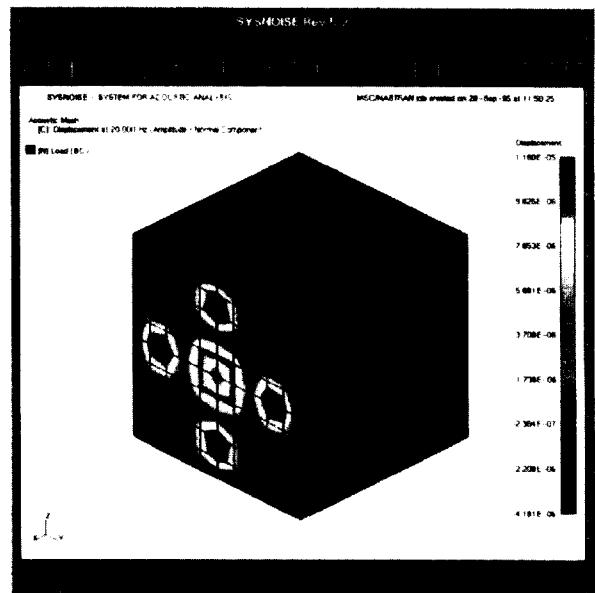
$$g_{ij} = \begin{cases} L_i & i=j \\ \{0\} & i \neq j \\ \{0\} & i \text{ is NOT a wet point} \end{cases} \quad (19)$$

### 3.4 MSC/NASTRAN DMAP Alter Sequence

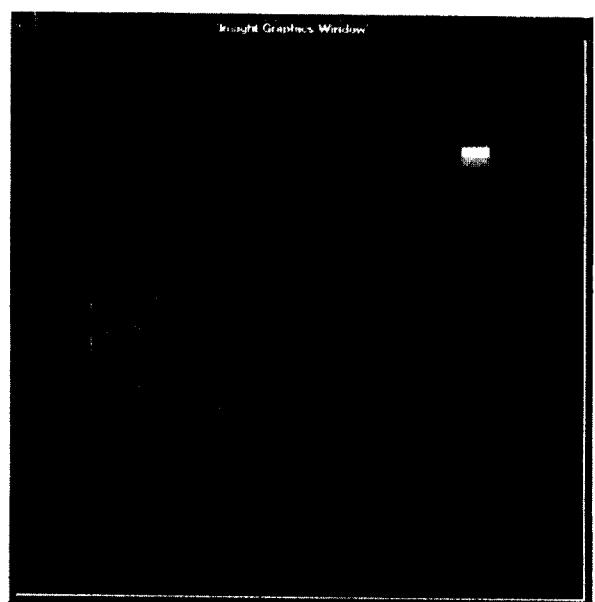
구조의 특성 행렬들은 사용자가 직접 프로그래밍하는 방법도 있지만 많은 시행착오를 거듭하여 오류를 수정해 나가야 하는 번거러움이 항상 따르기 때문에 가능하다면 범용 구조해석 프로그램으로부터 얻는 방법이 바람직하다. 범용 패키지를 이용하는 또 다른 중요한 이유는 MSC/NASTRAN의 경우, DMAP Alter를 이용하여 기존의 계산 모듈을 간단히 수정함으로서 원하는 계산은 물론 기존의 지원하는 구조응답에 대한 자료복원이 간편해 지기 때문이다. 즉 MSC/NASTRAN은 마지막 항  $-GAp$ 가 없는 식 (1)과 같은 형태의 행렬 방정식을 풀도록 되어있다. 그런데 구조-유체 상호작용 문제에서는 식 (8)을 푸는 것이므로 기존의 MSC/NASTRAN Solution Sequence를 식 (20) 같이 수정할 수 있다면 구조-유체 상호작용해석은 가능해진다.

$$\begin{aligned} M &\leftarrow M + M_A \\ B &\leftarrow B + B_A \\ F &\leftarrow F - GAE^{-1}p_I \end{aligned} \quad (20)$$

MSC/NASTRAN에서는 사용자의 목적에 맞게 기존의 Solation Sequence를 수정할 수 있는 Alter



(a) SYSNOISE results in water



(b) MSC/NASTRAN +SYSNOISE results in water

**Table 1** Properties of the varification model (in MKS)

구분	밀도	영 계수	포아송 비	두께/음속
구조	7800	2.1E+11	0.28	0.001(두께)
유체	998	—	—	1500(음속)

기능을 갖고 있으며 본 연구의 목적에 맞는 결합 및 결합에 필요한 계산을 수행하는 DMAP Alter Sequence(부록 I)를 개발하였다.

#### 4. 검증

본 연구에서 제안한 범용 패키지를 이용한 유체-구조 상호 작용 해석 방법의 신뢰성 검증하기 위하여  $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$  크기의 직방형 공동(rectangular cavity)을 검증모델로 하여 SYSNOISE로 해석한 결과와 비교하였다. 이 모델은 내부구조물이 없는 경우의 구조-유체 상호작용 문제로서 SYSNOISE만으로도 해석이 가능한 모델이다. Table. 1에서는 해석에 사용한 물성치를 보이고 있으며 가진력은 Fig. 3에서 보이는 y-z평면의 중앙부(□)에 x방향으로 주파수 50 Hz의 단위하중이다. Fig. 3은 본 연구에서 제안한 방법과 SYSNOISE에서 ANALYSIS RESPONSE하여 얻은 구조물의 법선방향의 가속도 수준을 (a)와 (b)에 각각 나타내어 비교하였다. 두 방법에 의해 해석한 결과는 잘 일치하는 것으로 판단되며 약간의 차이를 보이는 이유는 본 연구에서 제안한 방법에서 사용한 MSC/NASTRAN 셀요소는 SYSNOISE의 셀요소와 정식화 단계에서부터 근본적인 차이가 있기 때문인 것으로 생각된다.

#### 5. 적용예

일반적으로 알려진 상용 구조-유체 상호작용 해석 패키지들은 음향해석에 주안점을 두고 있으므로 복잡한 구조물을 모델링한다 든지 구조물의 응답에 관심이 있다면 의례 다음과 같은 제한점들을 갖게 된다.

- (1) TIME Domain Analysis : SYSNOISE는 시간 영역 해석이 지원되지 않는다 (단, 내부음장 해석문제는 가능)
- (2) Structural Finite Element Library : MSC/NASTRAN과 같은 구조 해석 전용 패키지들에 비하면 SYSNOISE에서는 지원되지 않는

구조 요소가 많다.

- (3) Internal Structure Modelling : 내부구조물이 있는 모델은 해석에 어려움이 많다.
- (4) Data Recovery to structural response : SYSNOISE에서는 음향학적인 자료를 중심으로 자료복원이 지원되며 특히 구조물의 응력, 내부에너지 및 파워흐름등 구조물에 동적응답에 대한 자료 복원 기능이 거의 지원되지 않는다.

본장에서는 이들 문제점을 극복하는 특별한 조건을 갖는 간단한 문제를 모델링하여 해석하였다. 본 예에서 극복한 일반적으로 대부분되는 제한점들은 다음과 같다.

- (1) 2차원 구조모델(plane-strain 요소)
- (2) 복잡한 내부구조물(Fig. 4참조)
  - (가) 서로다른 재질로 적층
  - (나) 내부 흠
- (3) 가진력
  - (가) 시간영역에서 전파특성을 파악하기 위한 harmonic transient force
  - (나) 파워흐름해석을 위한 steady-state harmonic force
- (4) data recovery

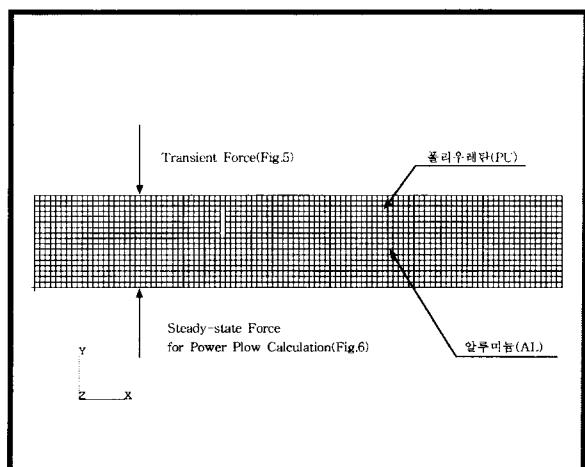


Fig. 4 FEM mesh of the application model

Table 2 Properties of the application model (in mm, kg and sec)

구분	밀도	영 계수	포아송 비	음속
알루미늄	2.69E-6	7.03E+6	0.345	—
폴리우레탄	1.12E-6	5.01E+6	0.4	—
음향매질	0.998E-6	—	—	1.5E+6

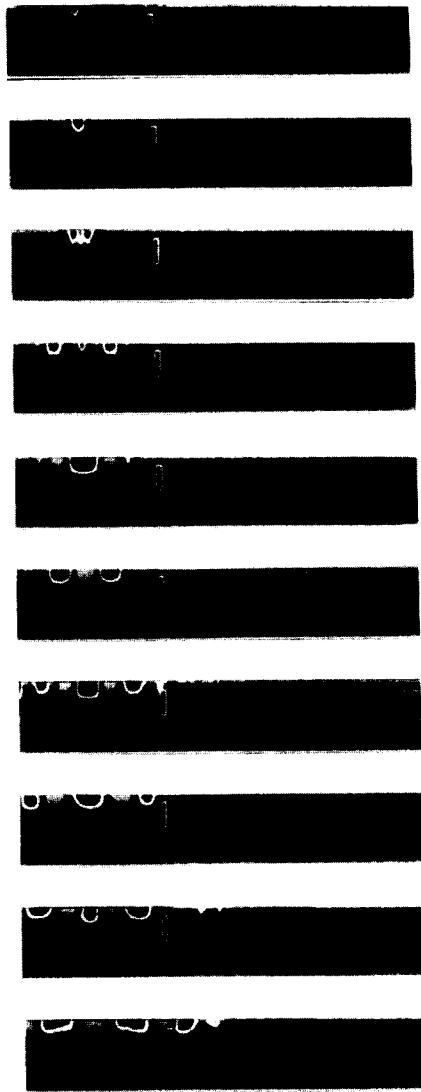
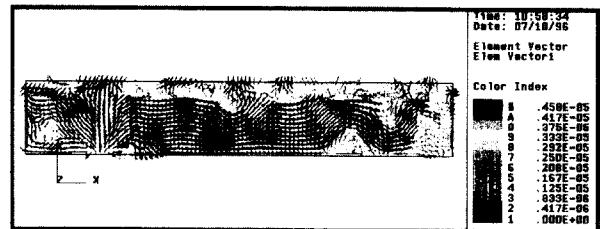


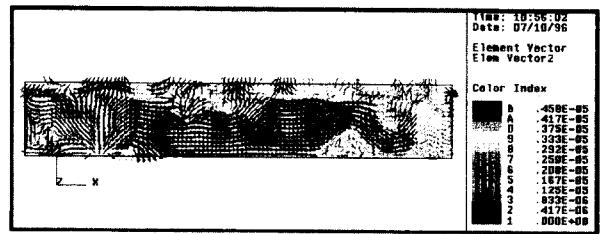
Fig. 5 Stress Wave Propagation in a Submerged Structure

- (가) 응력 전파 특성 가시화  
(나) 파워 흐름 가시화

적용예로 선정한 모델은 Fig. 4에서 보인바와 같이 2차원 공간상의 음향매질속에 있는 복잡한 내부구조물을 갖는 문제이다. 해석에 필요한 물성치는 Table 2에서 보이고 있으며 이 모델은 알루미늄위에 폴리우레탄 몰딩하여 서로 다른 재질로 층을 이루고 있으며 내부에는 응력파와 전파의 제어 목적으로 흠이 있다. 가진력은 폴리우레탄 층의 가장자리에 harmonic transient force를 가하여 파동을 생성시키고 이에 의한 구조물 내부에 생성된 응력파의 전파특성을 파악하였으며, 알루미늄 층의 가장자리에 steady-state force를 가하여 파워흐름을 계산하였다.



(a) Without Hole in the structure



(b) With Hole in the structure

Fig. 6 Post Calculation of Power Flow in a Submerged Structure

Fig. 5는 SYSNOISE와 MSC/NASTRAN을 이용하여 구조-유체 상호작용이 있는 구조물 내부의 응력파 전파 현상을 계산(TIME Domain Analysis)한 결과이며, Fig. 6은 같은 모델에 대하여 정상상태 하중을 알루미늄부의 가장자리에 가하여 SYSNOISE에서는 해석결과로서 변위, 속도 및 가속도 만을 제공하는 제한점을 극복하여 MSC/NASTRAN에서 요소의 힘과 속도를 이용하여 몰수된 2차원 구조물 내부의 파워 흐름을 계산한 결과를 보이고 있다. Fig. 6(a)는 흠이 없는 경우의 파워 흐름을 보이고 있으며, (b)는 흠이 있는 경우의 결과이다. 흠 근처에서 파워 흐름의 변화를 관찰 할 수 있으며 경계면에서 파워 흐름이 수중으로 향하여 있음을 관찰 할 수 있다.

## 6. 결론 및 후기

본 연구에서는 유체-구조 상호 작용 문제에서 범용 패키지들이 갖고 있는 제한 점을 효과적으로 극복 할 수 있는 방법을 제시 하였다. 이 방법은 주로 유체의 효과를 무시 할 수 없는 복잡한 구조물의 응답에 관심이 있을 때 응용 가치가 높으며 특히 선박의 진동해석이나 몰수된 구조물의 진동해석에 효과적으로 이용할 수 있을 것으로 보인다.

경계요소법에서 얻어지는 유체영향행렬은 외부문제일 때 그 경계요소에 대응하는 Dirichlet 경계조건을 만족하는 내부문제의 가상고유모드에 의해 그때의 고유주파수(critical frequency, Chief point)에서

해가 존재하지 않는 경우가 발생한다. 따라서 이런 경우의 문제점을 해결하기 위해 CHIEF 법이나 Lagrange Multiplier법 등이 제안되어 있다. 그러나, 본 연구에서 제안한 범용 패키지를 이용할 때 이 방법들이 고려된 유체영향행렬을 얻을 수 없었으며, 유체영향행렬을 얻었다 하더라도 MSC/DMAP Alter를 적용하는 과정에서 정방행렬이 아닐 때 결합 모듈의 구성이 불가능 하므로 이에 대한 연구는 향후 과제로 남아있다.

참고문헌

- (1) Gorden C. Everstine and Francis M. Henderson, 1990, "Coupled Finite Element/Boundary Element Approach for Fluid-structure Interaction", JASA, 87(5), pp. 1938~1947.
  - (2) Ian C. Mathews, 1986, "Numerical Techniques for Three Dimensional Steady-state Fluid-Structure Interaction", JASA, 79(5), pp. 1317~1325.
  - (3) Ken R. Fyfe, Jean-Pierre G. Coyette and Peter A. van Vooren, 1991, "Acoustic and Elasto-Acoustic Analysis using Finite Element and Boundary Element Methods," Sound and Vibration, pp. 16~22.
  - (4) Ian C. Mathews, 1987, "Numerical Techniques for Three-Dimensional Fluid-Structure Interaction Problems", DTRC-87/047.
  - (5) "SYSNOISE Manuals," Volume I, Volume II, Volume III, Volume IV, Numerical Integration Technology.
  - (6) "MSC/NASTRAN Reference Manual", Volume I, II, III, The Macneal-Schwendler Corporation.
  - (7) Francesco Marulo, Tedd B. Beyer, 1987, "NASTRAN Application for the Prediction of Aircraft Interior Noise", Proceedings of fifteenth NASTRAN User's Colloquium, pp. 266~285, May 4~8.

## 부 록 I

## **MSC/NASTRAN DMAP Alter for coupling the structure and the fluid model**