

# 이중저 형상 구조물의 음향방사효율과 수중방사소음 해석

최성원<sup>1</sup>·김국현<sup>2</sup>·조대승<sup>1</sup>·서규열<sup>2,†</sup>  
부산대학교 조선해양공학과<sup>1</sup>  
동명대학교 조선공학과<sup>2</sup>

## Analysis of Acoustic Radiation Efficiency and Underwater Radiated Noise of Double Bottom-shaped Structure

Sung-Won Choi<sup>1</sup>·Kookhyun Kim<sup>2</sup>·Dae-Seung Cho<sup>1</sup>·Kyu-Youl Suh<sup>2,†</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University<sup>1</sup>  
Department of Naval Architecture, Tongmyong University<sup>2</sup>

### Abstract

Recently, reducing underwater radiated noise (URN) of ships has become an environmental issue to protect marine wildlife. URN of ships can be predicted by various methods considering its generating mechanism and frequency ranges. For URN prediction due to ship structural vibration in low frequency range, the fluid-structure interaction analysis technique based on finite element and boundary element methods (FE/BEM) is regarded as a useful technique. In this paper, URN due to a double bottom-shaped structure vibration has been numerically investigated based on a coupled method of FE/BEM to enhance the prediction accuracy of URN due to the vibration of real ship engine room structure. Acoustic radiation efficiency and URN transfer function in case of vertical harmonic excitation on the top plate of double bottom structure have been evaluated. Using the results, the validity of an existing empirical formula for acoustic radiation efficiency estimation and a simple URN transfer function, which are usually adopted for URN assessment in initial design stage, is discussed.

**Keywords** : Underwater radiated noise(수중방사소음), Fluid-structure interaction analysis(유체-구조 연성해석), Acoustic radiation efficiency(음향방사효율), URN transfer function(수중방사소음 전달함수), Coupled method of finite element and boundary element method(유한요소/경계요소 연성방법)

## 1. 서론

선박의 수중방사소음(underwater radiated noise; URN)은 탑재 장비, 프로펠러, 유체 동역학적 현상 등에 의해 발생한 진동 음향에너지가 직·간접적으로 수중으로 전파되어 나타난다. 음향 신호에 해당하는 URN은 소나 등과 같은 음향센서를 통해 선박의 위치와 인식 등에 활용된다. 이로 인해 URN은 수상함, 잠수함 등과 같이 군사목적으로 운용되는 선박의 생존성에 직접적인 영향을 미치는 주요 스텔스 성능으로 인식되고 있다. 한편, 최근에는 고래 등과 같은 해양생물 보호에 관한 국제적 관심이 증대되면서 일반 상선 및 해양구조물의 URN 수준에 대한 규제 필요성이 제기되고 있다(IMO, 2010).

선박의 URN 수준은 실험을 통해 평가가 가능하다. 그러나, 이는 대상 선박의 건조 후에 실시 가능하므로 문제 발생 시 개선에 한계가 있으므로 설계 단계에서부터 정도 높은 URN 평가

가 요구된다.

URN 평가를 위한 수치해석방법으로는 유한요소법(finite element method; FEM), 경계요소법(boundary element method; BEM) 등의 저주파수 영역 해석 방법(Wang, et al., 2000)과 파워흐름해석(power flow analysis, Lee & Hong, 2001), 통계적 에너지해석방법(statistical energy analysis, Bae, et al., 1993) 등의 고주파수 영역 해석방법이 있다. 특히, 통계적 에너지해석 방법은 대상구조물을 유한개의 세부시스템으로 모델링하고 세부 시스템 간의 에너지 교환 및 평형 관계를 이용해 진동-소음 수준을 추정하는 방법으로써 다른 해석 방법에 비해 연산시간이 짧고 선박과 같은 대형구조물에 대한 적용이 용이한 장점이 있어 조선공학, 자동차공학, 항공공학 등에 대한 소음해석방법으로 널리 사용되고 있다.

한편, 통계적 에너지해석방법을 이용한 URN 평가에 있어서, 유체와 접한 선체 외판의 음향방사효율(acoustic radiation

efficiency)은 해석 정확도에 영향을 미치는 중요한 해석인자로서, 음향방사파워(acoustic radiation power), 판 구조의 사·공간 평균 진동속도 및 접수면적, 유체의 임피던스(fluid impedance) 등을 이용해 산정 가능하다(Bae, et al., 1993). 접수 판 구조의 음향 방사효율에 대한 수치해석적 연구로는 Putra and Thomson (2010)이 평판의 음향방사효율을 baffle 조건과 unbaffle 조건하에서 평가고찰한 바 있으며, Wang, et al.(2000)은 FE/BEM 연성 해석이론을 이용해 기진력이 작용하는 선박 엔진룸 모델의 접수 선체 외판에 대한 음향방사효율을 추정한 바 있다. 또한 실험적 연구로는 Uchida, et al.(1986)이 편면 접수 평판의 재질과 두께에 따른 음향방사효율에 대한 실험식을 제안하고 통계적 에너지해석방법 및 실선 시험에 의한 결과 등과 비교한 바 있다. 그러나 선박 URN 해석에 있어서 Uchida 등이 제시한 음향방사효율 실험식을 적용할 경우 저주파수 영역에서의 URN 수준이 과도하게 나타나는 문제점이 있어 이를 개선할 수 있는 보완연구가 요구된다.

본 연구에서는 구조-유체 연성 효과를 고려할 수 있는 FE/BEM 연성 해석방법을 이용하여 선박 이중저(double bottom)형상 구조물의 중저주파수 음향방사효율과 URN 해석을 수행하였다. 또한 실제 선박 엔진룸 구역의 하부 이중저 구조를 참고한 유한요소모델의 하부 평판 두께와 기진 위치에 따른 음향방사효율 및 URN 전달함수를 평가하였다. 이를 통해 음향방사효율에 대한 Uchida 실험식 및 URN 전달함수 간에 평가식의 타당성을 고찰하였다.

## 2. 해석이론 및 절차

### 2.1 음향방사효율과 URN 전달함수

접수 진동하는 물체의 음향방사효율  $\sigma$ 는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\sigma = \frac{W}{\rho c A \langle v^2 \rangle} \quad (1)$$

여기서,  $W$ 와  $\langle v^2 \rangle$ 는 접수 외판 전체의 음향방사파워(acoustic radiation power)와 사·공간 평균 제곱속도(mean quadratic velocity)를 각각 의미하며,  $\rho$ 와  $c$ 는 물의 밀도(water density)와 수중음파속도(sound speed in water)를,  $A$ 는 접수 외판의 면적을 나타낸다.

상기의 음향방사효율 평가는 접수 구조에 대한 구조-유체 연성 효과를 고려한 진동해석이 요구된다. 이에 초기 설계 단계에서 음향방사효율의 효율적 추정을 위해 Uchida, et al.(1986)은 접수 판 구조물의 두께, 재질, 면적 및 주파수 변화 등에 따른 음향방사효율 실험식을 다음과 같이 제안하였다.

$$10 \log \sigma = 10 \log(m \sqrt{B/A}) - 78, \quad f < f_1 \quad (2)$$

$$10 \log \sigma = (50/3) \log(4f/f_0) + 10 \log(m \sqrt{B/A}) - 78, \quad f_1 < f < f_2 \quad (3)$$

$$10 \log \sigma = 50 \log(f/16000) - 10, \quad f_2 < f < f_3 \quad (4)$$

$$10 \log \sigma = -10, \quad f > f_3 \quad (5)$$

여기서,

$$f_0 = 700(m \sqrt{B/A})^{0.2}, \quad f_1 = 0.25f_0$$

$$f_2 = 2f_0, \quad f_3 = 16000$$

이고,  $m$ 은 접수 외판의 면밀도이고,  $B$ 는 판의 단위면적 당 굽힘강성,  $f$ 는 주파수를 각각 나타낸다.

한편, URN 전달함수(URN transfer function; TF)는 단위 기진력이 작용할 때 발생하는 음압수준(acoustic pressure level)으로 정의되며, 단위로 dB re.  $1 \mu Pa/kN @ 1m$ 을 사용한다. 수직 기진력이 가해진 무한평판에 대한 URN 전달함수는 다음과 같다(Su & Vasudevan, 1997; Kim, 2010).

$$TF = 20 \log_{10} \left| \frac{k}{2\pi \{1 - (i\omega h \rho_s / \rho c)\}} \right| + 120 \quad (6)$$

여기서,  $k$ 는 파수(wavenumber,  $= \omega/c$ ),  $\omega$ 는 원주파수(circular frequency),  $h$ 는 평판의 두께(thickness),  $\rho_s$ 는 평판의 밀도를 각각 의미한다.

### 2.2 FE/BEM 연성 해석방법

본 절에서는 음향방사효율과 URN 해석을 위해 진동하는 구조물과 접한 유체간의 연성효과를 고려할 수 있는 FE/BEM 기반의 해석이론을 정리한다(Choi, et al., 1996; LMS, 2000).

조화기진력을 받는 비감쇠 구조물의 운동방정식은 식 (7)과 같다.

$$[-\omega^2 [M_s] + [K_s]] \{w\} = \{F\} \quad (7)$$

여기서,  $[M_s]$ 와  $[K_s]$ 는 구조물의 관성행렬과 강성행렬을 각각 나타내고,  $\{w\}$ 와  $\{F\}$ 는 변위벡터와 구조물에 작용하는 기진력 벡터를 의미한다.

구조물이 유체와 접한 경우 구조물에 작용하는 기진력은 구조 기진력  $\{F_s\}$ 와 유체 기진력  $\{F_f\}$ 로 구분하여 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{F\} = \{F_s\} + \{F_f\} = \{F_s\} - [C] \{p\} \quad (8)$$

여기서,  $[C]$ 는 구조와 유체간의 경계면에서 구조의 진동변위와

유체의 음압을 연계시키는 음압 연성행렬(pressure coupling matrix)이고,  $\{p\}$ 는 유체요소 각 절점에서의 음압벡터이다.

한편, 구조물과 접하는 유체의 음압은 식 (9)의 헬름홀츠(Helmholtz) 방정식을 만족해야 한다.

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (9)$$

여기서,  $p$ 와  $k$ 는 음압(acoustic pressure)과 파수를 각각 나타낸다. 이때, 구조물 경계면에서의 음압은 식 (10)의 경계조건을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \rho \omega^2 u \quad (10)$$

여기서,  $u$ 는 구조물경계면의 법선 방향 변위,  $\partial/\partial n$ 은 법선방향 편미분을 나타낸다.

직접 경계요소법(direct boundary element method: DBEM)을 이용하여 구조물과 유체 경계면에서의 구조물 진동속도와 음압간의 관계를 행렬식으로 나타내면 식 (11)과 같다.

$$[A]\{p\} + \rho \omega^2 [B][T]\{w\} = \{F_A\} \quad (11)$$

여기서,  $\{F_A\}$ 는 유체 내의 음원에 의한 기진력 벡터이고,  $[A]$ 와  $[B]$ 는 유체의 영향행렬(influence matrix)이다. 또한,  $[T]$ 는 변위 연성행렬(displacement coupling matrix)로서 구조물경계면의 법선방향 변위 벡터  $\{u\}$ 와는 식 (12)와 같은 관계를 갖는다.

$$[T]\{w\} = \{u\} \quad (12)$$

또한, 식 (7)과 식 (11)을 결합하면 식 (13)과 같은 구조-유체 연성 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [K_s] - \omega^2 [M_s] & [C] \\ \rho \omega^2 [B][T] & [A] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{w\} \\ \{p\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_s\} \\ \{F_A\} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

상기 행렬식으로부터 구조 요소 절점에서의 진동 변위  $\{w\}$ 와 경계면에서의 음압  $\{p\}$ 을 구할 수 있으며, 구조 경계면의 법선방향 속도  $\{\dot{u}\}$ 는 식 (12)로부터 연산할 수 있다. 또한 이를 헬름홀츠 적분방정식에 대입하면 경계면 외부 유체 영역 임의 위치에서의 음압, 속도, 음향 인텐시티(acoustic intensity) 등의 결과를 구할 수 있으므로 음향방사파워를 평가할 수 있다. 따라서, 상기와 같이 평가된 음향방사파워와 접수 구조의 사공간 평균 제곱속도를 이용하여 음향방사효율을 평가할 수 있다.

한편, 식 (13)을 이용한 수치해석 방법은 선박 등과 같이 자유도가 큰 복잡한 구조에 적용하기에는 연산부담이 매우 크다. 이에 수치해석 모델에 대한 물리좌표계(physical coordinates)를 모드좌표계(modal coordinates)로 변환하여 연산 부담을 줄이는 것

이 효과적이다. 모드좌표계를 이용할 경우에 식 (13)은 식 (14)와 같이 변환된 형태의 행렬로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [\widehat{K}_s] - \omega^2 [\widehat{M}_s] & - [C] \\ \rho \omega^2 [\widehat{B}][\widehat{T}] & [A] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\widehat{w}\} \\ \{p\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\widehat{F}_s\} \\ \{F_A\} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

여기서,

$$\begin{aligned} [\widehat{M}_s] &= \{\Phi\}^t [M_s] \{\Phi\}, [\widehat{K}_s] = \{\Phi\}^t [K_s] \{\Phi\} \\ [\widehat{B}][\widehat{T}] &= \{\Phi\}^t [B][T] \{\Phi\} \\ \{\widehat{F}_s\} &= \{\Phi\}^t \{F_s\} \end{aligned}$$

이고,  $\{\Phi\}$ 는 구조물의 고유모드 벡터,  $\widehat{\phantom{x}}$ 는 모드좌표계로 변환된 행렬과 벡터, 상첨자  $t$ 는 전치행렬을 나타낸다.

Fig. 1에는 접수 구조의 음향방사효율 평가를 위해 본 연구에서 적용한 FE/BEM 연성해석 절차를 개략적으로 도시한 것이다.

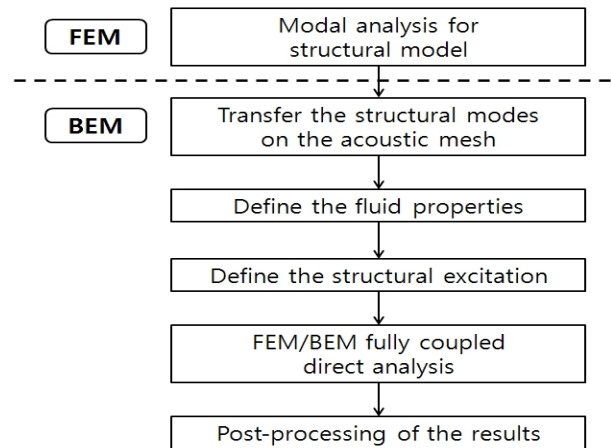


Fig. 1 Analysis procedure of fluid-structure interaction based on FE/BEM

### 3. 수치해석 및 고찰

#### 3.1 수치해석모델

FE/BEM 방법을 적용한 선박 접수 구조의 음향방사효율 평가와 URN 해석은 선박 전체를 대상으로 하는 것이 가장 이상적이거나, 주파수 증가에 따른 유한요소 수 증가, 컴퓨터 용량 및 연산 부담 등 많은 제약이 따른다. 이에 본 연구에서는 선박의 주요 기진원이 탑재되는 엔진룸 구역의 이중저 구조만을 대상으로 범용 유한요소 해석 S/W인 MSC/NASTRAN (2008)과 구조-유체 연성 해석 S/W인 LMS/Virtual.Lab(Rev 9)을 이용하여 수행하였다.

수치해석 대상 이중저 구조는 크기가 2,400mm × 3,360mm × 1,200mm이며, 상부 평판과 하부 평판 사이의 격벽은 길이 방향으로 600mm, 폭 방향으로 840mm의 등간격으로 3개씩 배치하였다. 또한, 이의 주요 부재별 치수와 재료 물성치는 Table 1과

Table 2에 나타내었는데, 물과 접하는 하부 평판의 경우 두께에 따른 음향방사효율을 검토하고자 11mm, 15mm, 20mm, 30mm, 40mm의 5가지 모델을 적용하였다.

이중저 구조의 기하학적 형상과 유체영역 모델링을 위한 경계 요소모델(boundary element model)은 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타내었다. 상기 유한요소모델은 22,811개의 절점과 23,040개의 사각 평판요소로 구성되어 있으며, 경계요소모델의 절점과 요소 수는 각각 1,911개와 1,872개이다. 경계요소모델의 폭과 길이는 유한요소모델과 동일하게 설정한 반면, 높이는 유한요소모델의 하부 평판이 수면 하 3,000mm에 잠기도록 정의하였다.

수치해석에 있어서 구조부에 대한 경계조건은 상·하부 평판의 4변은 단순지지로 가정하였다. 또한, 경계요소에 대한 조건은 측면부는 속도 '0'을 부여하고, 상단(top edge)에는 수면에 의한 방사효과를 고려하기 위한 반대칭(anti-symmetry) 조건을 부여하여 하부 평판 진동면에 의한 방사소음을 평가하였다. 조화기진력은 상면에 수직 방향으로 가하였으며, 기진 위치는 Fig. 2에 나타낸 ①~④의 강 지지부(rigidly supported)와 A~D의 약 지지부

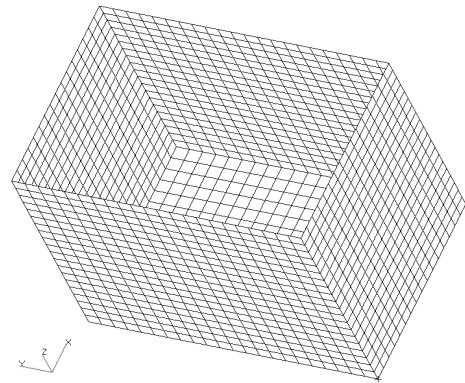


Fig. 3 Box-shaped boundary element model

(non-rigidly supported)로 설정하였다. 상기 해석에 있어서 물의 밀도와 음속은 각각  $1,025 \text{ kg/m}^3$ 과  $1,500 \text{ m/s}$ 로 설정하였다.

### 3.2 음향방사효율 해석 결과

5가지 경우의 하부 평판 두께별 음향방사효율 해석은 Fig. 2에 도시한 강 지지부 기진 위치에 1kN의 수직방향 조화기진력이 적용한 경우에 대하여 15Hz부터 447Hz까지 1Hz 간격으로 수행한 후 1/3 옥타브 밴드 평균값으로 환산한 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 이로부터, 일반적으로 알려진 바와 같이 하부 평판 두께 증가에 따라 음향방사효율이 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 하부 평판 두께가 11mm, 20mm, 30mm 인 경우의 음향방사효율 해석결과를 Uchida, et al.(1986)이 제시한 실험식에 의한 결과와 함께 도시한 것이다. 이로부터 400Hz 이하의 저주파수 구간에서 FE/BEM에 의거한 결과는 음향방사효율이 일정한 것으로 평가하는 Uchida 실험식에 의한 결과보다 작게 평가되며, Uchida 실험식에서 5dB/Oct. 기울기로 변화하는 중주파수 영역의 음향방사효율 특성과 유사함을 확인할 수 있다. 따라서, 선박 URN 해석에 있어서 Uchida 실험식으로 추정된 음향방사효율을 적용할 경우 저주파수 영역에서 URN 수준이 과도하게 추정될 수 있으므로 이에 대한 유의가 필요할 것으로 사료된다.

한편, 기진 위치가 음향방사효율에 미치는 영향을 고찰하고자

Table 1 Thickness of sub-panel for the structure

Type	Thickness
Lower plate	11/15/20/30/40 mm
Upper plate	10 mm
Center longitudinal bulkhead	9 mm
Side longitudinal bulkhead	14 mm
Transverse bulkhead	9 mm

Table 2 Material properties of the structure

Properties	Value
Young's modulus	$2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
Poisson's ratio	0.3
Density	$7.850 \times 10^{-9} \text{ kg/mm}^3$

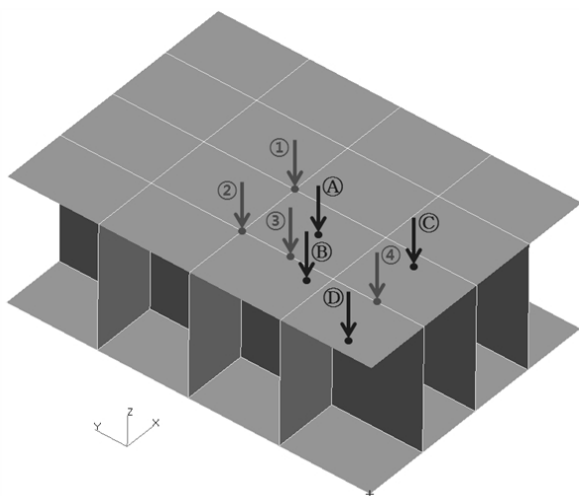


Fig. 2 Geometry of double bottom-shaped structure model and excitation positions

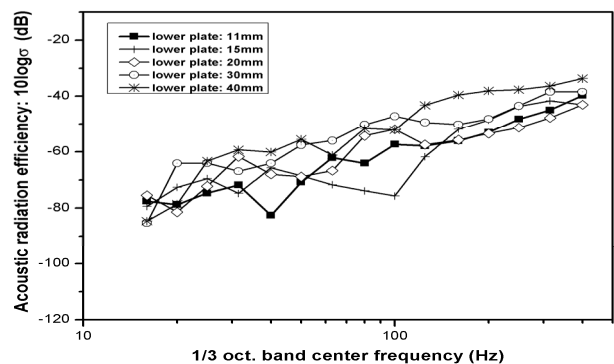


Fig. 4 Acoustic radiation efficiencies according to the variation of lower plate thickness

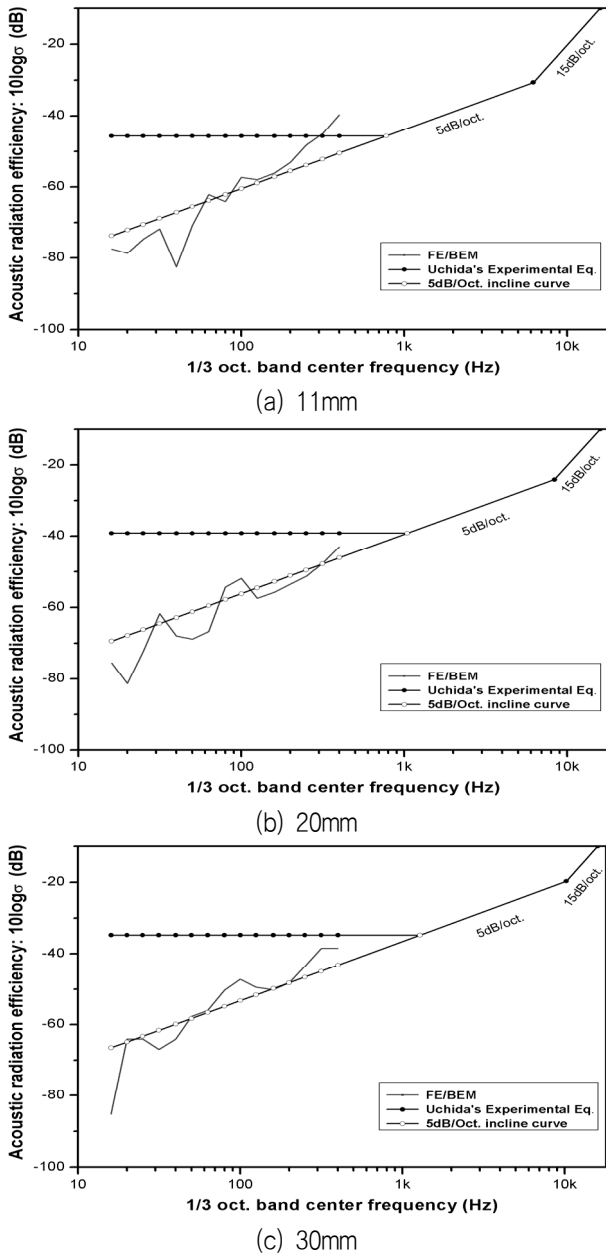


Fig. 5 Comparison of acoustic radiation efficiencies with FE/BEM coupled analysis and empirical formula analysis

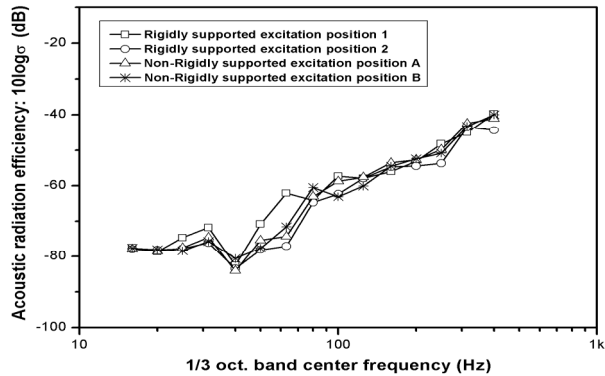


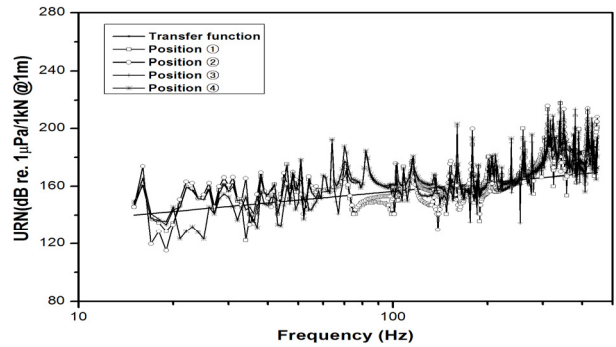
Fig. 6 Comparison of acoustic radiation efficiencies with respect to supported conditions of excitation position

하부 평판 두께가 11mm인 경우에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 6은 Fig. 2에 도시한 강 지지부 ①과 ②, 약 지지부 ③과 ④에 가진한 경우의 음향방사효율 해석결과를 예시한 것이다. 이로 부터 하부 판의 음향방사효율은 상부 판 기진 위치의 지지 강성에 따라 40Hz부터 80Hz 사이의 주파수 구간에서 다소간의 차이가 있으나 전반적으로는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 이는 상부 판의 입력 파워가 궁극적으로 보강 격벽을 통해 하부 판으로 전달되므로 상부 판 기진 위치가 음향방사효율에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 평가한다.

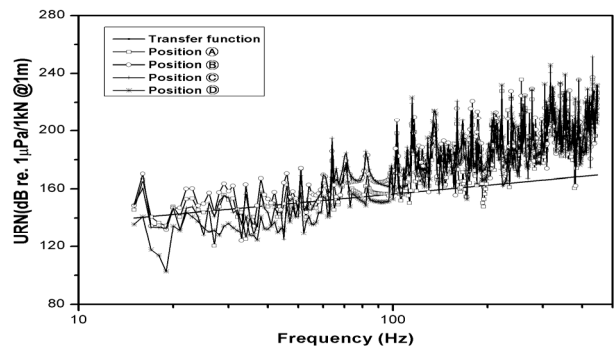
### 3.3 URN 해석 결과

기진 위치에 따른 URN 변화 수준을 고찰하고자 하부 평판 두께가 11mm인 수치해석모델에 대해 Fig. 2에 도시한 각각의 기진 위치에 1kN의 수직방향 조화기진력이 작용한 경우에 대한 URN 해석을 수행하였다.

Fig. 7은 강 지지부 기진과 약 지지부 기진에 대한 URN 해석 결과를 나타낸 것이다. 이에는 식 (6)의 간이 평가식에 의한 URN 추정 결과도 함께 나타내었다. 이로부터 강 지지부 기진 시 FE/BEM 방법으로 해석한 URN 수준은 전반적으로 식 (6)의 간이 평가식에 의한 URN 추정 결과와 유사함을 확인할 수 있다. 그러나, 약 지지부 기진 시 100Hz 이상의 주파수영역에서 간이 평가식에 의한 결과가 FE/BEM 해석 결과 대비 낮게 평가됨을 확인할 수 있다. 이는 동일한 기진력 작용 시 기진부의 강성이 약하면 입력파워가 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단한다.



(a) Rigidly supported



(b) Non-rigidly supported

Fig. 7 URN levels with respect to excitation positions

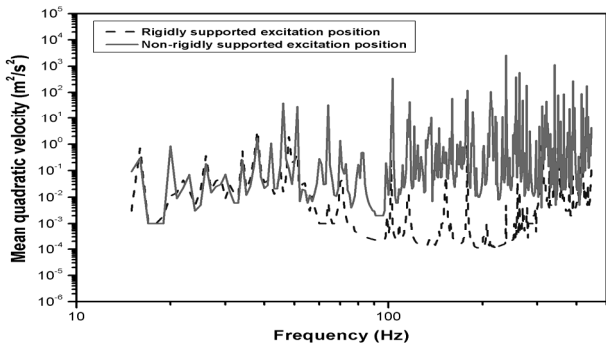


Fig. 8 Mean quadratic velocities with respect to supported conditions of excitation position

한편, Fig. 8에는 강 및 약 지지부 기진 조건에 대해 하부 평판의 시-공간 평균제곱속도를 나타낸 것이다. 이로부터 70Hz 이상의 주파수 영역에서 강 지지부 기진에 비해 약 지지부 기진 조건에서 상대적으로 큰 속도응답을 나타냄을 확인할 수 있다. 이는 약 지지부에 작용한 기진력이 유발한 상대적으로 큰 입력파위가 하부 평판의 응답을 증가시켜 URN을 증대시키기 때문이다.

상기 결과로부터 선박 URN 수준을 저감하기 위해서는 기진력이 강 지지부에 작용하도록 설계하는 것이 요구됨을 알 수 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 구조-유체 연성 효과를 고려할 수 있는 FE/BEM 연성 해석방법을 이용해 선박 엔진룸 구역의 이중저 형상 구조물에 대한 음향방사효율 및 URN 해석을 수행하였다. 상기 구조의 하부 평판 두께와 상부 판의 기진 위치의 강성에 따른 음향방사효율 및 URN 전달함수를 평가한 결과를 초기 설계단계에서 널리 활용되고 있는 음향방사효율 실험식 및 URN 전달함수간이 평가식에 의한 결과와 비교검토하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 이중저 구조의 접수 하부 평판 두께가 증가하면 음향방사효율은 증가한다. 그러나, 상부 평판 기진부의 강성이 음향방사효율에 미치는 영향은 크지 않다.

(2) 초기설계단계에서 URN 해석에 활용되고 있는 Uchida의 음향방사효율 실험식은 저주파수 영역에서 음향방사효율을 정밀 해석 대비 높게 평가한다. 따라서 저주파수 영역에서의 Uchida 실험식에 대한 수정보완이 필요하다고 사료한다.

(3) 동일한 기진력이 이중저 구조 상부 판의 약 지지부에 작용하면 강 지지부 기진 시와 비교하여 높은 주파수 영역에서의 입력파위 증가로 인해 URN 수준이 증가한다.

### 후 기

이 논문은 2010 학년도 동명대학교 연구년지원에 의하여 연구되었음.

### 참 고 문 헌

Bae, S.R. Joen, J.J. & Lee, H.G., 1993. Waterborne Noise Prediction of the Reinforced Cylindrical Shell Using the SEA Technique. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 3(2), pp.155-161.

Choi, S.H. & Kim, J.O., 1996. Structure-Fluid Interaction in a Coupled Vibroacoustic System. *Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Annual Autumn Meeting*, pp.135-141.

IMO, 2010. Noise from Commercial Shipping and its Adverse Impacts on Marine Life. Document MEPC 60/18.

Kim, Kookhyun, 2010. Implementing Framework for Transfer Function-based Ship Underwater Radiated Noise Analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(6), pp.803-807.

Lee, H.W. & Hong, S.W., 2001. Development of Sound Radiation Analysis System Using the Results of Power Flow Finite Element Method. *Journal of Acoustical Society of Korea*, 20(7), pp.21-30.

LMS, 2000. *SYSNOISE 5.5 User Manual*. LMS International.

MSC, 2008. *MSC/NASTRAN User's Manual*. MSC Software Corporation.

Putra, A. & Thompson, D.J., 2010. Sound Radiation from Rectangular Baffled and Unbaffled Plates. *Applied Acoustics*, 71(12), pp.1113-1125.

Su, J.H. & Vasudevan, R., 1997. On the Radiation Efficiency of Infinite Plates Subject to a Point Load in Water. *Journal of Sound and Vibration*, 208(3), pp.441-455.

Uchida, S. Yamada, Y. Hattori, K. & Nakamachi, K., 1986. Prediction of Underwater Noise Radiation from Ship's Hull. *Bulletin of the Society of Naval Architecture of Japan*, No. 686, pp.36-45.

Wang, W.H. Liou, J.H. Sutton, R. & Dobson, B., 2000. Machine Vibration Induced Underwater Acoustic Radiation. *Journal of Science and Technology*, 8(1), pp.30-40.



최성원

김국현

조대승

서규열