

위상차를 갖는 다중 가진 시 구조물의 방사효율 특성 해석

Analysis of the Acoustic Radiation Efficiency on Multi-excitation System with Different Phase

강명환*·이종주*·한승진*·배수룡*·정우진*
Myunghwan Kang, Jongju Yi, Seungjin Han, Sooryong Bae and Woojin Jung

(Received October 14, 2014 ; Revised December 2, 2014 ; Accepted December 2, 2014)

Key Words : Radiation Efficiency(방사효율), Surface Vibration Field(표면진동장), Acoustic Radiation Power(음향방사파워)

ABSTRACT

Acoustic radiation efficiency is one of the important factors in the prediction of underwater radiated noise of ships. A ship has much equipment to operate successful mission in a ship. Most of equipment is running simultaneously as multi-excitation and becomes the source of underwater radiated noise. In many cases of multi-excitation, phase difference between multi-excitation is not considered. Because vibration response under multi-excitation is the vector sum of each single excitation, acoustic radiation efficiency based on surface velocity field can be affected by phase of excitation. In this study, acoustic radiation efficiency of a plate on air and a stiffened cylindrical model in water under multi-excitation with phase difference is investigated.

기 호 설 명

- σ : 방사효율(radiation efficiency)
- W : 표면 법선 변위(normal displacement)
- ω : 주파수(frequency)
- θ : 위상(phase)
- ρ_0 : 외부 유체 밀도, kg/m^3
- c_0 : 외부 유체 음속, m/s
- Φ : 구조 모드(structural mode)

1. 서 론

수중 운동체의 방사소음은 적함의 소나(sonar)에

의한 피탐지 여부와 자함 탑재 소나의 탐지 성능을 결정하는 중요한 요소로 분류되고 있다. 수중 운동체의 방사소음은 기계류에 의한 소음, 유체소음, 프로펠러 소음으로 크게 나눌 수 있으며, 주로 저속에서는 기계류에 의한 방사소음이 주요 소음원이 된다. 기계류에서 발생된 진동에너지는 수중 운동체 표면으로 전달되어 수중 운동체 표면에서 진동에너지가 음향에너지로 전환이 되어 수중방사소음을 야기시킨다. 수중방사효율은 수중 운동체 표면의 진동에너지와 이 진동에너지에 의해 방사된 소음 에너지의 비로 나타내며, 수중방사소음을 해석하고 예측하는데 중요한 지표로 사용되고 있다.

방사효율에 대한 연구는 평판⁽¹⁻³⁾ 및 원통구조물^(4,5) 표면의 진동 정보를 이용하여 방사효율 및 방사소음

† Corresponding Author ; Member, Agency for Defense Development
E-mail : kangmh@add.re.kr
Tel : +82-55-540-6414, Fax : +82-55-542-3737
* Member, Agency for Defense Development

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

을 예측하는 연구들이 주로 수행되었다. 이러한 논문들의 관점은 표면의 진동 정보에 국한되어 있기 때문에, 진동이 발생한 원인인 가진력에 대한 연구는 미미하다. 실제 수중 운동체의 경우에 다양한 탑재장비로 인해 하나의 가진력으로 정의되는 것이 아니라 수 많은 탑재 장비에 의해 속도나 운항 조건별로 가진 특성이 다른 다중 가진의 영향을 받는다. 따라서 각각의 탑재 장비의 작동여부 및 작동 파워 등 작동환경에 의해 다양한 진동 특성을 가지게 된다.

이 논문에서는 각각의 장비를 하나의 가진력으로 모델링할 경우, 장비간 가진력의 위상에 의한 방사효율의 영향을 해석하였다. 이를 위해 평판과 보강 원통형 물수체에 대해 가진력간의 위상차가 존재하는 다중가진 상태를 적용하여 가진력간의 위상차에 의한 방사효율의 영향을 고찰하였다.

2. 위상차를 갖는 다중가진에 의한 공기중 평판의 방사효율 해석

2.1 평판의 이론해석

Fig. 1과 같이 집중하중을 받는 단순 지지된 직사각형의 평판의 운동방정식⁽⁶⁾에 위상을 고려하면 다음과 같다.

$$\nabla^4 W(x,y,\omega) - k_f^2 W(x,y,\omega) = \frac{1}{D} F(\omega) e^{i\theta} \delta(x-x_0) \delta(y-y_0) \quad (1)$$

여기서 θ 는 위상이며, k_f 는 평판의 굽힘 파수 (flexural bending wave number)이며, D 는 $\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$

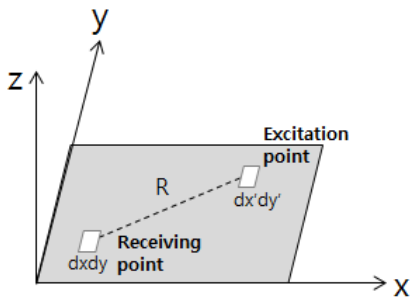


Fig. 1 Coordinates of the plate

으로 굽힘 강성이다. E 는 평판의 탄성계수, ν 는 푸아송비(Poisson ratio), h 는 평판의 두께이다.

단순 지지된 평판은 경계조건을 이용하여, 다음과 같은 평판의 모드 세트⁽⁶⁾로 표현할 수 있다.

$$\Phi_{mn}(x,y) = \frac{2}{\sqrt{L_x L_y}} \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \quad (2)$$

$n = 1, 2, 3, \dots, m = 1, 2, 3, \dots$

여기서, L_x 는 평판의 x 방향 길이, L_y 는 평판의 y 방향 길이이다.

평판의 운동방정식과 모드의 특성을 이용하면, 평판의 응답을 구할 수 있다⁽⁶⁾. 여기에 가진시스템이 선형이라고 가정하고 가진력의 위상을 고려하면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} W(x,y,\omega) &= -\frac{F_1 e^{i\theta_1}}{\rho_s h} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \frac{\Phi_{mn}(x,y) \Phi_{mn}(x_1,y_1)}{\omega^2 - \omega_{mn}^2} \\ &\quad - \frac{F_2 e^{i\theta_2}}{\rho_s h} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \frac{\Phi_{mn}(x,y) \Phi_{mn}(x_2,y_2)}{\omega^2 - \omega_{mn}^2} \\ &= -\left(\frac{F_1 e^{i\theta_1}}{\rho_s h} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \frac{\Phi_{mn}(x_1,y_1)}{\omega^2 - \omega_{mn}^2} \right) \sum_{m=1n=1}^{\infty} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \Phi_{mn}(x,y) \\ &\quad + \left(\frac{F_2 e^{i\theta_2}}{\rho_s h} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \frac{\Phi_{mn}(x_2,y_2)}{\omega^2 - \omega_{mn}^2} \right) \sum_{m=1n=1}^{\infty} \sum_{m=1n=1}^{\infty} \Phi_{mn}(x,y) \end{aligned} \quad (3)$$

위에서 구해진 응답을 이용하여 공간 속도 평균 제곱은 다음과 같이 표현할 수 있다⁽⁶⁾.

$$\langle |\dot{w}^2| \rangle = \frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} |\dot{W}(x,y)|^2 dx dy \quad (4)$$

여기서, (x_1, y_1) 은 가진점 1의 위치이며, (x_2, y_2) 는 가진점 2의 위치이다. ω_{mn} 은 평판의 구조 공진이 발생하는 모드 주파수이고 ρ_s 은 평판의 밀도이다. 평판의 응답은 가진력 1과 가진력 2의 위상에 의한 복소 형태로 표현된다. 구조물의 응답은 모드참여계수(mode partition factor)와 모드로 구성되며, 가진력 1의 응답과 가진력 2의 응답의 벡터 합으로 표현되기 때문에, 공간속도 평균 산출 시 위상에 따른 크기 차이가 발생된다.

레이리 적분식(Rayleigh integral)을 이용하여 표면 속도에 대한 평판의 음압은 다음과 같이 구할 수

있다⁽⁶⁾.

$$p(x,y,0) = \frac{j\omega\rho_0}{2\pi} \int_0^{L_y} \int_0^{L_x} \dot{W}(x',y') \frac{e^{-jkR}}{R} dx' dy' \tag{5}$$

여기서 R 은 평판 표면의 진동 격자와 음원 격자간의 거리로 $R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$ 으로 표현할 수 있다.

평판 표면의 음향 인텐시티를 적분하여 음향방사 파워를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Pi(\omega) = \frac{1}{2} Re \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x,y,0) \dot{W}^*(x,y) dx dy \tag{6}$$

식 (5)에서 산출한 음압을 식 (6)에 대입하면 변위에 의한 음향방사파워 식이 산출된다. 음향방사파워는 응답의 복소 계산 후 실수부분을 계산하기 때문에 가진력의 위상에 의해 차이가 발생된다.

위에서 해석된 음향방사파워와 평판의 공간속도 평균을 이용한 구조입력파워를 이용하여 식 (7)과 이 평판의 방사효율은 다음 식으로 주어진다.

$$\sigma = \frac{\Pi}{\frac{1}{2} \rho_0 c_0 L_x L_y \langle |\dot{W}|^2 \rangle} \tag{7}$$

가진력의 위상에 의해 음향방사파워와 공간속도 평균값에 영향을 주어 결국 방사효율 또한 위상에 따라 차이가 발생된다.

2.2 평판 방사효율 해석결과

가진력의 위상에 의한 방사효율의 영향을 알아보기 위해, 1 m×0.5 m크기의 공기중 평판 모델을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 두 개의 가진력 중 가진력 1은 (0.5, 0.26), 가진력 2는 (0.8,0.26) 위치에서 가진력 크기가 1 N으로 동등하게 들어간다고 가정하고 가진력 1은 위상을 0°으로 고정하고 가진력 2의 위상이 0~180°으로 변할 때 공간평균속도, 음향방사파워, 방사효율을 계산하였다. 주파수 범위는 100~1000 Hz 범위로 100 Hz 간격으로 수행하였다. 상기 해석에 있어서 평판의 재질은 강철로서 밀도 7850 kg/m³, 탄성계수 210 GPa, 푸아송비 0.28이며, 두께는 10 mm이다. 외부 유체는 공기로 밀도

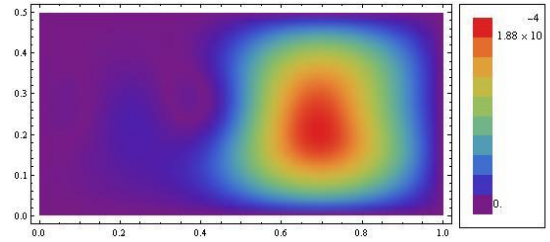


Fig. 2 Surface velocity field of the plate model (300 Hz, phase 0°)

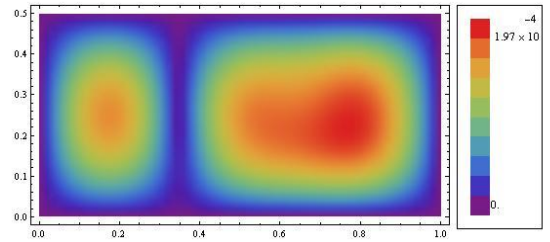


Fig. 3 Surface velocity field of the plate model (300 Hz, phase 20°)

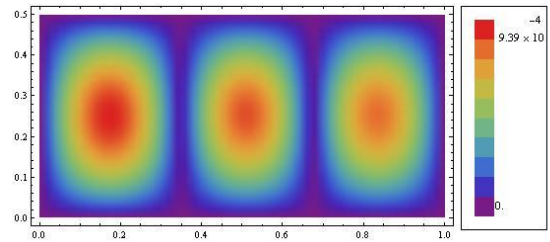


Fig. 4 Surface velocity field of the plate model (300 Hz, phase 180°)

1.225 kg/m³, 음속 340 m/s이다. 평판의 4변은 단순 지지 조건(simply supported condition)으로 가정하였다.

Figs. 2~4는 주파수 300 Hz에서의 가진력 위상이 0°, 20°, 180° 경우의 평판의 위상차에 따른 표면 법선 속도장(normal surface velocity field) 크기를 나타낸다. 식 (3)에서 진동장은 각 가진력에 의한 응답의 벡터 합으로 표현되기 때문에, 가진력의 위상 차이에 의해 진동장의 형태 및 크기가 다를 수 확인할 수 있다.

Fig. 5는 가진력 2의 위상이 0°, 30°, 60°, 120°, 150°, 180°인 경우의 공간 평균속도의 크기를 비교

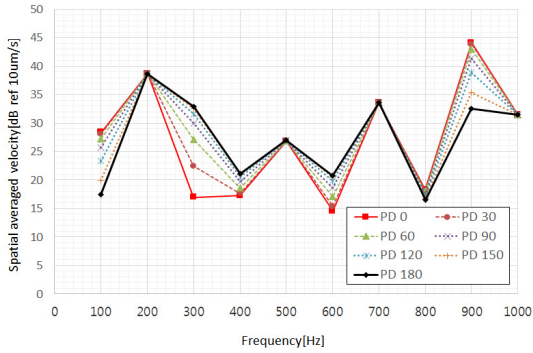


Fig. 5 Spatial averaged velocity due to phase difference(0~180°) of forces

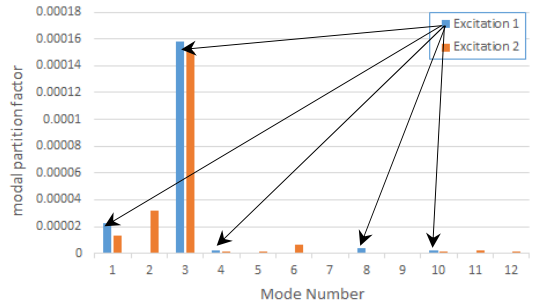


Fig. 7 Modal partition factor of excitation 1 and excitation 2(300 Hz)

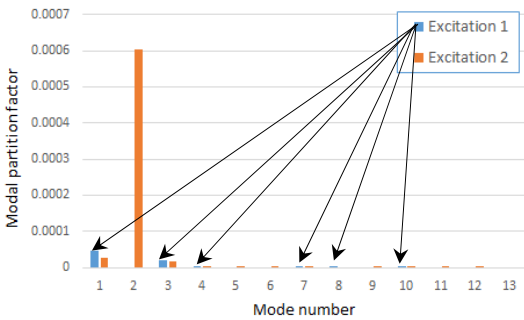


Fig. 6 Modal partition factor of excitation 1 and excitation 2(200 Hz)

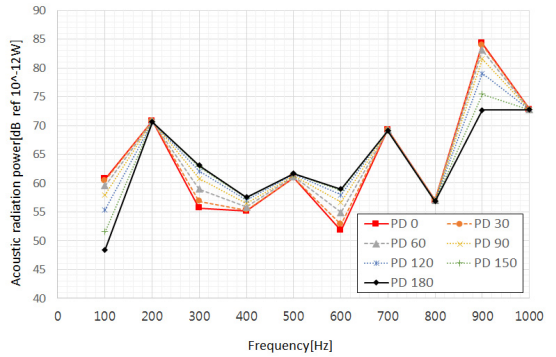


Fig. 8 Acoustic radiation power due to phase difference(0~180°) of forces

한 결과이다. 식 (3)에서와 같이 진동장은 각 가진력에 의한 응답의 벡터 합으로 표현되기 때문에, 공간 평균속도의 크기의 최소값 및 최대값은 간 위상차가 0° 혹은 180°일 때 발생된다. Fig. 6과 7은 200 Hz와 300 Hz의 가진점 1과 가진점 2의 모드참여계수를 비교한 그림이다. 가진력의 위상 변화는 모드참여계수에 영향을 주며 공간속도평균은 벡터의 크기로 표현되기 때문에, 가진력간의 모드참여계수가 비슷할수록 진동장은 가진력 위상에 변화에 민감해지고, 공간평균속도의 크기 차이가 발생한다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 가진력 2의 위상이 0°, 30°, 60°, 120°, 150°, 180°인 경우의 음향방사파워와 방사효율의 비교한 결과이다. 가진력 2의 위상에 따라 변경된 진동장에 의해 음향방사파워와 방사효율의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 위상에 따른 응답의 크기에 따라 방향방사파워 및 방사효율은 가진력 2의 위상이 0° 혹은 180°인 경우에 최대값 및 최소값이 발생됨을 확인할 수 있다.

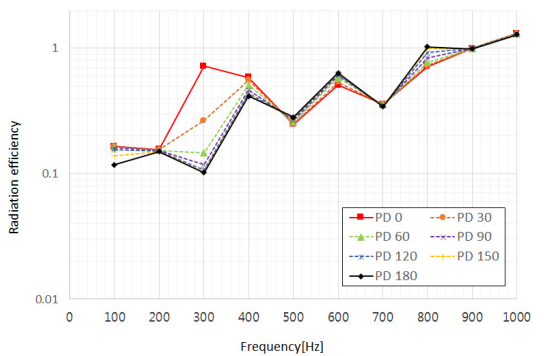


Fig. 9 Radiation efficiency due to phase difference (0~180°) of forces

3. 위상차를 갖는 다중 가진시 보강 원통형 물수체의 방사효율 영향

3.1 방사효율의 수치해석

이 장에서는 복잡한 구조로 구성되어 있는 수중

운동체의 탑재 장비의 위상의 변화가 방사효율에 미치는 영향을 분석하였다. 수중 운동체의 수중방사효율에 대해 위상 변화에 대한 방사효율의 변화에 고찰하기 위해 Fig. 10(a)와 같은 내부구조물이 있는 보강 원통형 구조물을 이용하여 해석을 수행하였다. 수치해석은 FEM/BEM 방법을 이용하기 위해, 범용 유한요소 해석 S/W인 ABAQUS V6.9⁽⁷⁾를 이용하여 구조-유체 연성 진동해석을 수행하고, 구해진 보강 원통형 구조물의 표면의 진동장을 범용 경계요소 해석 S/W인 SYSNOISE Rev 5.6⁽⁸⁾에 입력하여 음향 방사파워 및 수중방사효율을 산출하였다.

보강 원통형 구조물은 길이 4 m, 지름 1.35 m, 원주방향 두께는 8 mm, 양 막음판 두께는 100 mm, 보강재 간격은 0.4 m이다. 수치해석용 모델 내부에는 내부구조물, 마운트용 블록 및 보강재가 설치되어 있다. 이를 수치해석을 수행하기 위해, 내부구조물은 빔(beam) 모델을 구성하였고 내부구조물과 마운트용 블록은 강체연결조건을 이용하여 해석하였다. SYSNOISE를 이용한 음향해석은 direct exterior unbaffle method의 해석방법을 이용하였다. 수치해석 모델의 표면에 위치한 노드는 총 6600개이며, 수치적 오류를 줄이기 위해 유한요소해석과 경계요소해석의 노드 위치 및 수는 동일하다. 보강 원통형 구조물 재질은 강철이며 밀도 7850 kg/m³, 탄성계수 210 GPa, 푸아송비 0.28이다. 외부 유체는 물로 밀도 1000 kg/m³, 음속 1500 m/s이다.

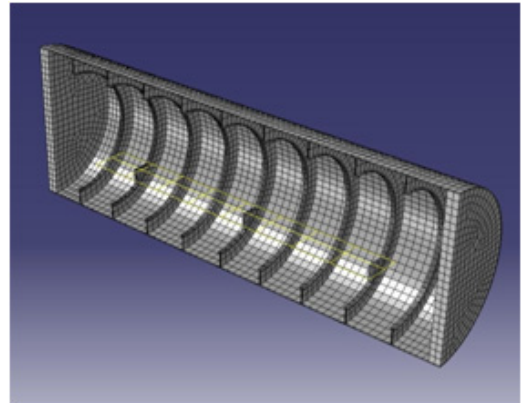
탑재장비의 가진력 위상차에 의한 수중방사효율 영향을 알아보기 위해, 이 연구에서는 탑재장비의 작동력을 집중하중으로 가정하였다. 가진력의 위치는 Fig. 10(b)와 같다. 가진조건은 각 가진력 크기는 1N으로 동일하고, 가진점 #1은 위상을 0으로 고정하고 가진점 #2를 20°, 45°, 120°, 180°로 변경하여 50~2000 Hz범위에서 50 Hz 간격으로 총 20개 주파수에 대해 가진력 위상 변화에 따른 진동 및 음향해석을 수행하였다.

3.2 보강 원통형 물수체 방사효율 해석결과

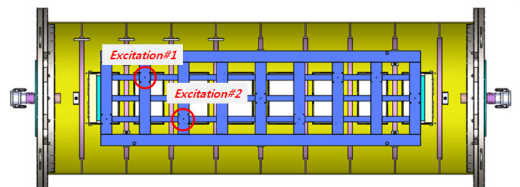
Figs. 11~14는 가진 주파수 800 Hz에서의 가진력의 위상차에 따른 보강 실린더모델 표면의 진동장을 이차원 형태로 나타낸 결과이다. 그림에서 가로방향은 보강 실린더모델의 길이 방향이고 세로방향은 보강 실린더모델의 원주방향이다. 앞장의 평판모델의

결과와 유사하게 식 (3)에서 진동장의 각 가진력의 모드참여계수의 벡터 합으로 표현되기 때문에, 가진력의 위상 차이에 의해 진동장의 형태 및 크기가 다르게 나타난다.

Fig. 15는 50~2000 Hz 범위로 50 Hz간격으로 가진력 #2의 위상이 0°, 45°, 120°, 180°일 때의 평균 공간속도를 계산한 결과이다. 공간 평균속도의 차이는



(a) Abaqus modeling for vibration analysis



(b) Excitation point

Fig. 10 The numerical model

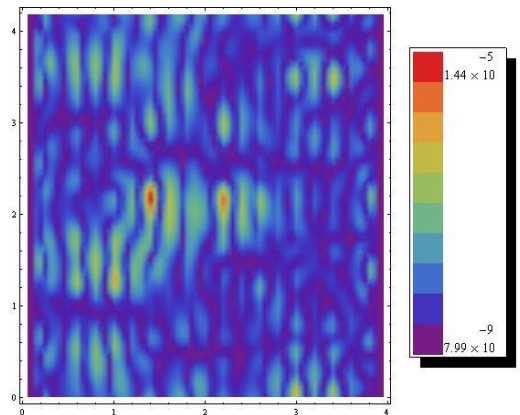


Fig. 11 Vibration velocity field of the cylinder model (800 Hz, PDO)

위상에 따른 진동장 크기 변화에 기인한다. 가진력 위상에 의한 공간 평균속도간의 주파수별 경향은 유사하지만, 수치적으로 볼 때 다소 차이가 발생하며 주파수 1550 Hz에서 최대 5 dB정도의 차이가 발생하였다.

Fig. 16은 가진력 #2의 위상이 0°, 45°, 120°, 180° 일 때의 음향방사파워를 나타낸다. 가진력 #2의 위상에 의한 진동장에 의한 음향방사파워이기 때문에 공간평균속도의 값이 유사하더라도 진동장의 형태가 다를 경우에 음향방사파워가 다르게 나타난다.

Fig. 17은 공간평균속도와 음향방사파워를 이용하여 방사효율을 계산한 그림이다. 이 보강 원통형 구조물 해석의 경우, 가진력 위상 변화에 의해 10배정도

차이가 나는 주파수 구간이 발생하였다. 이는 다중 가진 시스템에서의 방사효율은 가진력과 가진위치가

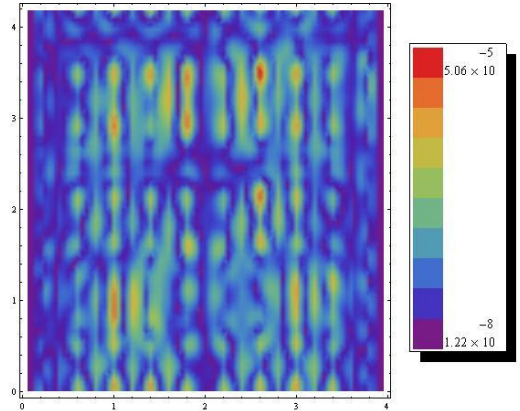


Fig. 14 Vibration velocity field of the cylinder model (800 Hz, PD180)

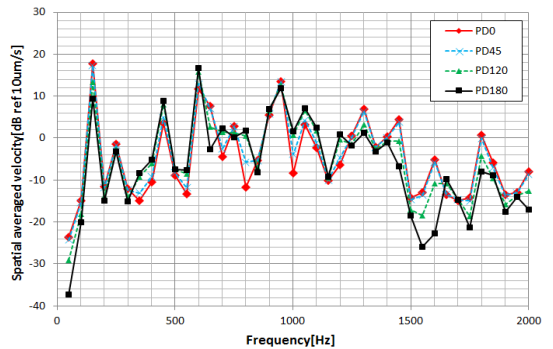


Fig. 15 Spatial averaged velocity due to phase difference of forces

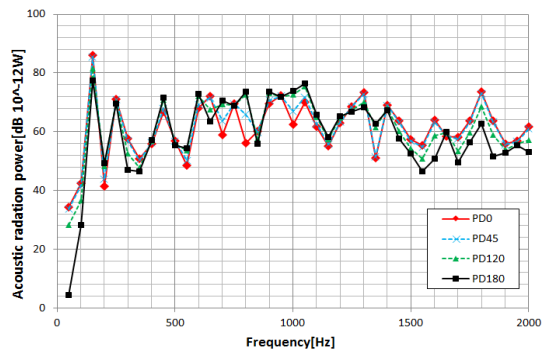


Fig. 16 Acoustic radiation power due to phase difference of forces

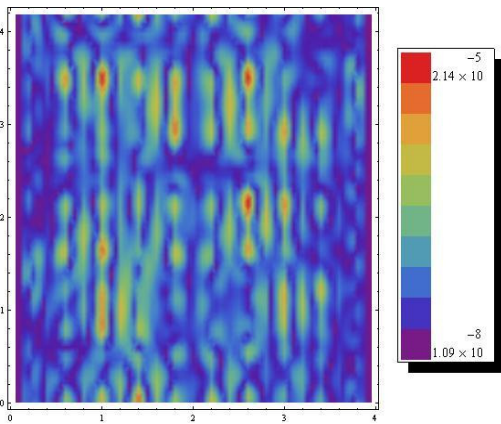


Fig. 12 Vibration velocity field of the cylinder model (800 Hz, PD45)

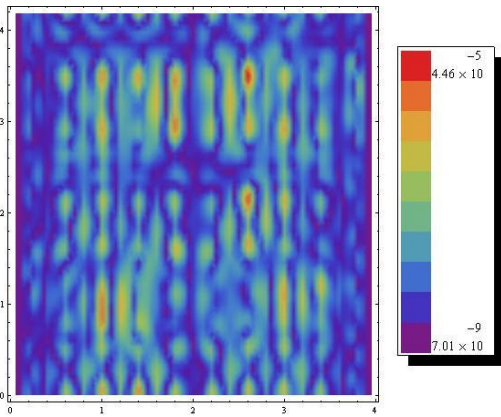


Fig. 13 Vibration velocity field of the cylinder model (800 Hz, PD120)

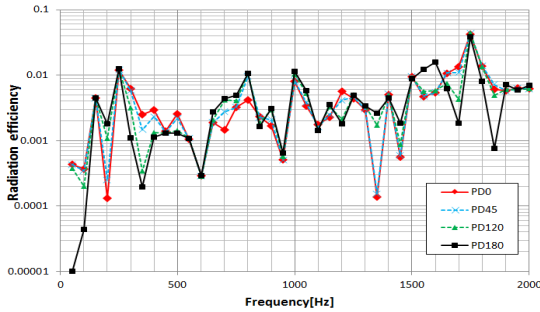


Fig. 17 Radiation efficiency due to phase difference of forces

동일하더라도 가진력의 위상 변화로 인해 방사효율이 다르게 계산될 수 있음을 뜻한다.

5. 결 론

이 연구에서는 다중 가진 시 위상차에 따른 방사효율의 영향을 알아보기 위해, 단순 평균 모델과 보강 원통형 물수체 모델을 이용하여 다중 가진력 위상차에 따른 공간평균속도, 음향방사파워, 방사효율에 대해 해석을 수행하였다.

보강 원통형 물수체 해석모델에서 가진력간 위상 변화에 의해 평균 공간속도가 최대 5 dB정도의 차이가 발생하였으며, 이러한 변화된 진동장에 의해 방사효율에 최대 10배정도 차이가 발생하였다. 해석을 통해, 구조물의 응답은 각 가진력에 의한 응답의 벡터 합으로 표현되므로 가진력의 위상에 따라 진동장 형태나 크기가 다르게 나타나고 있어, 다중 가진력의 위상차가 방사효율에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

이 연구를 통해 함정에 탑재된 다수의 장비들이 탑재 위치와 출력이 동일하더라도 각 탑재장비에 의한 가진력간의 위상 변화가 공간평균속도, 음향방사파워, 방사효율에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

References

(1) Nelisse, H., Beslin, O. and Nicolas, J., 1998, A Generalized Approach for the Acoustic Radiation from a Baffled or Unbaffled Plate with Arbitrary Boundary Conditions, Immersed in a Light or Heavy Fluid, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 211, No. 2, pp.

207~225.

(2) Kim, H. S., Kim, J. S., Kim, B. K., Kim, S. R. and Lee, S. H., 2012. An Analysis of Radiation Efficiency of the Simply Supported Plate in Water with Consideration of Low Order Cross Modest, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 22, No. 8, pp. 800~807.

(3) Snyder, S. D. and Tanaka, N., 1995, Calculating Total Acoustic Power Output Using Modal Radiation Efficiencies, *J. Acoust. Soc. of America*, Vol. 97, No. 3, pp. 1702~1709.

(4) Lin, T. R., Mechefske, C. and O'Shea, P., 2011, Characteristics of Modal Sound Radiation of Finite Cylindrical Shells, *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 133, pp. 051011-1~051011-6.

(5) Wang, C. and S Lai, J. C., 2000, The Sound Radiation Efficiency of Finite Length Acoustically Thick Circular Cylindrical Shells under Mechanical Excitation I: Theoretical Analysis, *Journal of Sound and Vibration*, Vol, 232, No. 2, pp. 431~447.

(6) Williams, Earl G, 1999, *Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*, Academic Press.

(7) SIMULIA, 2011, ABAQUS 6.9 Documentation.

(8) LMS, 2003, LMS SYSNOISE Rev 5.6 Users Manual.



Myunghwan Kang is received a B.S. degree from Kyungpook National University in 2007, M.S. degree from Postech in 2009. He is currently a researcher at the Agency for Defense Development, Korea. His research interests are underwater acoustic stealth technologies.



Woojin Jung is received his B.S. and M.S. degrees from Korea Aerospace University in 1985 and 1987 respectively, a Ph.D. degree from Pusan National University. He is currently a principal researcher at the Agency for Defense Development, Korea. His research interests are under-

water acoustic stealth technologies.