

물에 잠긴 多孔 直四角平板의 實驗的 모드 解析

Experimental Modal Analysis of Perforated Rectangular Plates Submerged in Water

유 계 형[†] · 이 명 규* · 정 경 훈** · 이 성 철***

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

(2002년 9월 16일 접수 : 2002년 12월 18일 심사완료)

Key Words : Experimental Modal Analysis(실험적 모드 해석), Fluid-structure Interaction(유체-구조 상호작용), Perforated Rectangular Plate(다공 직사각평판), Added Mass(부가 질량), Triangular Hole Pattern(삼각형 구멍 배열), Non-dimensionalized Added Virtual Mass Incremental(NAVMI) Factor(무차원 부가 가상질량 증분계수)

ABSTRACT

This paper dealt with an experimental study on the hydroelastic vibration 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 analytical method based on the relation between the reference kinetic and maximum potential energy and compared with the experimental results. Good agreement between the results was found for the natural frequencies of the perforated plates in air. It was empirically found that the natural frequencies of the perforated plate in air increase with an increase of P/D , on the other hand, the natural frequencies of the perforated plate in contact with water decrease with an increase of P/D . Additionally, the effect of the submerged depth on the natural frequency was investigated.

기호설명

a : 직사각평판의 장변
 b : 직사각평판의 단변
 D : 구멍의 직경
 E : 구멍이 없는 직사각평판의 탄성계수
 E^* : 다공 평판의 등가 탄성 계수
 h : 직사각평판의 두께

h_L : 다공 평판 아래쪽 물의 깊이
 h_U : 다공 평판 위쪽 물의 깊이
 m : 장변에 나타나는 모드수
 n : 단변에 나타나는 모드수
 P : 구멍사이의 피치
 p_L^* : 다공 평판의 아랫면에 작용하는 유체 압력
 p_U^* : 다공 평판의 윗면에 작용하는 유체 압력
 S_F : 물의 자유표면
 S_L : 다공 평판의 아랫면
 S_U : 다공 평판의 윗면
 T_P : 공기 중에서 평판의 운동에너지
 T_F : 물 속에서 평판의 운동에너지
 V_P : 공기 중에서 평판의 변형에너지
 x, y, z : 직교 좌표계

[†] 책임저자, 정회원, 전북대학교 대학원 기계공학과

E-mail : ghyoung@hanmir.com

Tel : (063) 270-2320, Fax : (063) 270-2315

* 전북대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 한국원자력연구소

*** 전북대학교 기계항공시스템공학부 공업기술연구센터

- β_{mn} : $m \times n$ 모드의 질량증분을
- Γ_{nm} : $m \times n$ 모드의 무차원 부가 가상질량 증분계수 (NAVMI 계수)
- $\eta = \frac{P-D}{P}$: 유대 효율(ligament efficiency)
- μ : 구멍이 없는 직사각평판의 포아송 비
- μ^* : 다공 평판의 등가 포아송 비
- ρ : 구멍이 없는 직사각평판의 밀도
- ρ^* : 다공 평판의 등가 밀도
- ρ_f : 물의 밀도
- ω_a : 공기 중에서 평판의 고유진동수
- ω_f : 물 속에서 평판의 고유진동수

1. 서 론

다공 평판은 산업 현장에서 폭넓게 사용되는 부품 중 하나이다. 원자로와 각종 열교환기에서 다공 평판은 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 구조물은 공기 중과 다른 거동을 하게 되는데, 설계 기술의 발달로 구조물이 경량화 되고 얇아짐에 따라 구조물에 대한 유체의 영향이 증대되고 있다. 따라서, 이와 같은 구조물의 건전성을 확보하기 위해서 유체와 접하고 있는 구조물에 대한 정확한 동특성을 이해할 필요가 있다.

유체와 접하고 있는 다양한 형태의 평판 구조물에 대한 진동해석이 최근까지 수행되고 있는데, 김극천⁽¹⁾ 등은 물에 잠긴 직사각평판에 대한 실험을 통해 경계조건과 잠긴 깊이에 대한 영향을 조사하였다. 그 결과, 부가질량에 미치는 평판 경계조건에의 영향이 현저하고, 평판의 한쪽 면이 유체와 접할 때의 질량증분율은 무한 깊이에 잠겨있을 때의 반이 됨을 보였다. Kwak^(2,3)은 한쪽 면이 물과 접하고 있는 직사각형 평판과 원형 평판의 고유진동수, Amabili⁽⁴⁾ 등은 한쪽 면이 물과 접하고 있는 환형 평판의 고유진동수를 연구하였다. 이들은 유체 영역이 무한하다고 가정하고 무차원 부가 가상 질량증분(NAVMI)계수(nondimensionalized added virtual mass incremental factor)를

이용하여 유체로 연성된 구조물의 고유진동수에 대한 유체의 영향을 평가하였다.

Haddara⁽⁵⁾ 등은 실험과 해석적인 방법을 이용하여 물에 잠긴 직사각평판의 동특성을 연구하여 물에 잠긴 깊이가 감쇠와 모드 형상에 크게 영향을 미치지 않음을 보였다. Eto⁽⁶⁾ 등은 직사각평판의 접수 고유진동수를 쉽게 계산하기 위해 다양한 형태의 직사각평판에 대한 부가질량을 실험으로 구하여 이로부터 접수 고유진동수를 계산하는 방법을 제안하였고, 이를 이론해와 비교하였다.

반면에 구멍이 있는 평판의 접수진동에 대한 연구는 많지 않다. 이호섭⁽⁷⁾ 등은 직사각평판의 내부에 원형 구멍을 갖는 경우의 접수진동을 연구하여 직사각평판의 장·폭비, 구멍의 크기 및 편심이 진동특성에 미치는 영향을 조사하였고, De Santo⁽⁸⁾는 구멍이 있는 원형 평판에 대한 모드 해석을 실험으로 수행하여 부가질량과 감쇠의 영향을 검토하였다. 하지만 이들의 연구는 평판에 한 개 또는 두 개의 큰 구멍을 갖는 경우이기 때문에 일정한 배열을 갖는 많은 구멍이 뚫린 평판의 경우와 다른 특성을 가질 것으로 판단된다.

Choi⁽⁹⁾ 등은 일정한 배열을 갖는 다공 평판에 대한 공기 중의 고유진동을 해석하기 위해 다공 평판을 구멍이 없는 평판과 동일하게 취급하는 등가 물성치를 이용하여 실험 결과와 잘 일치함을 보였다. Jeong⁽¹⁰⁾ 등은 다공 직사각평판이 물과 접하는 경우에 대한 모드 해석을 수행하여 구멍직경에 대한 구멍사이의 거리 비가 커질수록 고유진동수가 감소함을 보였다.

평판의 접수진동에 관한 연구는 주로 평판 내에 구멍이 없거나 구멍이 있어도 단지 몇 개의 큰 구멍이 뚫린 경우가 대부분이었다. 이러한 기존의 연구는 일정한 배열을 갖는 다공 평판이 유체에 잠긴 경우와는 다른 특성을 나타내고, 기존의 연구 결과로부터 유체에 잠긴 다공 평판의 접수진동 특성을 예측하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 실험적으로 모드를 해석하여 물에 잠긴 다공 직사각평판의 동특성을 분석하였다. 이를 위해 다공 평판은 강체벽으로 구축된 물 속에 잠겨 있는 것으로 가정하였고, 평판의 가장자리를 강체벽으로 구축함으로써 완전고정 경계조건을 부여하였다. 공기 중에 있는 다공 직사각평판의 고유진동수를 등가 물성치를 이용하여 Rayleigh 지수로 계산하

고, 이를 실험값과 비교하였다. 물 속에 있는 다공 평판의 고유진동수와 모드 형상은 실험으로 구하였고, 잠긴 깊이에 따른 부가질량의 영향도 연구하였다.

2. 다공 직사각평판의 고유진동수

Fig. 1은 전형적인 삼각형 배열을 갖는 다공 평판을 도시한 것으로, 그림과 같이 직사각평판이 일정한 배열의 구멍을 가질 때, O'Donnell⁽¹¹⁾ 등이 제안한 등가 물성치를 이용하면 다공 평판을 구멍이 없는 평판과 유사하게 취급할 수 있다. 즉, 다공 평판의 물성치에 대한 구멍의 영향을 나타내는 등가 물성치를 사용함으로써 다공 평판을 균질 등방성 평판으로 취급할 수 있게 된다. 따라서 구멍이 없는 알루미늄 직사각평판의 물성치가 Table 1과 같이 주어질 때, 다공 평판은 수정된 등가 물성치를 갖는 평판으로 대체될 수 있다. 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.

공기 중에 있는 다공 직사각평판의 고유진동수는

구멍이 없는 평판에 대한 에너지 식에 등가 물성치를 사용하여 다음과 같이 Rayleigh 지수를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\omega_a = \sqrt{V_p/T_p} \quad (1)$$

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

$$\omega_f = \frac{\omega_a}{\sqrt{1 + T_f/T_p}} \quad (2)$$

즉 Fig. 2와 같이 물에 잠긴 다공 직사각평판의 고유진동수를 계산하기 위해서는 유체 운동에너지를 계

Table 1 Material properties of solid rectangular plate

Length × Width $a \times b$ (mm)	Thickness h (mm)	Poisson's ratio μ	Young's modulus E (GPa)	Mass density 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

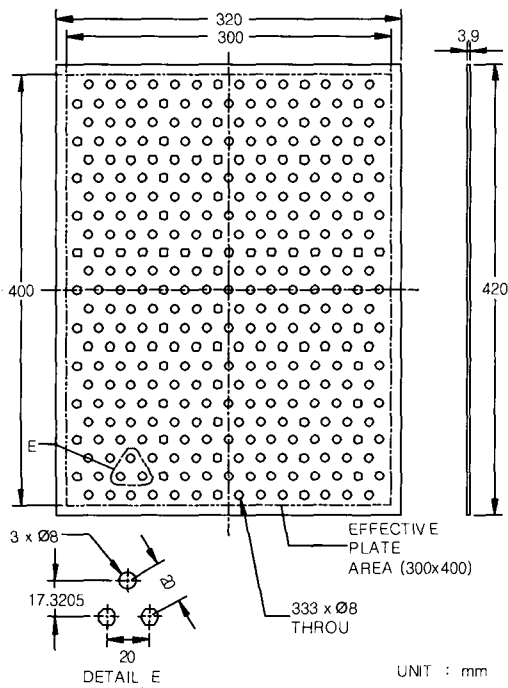


Fig. 1 A perforated rectangular plate with $P/D = 2.500$

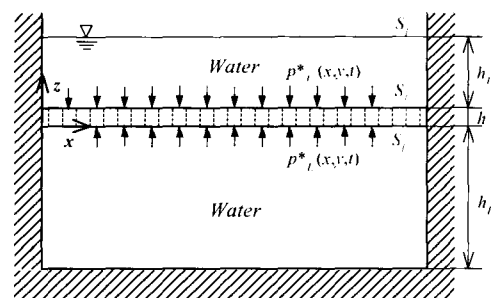


Fig. 2 Schematic diagram of perforated rectangular plate submerged in water

산할 필요가 있다. 하지만 다공 직사각평판의 구멍 부분의 물을 포함하는 속도 포텐셜을 계산한다는 것은 매우 어렵기 때문에, 다공 평판과 유체사이의 경계조건과 적합조건을 만족하는 유체의 운동에너지를 이론적으로 기술한다는 것은 매우 어렵다. 따라서 물과 접하는 다공 직사각평판의 접수 고유진동수는 이론 식으로부터 계산하기 어렵고, 실험을 통하여 구할 수밖에 없다.⁽¹⁰⁾

3. 모드 해석

3.1 실험 장치 및 방법

공기 중의 이론 해석 결과를 검토하고 물에 잠긴 다공 평판에 대한 물의 영향을 알아보기 위해 여러 종류의 다공 직사각평판을 제작하여 이에 대한 모드 해석을 수행하였다. 다공 평판은 3.9 mm 두께에 420 mm × 320 mm의 크기를 갖는 알루미늄 직사각평판에 직경이 8 mm인 원형 구멍을 뚫어 제작하였다. 이때 구멍 사이의 피치는 14, 17, 20, 24, 30 mm로 P/D 가 1.750, 2.125, 2.500, 3.000, 3.750인 삼각형 배열을 갖도록 하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 다공 평판 중 P/D 가 2.500인 평판을 도시한 것으로 실험에 사용된 유효면적은 300 mm × 400 mm이다.

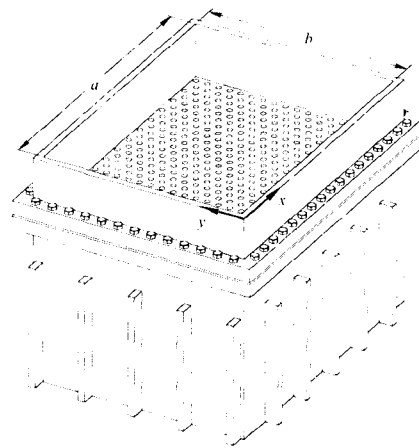
이와 같이 제작된 다공 평판을 Fig. 3(a)와 같이 상·하부 용기 사이에 놓고 볼트와 너트로 체결하여 고정 경계조건을 구현하였다. 이때 볼트와 너트는 60개를 사용하였고, 토크렌치를 이용하여 모든 볼트를 일정한 힘으로 체결하였다. 다공 평판을 고정하고 평판의 접수진동 실험을 위한 상·하부 용기는 두께가 10 mm인 강철판을 이용하여 제작하였다. 하부 용기는 다공 평판의 유효면적과 같은 300 mm × 400 mm의 넓이에 240 mm의 깊이를 갖고, 상부 용기는 동일한 넓이에 100 mm의 높이를 갖도록 제작하였다. 하부 용기의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

물에 접하거나 잠긴 다공 직사각평판의 모드 해석을 수행하기 전에 공기 중에 있는 다공 평판에 대한 실험을 수행하고 이를 이론해와 비교하여 실험의 타당성을 검토하였다.

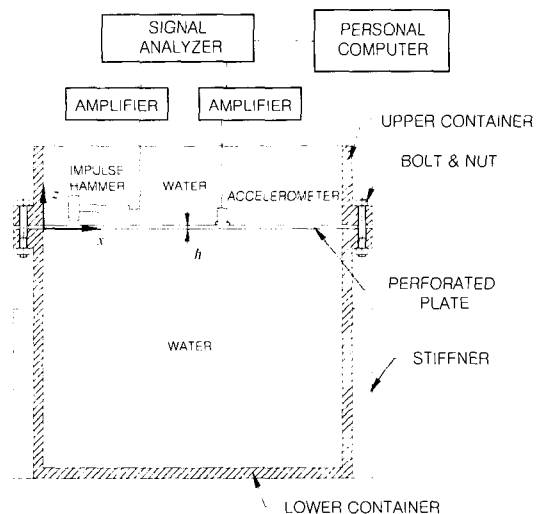
다공 평판이 물에 접할 때의 접수 진동 실험은 하부 용기에 물을 가득 채워 평판 두께의 중간까지 물

이 채워지도록 하였고, 물에 잠길 때의 접수 진동 실험은 하부용기에 물을 가득 채우고 평판 위쪽으로 20 mm씩 수위를 증가시켜 상부 용기의 20, 40, 60, 80 mm 지점에 물이 위치하도록 하여 다공 평판의 고유 진동특성에 대한 물의 영향을 검토하였다.

이와 같이 설정된 실험 모델에 대해 충격해머 가진 실험으로 모드 해석을 수행하였다. 측정장치는 Fig. 3(b)와 같이 충격해머(PCB, 086C03), 증폭기(PCB, 480E09), 가속도계(PCB, A353A17), 신호분석기(Zonic, Medallion)와 컴퓨터로 구성된다. 다공 직사각평판의 뒷면에 가속도계를 왁스로 부착하고, 가속도계에서 나온 신호를 증폭기로 증폭시킨 후, 신호분석



(a) Experimental apparatus



(b) Experimental setup

Fig. 3 The experimental apparatus and setup

기의 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. 측정된 주파수응답으로부터 고유진동수와 모드 형상, 감쇠비를 얻기 위해 상용 모드 해석 소프트웨어인 ME'scope VES(Vibrant Technology, Inc.)를 이용하였다.

3.2 실험 결과 및 고찰

(1) 공기 중에 있는 다공 직사각평판

물에 잠긴 다공 직사각평판의 모드 해석에 앞서 공기 중에 있는 다공 직사각평판의 이론 해석을 수행하여 실험에 대한 타당성을 확립하였다.

Table 3은 Table 2에서 제시한 등가물성치를 이용하여 계산한 다공 직사각평판의 고유진동수와 실험으로 구한 고유진동수를 P/D 값에 따라 비교한 것이다. 표에서 n 과 m 은 각각 길이가 300 mm인 b 변과 400 mm인 a 변에 나타나는 모드 수이다. 이론 해석은 다공 직사각평판을 구멍이 없는 평판으로 가정하고 Rayleigh 지수를 이용하여 근사해를 계산하였는데, Table 3의 결과를 보면 이론값이 실험값보다 작게 나타나고 있다. 이는 실험에서 이론 해석과 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 2.5 g인 소형이라 할지라도 P/D 값이 작은 평판의 경우는 가속도계로 인한 부가 질량의 영향으로 실험에서 구한 고유진동수가 낮게 나타나는 데 어느 정도 기여했다고 볼 수 있다. 이러한 이유로 Table 3의 결과는 타당하다고 볼 수 있다.

Table 3에서 평판 구멍사이의 피치가 증가함에 따라 공기 중에서 평판의 고유진동수는 증가하는데 그 이유는 구멍사이의 피치가 증가함에 따라 질량보다는 강성이 더 크게 증가하여 이로 인해 고유진동수가 커지기 때문이다.

(2) 물과 접하는 다공 직사각평판

Table 4는 물과 접하는 다공 직사각평판의 고유진동수를 P/D 값에 대하여 모드 수를 따라 정리한 것이다. 다공 직사각평판이 물과 접하기 시작할 때의 고유진동수를 비교해 보면 P/D 값이 증가함에 따라 고유진동수는 감소함을 알 수 있다. 이를 공기 중에 있는 다공 평판의 고유진동수와 비교하여 나타내면 Fig. 4와 같다. 물과 접하는 다공 직사각평판의 고유진동수와 공기 중의 고유진동수를 비교해보면 1차 고유진동수(1×1 모드)의 경우 $P/D = 1.750$ 에서는 공기 중 고유진동수에 비해 약 16 % 정도 감소하지만 $P/D = 3.750$ 에서는 약 50 % 정도 감소하여 P/D 값이 증가함에 따라 고유진동수 감소율이 커지게 된다. 이처럼 P/D 값이 증가함에 따라 고유진동수가 감소하게 되는데 이는 평판 구멍 사이의 피치가 증가함에 따라 물과 접하는 면적이 커져 평판의 진동에 관여하는 유

Table 3 Natural frequency of the perforated rectangular plates in the air

P/D	Method	Natural frequency(Hz) : $n \times m$ mode				
		1×1	1×2	2×1	1×3	2×2
1.750	Theory	239.2	401.9	563.2	669.3	714.1
	Experiment	212.9	377.3	540.2	636.4	697.3
	Error(%)	12.3	6.5	4.3	2.0	2.4
2.125	Theory	254.7	427.9	599.8	712.7	760.4
	Experiment	231.5	404.5	569.9	695.0	740.9
	Error(%)	10.0	5.8	5.2	2.5	2.6
2.500	Theory	265.8	446.7	626.0	743.9	793.7
	Experiment	259.0	444.7	617.2	749.6	799.9
	Error(%)	2.6	0.4	1.4	-0.8	-0.8
3.000	Theory	274.5	461.2	646.5	768.2	819.6
	Experiment	256.5	448.3	615.8	774.1	807.6
	Error(%)	7.0	2.9	5.0	-0.8	1.5
3.750	Theory	281.4	472.9	662.8	787.6	840.3
	Experiment	265.1	458.7	637.6	774.0	830.5
	Error(%)	6.2	3.1	3.9	1.8	1.2

Table 4 Natural frequency of the perforated rectangular plates in contact with water

P/D	Natural frequency(Hz) : $n \times m$ mode				
	1×1	1×2	2×1	1×3	2×2
1.750	179.0	314.4	450.5	548.6	581.7
2.125	172.6	303.1	432.7	530.0	559.6
2.500	155.7	280.5	403.2	473.6	523.4
3.000	145.3	269.3	386.1	463.0	507.9
3.750	133.7	252.4	370.2	436.8	484.0

체의 부가질량이 증가하기 때문이다. 또한, 물의 자유 표면 면적이 감소하여 유체운동이 다공 평판을 더욱 구속하게 되고, 이로 인해 물로 연성된 평판의 고유진동수는 감소하게 된다.

(3) 물에 잠긴 다공 직사각평판

Table 5는 물에 잠긴 다공 직사각평판의 고유진동

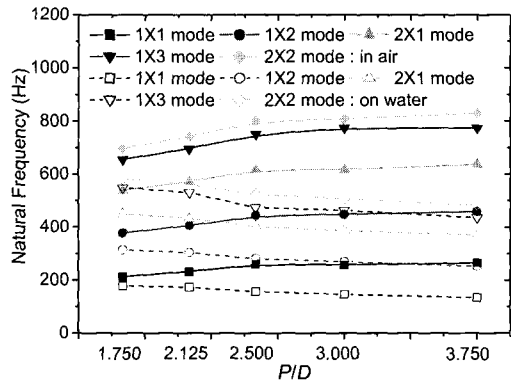


Fig. 4 Natural frequency of the perforated rectangular plates in the air and in contact with water

Table 5 Natural frequency of the perforated rectangular plates submerged in water

P/D	h _v /a	Natural frequency(Hz) : n × m mode				
		1×1	1×2	2×1	1×3	2×2
1.750	0.05	140.5	252.6	367.0	437.4	474.6
	0.10	139.6	250.1	364.5	433.2	470.5
	0.15	139.3	249.0	363.3	431.3	469.1
	0.20	139.3	248.9	362.9	430.0	468.3
2.125	0.05	127.0	234.4	338.4	405.7	441.5
	0.10	127.2	233.3	334.0	402.2	436.7
	0.15	126.6	231.3	332.0	399.6	434.0
	0.20	126.5	230.9	330.8	398.4	433.1
2.500	0.05	123.3	231.7	329.2	398.2	436.0
	0.10	122.5	227.6	322.9	390.2	426.6
	0.15	121.6	225.2	321.4	386.6	423.1
	0.20	121.4	223.8	319.7	385.1	421.0
3.000	0.05	107.1	213.2	300.9	371.2	407.7
	0.10	106.1	208.2	293.8	362.3	397.2
	0.15	105.0	204.8	288.9	357.2	390.4
	0.20	104.6	203.2	287.4	355.3	388.4
3.750	0.05	90.2	196.5	280.1	342.4	385.3
	0.10	89.0	189.4	270.5	329.4	369.0
	0.15	88.6	185.9	267.3	325.0	363.9
	0.20	88.3	183.2	264.5	322.6	360.4

수를 P/D 값과 h_v/a에 대하여 모드수를 따라 정리한 것이다. 표에서 h_v/a는 평판의 잠긴 깊이를 나타내는 것으로 길이가 400 mm인 변 a의 길이에 대한 물깊이의 비를 나타낸다.

물에 잠긴 깊이에 대한 다공 직사각평판의 고유진동수에 미치는 영향을 알아보기 위해 1차 고유진동수를 P/D 값과 h_v/a에 대해 나타내면 Fig.5와 같다. 그림에서 물에 잠기기 시작하면서 급격히 고유진동수가 감소하여 물에 잠기게 되면 일정한 고유진동수로 수렴한다는 것을 알 수 있다. 이는 김⁽¹⁾이나 Haddara⁽⁵⁾의 연구에서 확인된 것과 유사하다. 하지만 이들의 연구는 구멍이 없는 평판에 대한 것으로 본 연구와는 다르다. 즉, 구멍이 없는 평판이 물에 잠길 때의 부가질량은 한쪽 면만 물에 접하는 경우의 반이 된다. 하지만 다공 평판에서 P/D = 1.750일 때, 물에 잠긴 경우의 1차 고유진동수는 한쪽 면만 물에 접한 경우에 비해 22% 정도 감소하지만 P/D = 3.750일 때는 33% 정도 감소하게 된다. 즉, 다공 평판이 무한 유체에 잠길 때, 다공 평판에 대한 유체의 부가질량은 자유표면에 떠있거나 한쪽 면과 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 같이 접수면적이 증가함에 따라 부가질량도 증가하기 때문이다. 이처럼 접수 구조물에 작용하는 부가질량의 영향은 식 (3)과 같이 정의된 NAVMI 계수를 사용하여 나타낼 수 있다.

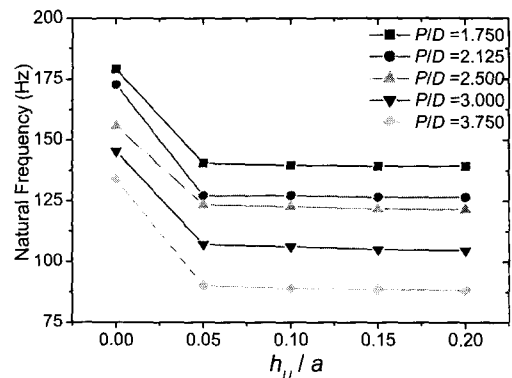


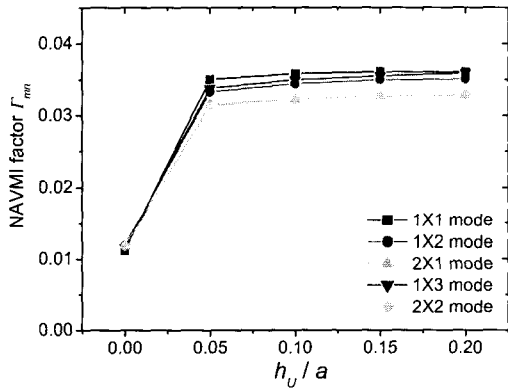
Fig. 5 Natural frequency of the perforated rectangular plates submerged in water (1×1 mode)

$$\beta_{mn} = \left(\frac{\omega_a}{\omega_f}\right)^2 - 1 \tag{3}$$

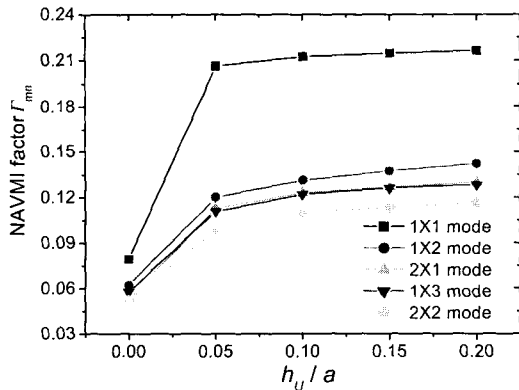
$$= \Gamma_{mn} \left(\frac{\rho_f}{\rho}\right) \left(\frac{a}{h}\right)$$

여기서, Γ_{mn} 는 NAVMI 계수로 알려진 무차원 변수⁽²⁻⁴⁾로 유체와 구조물의 경계조건, 기하학적 형상 등에 의해 결정된다. 따라서, 유체와 접하는 평판의 고유진동수는 진공 중의 모드 형상과 유체 속의 모드 형상이 동일하다면, 진공 중의 고유진동수와 NAVMI 계수로부터 구할 수 있다.

물에 잠긴 다공 직사각평판의 NAVMI 계수를 모드수와 h_U/a 에 대하여 P/D 값에 따라 도시하면 Fig. 6과 같다. Fig. 6 (a)와 (b)는 각각 P/D 값이 1.750, 3.750인 경우로 (a)에 비해 (b)에서 NAVMI 계수의 값과 변화가 크게 나타나고 있다. 즉, 구멍사이 피치의 크기가 작을수록 계수의 값이 작게 나타나는데,



(a) $P/D = 1.750$



(b) $P/D = 3.750$

Fig. 6 NAVMI factor of the perforated rectangular plates submerged in water

이는 부가질량이 작게 나타나고 있음을 의미한다. Fig. 7은 Fig. 5에 대한 NAVMI 계수를 도시한 것으로 P/D 값이 증가할수록 NAVMI 계수 값이 증가하고, 무한유체에 잠기게 되면 잠긴 깊이와 관계없이 NAVMI 계수 값이 일정하게 됨을 알 수 있다

(4) 다공 직사각평판의 감쇠비

다공 직사각평판의 감쇠비를 상용 모드 해석 소프트웨어인 MEscope VES를 이용하여 구하면 Tables 6~8과 같다.

Tables 6~8은 각각 다공 평판이 공기 중에 있을 때, 물과 접할 때, 물에 잠겼을 때의 감쇠비를 정리한

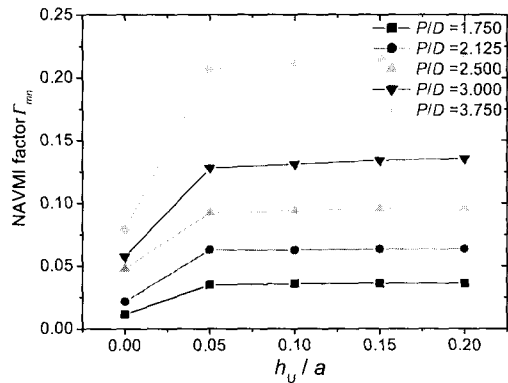


Fig. 7 NAVMI factor of the perforated rectangular plates submerged in water(1x1 mode)

Table 6 Damping ratio of the perforated rectangular plates in air

P/D	Damping ratio(%) : n x m mode				
	1x1	1x2	2x1	1x3	2x2
1.750	0.66	0.23	0.09	0.05	0.07
2.125	1.45	0.44	0.08	0.07	0.07
2.500	0.99	0.27	0.08	0.09	0.05
3.000	0.73	0.24	0.11	0.09	0.08
3.750	0.61	0.17	0.09	0.15	0.26

Table 7 Damping ratio of the perforated rectangular plates in contact with water

P/D	Damping ratio(%) : n x m mode				
	1x1	1x2	2x1	1x3	2x2
1.750	0.60	0.46	0.37	0.30	0.28
2.125	0.55	0.52	0.48	0.56	0.30
2.500	0.54	0.44	0.67	0.94	0.24
3.000	0.60	0.46	0.88	1.06	0.27
3.750	0.69	0.49	1.12	0.87	0.28

것으로 모드 형상에 따라 그 값이 다르게 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 구조물이 공기 중에 있을 때 접수시에 비해 감쇠가 크게 나타난다. 하지만 구멍 사이의 피치가 작을 때, 다공 평판의 1×1 모드에서는 공기 중의 감쇠가 접수시보다 크게 나타나고 있는데, 이는 구조감쇠가 접수시의 감쇠보다 크기 때문이라고 생각된다.

Table 8 Damping ratio of the perforated rectangular plates submerged in water

P/D	h _v /a	Damping ratio(%) : n × m mode				
		1×1	1×2	2×1	1×3	2×2
1.750	0.05	0.82	0.62	0.77	0.68	0.44
	0.10	0.84	0.62	0.90	0.68	0.47
	0.15	0.83	0.63	0.90	0.69	0.46
	0.20	0.85	0.63	0.88	0.73	0.47
2.125	0.05	0.81	0.63	1.47	0.63	0.42
	0.10	0.84	0.62	1.26	0.67	0.45
	0.15	0.82	0.63	1.46	0.66	0.44
	0.20	0.84	0.63	1.41	0.65	0.45
2.500	0.05	0.75	0.53	1.66	0.63	0.32
	0.10	0.76	0.53	1.19	0.62	0.35
	0.15	0.77	0.53	1.20	0.61	0.33
	0.20	0.76	0.52	1.26	0.63	0.35
3.000	0.05	0.78	0.59	1.83	0.53	0.30
	0.10	0.76	0.55	1.46	0.54	0.31
	0.15	0.79	0.53	1.26	0.54	0.34
	0.20	0.81	0.52	1.25	0.57	0.33
3.750	0.05	0.85	0.84	1.47	0.52	0.28
	0.10	0.86	0.90	1.16	0.59	0.30
	0.15	0.85	0.98	1.11	0.56	0.28
	0.20	0.89	0.79	0.98	0.60	0.29

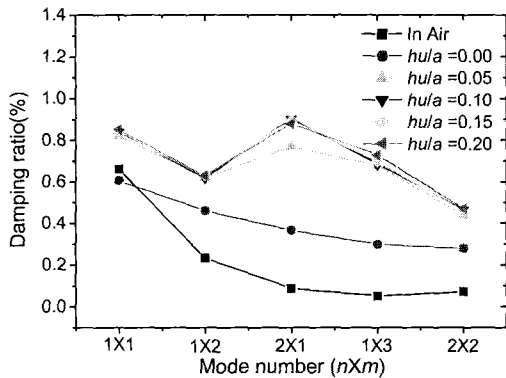


Fig. 8 Damping ratio of the perforated rectangular plates on the P/D = 1.750

Fig. 8은 P/D=1.750인 다공 평판의 감쇠비를 모드 수에 따라 나타낸 것으로 공기 중에 비하여 접수시의 감쇠가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 물에 잠긴 경우 잠긴 깊이가 변하여도 감쇠비는 크게 변하지 않고, 2×1 모드의 감쇠비가 상대적으로 크게 나타남을 볼 수 있다.

4. 결론

물에 잠긴 다공 직사각평판의 동특성을 조사하기 위해 완전 고정된 경계조건을 갖는 다공 평판이 강체 벽으로 구속된 물 속에 잠겨 있는 경우에 대해 실험적 모드 해석을 수행하였다.

물에 잠긴 다공 평판의 실험에 앞서 공기 중에 있는 다공 평판의 고유진동수를 등가 물성치를 이용하여 Rayleigh 지수로 계산하고 이를 실험값과 비교한 결과, 잘 일치하였고, 평판 구멍의 직경에 대한 각 구멍 사이의 피치와의 비로 주어지는 P/D 값이 증가함에 따라 고유진동수가 증가하였다. 반면에 다공 평판이 물과 접할 경우에는 P/D 값이 증가함에 따라 고유진동수가 감소하였는데, 이는 접수면적이 증가함에 따라 부가질량이 증가하기 때문으로 NAVMI 계수를 구하여 이를 확인하였다.

잠긴 깊이에 따른 다공 평판의 고유진동수를 검토한 결과, 물에 잠기기 시작하면서 급격히 감소하여 일정한 값으로 수렴하고, P/D 값이 증가함에 따라 고유진동수의 감소율이 증가함을 확인하였다.

또한 공기 중과 물 속에서의 감쇠비를 구하여 비교한 결과, 공기 중에 비해 접수시 감쇠가 크게 나타났고, 물에 잠긴 경우 잠긴 깊이에 상관없이 감쇠비가 일정하게 나타났다.

참고 문헌

- (1) 김극천, 김재승, 이현엽, 1979, "평판의 접수 진동에 관한 실험적 연구", 대한조선학회논문집, 제 16 권, 제 2 호, pp. 1~7.
- (2) Kwak, M. K., 1996, "Hydroelastic Vibration of Rectangular Plates", J. of Applied Mechanics, Transaction of the ASME, Vol. 63, pp. 110~115.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Haddara, M. R. and Cao, S., 1996, "A Study of the Dynamic Response of Submerged Rectangular Flat Plates", Marine Structures, Vol. 9, pp. 913~933.
- (6) Eto, H., Maruyoshi, K. and Saijo, O., 2001, "Experimental Study on Added of Elastic Plate on Water", J. of Naval Architects of Japan, Vol. 189, pp. 265~272.
- (7) 이호섭, 김극천, 1984, "유공 직사각형 평판의 접수 진동", 대한조선학회논문집, 제 21 권, 제 1 호, pp. 21~34.
- (8) De Santo, D. F., 1981, "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.
- (9) Choi, S., Jeong, K. H., Kim, T. W., Kim, K. S. and Park, K. B., 1998, "Free Vibration Analysis of Perforated Plates Using Equivalent Elastic Properties", J. of the Korean Nuclear Society, Vol. 30, No. 5, pp. 416~423.
- (10) 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.
- (11) O'Donnell, W. J., 1973, "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.
- (12) 정명조, 정경훈, 2001, "간헐 유체로 형성된 두 원판의 고유진동해석", 한국소음진동공학학회논문집, 제 11 권, 제 9 호, pp. 439~453.