



## 잔향수조의 구조-음향 연성효과에 관한 수치 및 실험적 고찰

Numerical and Experimental Investigation on Structure-acoustic Coupling Effect in a Reverberant Water Tank

---

저자 (Authors)	박용, 김국현, 조대승, 이종주 Yong Park, Kookhyun Kim, Dae-Seung Cho, Jong-Ju Lee
출처 (Source)	<a href="#">대한조선학회 논문집 56(1)</a> , 2019.2, 94-101(8 pages) <a href="#">Journal of the Society of Naval Architects of Korea 56(1)</a> , 2019.2, 94-101(8 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">대한조선학회</a> The Society of Naval Architects of Korea
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07610887">http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07610887</a>
APA Style	박용, 김국현, 조대승, 이종주 (2019). 잔향수조의 구조-음향 연성효과에 관한 수치 및 실험적 고찰. 대한조선학회 논문집, 56(1), 94-101
이용정보 (Accessed)	누리미디어 121.125.221.*** 2019/07/18 13:58 (KST)

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

# 잔향수조의 구조-음향 연성효과에 관한 수치 및 실험적 고찰

박용<sup>1</sup>·김국현<sup>2,†</sup>·조대승<sup>1</sup>·이종주<sup>3</sup>  
부산대학교 조선해양공학과<sup>1</sup>  
동명대학교 조선해양공학부<sup>2</sup>  
국방과학연구소<sup>3</sup>

## Numerical and Experimental Investigation on Structure-acoustic Coupling Effect in a Reverberant Water Tank

Yong Park<sup>1</sup>·Kookhyun Kim<sup>2,†</sup>·Dae-Seung Cho<sup>1</sup>·Jong-Ju Lee<sup>3</sup>  
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University<sup>1</sup>  
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Tongmyong University<sup>2</sup>  
Agency for Defense Development<sup>3</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Underwater acoustic power should be measured in a free field, but it is not easy to implement. In practice, the measurement could be performed in a reverberant field such as a water-filled steel tank and concrete tank. In this case, the structure and the acoustic field are strongly or weakly coupled according to material properties of the steel and water. So, characteristics of the water tank must be investigated in order to get the accurate underwater acoustic power. In detail, modal frequencies, mode shapes of the structure and frequency response functions of the acoustic field could represent the characteristics of the reverberant water tank. In this paper, the structure-acoustic coupling has been investigated on a reverberant water tank numerically and experimentally. The finite element analysis has been carried out to estimate the structural and acoustical modal parameters under the dry and water-filled conditions, respectively. In order to investigate the structure-acoustic coupling effect, the numerical analysis has been performed according to the structure stiffness change of the water tank. The acoustic frequency response functions were compared with the numerical analysis and acoustic exciting test. From the results, the structural modal frequencies of the water-filled condition have been decreased compared to those of the dry condition in the low frequency range. The acoustic frequency response functions under the coupled boundary conditions showed different patterns from those under the ideal boundary conditions such as the pressure release and rigid boundary condition, respectively.

**Keywords** : Structure-acoustic coupling effect(구조-음향 연성효과), Reverberant water tank(잔향수조), Finite element method(유한 요소해석), Experimental modal analysis(실험적 모달 분석), Structure-acoustic boundary condition(구조-음향 경계조건)

## 1. 서론

수중소음원의 음향파워 평가는 자유음장에서 이루어지는 것이 바람직하나, 자유음장 조건의 실험 환경은 다양한 환경적 요인으로 인해 구현하기가 쉽지 않다. 이에 수중소음원의 음향파워 평가 실험은 잔향수조에서의 실험 방법이 일반화되어 있다. 이러한

경우 구조-음향 연성효과는 잔향수조의 전반적인 음장 특성에 영향을 미칠 수 있으며, 잔향수조를 구성하는 구조물과 매질의 물성치 및 기하학적 형상에 따라 다르게 나타난다. 이러한 구조-음향 연성효과는 잔향수조의 고유진동수와 모달 감쇠, 음향장의 주파수응답함수(Frequency Response Function, FRF) 등을 통하여 확인할 수 있다.

잔향수조에서의 수중소음원의 음향파워 및 음향방사효율 산정

에 관한 연구로 Cochard et al.(2000)은 수조에서 측정된 음압 스펙트럼과 잔향특성을 이용하여 수중소음원의 음향파위를 산정하는 실험 기법을 구현하였다. Gemba and Nosal(2016)는 기지의 소음원으로부터 추정된 잔향수조의 충격응답 특성을 이용해 미지의 소음원의 음향신호를 복원하는 기법을 제안하였다. Han et al.(2015)은 잔향수조 내 형성되는 음향장을 이용하여 몰수 원통형 구조물에 대한 수중 방사효율을 산정하였다.

한편, 구조-음향 연성 효과와 관련된 연구로 Espinosa and Gallego(1984)는 접수 사각평판의 저주파수 진동 모드해석에 대한 근사해석기법을 제시하고, 이를 실험을 통해 검증하였다. Olson and Bathe(1985)는 유한요소법 기반의 구조-유체 연성 해석 연구를 수행하고 정적 및 과도신호에 대한 주파수응답함수를 실험 결과와 비교하였다. Choi and Kim(1996)은 유한요소법과 경계요소법을 이용하여 자동차 실내 공간의 음향특성을 해석하였으며, 이를 통해 구조-음향 연성음향모드 기여도를 정량화하는 방법을 제시하였다. Mazúch et al.(1996)은 유한요소해석과 실험을 통하여 물이 채워진 원통형 구조에 대한 구조-유체 연성 효과를 연구하였다. Kim and Kim(1997)은 사각평판-공동 시스템에 대해 수치해석과 실험을 수행하였고, 사각평판의 임피던스와 공동 내부 음향장 특성의 상관관계를 분석하였다. Sandberg et al.(2001)은 구조-유체 연성 해석의 연산부담을 줄이기 위한 방법으로 영역분할법을 제시하고, 이의 효율성을 항공기 객실에 대한 수치해석을 통해 검증하였다. Seo and Kim(2004)은 다양한 경계 형상에 따른 내부 및 외부 음향장 특성을 분석하여 구조-음향 연성효과를 검토하였다. Park et al.(2014)는 복합재 실린더에 대한 음향 가진 실험을 통하여 구조-음향연성 해석 및 실험을 수행하고 비교·분석하였다. 한편, 구조-음향 연성 모델에 대한 많은 연구가 수행되었지만 수중소음원의 음향파위 측정에 사용되는 잔향수조의 구조-음향 연성 효과에 관한 연구는 찾아보기 힘들다.

본 논문에서는 수중소음원의 음향파위 측정을 위해 설계된 잔향수조의 구조-음향 연성 효과를 유한요소법 기반의 수치해석과 실험을 통해 검토하였다. 잔향수조의 구조-음향 연성 및 비연성 구조, 음향 수치해석을 통해 모달 파라미터 및 주파수응답함수를 산정하고 실험결과와 비교하였다. 아울러, 구조-음향 연성 고유진동수 및 주파수응답함수를 통해 구조물의 강성증가에 따른 잔향수조의 음향 특성을 분석하였다.

## 2. 잔향수조

본 연구는 동명대학교 내 구축된 잔향수조를 대상으로 하며, 그 형상과 제원은 Fig. 1과 Table 1에 각각 나타내었다. 잔향수조의 벽면과 바닥면은 연강재질의 보강판 구조로 되어있으며, 한쪽 측면은 강화유리(tempered glass)를 설치하여 음향파위 측정과 내부 관측에 용이하도록 제작되었다. 또한 배경소음의 영향을 최소화하기 위해 잔향수조 지지부와 바닥면 사이에는 탄성 마운트(resilient mount)가 설치되어 있다.

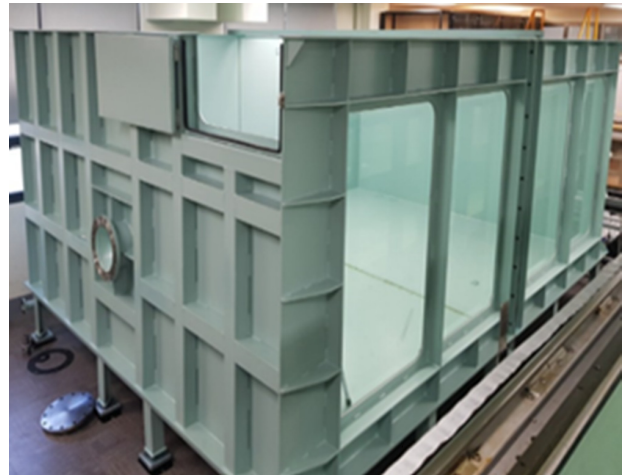


Fig. 1 Reverberant water tank

Table 1 Dimensions of reverberant water tank

Dimension	Value (m)
Length	5.00
Breadth	3.50
Height	1.95
Design water depth	1.47
Support leg length	0.31

## 3. 수치해석

잔향수조에 대한 구조-음향 연성해석은 식 (1)의 직교좌표계 (cartesian coordinate)에서의 행렬 방정식을 기반으로 한다.

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ -A^T & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & 0 \\ 0 & C_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & A \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ P_f \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $[M_s]$ ,  $[C_s]$ ,  $[K_s]$ 는 구조부의 질량, 감쇠 그리고 강성 행렬을 각각 나타낸다.  $[M_f]$ ,  $[C_f]$ ,  $[K_f]$ 는 음향장의 질량, 감쇠 그리고 강성 행렬을 나타낸다.  $\{u_s\}$ 는 구조요소 절점에서의 변위,  $\{p\}$ 는 음향요소 절점에서의 음압 벡터이다.  $\{F_s\}$ 는 구조요소 절점에 작용하는 외력,  $\{P_f\}$ 는 음향요소에 작용하는 외부압력 벡터이다.  $[A]$ 는 구조-음향 연성행렬로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[A] = \int_S N_s^T N_f \{n_s\} dS \quad (2)$$

여기서,  $N_s$ 와  $N_f$ 는 구조 및 음향요소의 형상함수이며  $n_s$ 는 구조와 음향요소 사이의 법선방향 벡터이다.

한편, 식 (1)을 모달 좌표계로 변환하면 식 (3)과 같은 구조-

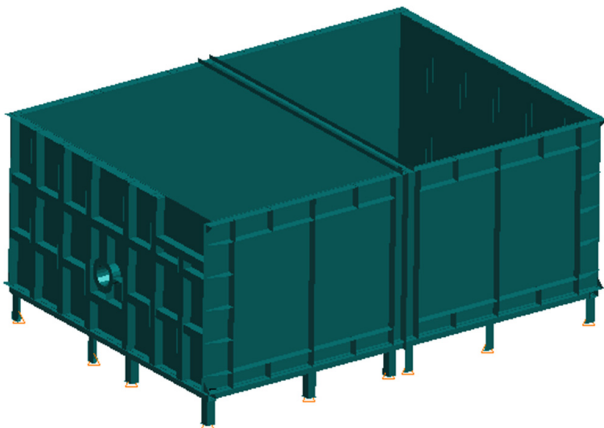
음향 연성 지배방정식을 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Phi_s^T M_s \Phi_s & 0 \\ -\Phi_f^T A^T \Phi_s & \Phi_f^T M_f \Phi_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_s \\ \ddot{q}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_s^T C_s \Phi_s & 0 \\ 0 & \Phi_f^T C_f \Phi_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_s \\ \dot{q}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_s^T K_s \Phi_s & \Phi_s^T A \Phi_f \\ 0 & \Phi_f^T K_f \Phi_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_s \\ q_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_s \\ P_f \end{Bmatrix} \quad (3)$$

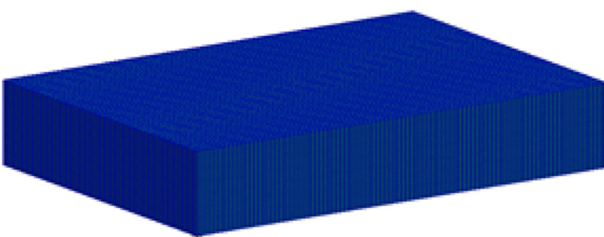
여기서,  $\Phi_s$ 와  $\Phi_f$ 는 비연성 시 구조와 음향의 모달행렬이며,  $q_s$ 와  $q_f$ 는 구조와 음향의 모달 좌표계(modal coordinate)이다.

본 연구에서는 잔향수조의 구조-음향 연성해석을 위해 MSC/Nastran (2008)을 사용하였다. 한편, 구조물과 음향장에 대한 수치 해석 모델은 Fig. 2에 나타내었다. 이때, 수조의 벽면과 보강재 부분은 CQUAD4 및 CTRIA3 요소, 수조 지지구조 하부의 탄성 마운트는 CBUSH 요소, 음향장은 HEXA 요소를 사용하여 수치해석 모델을 구성하였다. 또한, 구조 및 음향요소의 최대 크기는 굽힘파의 파장과 음속을 고려하여 20 mm 및 50 mm로 각각 모델링하였다. 아울러, 수치해석 모델에 적용된 재료 물성치를 Table 2에 나타내었다.

음향장의 경계조건은 수면에 해당하는 음향 모델의 윗면에 압력이 0인 경계조건(pressure release condition)을 적용하였다. 한편, 구조-음향 연성효과를 검토하기 위해 구조-음향 접수면에는 임피던스 매칭 경계조건을 부여하여 연성 해석을 수행하였다. 또한, 동일한 접수면에 대해 법선 속도가 0인 경계조건(rigid wall boundary condition), 압력인 0인 경계조건(pressure release boundary condition) 등의 이상적 경계조건을 적용하여 비연성 음향 해석을 수행하였다. 이에 대하여 수치해석은 비연성 시 구조물의



(a) Structure model



(b) Acoustic field model

Fig. 2 Finite element models for numerical analysis

모달 파라미터 산정(Case 1), 비연성 시 음향 모달 파라미터와 음향장의 주파수응답 산정(Case 2 & 3), 연성시 구조물의 모달 파라미터와 음향장의 주파수응답함수 산정(Case 4) 등으로 구분하여 수행하였으며, 상기 내용을 Table 3에 나타내었다. 이때 수치 해석은 란초스법(Lanczos method) 기반의 복소 고유치 해석과 모드 중첩법 기반의 강제진동해석 기법을 활용하였다.

Table 2 Material properties for numerical analysis

Material	Item	Value
Steel	Young's modulus (GPa)	193.05
	Density (kg/m <sup>3</sup> )	7,940
	Poisson ratio	0.30
	Plate thickness (m)	0.01/0.05/0.10/1.00
Glass	Young's modulus (GPa)	70.00
	Density (kg/m <sup>3</sup> )	2,600
	Poisson ratio	0.22
Resilient mount	Stiffness (kN/m)	3,800
Water	Density (kg/m <sup>3</sup> )	1,000
	Sound speed (m/s)	1,430

Table 3 Numerical analysis cases

Case	Uncoupled		Coupled
	Structure	Acoustic	
1	O	-	-
2	-	O (rigid wall)	-
3	-	O (pressure release)	-
4	O	O	O

## 4. 실험

잔향수조의 구조-음향 연성 효과를 분석하기 위해 실험은 충격망치실험과 음향가진실험을 구분하여 수행하였다. 충격망치실험은 비연성 및 연성 구조의 모달 파라미터 도출을 위해 수행하였다. 이때, 수신점은 잔향수조의 모드 확인을 위하여 보강재가 교차하는 10개 지점과 보강재의 영향이 적은 4개 지점, 가진점은 구조물 전체가 가진 될 수 있도록 보강재가 교차하는 55개 지점을 선정하여 가속도계를 부착하고 가진하였다. 충격망치실험에 대한 가진점과 수음점을 Fig. 3에 나타내었다. 사용된 장비는 주파수 분석기(B&K pulse), 충격망치(Dytran 5802), 가속도계(Dytran 3148E) 등이며, 그 구성은 Fig. 4와 같다. 한편, 음향가진실험은 연성 음향 주파수응답함수 도출 및 음향특성 파악을 위해 수행하였다. 수음점은 잔향수조 내부의 27개 지점, 음원은 잔향수조의 관측창 측면 중앙부 1개 지점을 선정하였다. 음향 가진 신호는 광대역 주파수에 대해 가진이 용이한 정현파 스위프 신호(sine sweep signal)를 사용하였다. 이때, 사용된 장비는 주파수 분석기(B&K pulse), 음향가진기(Neptune sonar D17), 수신기

(B&K 8103), 파워 앰프(B&K 2713) 그리고 컨디션 앰프(B&K nexus amp.)이며, 그 구성은 Fig. 5와 같다.

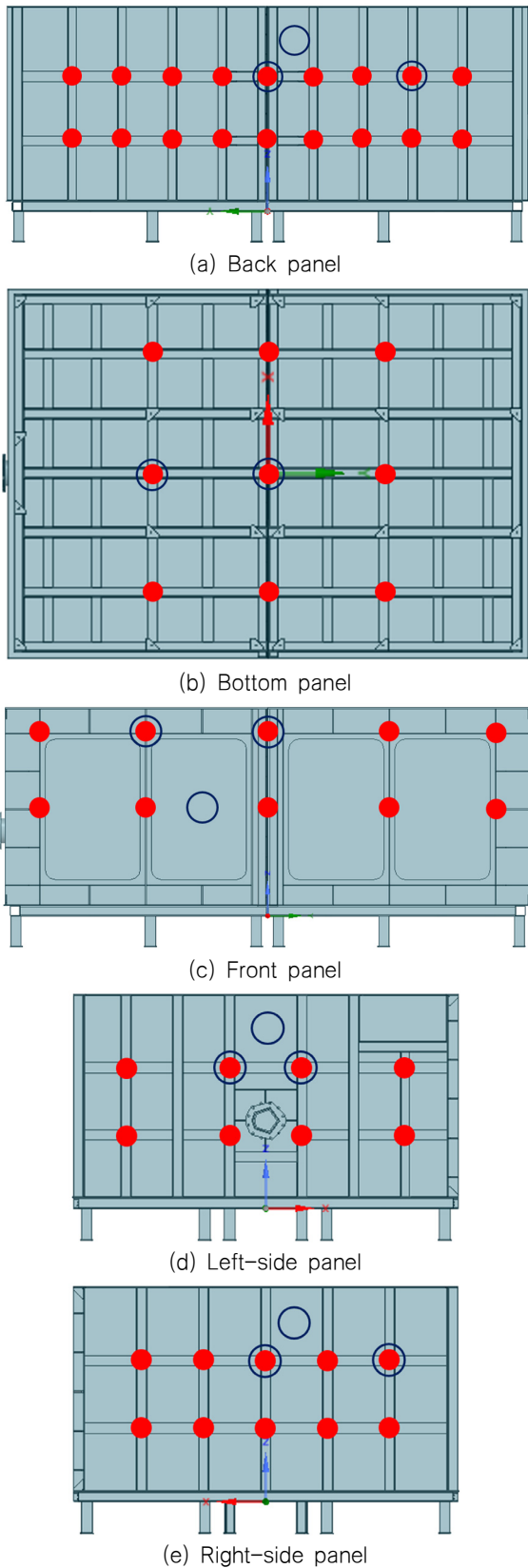


Fig. 3 Location of the structure excitations and receiver points (○ : receiver point, ● : excitation point)

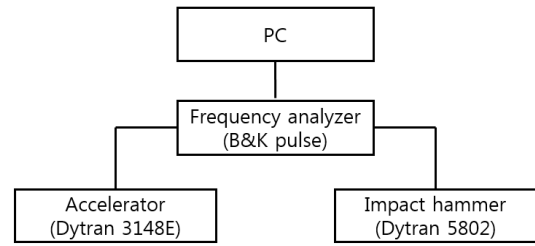


Fig. 4 Configuration for structure impact test

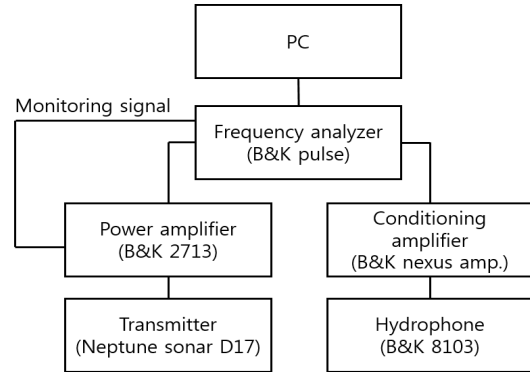


Fig. 5 Configuration for acoustic excitation test

## 5. 수치해석 및 실험결과

잔향수조의 비연성 구조, 음향 및 구조-음향 연성 수치해석결과와 실험결과를 비교·분석하였다. Table 3에 나타낸 수치해석 Case 중 비연성(Case 1)과 연성(Case 4)에 대한 구조의 1~4차 고유진동수 해석결과를 실험결과와 함께 정리하여 Table 4에 나타내었으며, 상대 비교를 위하여 차이(difference)와 상대 차이(relative difference)를 함께 나타내었다.

Case 1에 대한 구조의 1차~4차 고유진동수 수치해석결과는 실험결과 대비 최소 1.1%에서 최대 5.4%의 상대 차이를 보이며, Case 4에 대한 수치해석결과는 최소 0.8%에서 최대 9.1%의 상대

Table 4 Comparison of structural modal frequencies obtained by numerical analysis and experiment

Mode order		1	2	3	4
Uncoupled	Numerical (Hz)	8.8	10.6	16.9	22.7
	Experiment (Hz)	8.9	10.9	16.4	24.0
	Difference (Relative %)	0.1 (1.1)	0.3 (2.8)	0.5 (3.0)	1.3 (5.4)
Coupled	Numerical (Hz)	5.0	7.6	12.9	14.2
	Experiment (Hz)	5.5	7.5	13.0	15.5
	Difference (Relative %)	0.5 (9.1)	0.1 (1.3)	0.1 (0.8)	1.3 (8.4)

$$\text{Relative (\%)} = |\text{experiment} - \text{numerical}| / \text{experiment} \cdot 100$$



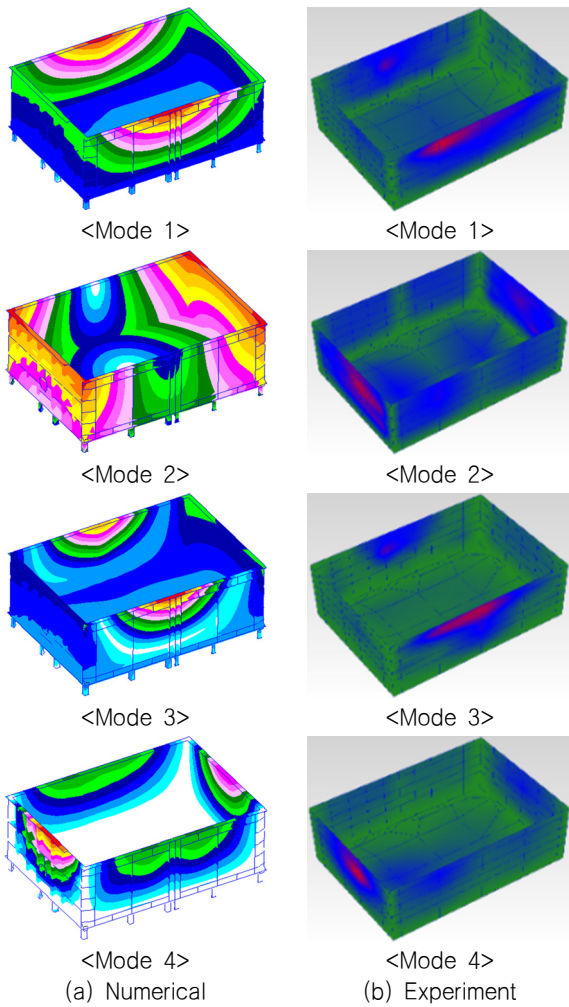


Fig. 6 Uncoupled mode shapes of the structure (Case 1)

고유진동수는 부가수 질량 효과로 인하여 비연성 시(Case 1) 구조 고유진동수 대비 전반적으로 33% 정도 낮게 나타났다. Case 1과 Case 4에 대한 1차부터 4차까지의 구조모드를 수치해석 및 실험결과를 비교하여 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다. 이를 통해 2차 고유모드를 제외한 수치해석과 실험의 고유모드가 각각 잘 부합함을 확인하였다.

한편, 비연성 시(Case 2 & 3)와 연성 시(Case 4) 음향장의 1~3차 고유진동수 수치해석결과와 시험결과를 비교하여 Table 5에 나타내었다. 비연성 시(Case 2 & Case 3) 1차 고유진동수는 각각 242.8 Hz와 546.2 Hz로써, 큰 차이를 보임을 확인할 수 있다. 이는 구조와 음향이 접하는 접수면에 대한 경계조건 차이에 의한 결과로 사료된다. 한편, 수치해석을 통한 연성 시(Case 4) 음향장의 1~3차 고유진동수는 실험결과와 0.0%에서 1.7%의 상대 차이를 보이며, 비연성 결과와 비교하였을 때 Case 2보다 Case 3의 음향 특성과 유사함을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 비연성 시(Case 2 & 3)와 연성 시(Case 4) 1차부터 4차까지의 음향장모드를 차수별로 비교하여 나타낸 것이다. 고유진동수 비교 결과와 마찬가지로 Case 4의 음향장모드는 Case 2보다는 Case 3의 음향장모드와 유사함을 확인할 수 있다. Case 별 고유진동수와 음향장모드를 통해 본 연구대상인 잔향수조의

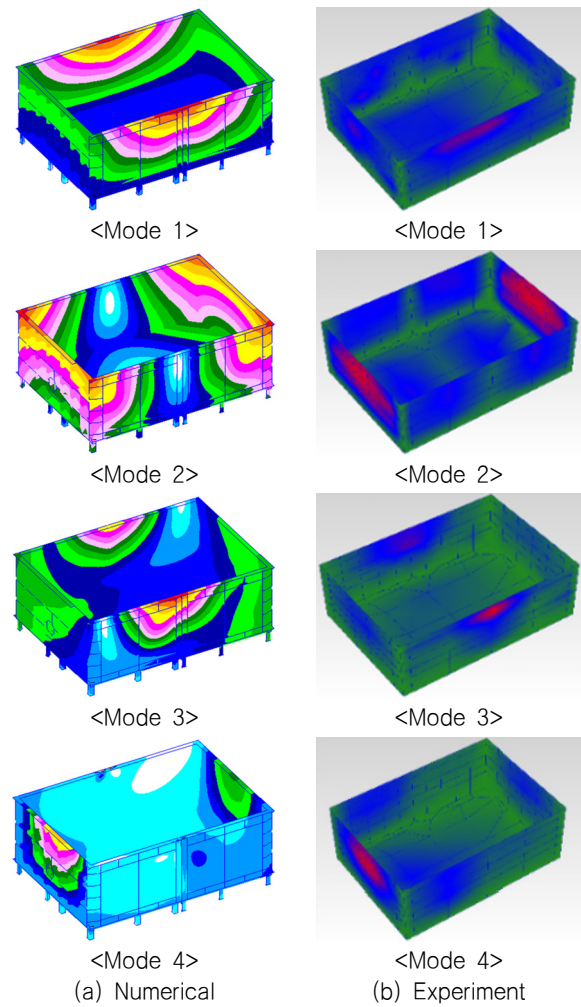


Fig. 7 Coupled mode shapes of the structure part (Case 4)

Table 5 Comparison of acoustic field modal frequencies obtained by numerical analysis and experiment

Mode order		1	2	3
Uncoupled	Case 2 (Rigid wall, Hz)	242.8	281.9	317.5
	Case 3 (Pressure release, Hz)	546.2	599.9	651.2
Coupled	Case 4 (Numerical, Hz)	528.9	578.7	626.8
	Case 4 (Experiment, Hz)	520.0	578.5	628.0
	Difference (Relative %)	8.9 (1.7)	0.2 (0.0)	1.2 (0.2)

접수면에 대한 경계조건은 “rigid wall condition”보다는 “pressure release condition”과 유사함을 확인할 수 있다.

이를 통해 개략적인 잔향수조의 음향장 해석 시, 수치해석 연산시간을 고려하여 구조-음향 연성 접수면에 대한 경계조건 대신 “pressure release 조건”을 적용한 비연성 음향장 모델에 대해 수치해석을 수행하는 것이 보다 실용적일 수 있다고 사료된다.

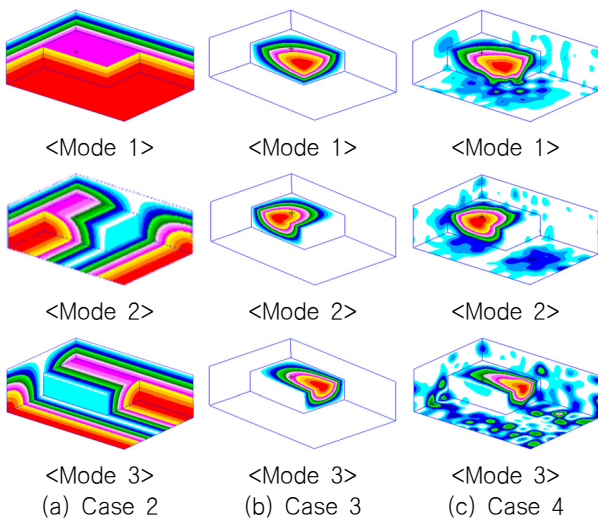


Fig. 8 Mode shapes of the acoustic field (Case 2~4)

또한, 잔향수조의 구조-음향 연성효과에 대한 검토를 수행하기 위해 수치해석을 통한 잔향수조의 주파수응답함수를 실험결과와 함께 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 저주파수 대역에서는 구조모드가 음향장에 지배적인 영향을 미치지만, 고주파수 대역에서는 음향모드가 음향장에 지배적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 한편, 고주파수 영역에서의 실험결과는 수치해석결과와 비교하였을 때 상대적으로 높은 부합성을 보이나, 저주파수 영역에서의 실험결과는 수치해석결과와의 부합성이 상대적으로 낮게 나타나고 있다. 이는 실험에 사용된 음향 가진기의 저주파수 특성에 의한 실험결과로 신뢰성이 매우 부족하다고 파악되는 주파수대역이다.

Fig. 10은 Case 2, Case 3, Case 4에 대해 수치해석을 통한 음향장의 주파수응답함수를 도시한 것이다. Table 5에 보인 바와 같이 1차 음향 고유진동수는 Case 2, Case 4, Case 3 순으로 높게 나타나고 있으며, 이전 고유진동수 및 고유모드 비교 결과와 마찬가지로 Case 4에 대한 주파수응답함수는 Case 2(rigid wall condition)보다 Case 3(pressure release condition)과 유사한 경향을 나타내고 있다.

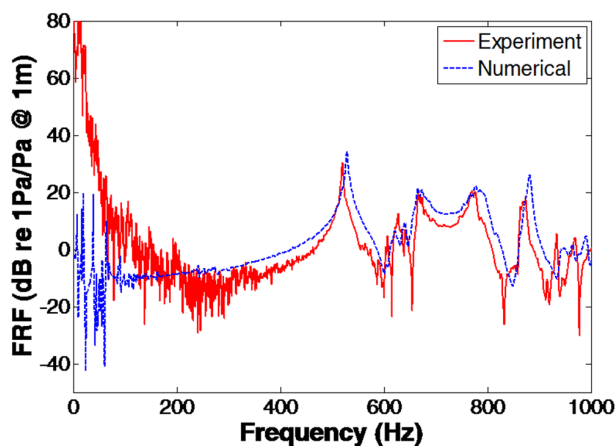


Fig. 9 Acoustic field frequency response functions obtained by experiment and numerical analysis

추가로 잔향수조 구조물의 강성 증가에 따른 구조-음향 연성효과를 고찰하였다. 구조물의 강성 증가를 모의하기 위해 Case 4에 대한 수치해석 모델의 판 두께를 기존 0.01 m에서 0.05 m, 0.10 m, 1.00 m로 변화시키며 수치해석을 수행하였다. 이에 대한 음향장의 1~4차 고유진동수를 비교하여 Table 6에 나타내었으며, 음향장 주파수응답함수를 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 나타내었다. 앞서 살펴본 바와 같이 평판 두께가 0.01 m(Case 4)인

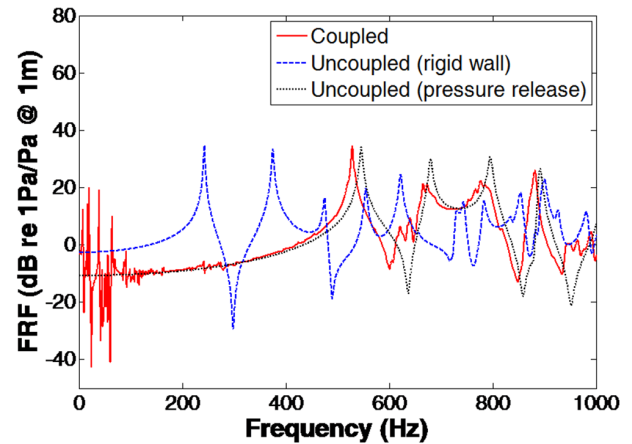


Fig. 10 Acoustic field frequency response functions obtained by numerical analysis (Case 2~4)

Table 6 Acoustic field modal frequencies in cases of variations of the plate thickness

Mode order	1	2	3	4	
Case 2 (Rigid wall, Hz)	242.8	281.9	317.5	348.2	
Case 3 (Pressure release, Hz)	546.2	599.9	651.2	680.0	
Case 4 (Wall thickness, Hz)	0.01 m	528.9	578.7	626.8	665.6
	0.05 m	429.8	477.2	533.2	559.7
	0.10 m	354.7	433.4	466.2	513.2
	1.00 m	250.6	292.3	323.7	358.7

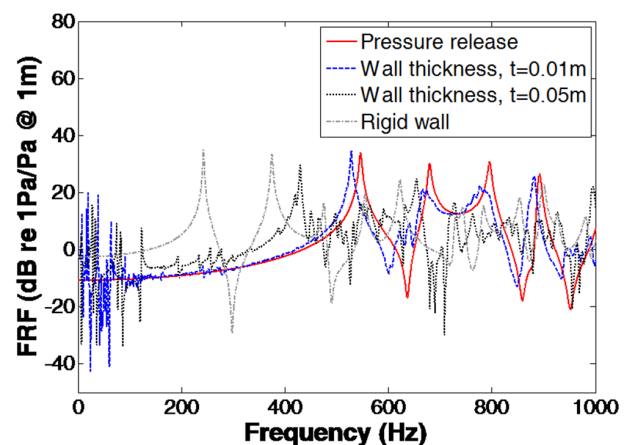


Fig. 11 Acoustic field frequency response functions obtained by numerical analysis (t=0.01 m, t=0.05 m)

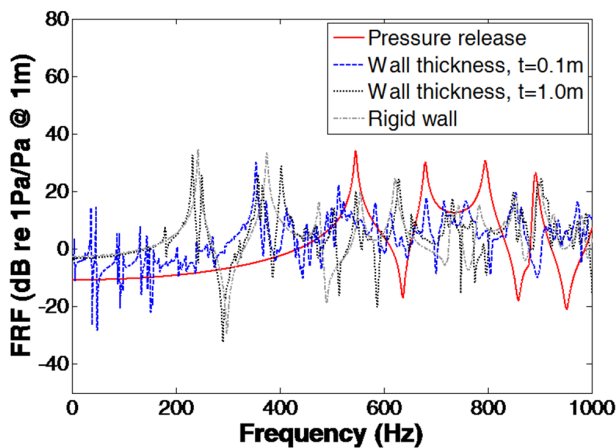


Fig. 12 Acoustic field frequency response function obtained by numerical analysis ( $t=0.10$  m,  $t=1.0$  m)

경우 Case 3(pressure release condition)의 음향특성과 비슷한 음향특성을 보이는 반면, 구조물 강성이 증가함에 따라 Case 2(rigid wall condition)에 가까운 음향특성을 보인다. 이를 통해 두께가 두꺼운 콘크리트 구조물로 제작되어 상대적으로 높은 강성을 가지는 잔향수조의 경우 개략적인 잔향수조의 음향장 해석 시, “rigid wall condition”을 적용한 비연성 음향모델에 대해 수치 해석하는 것이 보다 실용적일 수 있다고 사료된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 음향파워 측정을 위해 설계된 잔향수조의 구조-음향 연성효과를 수치해석과 실험을 통해 고찰하였다. 유한요소해석을 통하여 잔향수조의 비연성 및 연성 모달 파라미터 분석과 주파수응답함수 평가를 수행하였으며, 충격망치 및 음향기진실험을 통하여 수치해석결과와 비교·분석하였다. 수치해석을 통한 잔향수조의 고유진동수와 음향장 주파수응답함수는 실험결과와 전반적으로 유사하게 나타났다. 한편 구조-음향 연성 효과로 인한 구조물의 고유진동수는 부가질량 효과로 인해 비연성 시 구조물의 고유진동수에 비해 전반적으로 낮게 나타났으며, 구조와 음향이 연성된 잔향수조의 음향장은 접수면에 “pressure release condition”을 적용한 비연성 음향장과 유사한 음향특성을 가지는 것을 확인하였다. 또한 구조물의 강성변화에 따른 구조-음향 연성효과를 고찰하기 위해 잔향수조의 평판 두께를 변화시키며 수치해석을 수행한 결과, 구조물의 강성이 커질수록 “rigid wall 조건”을 적용한 비연성 음향장과 유사하며, 구조물 강성이 작아질수록 “pressure release condition”을 적용한 비연성 음향장과 유사한 음향특성이 나타나는 것을 확인하였다.

향후 수중소음원 계속 및 분석의 정도를 높이기 위해 실제 수중소음원에 대한 잔향수조에서의 실험과 수치해석을 통해 데이터를 확보해 나아가야 하며, 잔향수조의 특성을 반영하여 수중소음원에 대한 음향파워 추정 및 분석기법을 적용한 잔향수조에서

의 음향파워 실험을 수행할 예정이다.

## 후기

본 논문은 국방과학연구소의 “압축수 시스템 동적거동 중 수중 소음원 실험 및 경향분석 연구” 과제 수행 결과의 일부임.

## References

- Choi, S.H. & Kim, J.O., 1996. Structure–fluid interaction in a coupled vibroacoustic system. *Proceedings of Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference*, Republic of Korea, November, pp.135–141.
- Cochard, N.J., Lacoume, J.L., Arzelies, P. & Gabillet, Y., 2000. Underwater acoustic noise measurement in test tanks. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 25(4), pp.516–522.
- Espinosa, F.M.D. & Gallego, J.J.A., 1984. On the resonance frequencies of water-loaded circular plates. *Journal of Sound and Vibration*, 94(2), pp.217–222.
- Gemba, K.L. & Nosal, E., 2016. Source characterization using recordings made in a reverberant underwater channel. *Journal of Applied Acoustics*, 105, pp.24–34.
- Han, S.J. et al., 2015. Measurement of acoustic radiation efficiency of a circular cylindrical structure in water tank. *Proceedings of Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference*, Republic of Korea, October, pp. 219–222.
- Kim, S.M. & Kim, Y.H., 1997. Visualization of sound field of plate–cavity coupled system by experimental method. *Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference*, Republic of Korea, May, pp.662– 668
- Mazúch, T., Horáček, J., Trnka, J., & Veselý, J., 1996. Natural modes and frequencies of a thin clamped–free steel cylindrical storage tank partially filled with water : FEM and measurement. *Journal of Sound and Vibration*, 193(3), pp.669–690.
- Olson, L.G. & Bathe, K.J., 1985. Analysis of fluid–structure interactions. A direct symmetric coupled formulation based on the fluid velocity potential. *Journal of Computers & Structures*, 21(1/2), pp.21–32.
- Park, S.H., Seo, S.H. & Han, J.H., 2014. Comparison of acoustic test and vibro–acoustic analysis results of a composite cylinder under external acoustic loading. *Proceedings of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Republic of Korea, November, pp.1180– 1183.
- Sandberg, G.E., Hansson, P.A. & Gustavsson, M., 2001. Domain decomposition in acoustic and structure–acoustic analysis.



*Journal of Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190(24-25), pp.2979-2988.

Seo, H.S. & Kim, Y.H., 2004. The effects of the boundary shapes on the structural-acoustic coupled system. *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference*, 14(8), pp.718-725.

