

선체진동신호를 이용한 3차원 수중방사소음 패턴 산출에 대한 수치해석 연구

A Numerical Analysis Study on the Estimation of the 3D Underwater Radiated Noise Pattern using the Hull Vibration Signals

이 종 주* · 강 명 환* · 한 승 진* · 배 수 룡* · 김 재 호* · 정 우 진*

Jong-Ju Yi, Myung-Hwan Kang, Seung-Jin Han, Soo-Ryong Bae,

Jae-Ho Kim and Woo-Jin Jung

(Received August 4, 2014 ; Revised September 26, 2014 ; Accepted September 30, 2014)

Key Words : 3D Underwater Radiated Noise Pattern(3차원 수중방사소음 패턴), Hull Vibration Signal(선체 진동 신호), Far-field Acoustic Power(원거리 음향 파워), Numerical Model(수치 모델)

ABSTRACT

In this study, a numerical estimation method for 3D underwater radiated noise pattern using hull vibration and total acoustic power of the vibrating structure in the far-field is proposed. The underwater radiated noise pattern is known to be predicted using the vibration signals and radiation efficiency of each surface patch. But it is very difficult to know radiation efficiency of each surface patch which is one of important factors to calculate the 3D underwater radiated noise pattern. Instead of using radiation efficiency of each patch, the underwater radiated noise level is modified with the total acoustic power of the vibrating structure. The suggested estimation method for underwater radiated noise pattern is discussed with numerical model.

1. 서 론

수중방사소음은 함정의 선체 진동에 의한 구조 소음, 선체 외부표면과 주변유체간의 상호작용으로 인한 유체소음, 추진기 회전함에 따라 주변유체에 영향을 주면서 작용하는 추진기 소음 등으로 나눌 수 있다. 이중 구조소음은 함정에 탑재된 장비 진동 및 소음에 의하여 함정 선체를 진동시켜 발생하는 소음이다. 따라서 기계류의 작동상태에 따라 서로 다른 선체 표면진동장이 발생하며, 이로 인하여 수중방사소음이 발생 되므로 이에 대한

해석이 필요하다.

수중방사소음에 대한 수치해석 기법으로는 경계 요소법(boundary element method), 유한요소법(finite element method) 및 통계적 에너지 기법(statistical energy analysis)이 있으나, 이 기법들을 실 함정에서 측정되는 진동신호와 연결하여 적용하는 것은 한계가 있다.

표면진동장을 이용한 수중방사소음 예측을 위하여 방사효율을 이용한 방법들에 대해서 연구가 진행되어 왔다⁽¹⁻³⁾. 이때 사용된 방사효율은 방사소음의 방향성을 고려할 수 없다. Maidanik⁽¹⁾은 공기중에서 진동하는 평판의 방사소음 해석연구를

* Corresponding Author ; Member, Agency for Defense Development
E-mail : leongreal@add.re.kr
Tel : +82-55-540-6415

** Member, Agency for Defense Development

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

진행하여 방사효율식을 도출하였고, Uchida⁽²⁾는 실험을 통하여 접수된 평판의 방사효율 실험식을 제안하였다. 그러나 Maidanik이 제시한 방사효율은 저주파에서 접수효과를 고려하지 않아 방사효율이 크게 나타나는 경향이 있으며, Uchida가 제시한 방사효율을 이용한 방사소음은 저주파 대역에서 과도 예측되는 경향이 있는 것으로 알려져 있다⁽³⁾. 그리고 Jung et al.⁽⁴⁾들은 경계요소 모델을 이용한 방사효율 산출방법 등을 제안하였다. 한편, Takaaki⁽⁵⁻⁷⁾는 선체표면을 다수의 표면패치와 방사효율을 이용하여 방사패턴을 산출하는 기법을 제안하였으나, 각 표면패치별 방사효율을 구하는 것은 현실적으로 매우 어렵다.

이 논문에서는 선체진동신호와 방사효율이외에 원거리 음향 파워를 이용한 3차원 수중방사소음 패턴 산출방법을 제안하였으며, 제안된 방법에 대한 타당성은 수치모델을 이용하여 확인하였다.

2. 3차원 수중방사소음 패턴 산출 알고리즘

2.1 지배방정식

원음장 패턴 및 크기를 예측하기 위하여 Takaaki^(5,6)는 진동하는 평면을 피스톤음원이라고 가정하고 구조물 표면을 몇 개 구역을 나눈 패치별 방사효율과 표면진동장의 속도 크로스 스펙트럼을 이용하여 원음장 해석을 진행하였다. 자유음장 내부에서 헬름홀츠 적분방정식은 식 (1)과 같다.

$$p(r') = \iint_{S_0} \left\{ G(r, r') \frac{\partial(p(r))}{\partial n} - p(r) \frac{\partial(G(r, r'))}{\partial n} \right\} dS_0(r) \tag{1}$$

식 (1)의 그린함수는 $G(r, r') = \frac{e^{ikR}}{4\pi R}$ 이다. 그린함수의 미분식은 식 (2)와 같이 간략화 할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial n} G(r, r') \approx -\frac{1}{4\pi} \frac{ike^{ikR}}{R} \cos\beta \tag{2}$$

R과 β에 대한 정의는 Fig. 1에 나와 있다. 식 (1)을 이산화 하면 식 (3)⁽⁵⁾과 같은 형태로 쓸 수 있다.

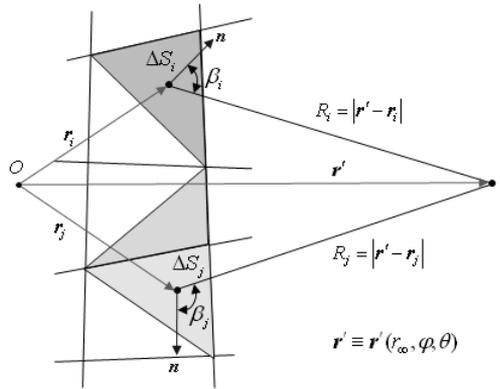


Fig. 1 The definition of surface patch and far field point

$$p_\infty(r') \approx -\frac{ik}{4\pi} \sum_{i=1}^N (1 + \cos\beta_i) p_i \frac{e^{ikR_i}}{R_i} \Delta S_i \tag{3}$$

식 (3)에서 표면음압 p_i 를 정확히 산출해야 정도 높은 원음장 음압계산이 가능하다. 그러나 현실적으로 복소수형태의 표면음압 p_i 를 이용하는 것보다는 실수값을 이용하는 것이 편리하다. 이를 위하여, 식 (3)의 공액 복소수(conjugate)항을 곱하여 정리하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다⁽⁵⁾.

$$|p_\infty(r')|^2 = \frac{k^2}{16\pi^2} \sum_{i,j} \frac{\psi_{ij}}{2R_i R_j} [p_i \bar{p}_j e^{ik\delta_{ij}} + \bar{p}_i p_j e^{-ik\delta_{ij}}] \Delta S_i \Delta S_j \tag{4}$$

위 식에서 $\psi_{ij} = 1 + \cos\beta_i + \cos\beta_j + \cos\beta_i \cos\beta_j$, $\delta_{ij} = R_i - R_j$ 이다.

수중구조물 표면의 각 패치가 피스톤 음원(piston source)라고 가정한다면, 식 (5)와 같은 관계가 될 수 있다^(5,6).

$$\bar{p}^2 = \frac{\rho_0^2 c_0^2 \sigma}{2\pi} \bar{v}^{-2} \int_S \left(\frac{D dx dy}{x^2 + y^2 + \epsilon^2} \right) \approx \rho_0^2 c_0^2 \sigma \bar{v}^{-2} \tag{5}$$

여기에서 $D = \cos\theta$ 이며 방향성(directionality)를 나타내며 방사효율은 $\sigma = (W_{ac} / \rho_0 c_0 S \bar{v}^2)$ 이다. 이때, \bar{p} 는 패치음압, \bar{v} 는 평균 속도, W_{ac} 는 원음장 방사 파워이다. 식 (5)를 식 (4)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$|p_{\infty}(r')|^2 \approx \frac{\rho_0^2 c_0^2 k^2}{16\pi^2} \sum_{i,j}^N \frac{\psi_{ij}}{R_i R_j} [Re(S_{ij})\cos(k\delta_{ij}) - Im(S_{ij})\cos(k\delta_{ij})] \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \Delta S_i \Delta S_j \quad (6)$$

이때 $S_{ij} = v_i v_j$ 이며, σ_i, σ_j 는 표면패치 i, j 의 방사효율이다.

2.2 원음장 패치 설정

식 (6)을 이용한 원음장 예측시, 원음장 위치는 구조물 중심점을 기준으로 반경 100 m인 구로 설정하였다. 이 논문에서 해석하고자 하는 최저 주파수는 200 Hz로써 파장이 7.5 m이다. 따라서 원음장을 산출하는 위치가 반경 100 m인 구표면인 경우, 200 Hz 파장에 비해 약 13배 이상 떨어져있기 때문에 수치해석을 진행한 모든 주파수영역에서 원음장영역이라 간주할 수 있다⁽⁸⁾. 원음장을 예측하는 영역은 5도 간격 원음장 포인트로 나누었다.

원음장 패치는 Fig. 2와 같이 일정 영역내에 있는 원음장 포인트에 대한 음향에너지를 파워평균하고 이를 대표값으로 나타내었다. 구조물의 표면패치 설정과 마찬가지로 원음장에서도 일정구역 내에 있는 원음장 포인트에서의 음압들을 파워평균하여 원음장 패치의 대표음압으로 나타내었다. 각 원음장 패치는 고각/방위각 30°인 지점을 분할하였다.

2.3 3차원 수중방사소음 패턴 산출

식 (6)을 살펴보면, 각 표면패치의 방사효율 σ_i, σ_j 에 대한 정보가 필수적이다. 그러나 표면패치별 방사효율을 실험적 혹은 수치적으로 산출하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 그러나 진동신호를 이용한 3차원 수중방사소음 패턴 산출에 식 (6)을 적용하는 것은 가능하나, 수중방사소음 패턴의 크기는 식 (6)에 나타난 표면패치 방사효율에 따라 크게 좌우된다.

앞서 언급한 바와 같이 신뢰성 높은 각 표면패치별 방사효율을 적용하는 것은 매우 어렵기 때문에 방사패턴의 크기를 보정할 다른 방법이 필요하다. 이를 위하여 이 논문에서는 일반적으로 수중방사소음분야에서 많이 사용하고 있는 원거리 음향 파워를 적용하는 방법을 제안하였다. 이는 전체 원거리 음

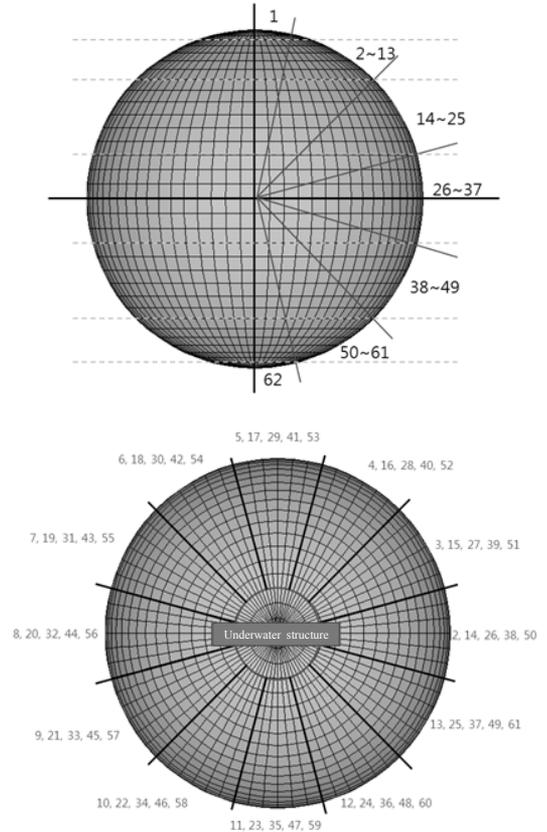


Fig. 2 The far field patch and point

향 파워는 각 원음장 패치 파워의 총합과 같다는 원리를 이용한 것이다.

식 (7)은 평면파 가정을 이용한 원거리 음향 파워 산출식으로써, 원거리 음향 파워는 음압의 제곱에 비례함을 알 수 있다.

$$W_k = \frac{1}{2} \int_S Re(pv_n^*) ds = \frac{1}{2} \int_S \frac{|P_{peak}|^2}{\rho c} ds \quad (7)$$

또한 전체 원음장 음압파워는 아래와 같다.

$$W_{total} = \sum_k \overline{W}_k \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)을 이용하여 원음장 패치 k 에 대해 음압파워비는 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$PR_k = \frac{W_k}{W_{total}} \quad (9)$$

한편, BEM 해석을 통하여 산출한 전체 원음장 음압파위를 $\overline{W}_{total, BEM}$ 이라고 하고, 식 (6)을 이용하여 산출된 음압을 이용한 원음장 패치 k 에서의 음압파위를 $\overline{W}_{DHIE, k}$ 라 하면, $W_{DHIE, k}$ 로 다음과 같이 된다.

$$W_{DHIE, k} = PR_k \times \overline{W}_{total, BEM} \tag{10}$$

식 (10)과 식 (7)을 이용하면 원음장 패치 k 번째의 음압을 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(P_{DHIE, k})^2 = \frac{\rho c W_{DHIE, k}}{S_k} \tag{11}$$

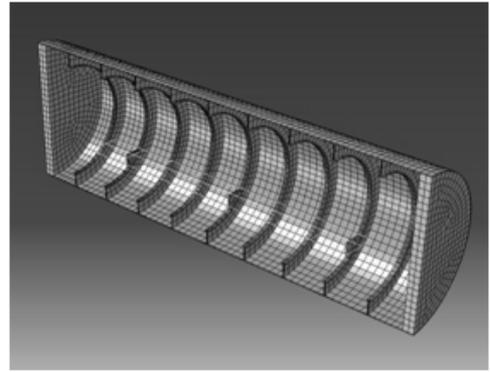
이때 식 (6)을 이용한 수중방사소음 패턴 산출시 표면패치 방사효율 $\sigma_i = \sigma_j = 1$ 로 하였다. 일반적으로 방사효율은 대상 구조물 전체에 대하여 주파수별 하나의 값으로 나타내므로 이 논문에서 사용한 표면패치별 방사효율값은 동일한 값을 적용하여 표면패치 방사효율값을 1로 하였다.

3. 수치해석 모델

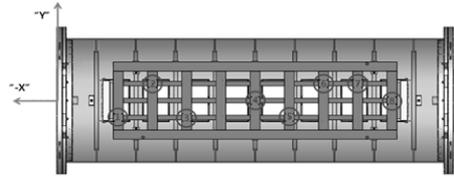
Fig. 3은 이 연구에 사용된 수치해석 모델 및 가진지점이다. 수치해석모델은 길이 4 m, 지름 1.35 m, 원주방향 두께는 8 mm, 양 막음판 두께는 100 mm로 설정되어 있다. 수치해석용 모델 내부에는 내부구조물과 강체마운트, 강체마운트용 블록 및 보강재가 설치되어있다. 보강대 간격은 0.4 m이다.

표면진동장 해석은 FEM기반인 ABAQUS를 이용하였다. ABAQUS에서 유체접수효과(fluid loading effect)가 고려된 표면진동장 해석결과를 BEM기반인 SYSNOISE의 속도경계조건으로 입력하여 BEM을 이용한 원음장 해석을 진행하였다. BEM해석시 입력한 진동장 정보는 수중구조물의 외부 표면에서 해석한 결과이다. BEM 해석시 direct method를 사용하였다. 수치해석 모델의 표면에 위치한 노드는 총 6600개이다. FEM해석과 BEM해석에서 표면노드의 위치정보는 동일하다. FEM해석시 가진 형태는 Sine파이며, 가진주파수는 10개로 200, 300, 450, 550, 650, 700, 850, 950, 1250, 1350 Hz이다.

이 논문에서 제시한 기법을 검증하기 위하여 막음판을 제외한 수중구조물의 몸통 표면을 Fig. 4(a)와 같이 64개 패치로 나누었다. Fig. 4(b)는 수중구



(a) Abaqus modeling for vibration analysis



(b) Excitation point

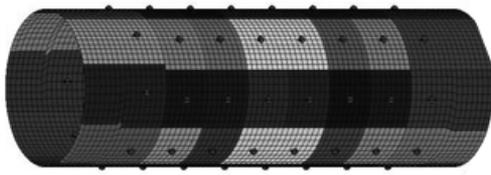
Fig. 3 The numerical modeling

Table 1 The numerical analysis of surface vibration

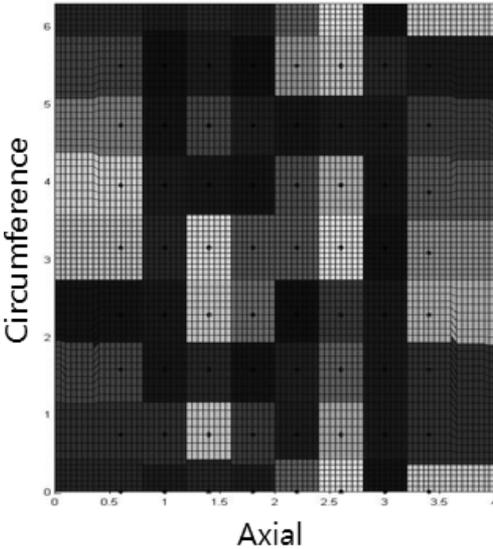
| Case | Excitation pont |
|--------|-----------------|
| Deck 1 | Point 1 |
| Deck 2 | Point 2 |
| Deck 3 | Point 3 |
| Deck 4 | Point 4 |
| Deck 5 | Point 5 |
| Deck 6 | Point 6 |
| Deck 7 | Point 7 |
| Deck 8 | Point 8 |

조물의 원주방향(8지역)으로 표면패치를 나타낸 그림이며, 각 패치의 중심부근에 있는 점이 표면패치의 속도를 대표하는 노드 위치이다. 표면패치는 보강대를 기준으로 나누었으며, 막음판부분에 있는 패치의 축방향길이는 0.8 m, 보강대 사이에 있는 패치의 축방향 길이는 0.4 m이다. 막음판 부근에 있는 표면패치 16개의 축방향 길이는 0.8 m이다. 원주방향은 총 8지역으로 나누었고, 대표노드의 원주방향 거리는 45° 간격, 0.53 m이다.

가진은 8지점을 각기 가진하였다. 해당위치는 Fig.



(a) The underwater surface patch



(b) The constitution of surface patch

Fig. 4 The numerical model for underwater structure

3(b)에 표시하였다. 가진포인트 위치에 따라 수직방향으로 1N의 힘을 수중구조물 내부에 있는 내부구조물에 인하여 해석을 진행하였고, 각 해석결과를 Table 1과 같이 deck1~8로 명하였다.

이 연구에서 사용된 알고리즘을 검증하기 위하여 BEM해석결과를 62개 원음장패치별 음압으로 파워평균한 결과와 식 (6)과 BEM의 해석결과중 원거리 음향 파워를 이용한 원음장 예측결과를 상호비교하여 이 연구의 알고리즘에 대한 타당성을 검토하였다.

4. 원음장 예측결과 비교

Figs. 5~7은 수치해석결과 deck1, 4, 8의 표면진동장을 이용한 결과로 BEM(실선)과 이 논문에서 제시한 기법(점선)으로 해석한 원음장 예측기법 결과를 비교한 그림이다. 200~700 Hz까지 각 원음장 패치별로 BEM 해석결과와 DHIE 방법에 의한 해석결

과가 최대 12 dB까지 차이가 있으나, 경향은 유사하게 나타내고 있음을 알 수 있다.

상대적으로 고주파수에 속하는 850 Hz부터 일부 원음장 패치에서 BEM해석결과와 DHIE 해석결과간 차이는 저주파 대역보다 다소 크게 발생하였다.

Takaaki⁽⁵⁾에 의하면 표면진동장 크로스스펙트럼을 이용한 원음장 음압산출시 표면진동장 정보를 추출하는 위치간 거리가 파장당 최소 2개 이상되는 것을 추천하고 있다. 이 논문에서 표면진동장 정보 추출 위치 간격이 가장 큰 경우는 0.8 m로써, 850 Hz의 파장이 1.8 m임을 고려할 때 850 Hz 이상부터는 원음장 패턴 예측에 차이가 발생할 수 있음을 예상할 수 있다.

또한, 일부 원음장 패치에서 차이가 난 이유는 표면패치별 진동장을 산출할 때, 정해진 위치에서 진동장을 산출해야하므로 표면패치 전체를 대표할 수 있는 진동값을 선정하지 못했기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 8과 Fig. 9는 deck1~8까지 각 해석별로 원음장 패치별 BEM해석과 DHIE해석의 차이에 대한 평균값 및 편차를 나타낸 그래프이며, 평균값은 식 (12)와 같이 계산하였다.

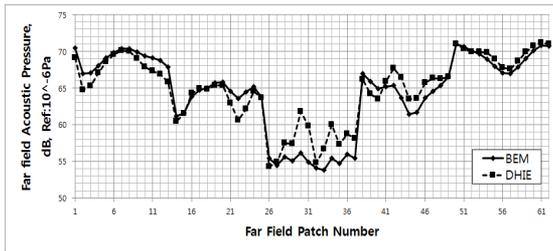
$$Mean = \frac{\sum |P_{BEM} - P_{DHIE}|}{N} \tag{12}$$

이 결과 최대 약 4.5 dB 수준의 평균 오차를 보이고 있으며, 일부 가진위치를 제외한 평균 오차는 고주파수로 갈수록 오차의 폭은 커지는 경향을 나타내고 있다. 이는 표면패치별 진동장을 나타내는 위치는 고정되어 있으나, 고주파수로 갈수록 주파수의 파장이 작아지므로 파장당 거리가 짧아져서 발생된 것으로 추정된다.

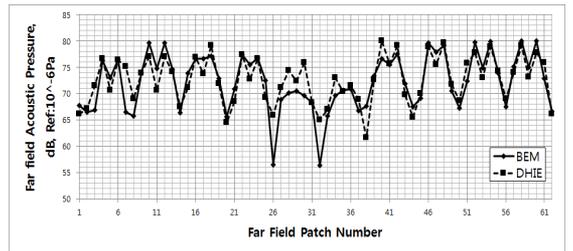
5. 결 론

이 논문에서는 표면진동장의 수치해석결과와 식 (6)을 이용하여 방사패턴을 예측하고, 원거리 음향 파워를 이용하여 원음장 음압크기 보정방법을 제시하였고 수치해석을 통하여 이 논문에서 제시하는 방사패턴 예측기법의 적용 가능성을 확인하였다.

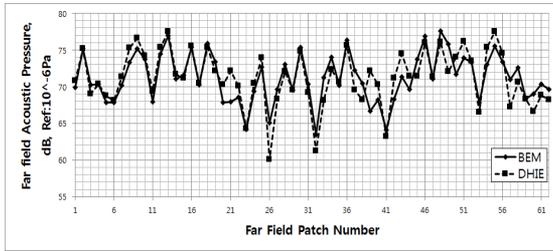
이 결과 파장당 2개 이상의 속도정보가 들어가는 200~700 Hz 해석결과를 보면 SYSNOISE 해석결과와 차이가 평균값 기준 최대 약 4.5 dB로 나타나 원



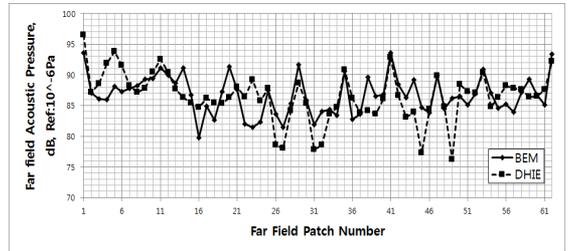
(a) 200 Hz



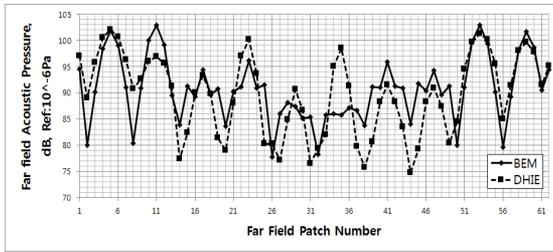
(f) 700 Hz



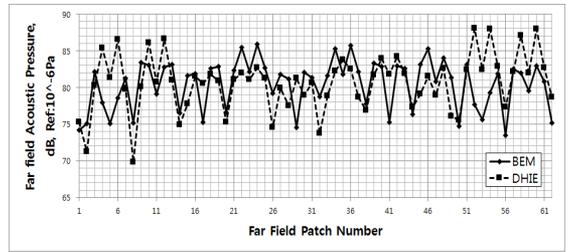
(b) 300 Hz



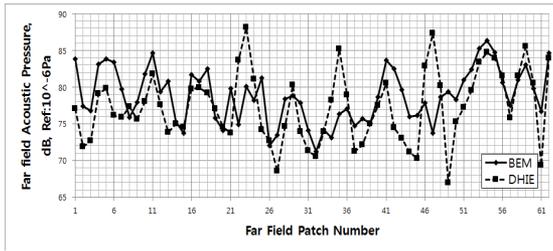
(g) 850 Hz



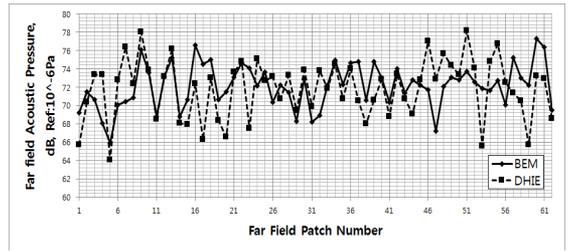
(c) 450 Hz



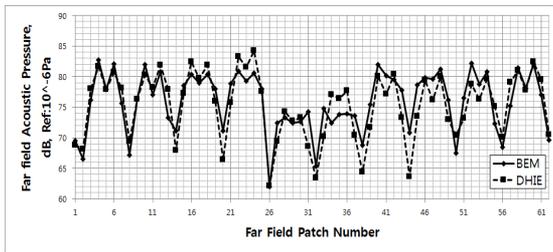
(h) 950 Hz



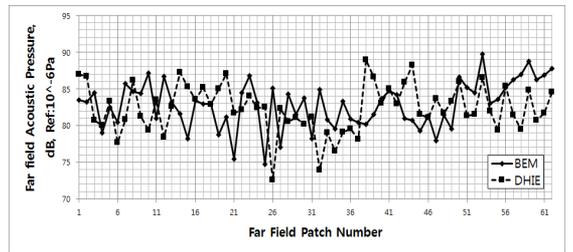
(d) 550 Hz



(i) 1250 Hz

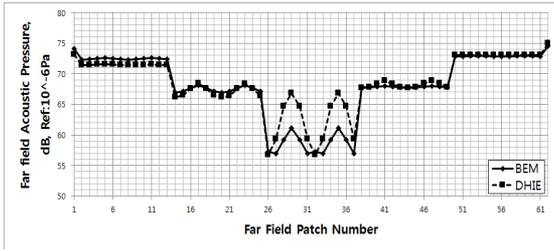


(e) 650 Hz

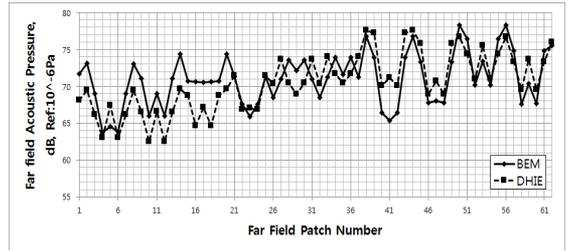


(j) 1350 Hz

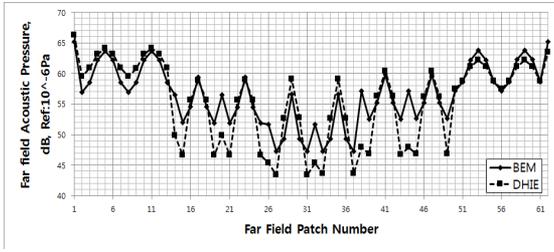
Fig. 5 The comparison of the BEM result and DHIE result for deck1 excitation



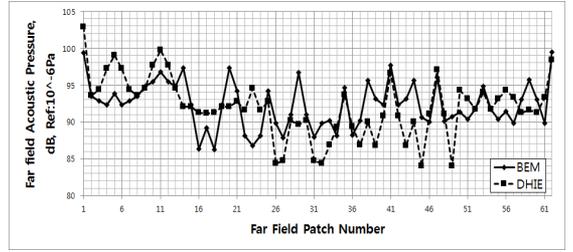
(a) 200 Hz



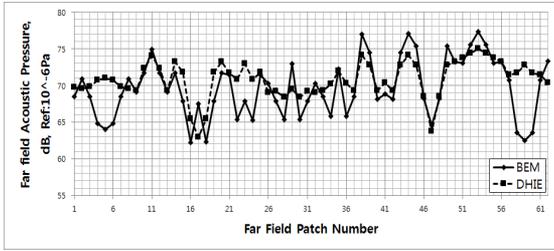
(f) 700 Hz



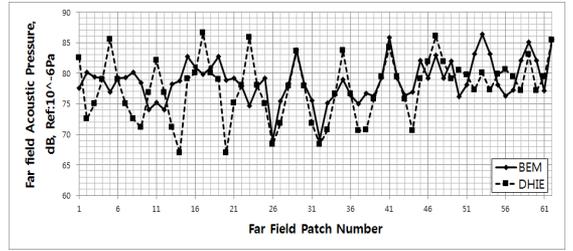
(b) 300 Hz



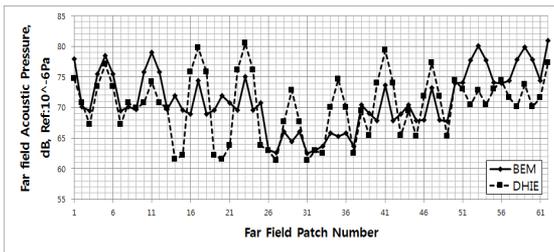
(g) 850 Hz



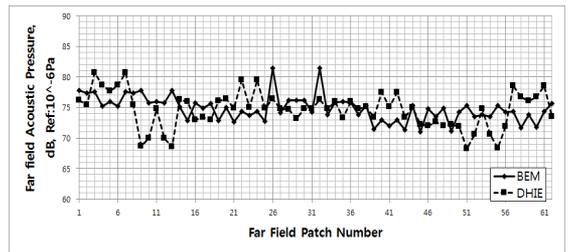
(c) 450 Hz



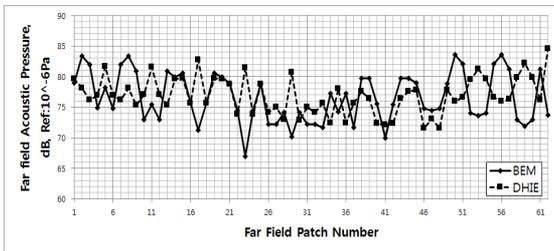
(h) 950 Hz



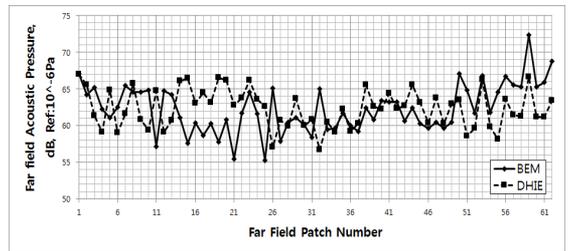
(d) 550 Hz



(i) 1250 Hz

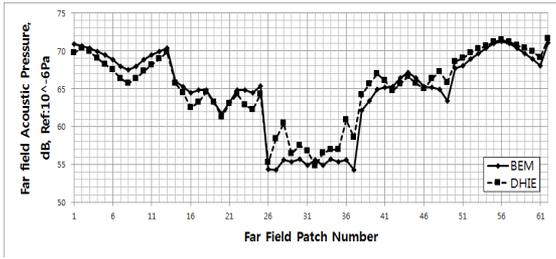


(e) 650 Hz

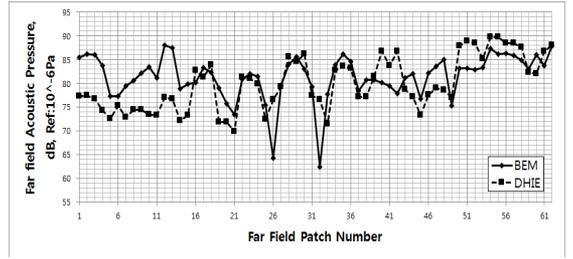


(j) 1350 Hz

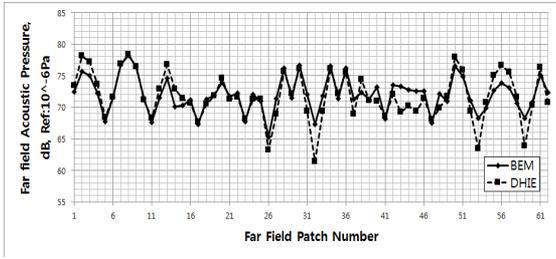
Fig. 6 The comparison of the BEM result and DHIE result for deck4 excitation



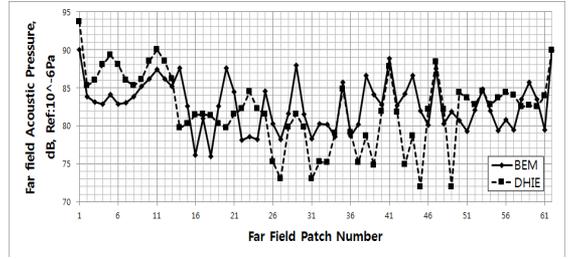
(a) 200 Hz



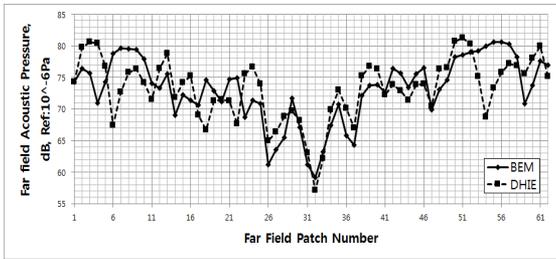
(f) 700 Hz



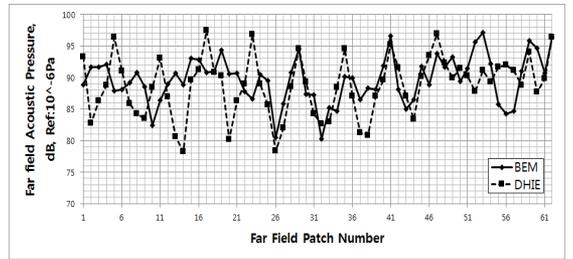
(b) 300 Hz



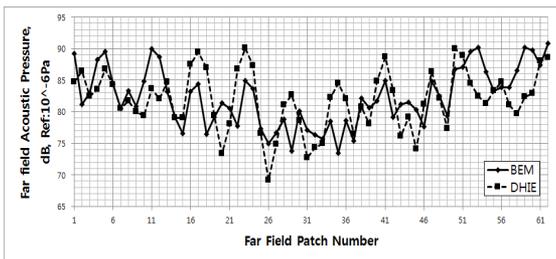
(g) 850 Hz



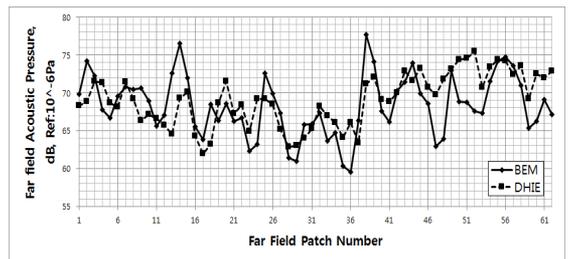
(c) 450 Hz



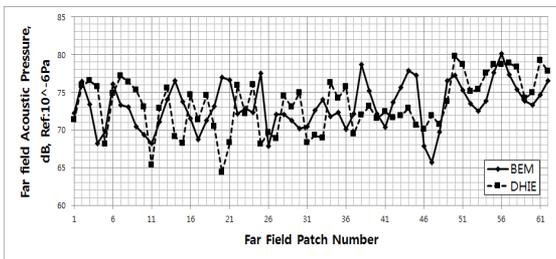
(h) 950 Hz



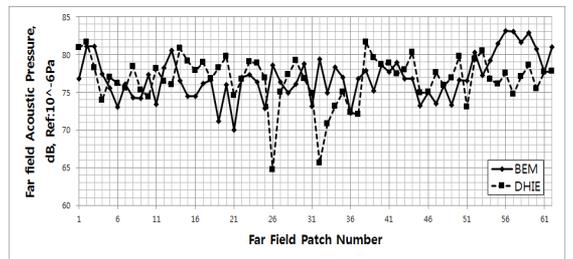
(d) 550 Hz



(i) 1250 Hz



(e) 650 Hz



(j) 1350 Hz

Fig. 7 The comparison of the BEM result and DHIE result for deck8 excitation

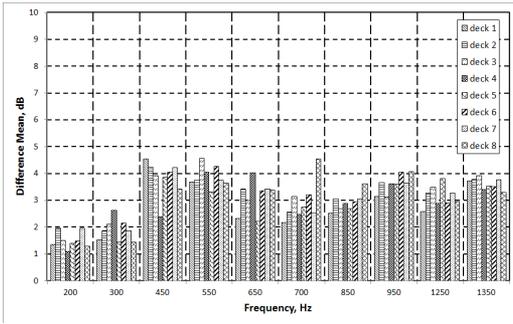


Fig. 8 The difference mean value between the BEM result and DHIE result

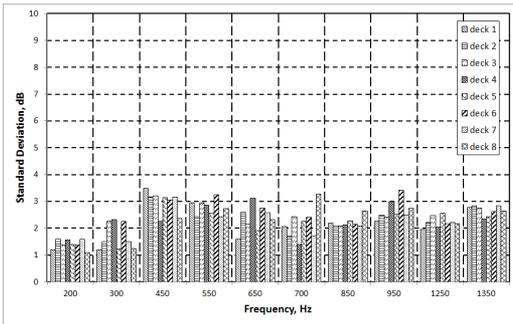


Fig. 9 The standard deviation between the BEM result and DHIE result

음장 전체 음압 파워를 이용한 원음장 음압 크기 보정방법을 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 850 Hz 이상에서는 파장당 속도정보 추출 위치간 거리가 요구되는 거리보다 커짐에 따라 원음장 패턴 산출이 일부 차이가 나고 있는 것으로 판단된다.

따라서 파장당 두 개 이상의 표면진동장을 적용하기 위해서는 목표주파수에 따라 표면진동장 산출 위치를 적절히 선정해야 되며, 원음장 음압 파워에 대한 예측도 중요한 요소가 된다.

향후 이 수치해석 연구 결과들에 대하여 수중구조물의 표면진동장의 실험적 계측결과와 근접음장 측정결과들을 이용하여 이 방법의 타당성을 확인할 예정이다.

References

(1) Maidanik, G., 1962, Response of Ribbed Panels to Reverberant Acoustic Fields, The Journal of the Acoustic Society of America, Vol. 34, No. 6m, pp.

802~826.

(2) Uchida, S., Yamanaka, Y., Ikeuchi, K, Hattori, K. and Nakamachi, K., 1986, Prediction of Underwater Noise Radiated from Ship’s Hull, Bulletin of the Society of Naval Architectures of Japan, No. 686, pp. 36~45.

(3) Han, H. S., Lee, K. H. and Park, S. H., 2013, Estimation of the Sound Radiation Efficiency of the Hull Considering the Type and Natural Frequency of Plates of It, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 12, pp 1073~1081.

(4) Jung, W. J., Yi, J. J., Kang, M. H. and Jeon, J. J., 2014, A New Extraction Method for the Radiation Efficiency and Radiation Directional Coefficient, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 93~101.

(5) Takaaki, M., 1993, Evaluation of Ship Radiated Noise Level from Near-Field Measurements, Applied Acoustics, Vol. 40, pp. 69~78.

(6) Takaaki, M., 1995, Far-field Radiated Noise Prediction Using the Cross-spectrum of Surface Vibration Velocity, The Journal of the Acoustic Society of Japan(E), No16, pp. 381~383.

(7) Takaaki, M., 1999, Numerical Calculation for Determining Sonar Self Noise Source Due to the Structural Vibration, Applied Acoustics, Vol. 69, pp. 19~32.

(8) Junger, M. C. and Feit, D., 1993, Sound, Structures, and Their Interaction, Acoustical Society of America, Chap. 3.

(9) Yi, J. J., Kim, J. H., Jung, W. J. and Jeon, J. J., 2013, A Study of the Prediction of Far field of the Stiffened Cylinder Using Surface Vibration Field and Radiation Efficiency in Air, Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 2013 The Conference, pp. 2272~2275.

Jong-Ju Lee is received his B.S. and M.S. degrees from Yonsei University in 2006 and 2008 respectively. He is currently a senior researcher at the Agency for Defense Development, Korea. His



research interests are underwater acoustic stealth technologies.



Myung-Hwan 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.



Woo-Jin 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 underwater acoustic stealth technologies.