

유체와 연성된 두 직사각형 평판의 유한요소 해석

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

Finite Element 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 identical rectangular plates coupled with bounded fluid. The fixed boundary condition along the plate edges and an ideal fluid were assumed. A commercial computer code, ANSYS was used to perform finite element analysis and FEM solutions were compared with the experimental results to modify the finite element model. As a result, comparison of FEM and experiment showed good agreement, and the transverse vibration modes, in-phase and out of-phase, were observed alternately in the fluid-coupled system. The effects of distance between two rectangular plates and width to length ratio on the fluid-coupled natural frequency were investigated. And it was found that the normalized natural frequency of the fluid-coupled system monotonically increased with an increase in the number of modes.

Key Words : Rectangular plate(직사각 평판), Fluid-structure interaction(유체-구조물 상호작용), FEM(유한요소법), Vibration characteristics(진동 특성)

1. 서 론

최근 구조물의 설계시 설계기술의 발달로 부재가 경량화되고 앓아짐에 따라 열교환기, 원자력발전소, 대형 저장탱크 등과 같이 유체와 접하는 구조물에서 유체의 영향이 증대되고 있고, 이에 대한 동특성을 이해할 필요성이 대두되고 있다. 최근까지 유체와 접하고 있는 다양한 형태의 구조물에 대한 진동해석이 수행되고 있으며,^(1,2) 특히 마주 보고 있는 동일 크기의 평판사이에 유체가 채워져 있는 구조물의 동특성을 해석하는 방법에 대한 연구가 수행되고 있다.^(3,4)

유체와 연성된 구조물의 동특성을 연구하기 위한 방법에는 유한요소법이나 경계요소법과 같은 수치해법을 이용한 해석적 방법과 실험모드 해석 방법이 있다. 실험적 방법은 여러 불확실성에 의한 값들이 이미 고려된 것으로 볼 수 있으므로 보다 신뢰도가 높은 결과를 얻을 수 있지만 많은 시간과 비용이 소요되고, 설계변화에 대한 대응이 어렵다는 단점이 있다. 반면에 유한요소법을 이용한 구조물의 동특성 평가는 설계단계에서 유연하게 대처할 수 있는 장점은 있지만 구속조건에 대한 가정이나 모델의 단순화

와 같은 여러 불확실한 변수를 포함하므로 해석결과에 대한 모델의 신뢰도를 높이기 위해서는 정확한 모델을 만들 필요가 있다. 따라서 실험을 통해 구한 값은 유한요소 모델에 적용시켜 유한요소 모델을 보완함으로써 해석 결과의 신뢰도를 높일 수 있다.^(5,6)

본 연구에서는 고정된 동일 크기의 두 직사각 평판 사이에 유체가 가득 채워진 경우에 대해 유한요소법으로 동특성을 해석하였다. 유한요소 해석을 수행하기에 앞서 해석모델과 동일한 실험모델에 대해 물성치를 결정하는 실험을 수행하여 유한요소해석에 적용하였다. 두 평판사이의 유체는 강체벽(rigid wall)에 의해 구속되도록 모델링하였고, 두 직사각 평판사이의 거리를 변화시켜 담긴 유체의 양에 따른 동특성을 비교하였다. 또한 직사각형 평판사이의 거리를 일정하게 하고, 가로와 세로의 비를 바꿔가며 이에 따른 동특성을 비교하였다.

2. 유한요소 해석

2.1 유한요소 모델링

Fig. 1에서 보는 바와 같이 강체벽과 두 개의 동일한 직사각형판에 갇힌 유체와 연성된 직사각형 판

의 유한요소 해석을 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS(release5.5.3)를 이용하였다.

직사각형 평판의 가로를 a, 세로를 b라 할 때, b/a 비 및 평판사이에 채워진 유체의 양에 따른 고유진동수의 변화를 비교하기 위해 다음과 같은 유한요소 모델을 만들었다.

3개의 변위 자유도를 갖는 8개의 노드로 구성된 3차원 유체요소 FLUID80과 6자유도를 갖는 4개의 노드로 구성된 탄성 쉘요소 SHELL63을 이용하여 3차원 모델을 구성하였다. 유체로 연성된 구조물의 고유진동 해석을 위해 CPINTF 명령을 이용하여 판의 횡방향 적합조건을 만족하도록 하였는데, CPINTF 명령은 유체와 평판의 인접 노드 쌍에서 선택된 자유도를 공유시켜 두 요소 사이를 연결시켜 준다. 직사각형 평판의 모델링에는 요소 SHELL63이 사용되었고, 평판 사이의 유체 모델링에는 FLUID80이 이용되었다.⁷⁾ FLUID 80은 유체-구조 상호작용(fluid-structure interaction) 문제를 모델링하기에 적합한 요소로, 평판 사이의 거리가 40mm인 경우 평판 사이에 유체의 두께방향으로 4개의 요소를 갖도록 요소의 크기 명령어 ESIZE를 0.01(m)로 설정하였다. 해석에 사용된 모델과 요소 및 노드의 수는 Table 1과 같다.

Table 1. Number of elements and nodes

Type	Model	Plate		Fluid	
		Element	Node	Element	Node
b/a (D=40mm)	0.50	1024	1122	2048	2805
	0.75	1536	1650	3072	4125
	1.00	2048	2178	4096	5445
	1.25	2560	2706	5120	6765
	1.50	3072	3234	6144	8085
	1.75	3584	3762	7168	9405
Distance (b/a=0.75)	20	6144	6370	12288	15925
	40	1536	1650	4608	4125
	80	1536	1650	7680	7425
	160	1536	1650	13824	14025

유한요소 해석에서 직사각 평판의 가장자리는 고정단으로 설정되었고, 평판사이의 유체는 강제벽에 접하는 면에서 강제벽면에 수직인 방향의 변위만이 구속되었다.

해석에 사용된 직사각형 평판과 유체는 각각 알루미늄과 물이 사용되었고, 이들의 물성치로서 알루미늄 평판의 경우 두께 $t=2.5\text{mm}$, 탄성계수 $E=72\text{GPa}$, 포아송비 $\nu=0.34$, 밀도 $\rho=2730\text{ kg/m}^3$, 평판사이의 물에 대하여는 체적탄성계수 $B=2.22\text{GPa}$, 밀도 $\rho=1000\text{kg/m}^3$ 가 사용되었다.

2.2 실험 장치 및 방법

2.1절의 물성치를 이용한 초기 해석결과와 실험 결과를 비교하여 유한요소 모델을 수정하였다. 유체 연성 구조물의 유한요소 모델을 보완하기 위한 실험

용 구조물을 Fig. 1과 같이 구성하여 b/a 비가 0.75인 $320\text{mm} \times 240\text{mm}$ 인 직사각형에 대해 실험하였다. 가로와 세로가 $336\text{mm} \times 256\text{mm}$ 이고, 두께가 2.5mm 인 직사각형 알루미늄 평판을 실험에 이용하였는데, 평판을 고정하기 위해 8mm 의 여유를 갖도록 하였다. 직사각형 평판을 고정하기 위한 프레임과 홀더는 가로와 세로가 각각 $420\text{mm} \times 340\text{mm}$ 인 강판의 내부에 $320\text{mm} \times 240\text{mm}$ 크기의 직사각형 구멍이 뚫린 구조물로, 홀더는 두께가 일정한 20mm 의 강판이다. 직사각형 평판을 지지 프레임과 홀더 사이에 놓고 볼트로 이들을 체결하여 고정단의 경계조건을 모사하였다. 볼트는 20mm 간격으로 각 면에 60개씩을 사용하였고, 토크렌치를 이용하여 모든 볼트가 일정한 힘으로 체결되도록 하였다.

평판 사이의 유체로는 물을 사용하였고, 지지 프레임 상단에 있는 구멍을 통해 물을 채웠다. 이때, 평판 주위는 실리콘으로 방수 처리하여 물이 새지 않도록 하였다.

이와 같이 설정된 실험장치를 이용하여 가진 실험을 실시하였다. 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 왁스로 부착하여, 가속도계에서 나온 신호를 증폭기를 통하여 증폭시킨 후 FFT의 Front end를 통해 컴퓨터에 입력시켰다. 각 평판을 각각 가로 8개, 세로 6개씩 48개의 절점을 갖도록 등분하였고, 가속도계를 각 절점마다 이동하면서 입력된 신호로부터 5회 평균하여 주파수 응답함수를 구하였다. 이때 가진점은 사각판의 동일한 위치로 설정하였다. 계측된 주파수 응답함수로부터 고유진동수와 모드형상을 구하기 위해 모드해석 소프트웨어인 ME'scope(Vibrant Technology, Inc.)를 이용하였다.

실험과 유한요소 해석을 통해 구한 고유진동수와 모드 형상을 비교하여 유한요소 해석을 위한 물성치를 선정하였다.

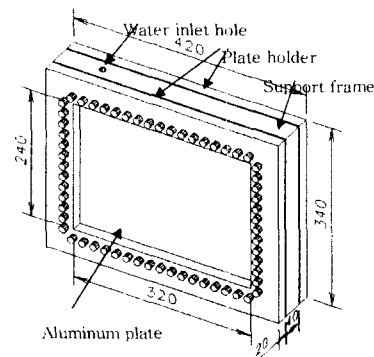


Fig. 1 Configuration of experimental setup

2.3 유한요소 해석 결과

유한요소 모델을 실제 모델과 유사하도록 하기 위해 유한요소 모델을 수정하는 방법에는 유한요소 모델의 질량이나 강성행렬 등과 같은 행렬을 수정인자로 사용하여 모델을 수정하거나, 유한요소 모델링 시 사용되는 밀도나 탄성계수, 두께 등을 수정인자로 보고 이들을 이용하여 민감도 해석을 수행하여 모델을 수정하는 방법이 있다. 본 논문에서는 직사각형 평판의 탄성계수를 수정인자로 사용하여 실험에서 구한 고유진동수와 유한요소 해석의 고유진동수를 비교하여 유한요소 모델을 수정하였다.

먼저 탄성계수 $E=72\text{GPa}$ 인 초기 물성치를 이용하여 b/a 비가 0.75이고 두 평판사이의 거리가 40mm인 경우에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다. 실험을 통해 구한 고유진동수와 모드 형상으로부터 유한요소 해석을 통해 구한 값을 비교하여 모델의 탄성계수 E 값을 변경함으로써 실제 모델과 유사한 동특성을 갖는 유한요소 모델을 구하였다.

Table 2. Comparison of experimental and FEM natural frequency of the fluid-coupled two rectangular plates with $d=40\text{mm}$

(a) in-phase mode

mode shape		Exp. (Hz)	E=72GPa		E=68GPa	
m	n		FEM (Hz)	Error(%)	FEM (Hz)	Error(%)
1	1	156.4	159.9	2.19	154.9	-0.98
	2	367.7	384.3	4.32	371.3	0.98
	3	-	741.2	-	714.1	-
2	1	263.0	271.6	3.19	262.6	-0.13
	2	469.9	491.4	4.39	474.0	0.86
	3	817.2	850.0	3.85	817.4	0.02
3	1	441.9	460.5	4.03	444.3	0.54
	2	653.6	676.3	3.36	650.8	-0.43
	3	999.2	1036.5	3.60	994.4	-0.49

(b) out-of-phase mode

mode shape		Exp. (Hz)	E=72GPa		E=68GPa	
m	n		FEM (Hz)	Error(%)	FEM (Hz)	Error(%)
1	2	144	149.9	3.92	145.3	0.90
	3	412.5	431.7	4.44	418.2	1.36
2	1	84.6	84.5	-0.14	81.9	-3.37
	2	224.7	240.7	6.65	232.7	3.43
	3	532.7	555.6	4.13	536.7	0.76
3	1	210.8	222.7	5.34	215.7	2.29
	2	396.8	409.4	3.08	395.2	-0.41
	3	705.4	726.9	2.96	701.0	-0.64

Table 2에 보는 바와 같이 탄성계수 E 를 68GPa로 했을 때, 보다 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 탄성계수를 68GPa로 설정하여 유한요소 해석을 수행하였다. 여기서 m 과 n 은 각각 직사각형의 가로방향과 세로방향의 진동모드를 나타내고 있

다.

유한요소해석에서 Block Lanczos법을 이용하여 20Hz와 4000Hz 사이에서 50개의 모드를 구하도록 하였다.

3. 유한요소 해석 결과 및 고찰

유체로 연성된 구조물에 대해 유한요소 해석을 수행하여 고유진동수와 모드형상을 검토한 결과 유체와 연성된 두 평판 사이의 상대적인 움직임에 따라 동위상(in-phase) 모드와 역위상(out-of-phase) 모드가 관찰되었다. Fig. 2는 두 평판 사이의 거리가 40 mm이고, b/a 비가 0.75인 경우에 대해 유체와 연성된 평판의 고유진동수를 도시한 것으로, 실선은 동위상 모드를, 점선은 역위상 모드를 나타내고 있다.

Fig. 2에서 대응되는 모드에서 동위상 모드의 고유진동수가 역위상 모드의 고유진동수보다 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 두 평판사이의 유체 운동에 기인하는 것으로 평판의 동위상 모드는 유체 운동방향이 판의 두께 방향으로 발생하는데 비해 역위상 모드는 유체의 이동이 수직방향과 수평방향의 혼합된 방향으로 발생하기 때문이다.

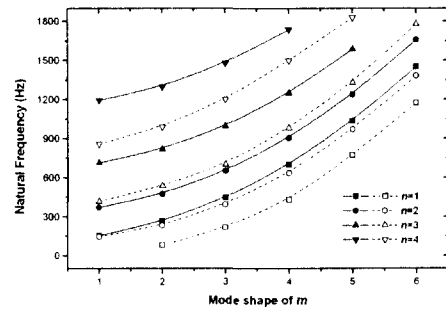


Fig. 2 Natural frequencies of the fluid-coupled two rectangular plates with $d=40\text{mm}$ and $b/a=0.75$ (continuous line=in-phase mode, dashed line=out-of-phase mode)

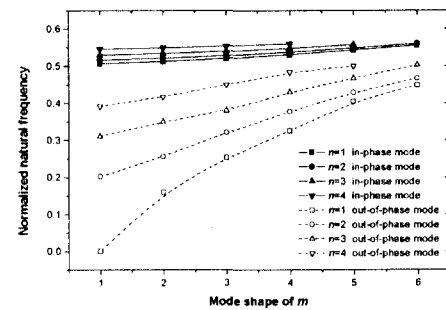


Fig. 3 Normalized natural frequencies of the fluid-coupled two rectangular plates with $d=40\text{mm}$ and $b/a=0.75$

유체와 접한 두 평판의 고유진동수는 유체의 부가질량(added mass)에 의해 진공 중에 있는 평판의 고유진동수에 비해 항상 작게 나타난다. 따라서 진공 중의 고유진동수로 유체와 연성된 고유진동수를 나눈 정규 고유진동수(normalized natural frequency)는 0과 1 사이의 값을 갖게 되고, 이를 모드별로 나타내면 Fig. 3과 같다. 동위상 모드의 정규 고유진동수는 모드가 증가함에 따라 점진적으로 증가하는 반면 역위상 모드에서는 급격히 증가한다는 것을 알 수 있다.

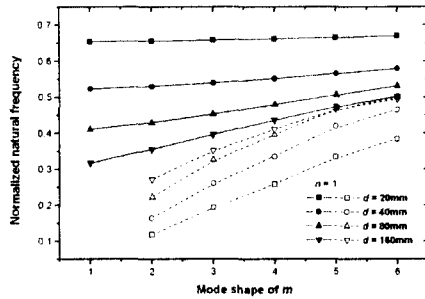


Fig. 4 Distance effect on normalized natural frequency for $n=1$ (continuous line = in-phase mode, dashed line = out-of-phase mode, $b/a=0.75$)

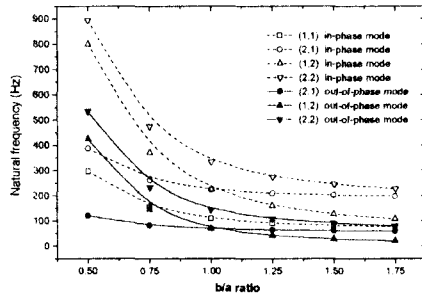


Fig. 5 b/a ratio effect on natural frequencies of the fluid-coupled two rectangular plates ($d=40\text{mm}$)

Fig. 4는 평판사이의 거리가 변할 때 평판사이 채워진 유체의 양에 따른 정규 고유진동수를 비교한 것으로 역위상 모드의 경우 평판사이의 거리가 증가함에 따라 정규 고유진동수가 증가하는 반면 동위상 모드에서는 감소하여 결국에는 일정한 값에 수렴하게 됨을 알 수 있다.

직사각형 평판의 b/a 비에 따른 유체연성 고유진동수를 변화를 비교해 보면 Fig. 5와 같다. 두 평판사이의 거리가 일정할 때 b/a 비에 따라 역위상 모드와 동위상 모드가 나타나고 있고, b/a 비가 커짐에 따라 고유진동수가 감소하여 동위상 모드와 역위상 모드의 차이가 작아짐을 알 수 있다. Fig. 5에서 $b/a=1.00$ 은 가로와 세로의 비가 같은 경우로 (2,1)모드와

(1,2)모드가 교차하고 있다.

5. 결론

고정단을 갖는 동일한 두 직사각 평판 사이에 유체가 가득 채워진 경우의 유한요소 해석을 수행하여 유체로 연성된 구조물의 동특성을 해석하였다. 해석에 앞서 해석모델과 같은 실험모델로 실험하고, 이 값을 토대로 물성치를 결정하여 유한요소 해석을 수행한 결과 실제 모델과 유사한 동특성을 갖는 유한요소 모델을 구할 수 있었다.

평판 사이의 거리변화에 따른 유체로 연성된 고유진동수의 변화를 검토한 결과, 거리변화에 관계없이 항상 동위상 모드의 고유진동수가 이에 해당되는 역위상 모드의 고유진동수보다 크게 나타났다. 평판사이의 거리가 증가함에 따라 동위상 모드의 고유진동수는 감소하는 반면, 역위상 모드는 진동수가 증가하는 경향을 확인하였다. 또한 직사각형 평판의 세로/가로(b/a) 비에 따른 유체로 연성된 고유진동수를 비교한 결과, 두 평판사이의 거리가 일정할 때 b/a 비가 커짐에 따라 고유진동수가 감소하여 동위상 모드와 역위상 모드의 차가 작아짐을 확인하였다.

참고문헌

1. Moon K. Kwak, "Hydroelastic Vibration of Rectangular Plates," J. of Applied Mechanics, Vol. 63, March, pp.110-115, 1996.
2. 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.
3. K. H. Jeong, T. W. Kim, S. Choi, and K. B. Park, "Free Vibration Analysis of Two Circular Disks Coupled with Fluid," PVP-Vol. 366, pp.157~164, 1998.
4. 유계형, 정경훈, 이성철, "유체와 연성된 두 직사각 평판의 고유진동 해석," 한국정밀공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp.752 ~ 755, 2001.
5. 김병곤, 정태진, 이종길, 허덕재, "고유벡터와 고유치를 고려한 모형프레임의 유한요소 모델 개선에 관한 연구," 한국소음진동공학회지, 제10권, 제6호, pp.1009~1015, 2000.
6. 지영춘, 박윤식, "고유치 오차 최소화 기준에 따른 실험데이터에 의한 유한요소 모델 개선," 대한기계학회논문집, 제19권, 제2호, pp. 363~373, 1995.
7. P. Kohnke, "ANSYS Theory Reference, ANSYS Element Reference, ANSYS Command Reference, Release 5.4," SAS IP, Inc., 1997.