

유체에 잠긴 다공 직사각평판의 고유진동 해석

유계형[†] · 권대규* · 정경훈** · 이성철***

전북대학교 대학원 기계공학과 · *전북대학교 메카트로닉스 연구센터 · **한국원자력연구소

***전북대학교 기계항공시스템공학부, 공업기술연구소

(2002. 10. 7. 접수 / 2002. 12. 21. 채택)

Free Vibration Analysis of Perforated Rectangular Plates Submerged in Fluid

Gye-Hyoung Yoo[†] · Tae-Kyu Kwon* · Kyeong-Hoon Jeong** · Seong-Cheol Lee***

Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Chonbuk National University

*Mechatronics Research Center, Chonbuk National University

**Korea Atomic Energy Research Institute

***Division of Mechanical and Aerospace Systems Engineering, Chonbuk National University,

The Research Institute of Industrial Technology

(Received October 18, 2002 / Accepted December 21, 2002)

Abstract : This paper presented an experimental modal analysis of clamped perforated rectangular plates submerged in water. The penetration of holes in the plates had a triangular pattern with P/D (pitch to diameter) 1.750, 2.125, 2.500, 3.000 and 3.750. The natural frequencies of the perforated plates in air were obtained by the Rayleigh-Ritz method and compared with the experimental results. Good agreement was obtained between the analytical solution and experimental result. The experimental results in water showed that the mode shapes are not sensitive to the depth of submergence. The natural frequencies were shown to decrease drastically once the perforated plates come in contact with water. However, the natural frequencies decrease with the depth of submergence until a certain depth is reached, and become the asymptotic values beyond this depth of submergence. The depth of submergence did not affect the damping ratio greatly.

Key Words : experimental modal analysis, fluid-structure interaction, perforated rectangular plate, added mass, triangular hole pattern, nondimensionalized added virtual mass incremental(NAVMI) factor

1. 서 론

다공 평판은 산업 현장에서 폭넓게 사용되는 부품 중 하나로 원자로와 각종 열교환기에서 구조물의 지지와 효과적인 열전달을 위해 다양한 형태로 제작되어 사용되고 있다. 특히 노심으로 유입되는 냉각재의 유동을 균일하게 하기 위해 원자로 내부에 설치된 유동 분배판(flow distribution plate)은 얇은 다공 평판으로 되어있고 냉각재인 물과 접하게 된다. 이처럼 유체와 접하거나 유체 속에 잠겨있는 구조물의 고유진동수와 감쇠비 등은 공기 중과 다르

게 나타난다.

설계기술의 발달로 구조물이 경량화 되고 얇아짐에 따라 구조물에 대한 유체의 영향은 더욱 증대되고 있다. 따라서, 이와 같은 구조물의 건전성을 확보하기 위해서 유체와 접하고 있는 구조물에 대한 동특성을 정확히 이해할 필요가 있다.

유체와 접하고 있는 다양한 형태의 평판 구조물에 대한 진동해석이¹⁻⁷⁾ 최근까지 수행되고 있는데, 구멍이 있는 평판의 접수진동에 대한 연구는 그다지 많지 않다.

평판의 접수진동에 관한 연구는 주로 평판 내에 구멍이 없거나 구멍이 있어도 단지 몇 개의 큰 구멍이 뚫린 경우가 대부분이었다^{8,9)}. 이러한 기존의 연구는 일정한 배열을 갖는 다공 평판이 유체에 잠긴

[†]To whom correspondence should be addressed.
ghyoung@hanmir.com

경우와는 다른 특성을 나타내고, 기존의 연구 결과로부터 유체에 잠긴 다공 평판의 접수진동 특성을 예측하기 어렵다¹¹⁾.

따라서 본 연구에서는 물에 잠긴 다공 직사각평판의 동특성을 알아보기 위해 실험적으로 모드해석을 수행하였다. 삼각형 배열을 갖는 다공 직사각평판은 그 네 변을 강체벽에 고정하여 완전고정 조건을 갖도록 하였고, 강체벽에 구속된 물에 잠겨있는 것으로 가정하였다. 공기 중에 있는 다공 직사각평판의 고유진동수를 등가 물성치를 이용하여 Rayleigh-Ritz 방법으로 계산하고, 이를 실험값과 비교하여 실험의 타당성을 검토하였다. 또한 물 속에 있는 다공 평판의 모드 매개변수를 실험으로 구하였고, 잠긴 깊이에 따른 부가질량의 변화도 연구하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 다공 직사각평판의 운동방정식

Fig. 1은 본 연구에 사용된 삼각형 배열을 갖는 다공 평판을 도시한 것으로 a, b, h는 각각 길이, 폭, 두께를 나타낸다. 이와 같은 다공 직사각평판이 물에 잠겼을 때의 운동방정식을 유도하기 위해 다음과 같은 가정을 사용한다. (a) 물의 운동은 작다. (b) 물은 비압축성, 비점성, 비회전 이상유체다. (c) 다공 평판은 선형 탄성, 균질, 등방성 재료다. (d) 전단 변형과 회전 관성은 무시한다. (e) 평판의 두께는 폭과 길이에 비하여 매우 작다.

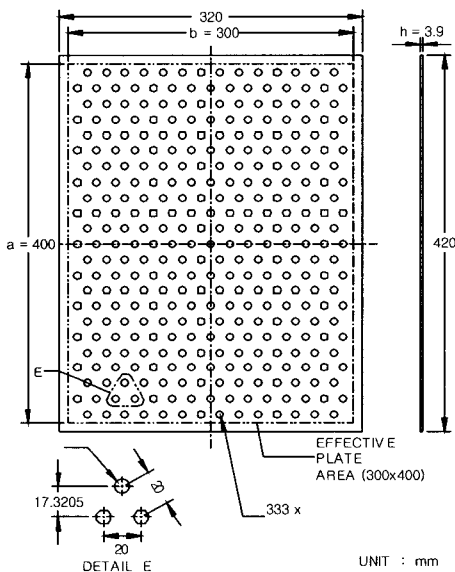


Fig. 1. A perforated rectangular plate with $P/D = 2.500$

삼각형 배열을 갖는 다공 평판은 O'Donnell¹²⁾ 등이 제안한 등가 물성치를 이용하여 구멍이 없는 평판과 유사하게 취급할 수 있다. 즉, 다공 평판의 강성과 밀도에 대한 구멍의 영향을 나타내는 등가 물성치를 사용함으로써 다공 평판을 균질 등방성 평판으로 취급할 수 있게 된다. 따라서 알루미늄으로 제작된 구멍이 없는 직사각평판의 물성치가 Table 1과 같을 때, 다공 평판의 등가 물성치는 평판 구멍의 직경에 대한 구멍 사이 피치의 비(P/D)에 따라 결정할 수 있고, O'Donnell의 값으로부터 보간법을 이용하여 구하면 Table 2와 같다.

다공 직사각평판이 Fig. 2와 같이 이상 유체에 잠겨 있을 때 평판의 횡변위 w 에 대한 운동 방정식은 식 (1)과 같다.

$$D^* \nabla^4 w + \rho^* h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = p_L^* - p_U^* \quad (1)$$

Table 1. Material properties of the solid rectangular plate

Length × Width	Thickness	Poisson's ratio	Young's modulus	Mass density
a × b (mm)	h (mm)	μ	E (GPa)	ρ (kg/m ³)
400 × 300	3.9	0.3	68.00	2730.0

Table 2. Equivalent material properties of the perforated rectangular plates

Pitch (mm)	P/D	Ligament efficiency η	Equivalent Poisson's ratio μ^*	Equivalent Young's modulus E^* (GPa)	Equivalent mass density ρ^* (kg/m ³)
14	1.750	0.4286	0.3383	29.61	1921.6
17	2.125	0.5294	0.3182	38.69	2181.7
20	2.500	0.6000	0.3154	45.18	2333.9
24	3.000	0.6667	0.3105	50.85	2454.9
30	3.750	0.7333	0.3042	55.85	2553.9

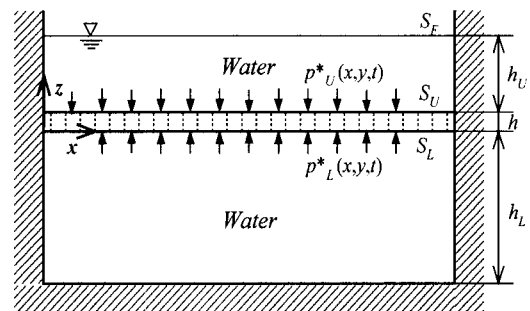


Fig. 2. A perforated rectangular plate submerged in water

여기서 $D^* = E^*h^3/12(1-\mu^{*2})$ 는 다공 평판의 등가 강성도이고, p_L^* 과 p_U^* 는 각각 다공 평판의 아래면과 윗면에 작용하는 유체 압력이다. 또한, ∇^4 은 직교 좌표계의 이중조화 연산자(biharmonic operator)로 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4}{\partial x^2\partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \quad (2)$$

식 (1)의 일반해는 다음과 같이 허용 함수(admissible function) $W_{mn}(x, y)$ 와 접수 고유진동수 ω_f 에 대한 조화 시간함수의 곱으로 쓸 수 있다.

$$w(x, y, t) = W_{mn}(x, y)\exp(i\omega_f t) \quad (3)$$

접수 시 진동 모드형상이 공기 중의 모드형상과 같다고 가정하면 $W_{mn}(x, y)$ 는 경계조건을 만족하는 공기 중에 있는 보에 대한 고유함수의 곱으로 나타낼 수 있다. 따라서 완전 고정 경계조건을 갖는 다공 직사각평판의 동적 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} W_{mn}(x, y) = & \left[\cosh\left(\frac{\lambda_m x}{a}\right) - \cos\left(\frac{\lambda_m x}{a}\right) \right. \\ & \left. - \sigma_m \left\{ \sinh\left(\frac{\lambda_m x}{a}\right) - \sin\left(\frac{\lambda_m x}{a}\right) \right\} \right] \\ & \times \left[\cosh\left(\frac{\lambda_n y}{b}\right) - \cos\left(\frac{\lambda_n y}{b}\right) \right. \\ & \left. - \sigma_n \left\{ \sinh\left(\frac{\lambda_n y}{b}\right) - \sin\left(\frac{\lambda_n y}{b}\right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 계수 $m, n = 1, 2, 3, \dots$ 일 때, $\lambda_m, \lambda_n = 4.73004, 7.85320, 10.99561, 14.13717, 17.27876, (2m+1)\pi/2$ ($m, n > 5$)이고, $\sigma_m, \sigma_n = 0.98205, 1.00078, 0.99997, 1.00000$ ($m, n > 3$)이다.

2.2. 속도 포텐셜

물을 이상유체로 가정할 때 다공 직사각평판과 접하고 강체 용기 벽으로 둘러싸인 물의 운동은 속도 포텐셜로 기술할 수 있다. 평판의 진동에 의한 유체 운동은 Laplace 방정식을 만족하는 속도 포텐셜이 되고 식 (5)와 같다.

$$\nabla^2 \phi(x, y, z, t) = 0 \quad (5)$$

일반적으로 속도 포텐셜 ϕ 는 공간 속도 포텐셜 ϕ 와 조화 시간함수의 조합으로 표현할 수 있다.

$$\phi(x, y, z, t) = i\omega_f \phi(x, y, z)\exp(i\omega_f t) \quad (6)$$

유체의 압력 p 는 Bernoulli 방정식으로부터 식 (7)과 같이 계산된다.

$$\rho_f \frac{\partial \phi}{\partial t} + p + \rho_f g z = 0 \quad (7)$$

여기서 ρ_f 는 물의 밀도이고, g 는 중력가속도이다. 따라서, 물의 자유표면 파동의 진동수가 ω 일 때, 자유표면 S_F 에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=h_r+h} - \frac{\omega^2}{g} \phi \Big|_{z=h_r+h} = 0 \quad (8)$$

또한, 벽면에서 유속의 법선 방향 성분이 0이므로 강체 용기 벽면의 경계조건은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=a} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=b} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=-h_r} = 0 \quad (11)$$

2.3. 다공 직사각평판의 고유 진동수

다공 직사각평판의 운동에너지 T_p 와 변형에너지 V_p 는 구멍이 없는 평판에 대한 에너지 식에 등가 물성치를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_p = \frac{1}{2} \rho^* h \int_0^a \int_0^b W_{mn}^2 dx dy \quad (12)$$

$$\begin{aligned} V_p = & \frac{D^*}{2} \int_0^a \int_0^b \left[\left(\frac{\partial^2 W_{mn}}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W_{mn}}{\partial y^2} \right)^2 \right. \\ & + 2\mu^* \left(\frac{\partial^2 W_{mn}}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 W_{mn}}{\partial y^2} \right) \\ & \left. + 2(1-\mu^*) \left(\frac{\partial^2 W_{mn}}{\partial x \partial y} \right) \right] dx dy \end{aligned} \quad (13)$$

따라서, 공기 중에 있는 다공 직사각평판의 고유진동수 ω_a 는 다음 식으로부터 계산된다.

$$\omega_a = \sqrt{V_F/T_P} \quad (14)$$

반면에 물에 잠겨있는 다공 직사각평판의 고유진동수를 계산하기 위해서는 물의 운동에너지를 계산할 필요가 있다. 이를 위해서는 경계조건과 적합조건을 만족하는 속도 포텐셜을 구해야하는데, 다공 직사각평판과 물이 접하는 면 S_U, S_L 의 적합조건은 식(15)와 같이 정의되고,

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=h} = \left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=0} = -W_{mn} \quad (15)$$

물과 접하는 면에 작용하는 압력은 다음 식으로부터 계산된다.

$$\rho_f \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=h} + \dot{p}_U + \rho_f g h_U = 0, \text{ at } S_U \quad (16)$$

$$\rho_f \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} + \dot{p}_L + \rho_f g (h_U + h) = 0, \text{ at } S_L \quad (17)$$

이와 같이 다공 직사각평판의 진동에 의한 유체 운동을 정의하는 속도 포텐셜은 평판과 접하는 면에서 식(15)를 만족해야한다. 이로부터 Green 정리를 이용하면 유체의 운동에너지 T_F 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_F = \frac{1}{2} \rho_f \int_0^a \int_0^b \left[\left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \phi \right|_{z=0} + \left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \phi \right|_{z=h} + \left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \phi \right|_{z=h+h_U} \right] dx dy \quad (18)$$

공기 중에서의 모드 형상과 물과 접하는 경우의 모드 형상이 동일하다고 가정하면 물과 접하는 다공 직사각평판의 접수 고유진동수는 다음의 관계를 갖는다.

$$\omega_f = \frac{\omega_a}{\sqrt{1+T_F/T_P}} \quad (19)$$

하지만 다공 직사각평판의 구멍 부분의 물을 포함하는 속도 포텐셜을 계산한다는 것은 매우 어렵

기 때문에, 다공 평판과 유체사이의 경계조건과 적합조건을 만족하는 유체의 운동에너지를 이론적으로 기술한다는 것은 매우 어렵다. 따라서 물과 접하는 다공 직사각평판의 접수 고유진동수는 이론 식으로 계산할 수 없고, 실험을 통하여 구할 수밖에 없다.

3. 모드 해석

3.1. 실험 장치 및 방법

공기중의 이론해석 결과를 검토하고 물과 접하는 다공 평판에 대한 물의 영향을 알아보기 위해 여러 종류의 다공 직사각평판을 제작하여 이에 대한 모드 해석을 수행하였다. 실험에 사용된 다공 직사각평판은 두께가 3.9mm이고, 가로, 세로가 각각 420mm×320mm인 알루미늄 평판에 직경이 8mm인 원형 구멍을 뚫어 제작하였다. 구멍의 직경에 대한 구멍 사이 피치의 비(P/D)가 1.750, 2.125, 2.500, 3.000, 3.750인 5종류의 다공 평판을 준비하여 실험하였다. Fig. 1은 P/D 가 2.500인 삼각형 배열을 갖는 다공 평판을 도시한 것으로 400mm×300mm의 유효면적을 갖는다.

이와 같이 제작된 다공 평판을 Fig. 3과 같이 상·하부 용기 사이에 놓고 볼트와 너트로 체결하여 고정 경계조건을 구현하였다. 이때 볼트와 너트는 60개를 사용하였고, 토크렌치를 이용하여 모든 볼트를 일정한 힘으로 체결하였다. 다공 평판을 고정하고 물을 채우기 위한 상, 하부 용기는 두께가 10mm인 강철판으로 제작하였다. 하부 용기는 다공 평판의 유효면적과 같은 400mm×300mm의 넓이에 240mm의 깊이를 갖고, 상부 용기는 동일한 넓이에 100mm의 높이를 갖도록 제작하였다. 하부 용기의 외곽 측면에는 20개의 바(bar)를 수직으로 용접 보강함으로써 다공 평판을 지지하기에 충분한 강성을 갖도록 하였다.

다공 평판의 접수진동 실험은 평판의 아랫 면이 물과 접하기 시작할 때부터 윗면으로 20mm씩 수위를 증가시켜 다공 평판의 고유진동특성에 대한 물의 영향을 검토하였다. 평판에 물이 접하기 시작할 때는 하부용기에 물을 가득 채워 평판 두께의 중간까지 물이 채워지도록 하였고, 평판이 물에 잠길 때는 하부용기에 물을 가득 채우고 평판 위쪽의 상부용기의 20, 40, 60, 80mm 지점에 물이 위치하도록 하여 실험하였다.

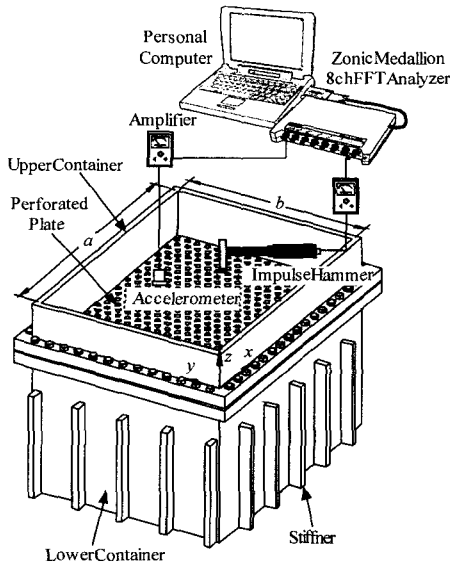


Fig. 3. The experimental setup and apparatus

이와 같이 설정된 실험 모델에 대해 충격해머 가진 실험으로 모드해석을 수행하였다. 측정장치는 Fig. 3과 같이 충격해머(PCB,086C03), 증폭기(PCB, 480E09), 가속도계(PCB, A353A17), 신호분석기(Zonic, Medallion)와 컴퓨터로 구성된다. 다공 직사각평판의 윗면에 가속도계를 왁스로 부착하고, 가속도계에서 나온 신호를 증폭기로 증폭시킨 후, 신호분석기의 데이터 획득 모듈(data acquisition module)을 통해 컴퓨터에 입력시켰다. 평판은 가로 9개, 세로 7개씩 63개의 측정점을 갖도록 등분하였고, 가속도계를 각 측정점마다 이동하면서 입력된 신호로부터 5회 평균하여 63개의 주파수 응답함수를 구하였다. 가진점은 직사각평판의 응답특성을 고려하여 판의 가장자리에 가까운 점으로 설정하여 일정하게 가진하였다. 계측된 주파수응답함수로부터 모드 매개변수를 얻기 위해 상용 모드해석 소프트웨어인 ME'scope VES(Vibrant Technology, Inc.)를 이용하였다.

3.2. 실험 결과 및 고찰

물에 잠긴 다공 직사각평판의 모드해석에 앞서 공기 중에 있는 다공 직사각평판의 이론해석을 수행하여 실험에 대한 타당성을 검토하였다.

Table 3은 Table 2에서 제시한 등가물성치를 이용하여 계산한 다공 직사각평판의 고유진동수와 실험으로 구한 고유진동수와 감쇠비를 P/D 값에 따라

Table 3. Natural frequency and damping ratio of the perforated rectangular plates in air

P/D	Method	Modal parameter	Mode Number (n×m)				
			1×1	1×2	2×1	1×3	2×2
1.750	Theory	Freq.(Hz)	239.2	401.9	563.2	669.3	714.1
		Freq.(Hz)	212.9	377.3	540.2	656.4	697.3
	Experiment	Damp.(%)	0.66	0.23	0.09	0.05	0.07
2.125	Theory	Freq.(Hz)	254.7	427.9	599.8	712.7	760.4
		Freq.(Hz)	231.5	404.5	569.9	695.0	740.9
	Experiment	Damp.(%)	1.45	0.44	0.08	0.07	0.07
2.500	Theory	Freq.(Hz)	265.8	446.7	626.0	743.9	793.7
		Freq.(Hz)	259.0	444.7	617.2	749.6	799.9
	Experiment	Damp.(%)	0.99	0.27	0.08	0.09	0.05
3.000	Theory	Freq.(Hz)	274.5	461.2	646.5	768.2	819.6
		Freq.(Hz)	256.5	448.3	615.8	774.1	807.6
	Experiment	Damp.(%)	0.73	0.24	0.11	0.09	0.08
3.750	Theory	Freq.(Hz)	281.4	472.9	662.8	787.6	840.3
		Freq.(Hz)	265.1	458.7	637.6	774.0	830.5
	Experiment	Damp.(%)	0.61	0.17	0.09	0.15	0.26

정리한 것이다. 표에서 n과 m은 각각 길이가 300mm인 b변과 400mm인 a변에 나타나는 모드 수이다. 이론해석은 다공 직사각평판을 구멍이 없는 평판으로 가정하여 Rayleigh-Ritz 방법으로 근사해를 계산하였다. Table 3의 결과를 보면 실험값이 이론값보다 작게 나타나고 있는데, 이는 실험에서 이론해석과 엄밀하게 동일한 경계조건을 부여하지 못했기 때문으로 생각된다. 즉, 실험 장치에서 평판을 고정하기 위해 사용한 볼트 체결로는 이론 해석과 같은 완전 고정 경계조건을 실현하기 어렵기 때문에 측정된 고유진동수는 언제나 이론값보다 작게 나타난다. 또한 실험에 사용된 가속도계의 무게가 2.5g인 소형이라 할지라도 P/D값이 작은 평판의 경우는 가속도계로 인한 부가 질량의 영향으로 실험에서 구한 고유진동수가 낮게 나타나는데 어느 정도 기여했다고 볼 수 있다. 이러한 이유로 Table 3의 결과는 타당하다고 볼 수 있다.

Fig 4는 다공 직사각평판이 물과 접하기 시작할 때(hU/a = 0)의 고유진동수를 공기중의 고유진동수와 비교한 것으로 P/D 값이 증가함에 따라 물과 접하는 평판의 고유진동수는 감소하는 반면 공기중의 고유진동수는 증가하고 있다. 이는 Jeong(11)의 연구결과와 유사하다. 그림에서 hU/a는 다공 직사각평판의 길이가 400 mm인 변 a에 대한 물에 잠긴 깊이의 비를 나타낸다.

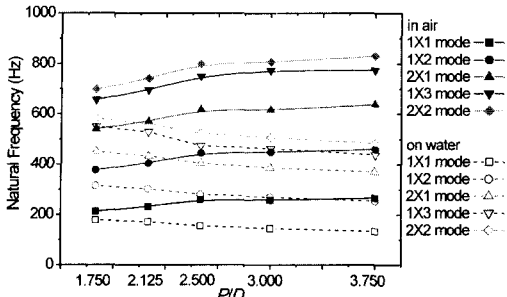


Fig. 4. Natural frequency of the perforated rectangular plates in air and on water ($h_u/a = 0$)

물과 접하고 있는 다공 직사각평판의 고유진동수를 공기 중 고유진동수와 비교해보면 1차 고유진동수(1×1모드)의 경우 $P/D = 1.750$ 에서는 공기 중 고유진동수에 비해 약 16%정도 감소하지만 $P/D = 3.750$ 에서는 약 50%정도 감소함을 알 수 있다. 즉, P/D 값이 증가함에 따라 고유진동수가 감소하게 되는데 이는 평판 구멍 사이의 피치가 증가함에 따라 물과 접하는 면적이 커져서 평판의 진동에 관여하는 유체의 부가질량이 증가하기 때문이다.

반면에 공기중에 있는 다공 직사각평판의 고유진동수는 P/D 값이 증가함에 따라 증가하게 되는데, 이는 구멍사이의 피치가 증가함에 따라 평판의 진동에 미치는 영향 면에서 질량보다는 강성의 영향이 더 크게 증가하기 때문이다. Fig. 5는 물에 잠긴 다공 직사각평판의 고유진동수를 P/D 값과 h_u/a 에 대하여 모드수에 따라 정리한 것이다. 그림에서 고유진동수가 물에 잠기기 시작하면서 급격히 감소하여 물에 잠기게 되면 일정한 값에 수렴하게 됨을 알 수 있다. 이는 김¹⁾이나 Haddara³⁾의 연구에서 확인된 것과 유사하다. 하지만 이들의 연구는 구멍이 없는 평판에 대한 것으로 본 연구와는 다르다. 즉, 구멍이 없는 평판이 물에 잠길 때 고유진동수는 한쪽 면만 물에 접할 경우의 절반이 된다. 하지만 다공 평판에서 $P/D = 1.750$ 일 때, 물에 잠긴 경우의 1차 고유진동수는 한쪽 면만 물에 접한 경우에 비해 22% 정도 감소하지만 $P/D = 3.750$ 일 때는 33% 정도 감소하게 된다. 즉, 다공 평판이 무한 유체에 잠긴 경우의 고유진동수는 자유표면에 떠있거나 한쪽 면만 접하는 경우의 반이 된다고 볼 수 없다. 따라서, 다공 평판이 물에 잠길 경우, 고유진동수 변화를 실험으로 구할 필요가 있다.

Fig. 5에서 볼 때, P/D 값이 증가함에 따라 고유진동수가 감소하는데, 이는 앞서서도 설명한 바와 같

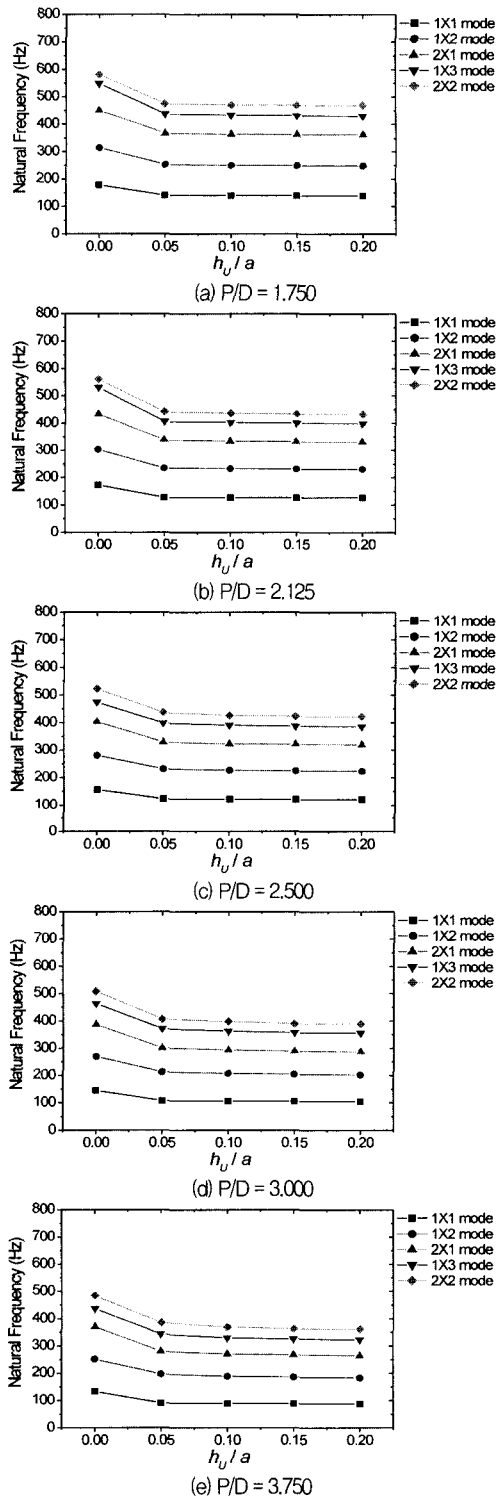


Fig. 5. Natural frequency of the submerged perforated rectangular plate on the P/D value

이 접수면적이 증가함에 따라 부가질량이 증가하기 때문이다.

이처럼 접수 구조물에 작용하는 부가질량의 영향은 식 (20)으로 정의된 NAVMI 계수를 사용하여 나타낼 수 있다.

$$\Gamma_{mn} = \frac{\left(\frac{\omega_a}{\omega_f}\right)^2 - 1}{\left(\frac{\rho_f}{\rho}\right)\left(\frac{a}{h}\right)} \quad (20)$$

여기서, Γ_{mn} 는 NAVMI 계수로 알려진 무차원 변수²⁴⁾로서 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.

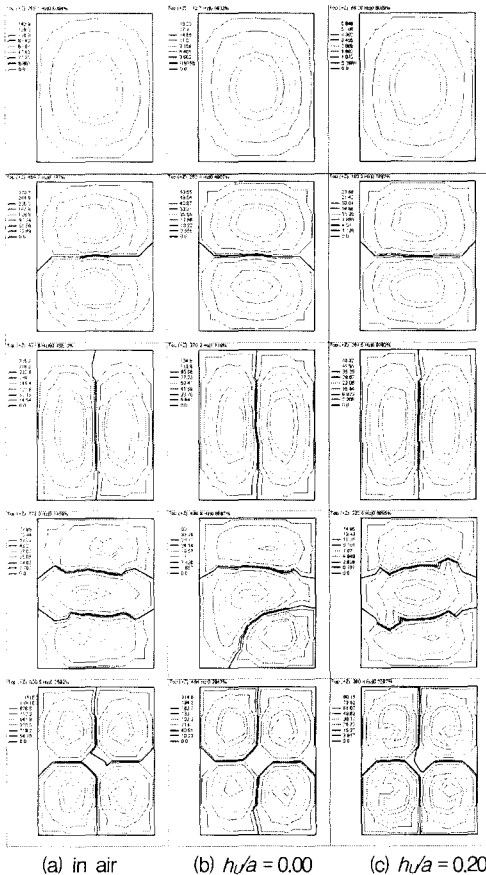


Fig. 6. Mode shapes of the perforated rectangular plate with $P/D = 3.750$

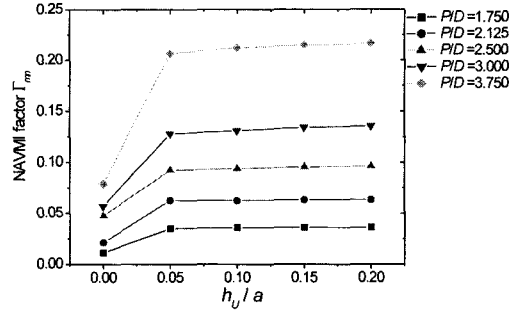


Fig. 7. NAVMI factor of the submerged perforated rectangular plates (1×1 mode)

Fig. 6은 $P/D=3.750$ 인 다공 평판의 모드형상으로 (a)는 공기 중의 모드형상, (b)는 물에 접하기 시작할 때의 모드형상, (c)는 물에 잠겼을 때의 모드형상이다. 그림에서 측정 조건에 따라 모드 변위의 크기만 차이가 날 뿐, 모드형상은 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 따라서, 유체와 접하는 평판의 고유진동수는 공기 중의 고유진동수와 NAVMI 계수로부터 계산할 수 있다.

물에 잠긴 다공 직사각평판의 1차 고유진동수(1×1 모드)에 대한 NAVMI 계수를 식 (20)으로 계산하여 h_u/a 에 대해 P/D 값에 따라 도시하면 Fig. 7과 같다. 그림에서 P/D 값이 증가할수록, 즉 구멍사이 피치의 크기가 커질수록 계수의 값이 크게 나타나는데, 이는 부가질량이 증가함을 의미한다. 또한 h_u/a 값이 증가할수록 계수의 값이 일정한 값, 즉 무한 유체에 잠긴 경우에 NAVMI 계수 값이 수렴함을 알 수 있다.

Fig. 8은 물에 잠긴 다공 직사각평판의 감쇠비를 P/D 값과 h_u/a 에 대하여 모드수에 따라 정리한 것이다. 그림에서 물에 잠긴 깊이와 모드형상에 따라 그 값이 다르게 나타남을 알 수 있다. 특히, 잠긴 깊이가 어느 값 이상이 되면 일정한 값에 수렴하여 나타나게 되는데, 이는 Haddara⁵⁾의 연구 결과와 유사하다. 또한 P/D 값에 상관없이 2×1 모드의 감쇠비가 크게 나타났는데, 이는 다공 평판의 진동시 유체의 유동으로 인한 감쇠가 상대적으로 크게 나타나기 때문으로 생각된다.

Fig. 9는 물에 잠긴 다공 직사각평판의 감쇠비를 모드수와 h_u/a 에 대하여 P/D 값을 따라 정리한 것으로 (a)는 물에 접하기 시작할 때의 감쇠비이고, (b)는 잠긴 깊이가 40mm인 경우, (c)는 잠긴 깊이가 80mm인 경우이다. 다공 평판이 물에 접하기 시작할

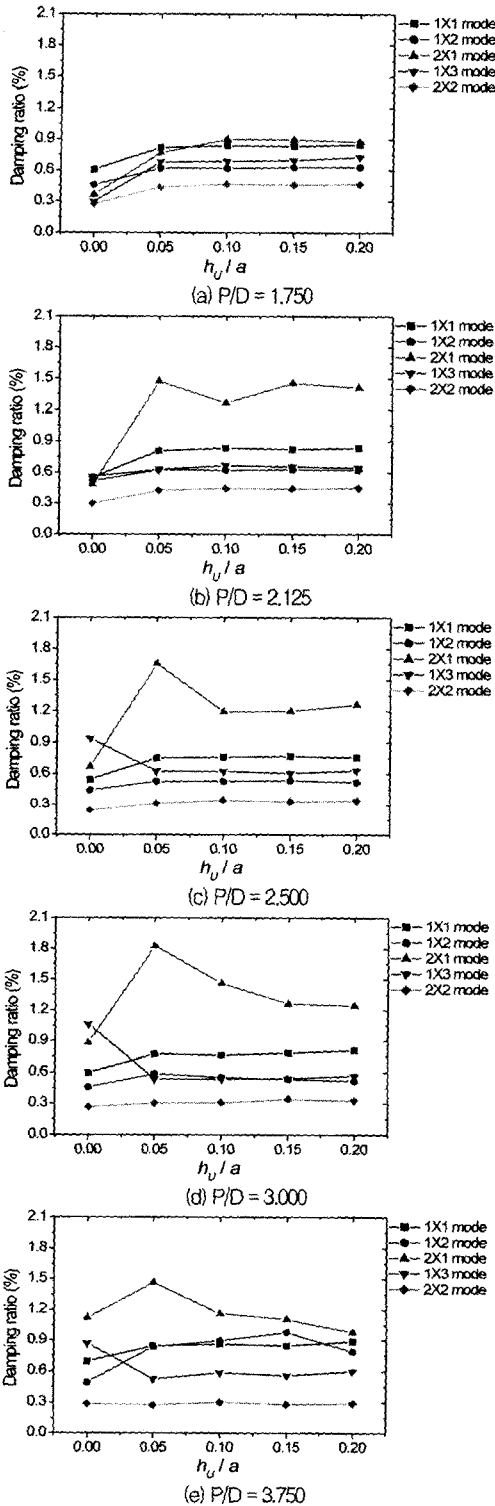


Fig. 8. Damping ratio of the submerged perforated rectangular plate versus h_v/a

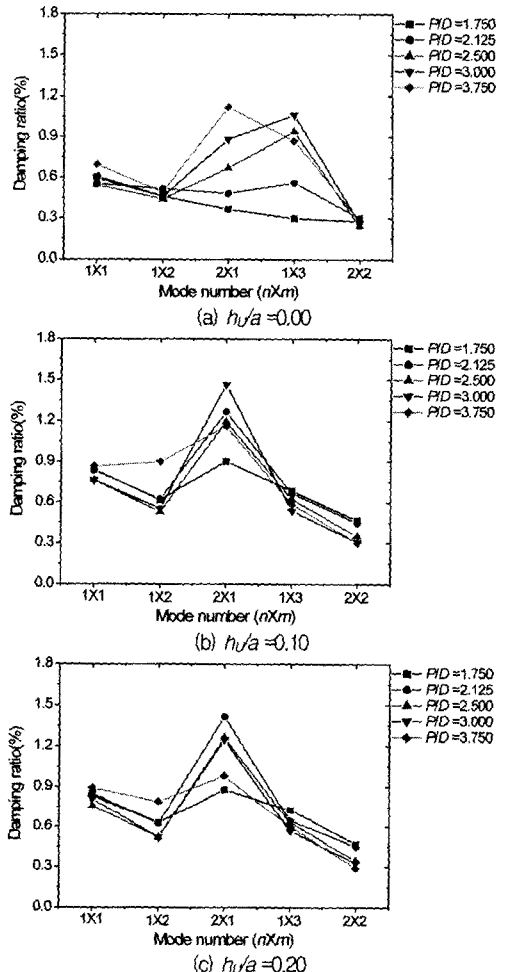


Fig. 9. Damping ratio of the submerged perforated rectangular plates versus mode number

때는 P/D 값에 따라 2×1 또는 1×3 모드의 감쇠비가 크게 나타났지만, 물에 완전히 잠겼을 때 2×1 모드의 감쇠비가 크게 나타났고, P/D 값이 커질수록 감쇠비가 크게 나타났다.

4. 결론

물에 잠긴 다공 직사각평판의 동특성을 조사하기 위해 강체벽으로 구속된 물 속에 잠겨 있는 완전 고정 경계조건을 갖는 다공 평판의 모드 매개변수를 실험으로 구하였다.

실험에 앞서 공기 중에 있는 다공 평판의 고유진동수를 증가 물성치를 이용하여 Rayleigh-Ritz 방법으로 계산한 결과 실험값과 잘 일치하였다.

평판 구멍의 직경에 대한 각 구멍 사이 피치의 비로 주어지는 PD 값이 증가함에 따라 공기 중의 고유진동수는 증가한 반면, 다공 평판이 물과 접하기 시작할 때의 고유진동수는 감소하였다. 이는 접수면적이 증가함에 따라 부가질량이 증가하기 때문으로 NAVMI계수를 구하여 이를 확인하였다.

잠긴 깊이에 따른 다공 평판의 모드 매개변수를 검토한 결과, 고유진동수는 물에 잠기기 시작하면서 급격히 감소하여 일정한 값으로 수렴하지만 모드형상은 잠긴 깊이에 관계없이 일정함을 확인하였다.

물 속에서의 감쇠비를 비교한 결과, 잠긴 깊이와 모드형상에 따라 그 값이 다르게 나타났고, 잠긴 깊이가 어느 값 이상이 되면 일정한 값에 수렴하여 나타났다.

참고문헌

- 1) 김극천, 김재승, 이현엽, "평판의 접수 진동에 관한 실험적 연구," 대한조선학회 논문집, 제16권, 제2호, pp. 1~7, 1979.
- 2) Kwak, M. K., "Hydroelastic Vibration of Rectangular Plates," J. of Applied Mechanics, Transaction of the ASME, Vol. 63, pp. 110~115, 1996.
- 3) Kwak, M. K., "Vibration of Circular Plates in Contact with Water," J. of Applied Mechanics, Transaction of the ASME, Vol. 58, pp. 480~483, 1991.
- 4) Amabilli, M., Frosali, M., and Kwak, M. K., "Free Vibrations of Annular Plates Coupled with Fluids," J. of Sound and Vibrations, Vol. 191, No. 5, pp. 825~846, 1996.
- 5) Haddara, M. R., and Cao, S., "A Study of the Dynamic Response of Submerged Rectangular Flat Plates," Marine Structures, Vol. 9, pp. 913~933, 1996.
- 6) Eto, H., Maruyoshi, K., and Saijo, O., "Experimental Study on Added of Elastic Plate on Water," J. of Naval Architects of Japan, Vol. 189, pp. 265~272, 2001.
- 7) 유계형, 정경훈, 이성철, "유체로 연성된 동일한 두 직사각 평판의 고유진동 해석," 산업안전학회지, 제17권, 제2호, pp. 8~15, 2002.
- 8) 이호섭, 김극천, "유공 직사각형 평판의 접수 진동," 대한조선학회 논문집, 제21권, 제1호, pp. 21~34, 1984.
- 9) De Santo, D. F., "Added Mass and Hydrodynamic Damping of Perforated Plates Vibration in Water," J. of Pressure Vessel Technology, Transaction of the ASME, Vol. 103, pp. 175~182, 1981.
- 10) Choi, S., Jeong, K. H., Kim, T. W., Kim, K. S., and Park, K. B., "Free Vibration Analysis of Perforated Plates Using Equivalent Elastic Properties," J. of the Korean Nuclear Society, Vol. 30, No. 5, pp. 416~423, 1998.
- 11) Jeong, K. H., Ahn, B. K., and Lee, S. C., "Modal Analysis of perforated Rectangular Plates in Contact with Water," Structural Engineering and Mechanics, Vol. 12, No. 2, pp. 189~200., 2001.
- 12) O'Donnell, W. J., "Effective Elastic Constants for the Bending of Thin Perforated Plates With Triangular and Square Penetration Patterns," J. of Engineering for Industry, pp.121-128, February, 1973.
- 13) Ewins, D. J., Modal Testing : Theory and Practice, Research Studies, 1986.