

유체로 연성되고 두께가 상이한 두 직사각 평판의 실험적 모드 해석

유계형[†] · 정경훈* · 이성철**
(2002년 2월 19일 접수, 2002년 10월 30일 심사완료)

Experimental Modal Analysis of Two Unequal Rectangular Plates Coupled with Fluid

Gye-Hyoung Yoo, Kyeong-Hoon Jeong and Seong-Cheol Lee

Key Words : Rectangular Plate(직사각 평판), Fluid-Structure Interaction(유체-구조물 상호작용),
Modal Analysis(모드 해석), FEM(유한요소법), Out-of-Phase Mode(역위상 모드),
In-Phase Mode(동위상 모드)

Abstract

In order to study the vibration characteristics of fluid-structure interaction problem, two rectangular plates coupled with bounded fluid were investigated. Experimental modal analyses were carried out to extract the modal parameters of the system. Additionally, finite element modal analyses performed using a commercial computer code, ANSYS. The FEM solutions were compared with the experimental solutions to verify the finite element model. As a result, the comparison between the experiment and FEM results showed excellent agreement. The transverse vibration modes, in-phase and out-of-phase, were observed alternately in the fluid-coupled system. The thickness effect of the plates on the fluid-coupled natural frequencies and mode shapes was investigated for two different cases with the identical thickness and the unequal thickness. It was found that the coupled natural frequencies increase with the thickness for the identical plates regardless of the mode phase. The experimental and the finite element analysis results showed that the out-of-phase mode shapes were deviated from the symmetrical mode shapes in the plate transverse direction for the unequal plate thickness case.

1. 서 론

유체와 접하고 있는 구조물들은 유체에 의한 유체연성 (fluid-coupled) 및 부가질량효과 (added mass effect)에 의하여 진공 중에서는 다른 거동을 하게 된다. 이러한 유체-구조물 상호작용 문제는

열교환기, 원자력발전소, 대형 유체 저장탱크 등과 같이 유체와 접하는 구조물에서 유체의 영향이 커짐에 따라 그 중요성이 증대되고 있다. 특히 원자로에서 중성자 조사에 의한 손상을 저감시키기 위해 사용되는 동축 원통형 셀 구조물이나 다중 평판 구조물과 같이 구조물 사이의 간격이 작고 유체와 접하는 경우에 유체연성 및 부가질량효과는 복잡하게 나타나고, 이와 같은 구조물의 건전성을 확보하기 위해서는 유체와 접하고 있는 구조물에 대한 정확한 동특성을 이해할 필요가 있다.

유체와 연성된 구조물의 동특성을 연구하기 위한 방법에는 유한요소법이나 경계요소법과 같은

[†] 책임저자, 회원, 전북대학교 대학원 기계공학과

E-mail : ghyoung@hanmir.com

TEL : (063)270-2320 FAX : (063)270-2315

* 한국원자력연구소

** 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부,
공업기술연구소

수치해법을 이용한 수치해석 방법과 실험을 통한 모드 해석 방법이 있다. 유한요소 해석은 많은 가정과 단순화 과정을 포함하므로 이들의 검증을 위해서는 실험적 방법이 필요하다. 실험에 의한 동특성 해석법에는 모드 해석이 널리 알려져 있고, 이를 이용하여 구한 모드 모델로부터 해석적으로 구한 모델을 수정하거나 보완하는 방법들이 제안되고 있다.^(1,2)

최근까지 유체와 접하고 있는 다양한 형태의 구조물에 대한 진동해석이 수행되고 있는데, Kwak^(3,4)은 한쪽 면이 물과 접하고 있는 직사각형 평판과 원형 평판의 고유진동을 연구하였고, Amabili⁽⁵⁾등은 한쪽 면이 물과 접하고 있는 환형 평판의 고유진동을 연구하였다. 이들은 유체 영역이 무한하다고 가정하고 NAVMI 계수(Non-dimensionalized Added Virtual Mass Incremental factor)를 이용하여 유체로 연성된 구조물의 고유진동수에 대한 유체의 영향을 추정하였다.

Jeong⁽⁶⁾ 등은 유공 직사각 평판이 고정되어 있는 경우에 대해 공기 중에서의 접수 시의 모드 해석을 수행하였고 그 특성을 분석하였다. 하지만, 이들의 연구는 모두 유체와 접하고 있는 단일 평판의 문제만을 고려하고 있기 때문에 두 평판 사이에 유체가 채워진 경우와는 근본적으로 다르다.

Jeong⁽⁷⁾ 등은 마주 보고있는 동일 크기의 두 원판 사이에 유체가 채워진 경우의 해석을 수행하여 역위상 모드의 오차 원인이 역위상 모드에서 진공 중의 모드와 다른 모드형상을 갖고 있기 때문임을 밝혔다.

Jhung⁽⁸⁾ 등은 두 원형 평판이 강체 벽에 구속된 유체로 연성된 경우의 고유진동을 해석하기 위해 Rayleigh-Ritz 방법을 이용하여 고유진동수를 구하고, 유한요소 해석을 수행하여 유체 양에 따른 진동특성을 연구하였다.

본 연구에서는 완전 고정된 동일 크기의 두 직사각 평판 사이에 강체벽(rigid wall)에 의해 구속된 유체가 가득 채워진 경우에 대하여 실험적 모드 해석을 수행하고, 이를 유한요소 해석 결과와 비교 검토하였다. 또한 유체와 접하고 있는 직사각 평판의 두께가 고유진동 특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 마주보는 두 직사각 평판의 두께가 동일한 모델과 두께가 서로 다른 모델들의 모드형상으로부터 역위상(out-of-phase) 모드

및 동위상(in-phase) 모드를 구하여 유체 연성 구조물의 동특성을 알아보았다.

2. 유체의 부가질량

구조물이 유체와 접하거나 유체에 잠겨있을 때 구조물의 고유진동수는 진공 중에서의 값보다 작아지게 된다. 이는 구조물의 진동이 유체에 전달되어 유체의 운동을 증가시키고, 이로 인해 전체계의 운동에너지가 증가되기 때문이다. 즉, 유체 운동에너지의 증가는 마치 구조물에 유체가 가상적으로 덧붙여 운동하는 것과 같은 효과가 나타나므로 이를 부가가상질량(added virtual mass) 또는 간단히 부가질량(added mass)이라 부르며 유체와 접하고 있는 구조물의 고유진동수를 진공 중에서의 값보다 작게 만든다.

유체와 접하고 있는 직사각 평판에 대한 부가질량의 평가는 유체 속에서 평판의 모드형상이 진공 중 모드형상과 동일하다는 가정에 따라 이루어져 왔다. 이러한 가정에서 유체와 접하는 평판의 고유진동수를 진공 중의 고유진동수로 나타낼 수 있고, 이들은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$f_V^2 \propto \left(\frac{V_P}{T_P} \right)_{vacuum} \quad (1)$$

$$f_F^2 \propto \left(\frac{V_P}{T_P + T_F} \right)_{fluid}$$

여기서, f_V 는 진공 중 평판의 고유진동수, f_F 는 유체와 접하는 평판의 고유진동수, V_P 는 평판의 최대 변형에너지, T_P 는 평판의 운동에너지, T_F 는 유체의 운동에너지를 나타낸다.

진공 중이거나 유체 속에서의 모드형상이 같다고 가정하였으므로, 평판의 최대변형에너지와 운동에너지는 진공 중이거나 유체 속에서 변하지 않는다. 따라서, 식 (1)로부터 진공 중의 고유진동수와 유체 속에서의 고유진동수 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$f_F = \frac{f_V}{\sqrt{1 + \beta_{mn}}} \quad (2)$$

여기서, β_{mn} 은 부가가상질량증가 계수(added virtual mass incremental factor)로서 식 (3)과 같이 평판의 진동으로 발생하는 유체의 운동에너지와 평판 자체 운동에너지의 비로 나타낼 수 있다.

$$\beta_{mn} = \frac{T_F}{T_P} = \Gamma_{mn} \left(\frac{\rho_F}{\rho_P} \right) \left(\frac{d}{h} \right) \quad (3)$$

여기서, ρ_F 는 유체의 밀도, ρ_P 는 평판의 밀도, d 는 두 평판 사이의 거리, 즉 유체의 두께를 나타내고, h 는 평판의 두께이다. Γ_{mn} 는 무차원 부가상질량증가 계수(NAVMI 계수)로 알려진 무차원 변수로,^(3,4) 유체와 구조물의 경계조건, 기하학적 형상 등에 의해 결정된다. 따라서, 유체와 접하는 평판의 고유진동수는 진공 중의 모드형상과 유체 속의 모드형상이 동일하다면, 진공 중의 고유진동수와 NAVMI 계수로부터 구할 수 있다. 본 논문에서는 실험적인 방법과 유한요소 해석을 이용하여 유체로 연성된 두 직사각 평판의 고유진동수와 NAVMI 계수를 구하였다.

3. 실험적 모드 해석

3.1 실험 장치 및 방법

유체로 연성된 두 직사각 평판의 모드 해석을 수행하기 위해 Fig. 1과 같은 실험장치를 준비하였다. 실험에 사용된 직사각 평판은 가로, 세로가 336 mm × 256 mm이고, 두께가 1.5 mm와 2.5 mm인 알루미늄 평판이며 판 고정을 위해 평판 가장자리에 8 mm의 여유를 갖도록 하였다.

직사각 평판을 고정하고, 평판사이의 유체가 강체벽에 구속되도록 하기 위해 지지 프레임과 홀더를 준비하였다. 지지 프레임과 홀더는 가로와 세로가 420 mm × 340 mm인 강판 내부에 320 mm × 240 mm 크기의 직사각형 구멍이 뚫린 구조물로, 지지 프레임의 두께는 40 mm, 홀더는 20 mm이다. 해석을 위한 직사각 평판을 지지 프레임과 홀더 사이에 놓고 볼트로 이들을 체결하여 고정단 경계조건을 만족하도록 하였다. 볼트는 20 mm 간격으로 각 면에 60개씩을 사용하였고, 토크렌치를 이용하여 모든 볼트가 일정한 힘으로 체결되도록 하였다. 평판 사이의 유체는 상온의 물을 사용하였고, 지지 프레임의 상단에 있는 구멍을 통하여 채웠다. 이때, 평판 주위는 실리콘으로 방수 처리하여 물이 새지 않도록 하였다.

이와 같이 설정된 실험모형을 충격 햄머로 가진 실험하였다. 측정장치는 Fig. 2에서와 같이 충격햄머(PCB, 086C03), 증폭기(PCB, 480E09), 가속도계 2개(PCB, 353A17, A353A17), 신호분석기

(Zonic, Medallion)와 컴퓨터로 구성된다. 양쪽 직사각 평판의 바깥 면에 각각 가속도계를 왁스로 부착하고, 가속도계에서 나온 신호를 증폭기로 증폭시킨 후, 신호분석기의 데이터 취득 모듈(data acquisition module)을 통해 컴퓨터에 입력시켰다. 평판은 각각 가로 8개, 세로 6개씩 48개의 측정점을 갖도록 등분하였고, 가속도계를 각 측정점마다 이동하면서 입력된 신호로부터 5회 평균하여 96개의 주파수 응답함수를 구하였다. 가진점은 직사각 평판의 응답특성을 고려하여 판의 가장자리에 가까운 점으로 설정하여 일정하게 가진하였다. 계측된 주파수응답으로부터 고유진동수와 모드형상을 얻기 위해 상용 모드 해석 소프트웨어인 ME'scope VES (Vibrant Technology, Inc.)를 이용하였다.

직사각 평판의 두께에 따른 유체의 연성효과를 알아보기 위해 마주보는 평판의 두께가 각각 1.5 mm와 2.5 mm로 동일한 경우와 마주보는 평판의 두께가 1.5 mm와 2.5 mm로 서로 다른 경우에 대하여 실험을 통해서 모드 해석을 수행하였다.

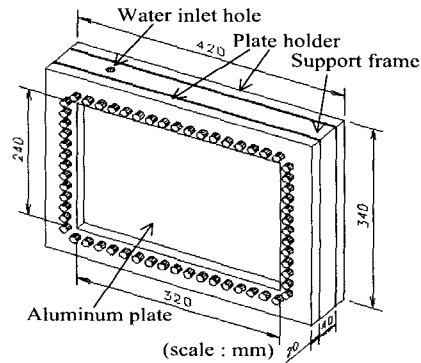


Fig. 1 Configuration of plate holder and support frame

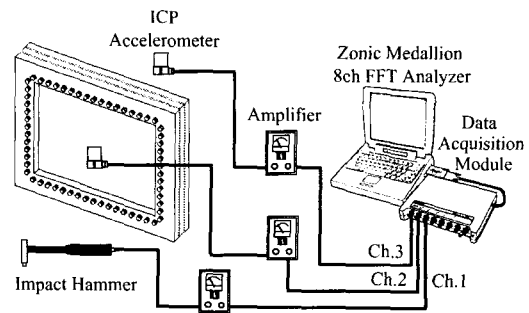


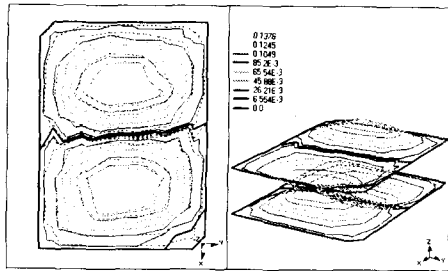
Fig. 2 Experimental apparatus

3.2 실험 결과

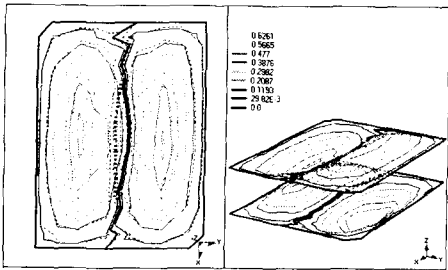
유체로 연결된 평판의 동특성 해석을 위해 마주보는 두 직사각 평판으로부터 얻은 출력신호와 가진 햄머로부터 얻은 입력신호를 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)하여 얻은 주파수응답 함수를 이용하여 모드 해석을 수행하였다.

Table 1은 실험을 통해 구한 모드 매개변수를

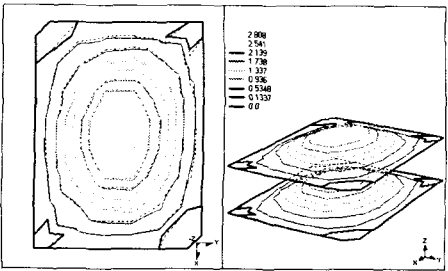
정리한 것으로 평판의 두께가 1.5 mm로 동일한 경우를 IT1515, 2.5 mm로 동일한 경우를 IT2525라 하였다. 또한 마주보는 두 평판의 두께가 1.5 mm와 2.5 mm로 다른 경우를 DT1525라 하여 두 직사각 평판의 두께에 따른 실험결과도 함께 정리하였다. 표에서 (m, n)모드의 m과 n은 각각 길이가 320 mm인 장변과 240 mm인 단변의 모드 번



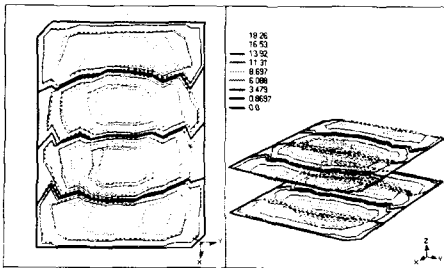
(a) Mode 1 : (2,1) out-of-phase, 82.9Hz



(b) Mode 2 : (1,2) out-of-phase, 143.9Hz

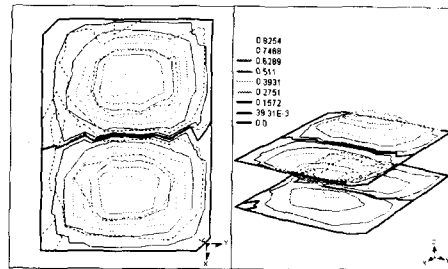


(c) Mode 3 : (1,1) in-phase, 156.7Hz

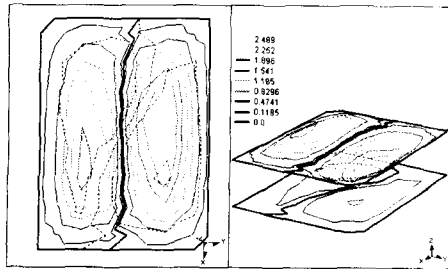


(d) Mode 10 : (4,1) out-of-phase, 427.2Hz

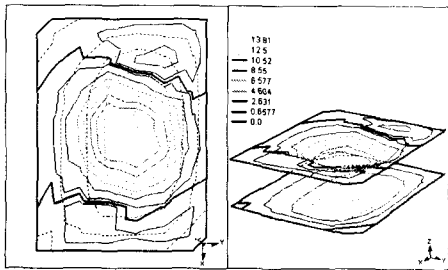
Fig. 3 Mode shapes of the fluid-coupled two plates with identical thickness (t = 2.5 mm)



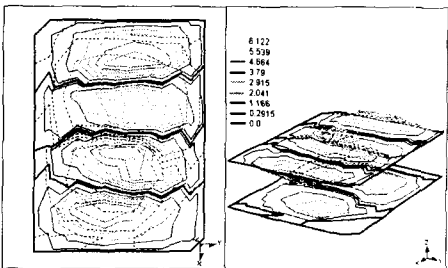
(a) Mode 1 : (2,1) out-of-phase, 50.7Hz



(b) Mode 2 : (1,2) out-of-phase, 82.2Hz



(c) Mode 3 : (1,1) in-phase, 115.0Hz



(d) Mode 7 : (4,1) out-of-phase, 253.8Hz

Fig. 4 Mode shapes of the fluid-coupled two plates with unequal thickness (t = 1.5 mm & t = 2.5 mm)

호를 나타내고, 'out'과 'in'은 각각 역위상 모드와 동위상 모드를 나타낸다.

Fig. 3은 두 직사각 평판의 두께가 2.5 mm로 동일한 모델에 대한 모드형상을 나타내고 있으며, 두 평판 사이의 상대적인 움직임에 따라 동위상 모드와 역위상 모드가 관찰되었다.

Fig. 4는 두 직사각 평판의 두께가 1.5 mm와 2.5 mm로 서로 다른 경우의 모드형상으로 이 경우에서도 두 평판 사이의 상대적인 움직임에 따라 동위상 모드와 역위상 모드가 관찰되었다.

하지만 모드 번호가 증가함에 따라 두께가 동일한 모델과는 다르게 모드형상이 나타나고, 두께가 동일한 경우에서 나타나는 모드의 대칭성이 깨져 보다 복잡한 형태의 모드형상이 나타났다.

Fig. 3과 Fig. 4의 (a), (b)는 각각 (2,1)모드와 (1,2)모드의 역위상 모드로, Fig. 3에서는 모드 변위(modal amplitude)의 절대값이 동일한 모드형상이 나타나 두 판 사이의 중심면을 따라 대칭을 이루지만, Fig. 4에 나타난 바와 같이 두 평판의 두께가 다른 경우는 두 평판의 모드 변위가 다르게 나타났다. 또한 (d)를 비교해 보면 두께가 동일한 모델에서는 모두 (4,1)모드로 진동하는 반면, 두께가 다른 모델에서는 두께가 얇은 쪽은 (4,1)모드로, 두께가 두꺼운 쪽은 (2,1)모드로 진동하고 있다. 이처럼 두께가 다른 두 평판이 마주 보고 있

을 때, 역위상 모드에서 모드 번호가 증가함에 따라 두 평판이 서로 다른 형태의 다양한 모드형상으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. 유한요소 해석

4.1 유한요소 해석

실험으로 구한 고유진동수와 모드형상을 확인하고, 유체로 연성된 구조물의 두께 변화에 따른 동특성을 알아보기 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS (release 5.5.3)를 이용하여 유한요소 모델을 만들고 해석하였다.

실험모델과 동일한 특성을 갖는 유한요소 모델을 구성하고 모드 해석을 수행하여 이 모델의 적합성을 확인하였고, 마주보는 두 평판의 두께가 동일한 경우와 서로 다른 경우에 대한 해석 모델을 만들어 평판의 두께가 유체로 연성된 구조물의 동특성에 미치는 영향을 평가하였다. 평판의 두께가 동일한 모델의 경우, 두께를 1.0 mm에서 4.0 mm까지 변화시켜가며 유한요소 해석하여 그 경향을 알아보았고, 두 평판의 두께가 서로 다른 모델의 경우, 두께가 2.5 mm인 평판을 기준으로 다른 평판의 두께를 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm로 변경하여 해석을 수행하였다.

실험을 모사하기 위하여 유한요소 해석에 사용

Table 1 Modal parameters of the fluid-coupled two rectangular plates

Mode No.	mode shape	Identical thickness							Different thickness				
		IT1515			mode shape	IT2525			mode shape	DT1525			
		FEM frequency (Hz)	Experiment frequency (Hz)	damping (%)		FEM frequency (Hz)	Experiment frequency (Hz)	damping (%)		FEM frequency (Hz)	Experiment frequency (Hz)	damping (%)	
1	(2,1)out	38.3	35.6	0.29	(2,1)out	81.9	82.9	0.76	(2,1)out	48.3	50.7	0.43	
2	(1,2)out	68.1	63.1	0.51	(1,2)out	145.3	143.9	0.45	(1,2)out	85.0	82.2	0.49	
3	(1,1)in	76.1	71.3	0.70	(1,1)in	154.9	156.7	0.23	(1,1)in	116.7	115.0	0.62	
4	(3,1)out	101.9	95.5	0.49	(3,1)out	215.7	213.3	0.21	(3,1)out	132.2	133.0	0.37	
5	(2,2)out	109.7	102.2	0.57	(2,2)out	232.7	228.2	0.23	(2,2)out	134.6	-	-	
6	(2,1)in	129.1	119.3	0.22	(2,1)in	262.6	263.5	0.11	(2,1)in	206.3	207.4	0.17	
7	(1,2)in	182.8	165.1	0.35	(1,2)in	371.3	368.3	0.11	(3,2)out	222.5	-	-	
8	(3,2)out	188.0	176.7	0.54	(3,2)out	395.2	389.3	0.20	(1,3)out	237.7	231.3	0.23	
9	(1,3)out	199.2	184.9	0.44	(1,3)out	418.2	409.2	0.16	(4,1)out	251.5	253.8	0.19	
10	(4,1)out	204.9	194.9	0.50	(4,1)out	429.0	427.2	0.18	(2,3)out	300.2	-	-	
11	(3,1)in	218.9	207.0	0.27	(3,1)in	444.3	446.7	0.12	(1,2)in	304.9	295.6	0.12	
12	(2,2)in	233.6	220.2	0.24	(2,2)in	474.0	470.4	0.11	(4,2)out	344.6	351.6	0.16	
13	(2,3)out	256.7	240.1	0.50	(2,3)out	536.7	527.8	0.18	(3,1)in	354.0	361.3	0.16	
14	(4,2)out	305.8	284.7	0.80	(4,2)out	636.3	626.9	0.24	(3,3)out	401.7	-	-	
15	(3,2)in	321.3	309.3	0.26	(3,2)in	650.8	652.4	0.09	(2,2)in	402.5	-	-	

된 직사각형 평판의 넓이는 320 mm × 240 mm이고 유체는 320 mm × 240 mm × 40 mm의 체적을 갖는다. 직사각형 평판을 1536개의 동일 크기의 탄성 쉘요소(SHELL63)로 나누어 채운(mesh)을 구성하였고, 직사각 평판 사이의 유체영역을 4068개의 동일한 크기의 3차원 유체요소(FLUID 80)로 나누었다. 실험을 모사하기 위한 유한요소 모델에서 직사각형 평판으로 사용된 알루미늄 평판의 물성치로 탄성계수 $E = 68 \text{ GPa}$, 포아송비 $\nu = 0.34$, 밀도 $\rho = 2730 \text{ kg/m}^3$ 을 입력하였고, 평판사이 유체는 상온으로 가정하여 체적탄성계수 $B = 2.22 \text{ GPa}$, 밀도 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 을 사용하였다.

유체와 구조물의 연성해석을 위해서는 두 요소 사이의 적합조건이 필요한데, 이를 위해 유체와 평판의 인접하는 절점(node) 쌍에서 선택된 자유도를 연결하여 접수면에 수직한 방향으로만 같이 움직일 수 있도록 하였다.

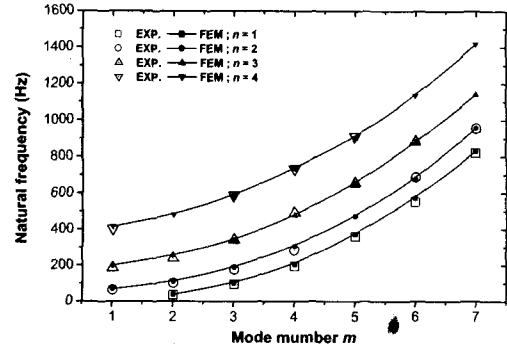
실험에서 구현한 평판의 경계조건을 모사하기 위하여 직사각형 평판의 가장자리를 고정단으로 설정하였고, 평판사이의 유체의 경계조건을 고려할 때, 강체벽에 접하는 접수면에서 강체벽면에 수직한 방향의 유체변위만을 구속하였다.

모드 해석에 사용된 고유치와 고유벡터를 구하는 방법으로 블록 Lanczos법을 선택하여 80개의 고유모드를 구하였고, 모드형상에 따라 역위상 모드와 동위상 모드로 구분하였다.

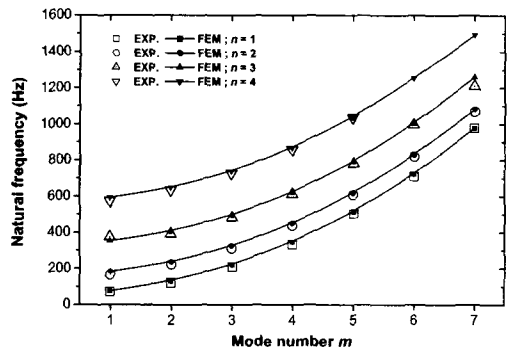
4.2 유한요소 해석 결과 및 고찰

유한요소 해석으로 유체로 연성된 두 직사각 평판의 고유진동수와 모드형상을 얻은 결과를 볼 때, 두 평판 사이의 상대적인 움직임에 따라 동위상 모드와 역위상 모드가 나타남을 알 수 있었고, 동위상 모드의 고유진동수가 이에 대응되는 역위상 모드의 고유진동수보다 항상 높게 나타났다.

Fig. 5는 직사각형 평판의 두께가 1.5 mm로 동일한 모델의 유한요소 해석과 실험을 통해 구한 고유진동수를 비교한 것이다. 이 비교를 통해서 실험결과와 유한요소 해석결과가 잘 일치하고 있음을 확인하였고, 이로부터 유한요소 해석 모델이 실험에 사용된 유체 연성구조물을 매우 잘 모사하고 있음을 알 수 있었다.



(a) Out-of-phase mode



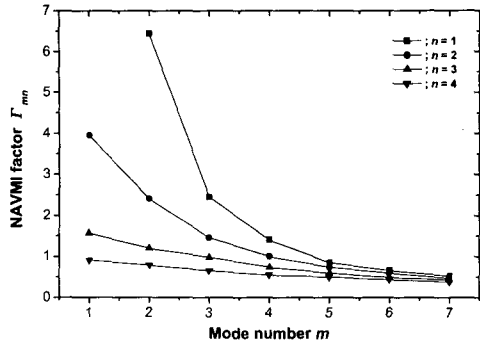
(b) In-phase mode

Fig. 5 FEM and Experimental natural frequencies of the fluid-coupled two rectangular plates with identical thickness ($t = 1.5 \text{ mm}$)

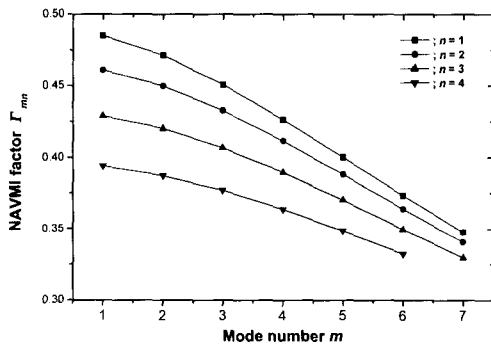
4.2.1 평판의 두께가 동일한 경우

Fig. 6은 두께가 1.5 mm로 동일한 모델의 유한요소 해석결과에 대한 NAVMI 계수로써, 역위상 모드의 값이 항상 동위상 모드보다 크게 나타나고 있고, 모든 모드에서 모드 번호가 증가함에 따라 NAVMI 계수 값이 감소하였다. 또한 모드 번호가 증가함에 따라 역위상 모드에서는 NAVMI 계수의 감소폭이 큰 반면, 동위상 모드에서는 작게 나타났다. 이러한 결과로부터 역위상 모드에서 더 큰 유체 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 두 평판의 두께가 동일한 모델에서 두께 변화에 따른 고유진동수의 변화를 나타낸 것으로 두께가 증가함에 따라 각 모드의 고유진동수가 증가함을 알 수 있다. 이는 두께의 증가는 판의 강성을 판 두께의 제곱으로 급속히 증가시키지만 질량의 증가는 판 두께에 비례하기 때문이다.



(a) Out-of-phase mode



(b) In-phase mode

Fig. 6 NAVMI factor of the fluid-coupled two rectangular plates with identical thickness ($t = 1.5 \text{ mm}$)

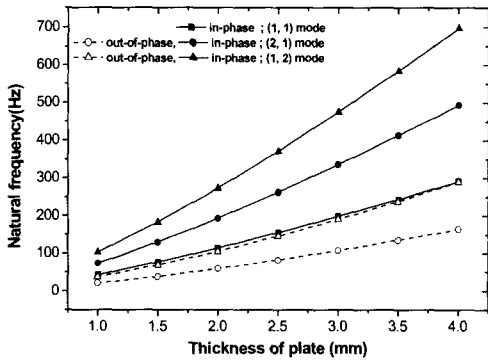


Fig. 7 Thickness effect on natural frequencies of the fluid-coupled two rectangular plates with identical thickness

동위상 모드의 고유진동수가 역위상 모드보다 크게 나타나고 있는데 이는 이미 원형 평판에서도 밝혀졌다.^(7,8) 또한, 동위상 모드의 고유진동수 증가율이 역위상 모드의 증가율 보다 크게 나타

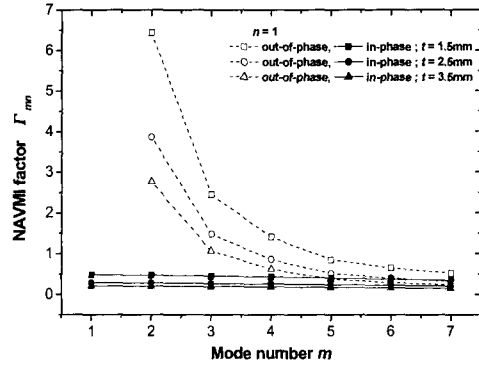


Fig. 8 Thickness effect on NAVMI factor of the fluid-coupled two rectangular plates with identical thickness

나는데, 이는 두 평판사이의 유체 움직임에 기인한다. 이와 같은 유체 움직임은 유체로 연성된 구조물의 고유진동수를 감소시키고, 접수 모드형을 변경시키는 원인이 된다.

동위상 모드는 평판에 수직인 방향의 유체 움직임에 의해 발생하는 반면, 역위상 모드는 수직, 수평 방향의 혼합된 유체 움직임에 의해 발생한다. 따라서 역위상 모드의 혼합된 유체 움직임에 의한 운동에너지의 증가량이 동위상 모드의 운동에너지 증가량에 비해 크게 되고, 이로 인해 동위상 모드의 진동수가 이에 대응되는 역위상 모드의 진동수보다 항상 높게 된다. 이와 같은 이유로 동위상 모드는 진공 중의 직사각 평판과 동일한 모드형을 갖지만, 역위상 모드에서는 모드 번호가 증가함에 따라 진공 중의 모드형상과 다르게 진동하게 된다. 즉, 직사각 평판에 수평인 유체의 움직임은 평판의 움직임을 부분적으로 방해하고, 이로 인해 역위상 모드의 모드형상은 진공중의 모드형상과 다르게 된다.

Fig. 8은 두 평판의 두께가 동일한 경우, 직사각 평판의 두께 변화에 따른 NAVMI 계수를 비교한 것으로 동위상 모드에 비해 역위상 모드에서 유체의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 두께가 증가함에 따라 유체의 영향이 감소함을 알 수 있는데, 동위상 모드보다 역위상 모드에서 감소 폭이 크게 나타났다. 이는 유체와 접하는 평판의 두께 증가로 인한 유체의 영향이 역위상 모드에서 크게 감소함을 보여주는 것으로 판의 두께가 두꺼워질수록 상대적인 유체의 영향이 감소함을 알 수 있다.

4.2.2 평판의 두께가 다른 경우

Fig. 9는 마주보는 두 평판의 두께가 동일하지 않은 경우로서 한 쪽 평판의 두께를 2.5 mm로 고정시키고 다른 쪽의 두께를 바꾸어 가며 얻은 모드형상으로, (4,1)모드의 역위상 모드를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 9의 (b)는 Fig. 4의 (d)를 모사한 모드형상으로서 실험으로 구한 모드형상이 유한요소 해석으로 구한 결과와 서로 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

유체로 연성된 두 직사각 평판의 두께가 서로 다른 경우 그 두께에 따라 평판의 상대적인 움직임에 의한 동위상 모드 및 역위상 모드의 형태가 동일한 두께를 갖는 평판의 경우와 달라지게 된다. Fig. 9의 (d)와 같이 두께가 동일한 모델에서는 두 평판의 움직임이 대칭적으로 나타나지만, (a), (b), (c)와 같이 평판 두께가 서로 다른 경우는 두께에 따라 평판의 모드형상이 대칭으로부터 점차 벗어나고 있음을 확인할 수 있다. 두께가 서로 다른 경우, 역위상 모드에서 두께가 두꺼운 평판의 모드형상은 얇은 평판에 비해 작은 변위를 갖게 되는데, 이로부터 평판의 강성 차이가 모드형상에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그러나 동위상 모드에서는 강성차이로 인한 두 평판의 변위 차이가 크게 나타나지 않았다.

두께의 차이가 작은 경우에 역위상 모드와 동위상 모드는 두 평판에서 유사한 모드형상으로 나타나지만, 두께의 차이가 큰 경우에는 변위 크기의 차이가 크게 나타난다. 역위상 모드에서 모드 번호가 증가함에 따라 평판의 움직임이 달라지는 데, 두꺼운 평판은 거의 움직이지 않는 반면, 얇은 평판만 움직이는 것처럼 나타난다.

Fig. 10은 두께가 서로 다른 평판 사이에 채워진 유체 변위에 대한 벡터선도로서 두 평판의 두께 차이가 클수록 얇은 쪽 평판에서 진동 모드가 상대적으로 크게 나타나고 이로 인해 내부 유체는 얇은 평판 주위에서만 움직이게 된다. 두께가 서로 다른 구조물에서 나타나는 이러한 진동 모드는 서로 다른 동특성을 갖는 직사각 평판이 유체로 연성되어 나타나는 현상으로, 유체와 구조물이 서로 영향을 주고 있음을 보여준다. 이 경우 모드 번호가 증가하면 역위상 모드와 동위상 모드가 혼재되어 복합 모드형상으로 발전하게 된다. 이처럼 유체로 연성된 구조물에서 유체는 구조물의 진동 모드에 영향을 주고 구조물 또한

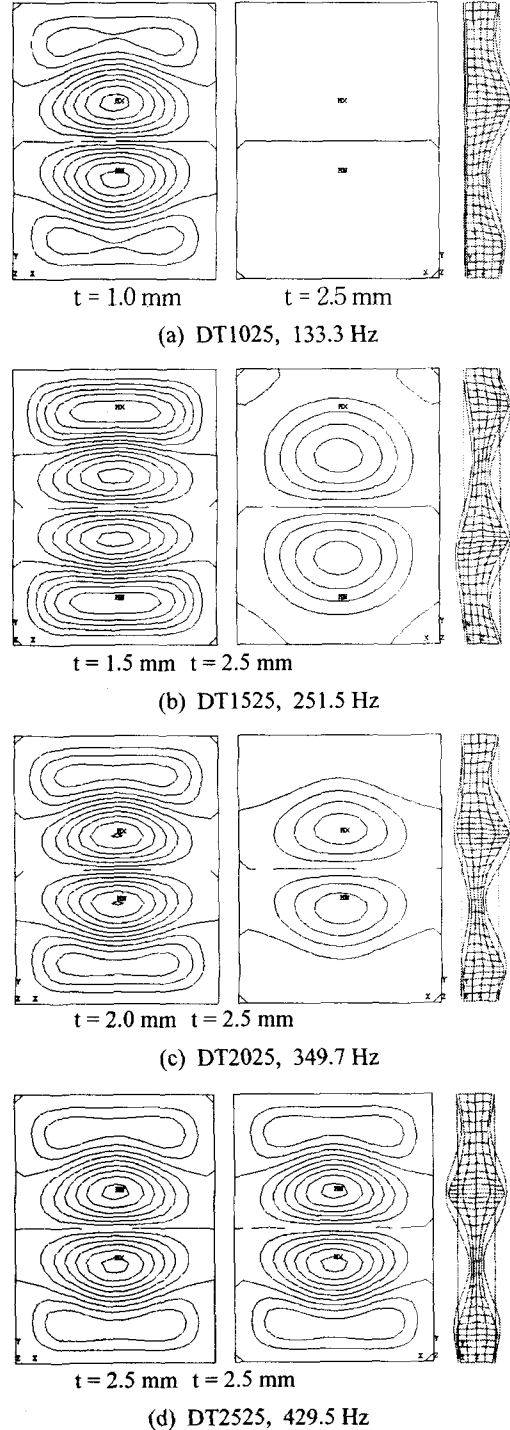


Fig. 9 Mode shapes of the fluid-coupled two rectangular plates with unequal thickness for (4,1) out-of-phase mode

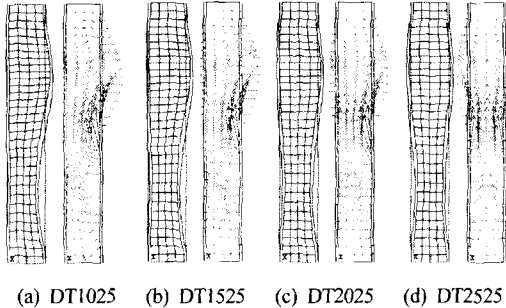


Fig. 10 Mode shape and displacement vector plot of the fluid-coupled two rectangular plates with unequal thickness for (2,1) out-of-phase mode

유체의 움직임에 영향을 주어 이 상호작용에 따라 전체 계의 동특성이 결정된다.

5. 결론

직사각 평판의 두께변화에 따른 유체 연성 구조물의 동특성을 알아보기 위해 강체벽에 의해 구속된 유체로 연성된 두 평판의 모드 해석을 실험적인 방법과 유한요소법으로 수행하였다. 유한요소 해석에 앞서 해석모델과 같은 조건의 실험을 수행하여 유한요소 모델의 모사를 검증하였다. 또한 두 평판의 두께가 동일한 경우와 서로 다른 경우에 대해서 유한요소 해석을 수행하고, 두께가 동일한 경우 해석 결과로부터 NAVMI 계수를 구하여 평판의 두께가 유체로 연성된 두 평판의 고유진동에 미치는 영향을 알아보았다.

해석 결과, 두 평판 사이의 상대적 움직임에 따라 동위상 모드와 역위상 모드가 나타났고, 두 평판의 두께가 동일할 때 두께에 관계없이 동위상 모드의 고유진동수가 이에 해당되는 역위상 모드의 고유진동수보다 크게 나타났다. NAVMI 계수는 역위상 모드가 동위상 모드보다 크게 나타났다, 모든 모드에서 모드 번호가 증가함에 따라 감소함을 확인하였다. 또한 두 평판의 두께가 서로 다른 경우, 평판의 역위상 모드형상이 대칭에서 벗어나고 있음을 확인하였다.

참고문헌

(1) Minas, C., and Inman, D. J., 1990, "Matching

Finite Element Models to Modal Data," *J. of Vibration and Acoustics, Transaction of the ASME*, Vol. 112, Jan., pp. 84~92.

(2) Song, S. H., and Jung, M. J., 1999, "Experimental Modal Analysis on the Core Support Barrel of Reactor Internals using a Scale Model," *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 8, pp. 585~594.

(3) Kwak, M. K., 1996, "Hydroelastic Vibration of Rectangular Plates," *J. of Applied Mechanics, Transaction of the ASME*, Vol. 63, pp. 110~115.

(4) Kwak, M. K., 1991, "Vibration of Circular Plates in Contact with Water," *J. of Applied Mechanics, Transaction of the ASME*, Vol. 58, pp. 480~483.

(5) Amabili, M., Frosali, M., and Kwak, M. K., 1996, "Free Vibrations of Annular Plates Coupled with Fluids," *J. of Sound and Vibrations*, Vol. 191, No. 5, pp. 825~846.

(6) Jeong, K. H., Ahn, B. K., and Lee, S. C., 2001, "Modal Analysis of perforated Rectangular Plates in Contact with Water," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 12, No. 2, pp. 189~200.

(7) Jeong, K. H., Kim, T. W., Choi, S., and Park, K. B., 1998, "Free Vibration Analysis of Two Circular Disks Coupled with Fluid," *PVP-Vol. 366, Proceedings, Technologies in Reactor Safety, Fluid-Structure Interaction, Sloshing and Natural Hazards Engineering*, pp. 157~164.

(8) Jhung, M. J., and Jeong, K. H., 2001, "Natural Vibration Analysis of Two Circular Plates Coupled with Bounded Fluid," *Transaction of the KSNVE*, Vol. 11, No. 9, pp. 439~453.

(9) Yoo, G. H., Jeong, K. H., and Lee, S. C., 2001, "Modal Analysis of Two Rectangular Plates Coupled with Fluid," *Proceedings of the KSME 2001 Spring Annual Meeting A*, pp. 556~561.

(10) Ewins, D. J., 1986, *Modal Testing: Theory and Practice*, Research Studies.

(11) Kohnke, P., 1998, *ANSYS Theory Reference, ANSYS Element Reference, ANSYS Command Reference, Release 5.5*, SAS IP, Inc.