

# 유체와 연성된 두 직사각 평판의 고유진동 해석

유계형\*(전북대원), 정경훈\*\*(한국원자력연구소), 이성철\*\*\*(전북대, 공업기술연구소)

## Free Vibration Analysis of Two Rectangular Plates Coupled with Fluid

G. H. Yoo\*(Graduate School Chonbuk Univ.), K. H. Jeong\*\*(KAERI), and S. C. Lee\*\*\*(Chonbuk Univ. RIIT)

### ABSTRACT

In order to investigate the vibration characteristics of fluid-structure interaction problem, we modeled two rectangular identical plates coupled with bounded fluid. The fixed boundary condition along the plate edges and an ideal fluid are assumed. MSC/NASTRAN was used to perform finite element analysis and analytic solutions were compared with experimental solutions to verify finite element model. As a result, comparison of FEM and experiment show good agreement, and the transverse vibration modes, in-phase and out of-phase, were observed alternately in the fluid-coupled system. The effect of distance between two rectangular plates on the fluid-coupled natural frequency is investigated

**Key Words** . Rectangular plate(직사각 평판), Fluid-structure interaction(유체-구조 상호작용), F.E.M(유한요소법), Vibration characteristics(진동 특성)

### 1. 서 론

유체와 접하거나 유체에 잠겨있는 구조물의 고유진동수는 진공 중의 고유진동수에 비해 현저히 감소한다는 사실은 잘 알려져 있다. 이러한 문제를 유체-구조 상호작용(fluid-structure interaction)이라 하는데, 이러한 문제를 해결하기 위해 유체 속에 있는 구조물의 고유진동수 변화를 예측하는 많은 근사 해법이 구해졌다. 유체-구조 연성문제는 유한요소법이나 경계요소법과 같은 수치해법을 이용한 수치적 기법에 의해 시뮬레이션되거나 새로운 기법을 이용하여 표현되고 있는데, 유한요소법이나 경계요소법과 같은 기법은 계산과 모델링을 하는데 많은 시간과 노력이 필요하다.

유체와 접하고 있는 직사각 평판의 진동이 최근 연구되고 있는데, Kwak<sup>(1)</sup>은 한쪽 면이 물과 접하고 있는 직사각 평판의 고유 진동을 연구한 반면, Amabili<sup>(2)</sup>등은 한쪽 면이 물과 접하고 있는 환상 평판의 고유진동을 연구하였다. 이들은 유체 영역을 무한하다고 가정하고, 유체-구조계의 고유진동수에 대한 유체의 영향을 추정하기 위해 NAVMI 계수(Non-dimensionalized Added Virtual Mass Incremental factor)를 도입하였다.

Cheung<sup>(3)</sup>등은 유체가 채워진 직사각 컨테이너 바닥 평판의 진동특성을 연구하였고, 이동익<sup>(4)</sup>등은 폐공간에 의해 구조-음향 연성현상이 발생하고 이에 의해 평판의 진동 특성이 바뀌는 것을 연구하였다.

Fernholz<sup>(5)</sup>등은 범용 유한요소 프로그램인 MSC/NASTRAN을 이용하여 유체-구조 연성문제의 고유진동을 해석하기 위한 방법을 제안하였다. 기존의 연구는 단순히 평판이 유체와 접하거나 잠긴 상태의 진동해석이나, 직사각 컨테이너에 유체가 부분적으로 채워졌을 때의 유체와 연성된 구조물의 진동을 해석하였다.

본 논문에서는 네 변이 완전 고정된 마주보는 두 직사각 평판 사이에 강성벽에 의해 구속된 유체가 가득 채워진 경우에 대한 진동특성을 고찰하였다. 이를 위해 MSC/NASTRAN을 이용하여 유한요소 해석을 수행하였고, 실험을 통하여 유한요소 모델의 타당성 검토하였다. 또한 폐공간에 유체가 채워져 있을 때 발생할 수 있는 유체와 구조물의 연성효과에 의한 in-phase와 out-of-phase의 고유진동수를 구하여 연성효과에 의한 진동특성을 분석하였다.

### 2. 유한요소 해석

NASTRAN에서 연성된 유체-구조계를 해석하는 방법에는 유력탄성(hydroelastic) 문제에 대한 방법으로 유체 유한요소법(Fluid Finite Element Method)과 가상 질량법(Virtual Mass Method)이 있고, 연성 유체-구조(Coupled Fluid-Structure)에 대한 방법으로 연성 음향 해석법(Coupled Acoustic Analysis)을 이용한 방법이 있다.

가상 질량법은 경계요소법을 바탕으로 이상유체에서 유체와 구조의 연성 진동 문제를 계산하기 위해 사용되는 일반적인 방법으로, 유체와 접하고 있는 경계면에서 적합조건을 만족시키는 이상유체의 포텐셜에 의한 힘으로부터 유체-구조 연성문제를 계산한다. 하지만 유체가 가득 채워진 구조물의 경우 경계적분 시 특이(singularity)가 발생하므로 이를 고려하여 모델링하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 모델의 상단에 아주 미소한 공간을 정의하여 유체와 연성된 두 직사각 평판의 진동을 해석하였다.

SDRC I-DEAS에서 절점과 요소를 생성하여 유한요소 모델을 만들고, 해석 결과의 후처리를 하였다. I-DEAS에서 만들어진 유한요소 모델을 NASTRAN에서 해석하기 위한 입력 파일로 변환하였는데, 유체와 연성된 구조를 해석하기 위해서는 I-DEAS에서 만들어진 입력 파일을 수정할 필요가 있다. 가상 질량법을 이용할 때 두 평판 사이의 유체는 MFLUID를 이용하여 유체의 물성치와 유체의 접수 높이, 경계면을 정의하고, ELIST로 유체와 접하는 요소를 정의하여 모델링하였다.

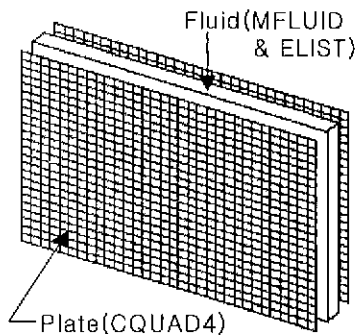


Fig. 1 Finite element model of fluid and plates, exploded view

유한요소 모델은  $0.32 \times 0.24 \times 0.002(m)$ 의 직사각형 평판이 마주보고 있고, 그 사이에 물이 가득 채워져 있는 경우로 그 개략도는 Fig.1과 같다. 평판 사이에 채워진 물은 MFLUID와 ELIST를 이용하여 모델링하였고, 좌우 평판은 가로 32개, 세로 25개의 요소를 갖도록 CQUAD4로 모델링하였는데, 이때 가상 질량법의 특성상 상부 접수면에서 발생하는 특이 제거하기 위해 세로 방향의 상단에  $0.1mm$ 의 공간을

갖도록 요소를 정의하여 해석하였다.

Table 1. Number of elements and nodes

| Model | Element | Element number | Node number |
|-------|---------|----------------|-------------|
| Plate | CQUAD4  | 1600           | 1716        |

Table 2. Mechanical properties of the plate material

| Material | Young's modulus                           | Possion's ratio | Density                                 |
|----------|---|-----------------|---|
| Aluminum | $7.00 \times 10^{10}$ (N/m <sup>2</sup> ) | 0.34            | $2.82 \times 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> ) |

Table 3. Material properties of fluid

| Material | Density                                 | Speed of sound             | Bulk modulus                           |
|----------|---|----------------------------|--|
| Water    | $1.00 \times 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $1.50 \times 10^3$ (m/sec) | $2.25 \times 10^9$ (N/m <sup>2</sup> ) |

구속조건은 각 평판의 네 변을 완전 구속하도록 하였고, 평판사이의 물은 강성벽(rigid wall)에 의해 구속된 것으로 하였다. 해석에 사용된 모델의 요소와 절점 수는 Table 1과 같고, 물성치는 Table 2, Table 3과 같다.

해석은 SOL103으로 모드해석을 하였고, Lanczos법을 이용하여 5Hz에서 1600Hz까지의 모든 고유진동수를 구하였다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험 장치

유한요소 해석 결과와 유체의 연성효과에 의한 평판 구조물의 동특성을 검토하기 위한 실험장치를 Fig. 2와 같이 구성하였다. 실험에 사용한 알루미늄 평판의 크기는  $0.325 \times 0.245 \times 0.002(m)$ 이고, 직사각 평판을 지지하기 위한 프레임과 홀더는  $0.42 \times 0.34 \times 0.02(m)$ 인 강판을 가공하여 사용하였다. 지지 프레임과 홀더는 해석에 사용된 직사각 평판의 크기와 같은  $0.32 \times 0.24(m)$ 의 직사각형을 강판의 중앙에 방전 가공기를 이용하여 잘라내어 제작하였다. 해석에 사용된 경계조건을 만족시키기 위해 지지 프레임과 홀더 사이에 직사각 평판을 놓고 볼트로 이들을 체결하여 완전 구속조건을 부여하였다. 볼트는 20mm 간격으로 각면에 60개씩을 사용하였고, 토크렌치를 이용하여 모든 볼트가 일정한 토크를 갖도록 하였다.

직사각 평판 사이의 물은 지지 프레임 상단에 있는 물구멍을 통해 채웠고, 평판 주위를 방수 처리하여 물이 새지 않도록 하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 유한요소 해석 결과 및 고찰

평판 사이의 거리가 20, 40, 80, 160, 320mm인 경우에 대해 NASTRAN으로 모드해석을 하여, I-DEAS로 고유진동수와 모드형을 검토한 결과 유체와 연성된 두 평판 사이의 상대적인 움직임에 따라 in-phase 모드와 out-of-phase 모드가 관찰되었다. Fig. 4는 평판 사이의 거리가 20mm인 경우에 대해 유체와 연성된 평판의 고유진동수를 도시한 것으로, (a)는 out-of-phase 모드이고, (b)는 in-phase 모드이다. 그림에서  $m$ 은 직사각형의 진동모드에 대한 장축의 절선을,  $n$ 은 단축의 절선을 나타내고 있는데, 동일 모드에서 in-phase 모드가 out-of-phase 모드 보다 높은 고유진동수로 나타났다.

두 평판 사이의 거리 변화에 따른 각 모드의 진동수 변화를 살펴보면 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 평판 사이의 거리가 멀어질수록 유체에 의한 부가질량 효과는 줄어들고, 고유진동수는 일정한 값에 수렴하게 됨을 알 수 있다.

유체와 접한 두 평판의 연성 고유 진동수는 유체의 부가질량에 의해 진공 중에 있는 평판의 고유진동수에 비해 항상 작게 나타난다. 따라서 진공 중의 고유진동수로 유체와 연성된 고유진동수를 나눈 정규 고유진동수는 0과 1 사이의 값을 갖게되고, 이를 나타내면 Fig. 6과 같다.

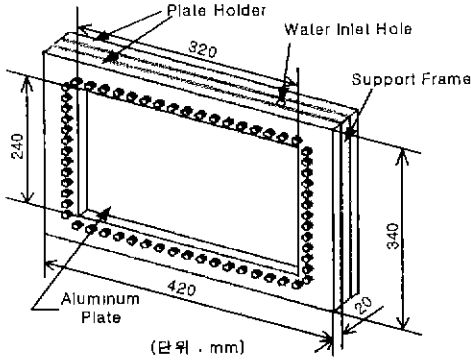


Fig. 2 Schematic diagram of plate holder and support frame

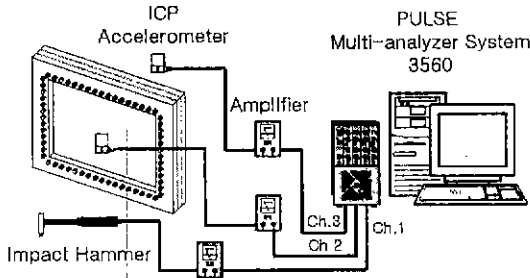


Fig. 3 Experimental apparatus

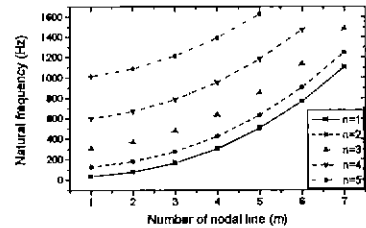
### 3.2 실험 방법

물이 채워진 경우, 가진 실험을 통해 유한 요소 모델의 타당성을 검토하기 위해서 각 절점에서 주파수 응답함수를 구하였다.

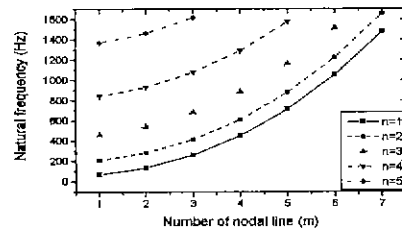
충격해머(PCB, 086C03)로 가진하여 얻은 신호를 증폭기(PCB, 480E09)로 증폭시킨 후 FFT(B & K, 3560)의 Front end를 통해 컴퓨터에 입력시키고, 양쪽 평판의 바깥면에 각각 한 개의 가속도계(PCB, 353A17, A353A17)를 왓스로 부착하여, 가속도계에서 나온 신호를 증폭기를 통하여 증폭시킨 후 FFT의 Front end를 통해 컴퓨터에 입력시켰다.

각 평판을 각각 40mm 간격으로 가로 7개, 세로 5개씩 35개의 절점을 갖도록 등분하고, 가속도계를 각 절점 마다 이동하면서 입력된 신호로부터 5회 평균하여 주파수 응답함수를 구하였다. 이때 가진점은 일정하게 하였다.

계산된 주파수 응답함수로부터 고유진동수와 모드형을 구하기 위해 모드해석 소프트웨어인 ME'scope (Vibrant Technology, Inc.)를 이용하였다.



(a) out-of-phase mode



(b) in-phase mode

Fig. 4 FEM natural frequencies of the fluid-coupled two rectangular plate with  $d=20$ mm

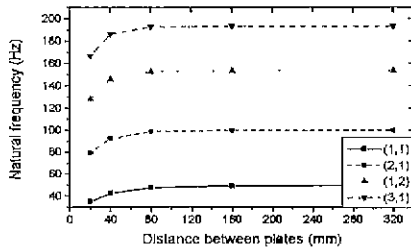


Fig. 5 Effect of distance between plates on the frequency of the out-of-phase mode

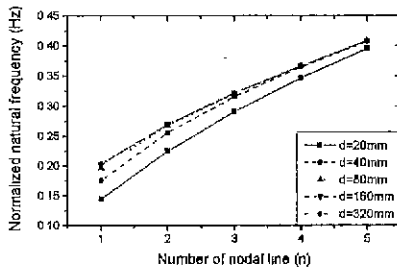


Fig. 6 Distance effect on normalized natural frequency of the out-of-phase mode for  $m=1$

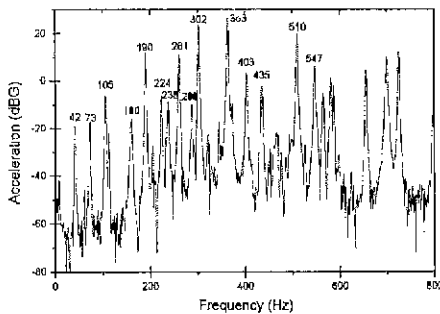


Fig. 7 Frequency response function of the fluid-coupled two rectangular plate with  $d=20\text{mm}$

#### 4.2 실험 결과 및 고찰

유체와 연성된 직사각 평판의 입력신호와 출력신호를 고속 푸리에 변환하여 주파수 응답함수를 구하면 Fig.7과 같고, 각 절점으로부터 구한 주파수 응답함수로부터 고유진동수와 모드형을 구해 해석치와 비교하였다.

Table 4는 각각의 모드에 대한 in-phase 모드와 out-of-phase 모드를 비교한 것으로 해석치가 실험치에 근사하고 있음을 알 수 있다.

Table 4 Comparison of F.E.M and experiment of the fluid-coupled two rectangular plate with  $d=20\text{mm}$

| mode no | mode shape | Natural Frequency |     | error(%) |
|---------|------------|-------------------|-----|----------|
|         |            | FEM               | Exp |          |
| 1       | (1,1) out  | 35.1              | 42  | -19.7    |
| 2       | (1,1) in   | 68.0              | -   | -        |
| 3       | (2,1) out  | 79.6              | 73  | 8.3      |
| 4       | (1,2) out  | 128.1             | -   | -        |
| 5       | (2,1) in   | 136.9             | 118 | 13.8     |
| 6       | (3,1) out  | 166.8             | 160 | 4.1      |
| 7       | (2,2) out  | 181.4             | -   | -        |
| 8       | (1,2) in   | 209.2             | 201 | 3.9      |
| 9       | (3,1) in   | 261.9             | 257 | 1.9      |
| 10      | (3,2) out  | 278.3             | 261 | 6.2      |

## 5. 결론

유체와 연성된 마주보는 직사각 평판 구조물의 진동 특성을 검토하기 위해 범용 유한요소 프로그램을 이용하여 유한요소 해석을 하였고, 실험을 통해 이를 비교하였다. 그 결과, 유한요소 해석치와 실험치가 잘 일치하였고, 각각의 모드에 대해 in-phase 모드와 out-of-phase 모드가 관찰되었다. 또한 유한요소 모델을 이용하여 두 평판 사이의 거리에 대한 유체 부가 질량 효과를 검토한 결과 거리가 증가함에 따라 부가 질량 효과가 감소하였고, out-of-phase 모드의 경우 고유진동수는 증가하여 일정한 값에 수렴하였다.

## 참고문헌

1. Moon k. Kwak, "Hydroelastic Vibration of Rectangular Plates," J. of Applied Mechanics, Vol. 63, March, pp.110-115, 1996.
2. M. Amabili, G. Frosali, and M. K. Kwak, "Free Vibrations of Annular Plates Coupled with Fluids," J of Sound and Vibrations, Vol.191, No.5, pp. 825-846, 1996.
3. Y. K. Cheung and D. Zhou, "Coupled Vibratory Characteristics of a Rectangular Container Bottom Plate," J of Fluids and Structures, Vol.14, No.3, pp. 339-357, 2000.
4. 이동익, 오재용, "구조-음향 연성평판의 자유진동 해석," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제8호, pp. 2546-2554, 1996.
5. Christian M. Fernholz, and Jay H. Robinson, "Fully-Coupled Fluid/Structure Vibration Analysis Using MSC/NASTRAN," NASA TM-110215, 1996
6. M. C. Kim and S. S. Lee, "Hydroelastic Analysis of a Rectangular Tank," 1997 MSC Aerospace users' Conference, 1997.