

복합센서의 전후방 신호에 대한 음향진동 정합기법을 이용한 수동소나 탐지성능 향상에 대한 연구

Study on improving passive sonar detection using acoustic vibration matching method for front and rear signal of complex sensor

서동완,¹ 장우석,^{1†} 김동현,¹ 노응휘,¹ 양정은²

(Dongwan Seo,¹ Woosuk Chang,^{1†} Donghyeon Kim,¹ Eunghwy Noh,¹ and Jeongeun Yang²)

¹LIG 넥스원, ²국방기술진흥연구소

(Received November 7, 2023; revised December 26, 2023; accepted January 3, 2024)

초 록: 함정 선체부착형 수동소나체계는 최근 표적탐지성능을 향상시키고자 함내 진동유기 소음을 제거하려는 연구가 활발히 진행 중이다. 본 연구진은 신호처리의 관점에서 음향센서와 진동센서가 설치된 복합센서를 이용한 음향-진동 정합기법을 개선책으로 제시한다. 본 논문에서는 정합기법의 이론적 배경에 대해 기술한 후, 그것이 다중물리 유한 요소해석 상에서 실현됨을 보였다. 나아가 정합기법을 센서 시스템에 적용할 시의 표적신호 수신감도 상승 및 진동유기 소음 제거 성능을 산출하였으며, 정합기법의 실용성과 향후 연구방향에 대해 논하였다.

핵심용어: 수동소나, 표적탐지, 진동유기 소음, 음향-진동 정합기법

ABSTRACT: Recently, ship hull-mounted passive sonar system solution is needed in the perspective of improving target detection and elimination of vibration-induced noise. Our research team suggests acoustic-vibration matching method using front and rear signal of a sensor as the improvement of the problem above. Thus in this paper, theoretical background about matching method and its application on finite element method based multi-physics simulation are described. Furthermore, it is shown that target detection and hull vibration performance are improved by using matching method under the condition of our sensor system. Finally, practicality and future research are discussed.

Keywords: Passive sonar, Target detection, Vibration-induced noise, Acoustic-vibration matching method

PACS numbers: 43.30.Wi, 43.58.Fm

1. 서 론

수동소나체계는 함정의 눈과 귀 역할을 하여 신속하고 은밀한 작전수행을 가능하게 하는 비대칭 전력 요소이므로 국내에서 지속적인 연구가 이루어졌다. 수동소나는 음향센서를 통해 원거리 표적의 각종 신호들을 수신하여 탐지 및 위치추정을 수행하는데,

일반적으로 표적신호 수신감도(즉, 신호대잡음비)가 높을수록 표적의 위치를 식별하는 데에 유리하다. 그러나 음향센서는 표적신호 외에 수신을 방해하는 다양한 소음에 노출된다. 선체부착형 음향센서의 경우 이러한 소음들 중, 함정 기동에 따른 유체소음, 그리고 함내에서 발생하는 각종 기기들에 의한 진동유기 소음에 의해 표적탐지 성능이 크게 감소한

†Corresponding author: Woosuk Chang (wschang@lignex1.com)

Maritime Sensor System, LIGNEX1 & 333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi Province 13488, Republic of Korea
(Tel: 82-31-5179-7339, Fax: 82-31-5179-7089)

“이 논문은 2023년도 한국음향학회 춘계학술대회에서 발표하였던 논문임.”



Copyright©2024 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

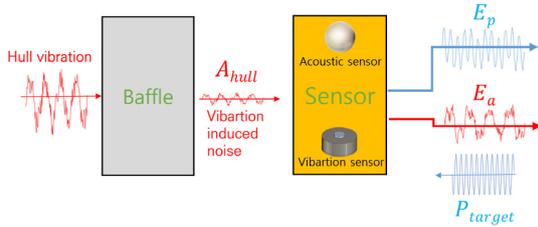


Fig. 1. (Color available online) Acoustic-vibration sensor.

다. 이중 특히 진동유기 소음은 함정이 작동하는 이상 음향센서 후방에서 지속적으로 발생한다는 특성 때문에 현재까지 음향센서 후면에 차음배플을 설치하여 진동유기 소음을 감쇄하는 음향구조 측면에서의 연구가 많이 진행되었다.^[1,2]

진동유기 소음 수신 문제를 수중센서의 관점에서 보면, 일반적인 음향센서는 무지향성이며 음압을 수신하는 스킨센서이므로 전후방 신호를 구분하지 못하는 점에서 기인한다고 볼 수 있다. 이는 최근 활발히 연구가 진행중인 벡터 센서를 통해 개선시킬 수 있다.^[3-5] 국내에서는 벡터 센서를 예인형배열센서(Towed Array SONAR, TAS)에 적용하여 탐지 성능을 향상시킨 예가 존재하며,^[6] 나아가 기존 음향센서와 벡터센서를 모두 사용하는 복합센서를 설계하여 이를 통해 수신 성능을 시험한 연구 결과도 존재한다.^[7] 그러나 벡터센서, 혹은 복합센서를 진동유기 소음 측정에 응용하는 연구는 수행되지 않았다. 이에 본 연구진은 음향센서로는 전방 표적신호, 진동센서로는 후방 진동유기 소음을 측정하는 선체부착형 복합센서를 설계하였다.

Fig. 1과 같이 음향센서과 진동센서가 설치된 복합센서에 표적음향신호의 음압 P_{target} , 함내 진동유기 소음의 입자가속도 A_{hull} 이 발생 시, 각각의 센서에서 측정되는 출력전압은 Eq. (1)과 같이 2x2 전달함수 행렬 개념을 통해 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} E_p \\ E_a \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{pP} & T_{pA} \\ T_{aP} & T_{aA} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_{target} \\ A_{hull} \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

E_p, E_a 는 각각 음향센서, 진동센서의 출력전압이며 전달함수 행렬의 성분 $T_{pP}, T_{pA}, T_{aP}, T_{aA}$ 는 각각 음향센서 음향감도, 음향센서 진동감도, 진동센서 음

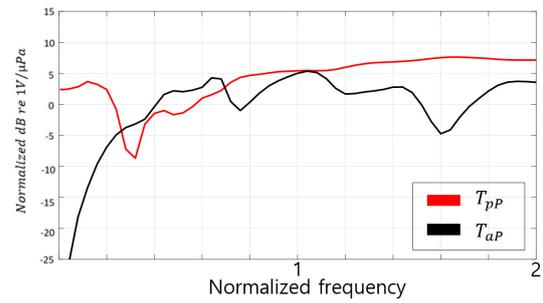


Fig. 2. (Color available online) Acoustic-vibration coupling.

향감도, 진동센서 진동감도이다. 즉 전달함수의 각 성분들은 음향입사/진동유기 소음에 대한 음향센서/진동센서의 센서특성이다. 이상적으로 설계된 음향센서와 진동센서의 경우 각각 표적신호, 진동유기 소음만을 감지하며 그 외의 신호는 감지하지 않는다. 즉, 전달함수 행렬의 관점에서는 대각 성분의 최대화, 비대각 성분의 최소화라고 볼 수 있다. 하지만 음파가 매질을 진동시키고, 진동으로 인해 음파가 발생하는 것처럼, 음향-진동 Coupling에 의해 실제로는 비대각 성분 또한 무시할 수 없을 만큼 크다. Fig. 2는 복합센서 내 음향센서, 진동센서의 주파수에 따른 표적신호 음향감도 그래프이다. 음향-진동 Coupling에 의해 진동센서의 음향감도가 저주파에서는 오히려 음향센서 음향감도보다 높게 측정된다.

본 연구진은 음향-진동 정합기법을 해당 문제에 대한 개선책으로 제시한다. 정합기법을 적용하면 표적신호와 진동유기 소음을 구분하고, 나아가 해당 신호들의 증대 및 안정화까지 가능하다. 이에 본 논문에서는 먼저 정합기법의 이론적 배경에 대해 기술한 후, 그것이 다중물리 유한요소해석 프로그램에서 구현됨을 보였다. 나아가, 정합기법을 실제 센서 시스템에 적용하여 수신감도 및 감도 안정화 해석을 수행하였다.

II. 정합기법 이론

양의 x축 상에 위치한 복합센서에 시간조화 음향입사 상황을 가정하였을 때, 음향센서의 출력은 전후방 음압의 합에 센서특성을 곱한 값이 되며 총 음압 p 는 다음과 같다.

$$p = (p_f e^{-jkx} + p_r e^{jkx}) e^{j\omega t}, \quad (2)$$

여기서 p_f, p_r 은 각각 전방, 후방입사파의 복소 음압 크기이며 k 는 파수이다. 진동센서의 출력은 전후방 입자가속도에 센서특성을 곱한 값으로 표현되며, 이때 가속도라는 물리량의 방향성에 의해 총 입자가속도 a 는 다음과 같다.

$$a = (a_f e^{-jkx} - a_r e^{jkx}) e^{j\omega t}. \quad (3)$$

a_f, a_r 은 각각 전방, 후방입사파의 입자가속도 복소 음압 크기이다. 전후방 입사파가 시간조화의 형태이므로 Eq. (3)은 입자속도로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} a &= (a_f e^{-jkx} - a_r e^{jkx}) e^{j\omega t} \\ &= j\omega(u_f e^{-jkx} - u_r e^{jkx}) e^{j\omega t}. \end{aligned} \quad (4)$$

u_f, u_r 은 각각 전방, 후방입사파의 입자속도 복소 음압 크기이다. 평면파 전방입사 가정 시, 음압 p 와 입자속도 u 와의 관계는 다음과 같다.^[8]

$$\begin{aligned} p &= p_f e^{j(\omega t - kx)} = \rho c u_f e^{j(\omega t - kx)} \\ &= \rho c u. \end{aligned} \quad (5)$$

ρ 는 매질의 밀도, c 는 매질의 음속이다. 마찬가지로, 평면파 후방입사 가정 시, 음압 p 와 입자속도 u 와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p &= p_r e^{j(\omega t + kx)} = -\rho c u_r e^{j(\omega t + kx)} \\ &= -\rho c u. \end{aligned} \quad (6)$$

Eqs. (5)와 (6)의 음압과 입자속도와의 관계는 음향센서와 진동센서와의 정합관계라 볼 수 있다. 정합관계에 따르면 전/후방 평면파 입사에 대해 음향센서, 진동센서가 수신하는 음압과 입자속도의 크기인 p_f, p_r 과 a_f, a_r 은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$p_f = \rho c u_f = \frac{\rho c}{j\omega} a_f. \quad (7)$$

$$p_r = \rho c u_r = -\frac{\rho c}{j\omega} a_r. \quad (8)$$

Eqs. (7)과 (8)의 p - a 관계는 음향센서와 진동센서가 각각 수신하는 물리량의 Coupling이 가능하다는 의미이며, Eqs. (9)와 (10)과 같이 기존의 음향센서, 진동센서 대신 새로운 정합센서로 수신음압을 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_f &= p + \rho c u \\ &= \left\{ \left(p_f + \frac{\rho c}{j\omega} a_f \right) e^{-jkx} + \left(p_r - \frac{\rho c}{j\omega} a_r \right) e^{jkx} \right\} e^{j\omega t} \\ &= (p_{fP} e^{-jkx} + p_{fA} e^{jkx}) e^{j\omega t}. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_r &= p - \rho c u \\ &= \left\{ \left(p_f - \frac{\rho c}{j\omega} a_f \right) e^{-jkx} + \left(p_r + \frac{\rho c}{j\omega} a_r \right) e^{jkx} \right\} e^{j\omega t} \\ &= (p_{rP} e^{-jkx} + p_{rA} e^{jkx}) e^{j\omega t}. \end{aligned} \quad (10)$$

본 논문에서는 전방 표적을 감지하는 음향센서에 대응하는 정합된 센서를 전방센서, 후방 자함소음을 감지하는 진동센서에 대응하는 정합된 센서를 후방센서로 명명하였다. 즉, P_f 는 정합처리된 전방센서의 총 수신음압을 나타내며, 마찬가지로 P_r 은 정합처리된 후방센서의 총 수신음압이다. $p_{fP}, p_{fA}, p_{rP}, p_{rA}$ 는 각각 전방센서 전방음압, 전방센서 후방음압, 후방센서 전방음압, 후방센서 후방음압의 크기이다.

Eqs. (9)와 (10)은 정합관계를 이용하여 음압이 아닌 입자가속도로 기술할 수 있지만, 본 논문에서는 각 성분들의 비교를 위해 음압을 기준으로 단위를 환산하였다. 추가적으로, 음향-진동 Coupling에 의해 Eq. (1)의 A_{hull} 은 함내 진동으로 인해 발생하는 음향, 즉 P_{hull} 로 대체할 수 있다. 마지막으로 전방, 후방센서의 총 수신음압에 센서감도를 곱하면 전후방 입사파에 대한 각각의 출력전압을 2x2 전달함수의 형태로 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} E_f \\ E_r \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} T_{fP} & T_{fA} \\ T_{rP} & T_{rA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{target} \\ P_{hull} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & \frac{\rho c}{j\omega} \\ 1 & -\frac{j\omega}{\rho c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{pP} & T_{pA} \\ T_{aP} & T_{aA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{target} \\ P_{hull} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (11)$$

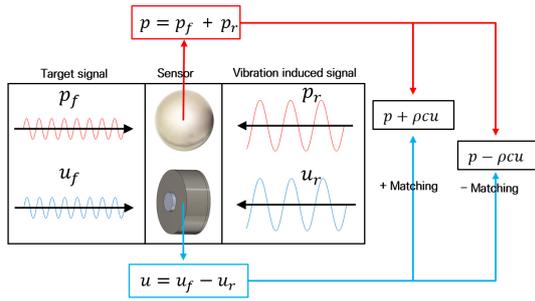


Fig. 3. (Color available online) Simplified diagram of Acoustic-vibration matching method.

E_f , E_r 은 각각 전방센서, 후방센서의 출력전압이며 정합처리된 새로운 2×2 행렬의 각 성분 T_{fP} , T_{fA} , T_{rP} , T_{rA} 는 각각 전방센서 음향감도, 전방센서 진동감도, 후방센서 음향감도, 후방센서 진동감도로 정의하였다. Eq. (1)과 비교하였을 때 즉, 음향/진동 정합기법이란 Fig. 3과 같이 두 종류의 독립적인 센서의 신호를 기반으로, 전방 표적신호에 대해서는 합을, 후방 진동유기 소음에 대해서는 차이를 산출하는 기법이다. 따라서, 정합기법은 전면방향 표적탐지에 대해서는 우수한 함내 진동유기 소음 차단을 구현하며, 후면방향에 대해서는 표적신호 간섭이 없는 함내 진동유기 소음 신호를 확보할 수 있다. 정합기법의 이론적 성능이 물리세계에서 적용되는지 확인하기 위해 본 연구에서는 Eq. (11)를 응용하여 정합처리 전후의 2×2 행렬의 대각성분을 비교/분석하였으며 이를 통해 정합기법의 성능과 표적신호/진동유기 소음의 분리, 증폭, 제거에 대해 논하였다.

III. 정합기법 검증 및 해석

본 연구에서는 정합기법 이론의 전산해석 구현성과 물리세계에서의 실현가능성을 확인하기 위해 다중물리 유한요소해석 프로그램 COMSOL을 통해 이를 검증하였다. 먼저, 이상적으로 정합기법이 적용되도록 Fig. 4와 같이 물 영역에 음향센서, 진동센서를 표현하는 두 개의 점을 설정하였으며, 표적신호와 진동유기 소음은 각각 전후방 평면파 입사로 모의하였다. 점에서 값을 산출한다는 것은 두 센서의 특성이 동일하다는 의미이며 Eqs. (9)와 (10)에 의해 전방센서는 음향센서 대비 2배, 후방센서는 0이 산

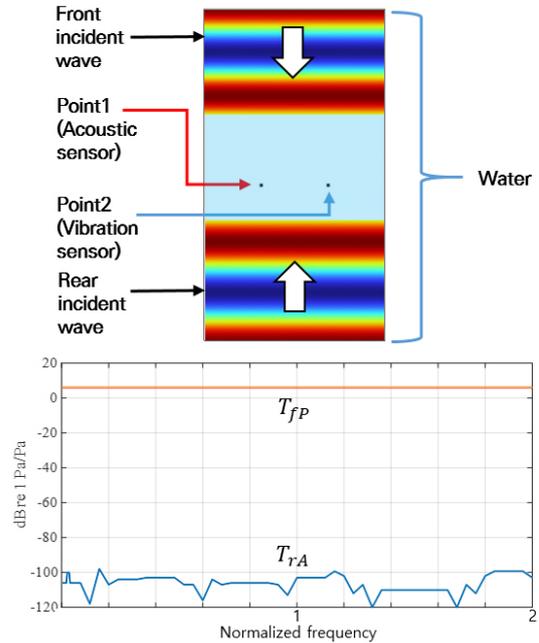


Fig. 4. (Color available online) Verification of matching method under ideal condition.

출되어야 한다. Fig. 4의 하단 그래프를 보면 이러한 이론적 결과가 정확히 반영되었음을 알 수 있는데, 전방센서 음향감도는 기존 음향센서 음향감도 대비 정확히 6 dB, 후방센서 진동감도는 기존 진동센서 진동감도 대비 약 -100 dB 하락, 즉 소멸하는 것을 확인할 수 있다. 이론이 프로그램상에서 구현됨을 확인하였기에 단계별로 형상을 추가하며 대각행렬에 대한 비교를 진행하였다.

다음으로 이상적인 조건에서 Fig. 5와 같이, 음향센서와 진동센서 형상을 추가했을 때 주파수에 따른 전달함수 성분들은 다음과 같다. Fig. 5의 그래프를 보면 이상적인 그래프와 비교했을 때 그 양상이 크게 변화했음을 확인할 수 있다. 이는 센서들이 각각 고유의 감도특성을 가지고, 더 이상 점이 아닌 물리적 형상을 가지는 것을 원인으로 들 수 있다. 그럼에도 불구하고 대각성분을 비교해보면 전방센서 음향감도는 음향센서 음향감도에 비해 3 dB, 후방센서 진동감도는 진동센서 진동감도에 비해 평균 10 dB 가량 상승한 것을 확인할 수 있다.

다음으로는 Fig. 6과 같이 실제 센서조립체를 묘사하여 대각성분을 산출하였다. Fig. 5와 비교하였을 때 추가적인 구조물들에 의해 대각성분들의 양상이

변화하였음을 확인할 수 있다. 이는 정합기법 수행 시 사용하는 변수 ρc 에 의한 영향이라고 볼 수 있다. 이상적인 상황에서는 ρc 는 곧 물의 밀도와 음속으로 $\rho c = \rho_0 c_0 = 1000 \times 1500 = 1.5 \times 10^6 \text{ (kg/m}^2\text{s)}$ 의 값을 가지지만 센서조립체의 경우 물이 아닌 다층구조

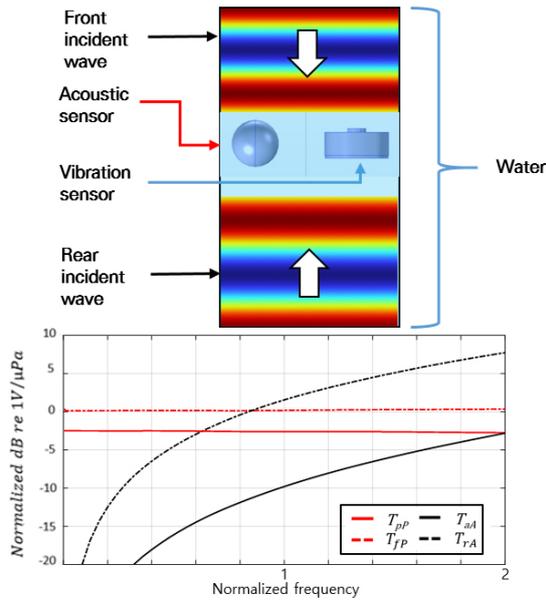


Fig. 5. (Color available online) Verification of matching method under designed acoustic-vibration sensor only.

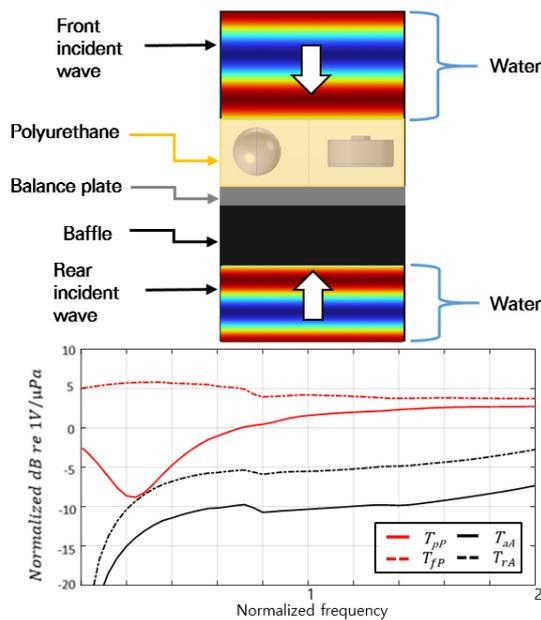


Fig. 6. (Color available online) Verification of matching method under full sensor system.

로 인해 탄성체 해석이 수행되기 때문이다. 하지만 여전히 정합처리된 전달함수의 대각성분들은 기존 성분 대비 높게 계산된다. 전방센서 음향감도는 고주파 영역에서 약 2 dB 상승, 후방센서 진동감도는 약 5 dB가 상승하며, 추가적으로 음향감도는 주파수에 따른 감도안정화까지 이루어진다. 이러한 계산 결과를 근거로 시뮬레이션 차원을 3차원으로 확장하여 복합적인 형상에서의 성능을 계산하였다.

IV. 정합기법 성능

3장까지의 해석은 복합센서의 다층구조와 센서 형상을 반영하였지만, 1차원 무한평판 배열 해석이라는 점에서 구조물들의 진동모드, 구조에 의한 음향 회절 등이 고려되지 않았기에 추가적인 정합성능 검증이 필요하다. 이에 본 연구진은 해당 복합센서를 모듈 단위로 설계하였으며 향후 정합성능 측정시의 실험조건들을 고려하여 3개의 모듈을 배열한 형상에 대한 성능을 계산하였다. 3개 모듈 해석 형상은 Fig. 7과 같이 복합센서들이 실험치구에 결합된 형상이며 전후방 음향입사조건을 설정하여 표적음향신호, 진동유기 소음을 모사하였다. 경계조건과 회절 현상을 고려하여 복합센서 모듈 3개 중 중앙에 음향센서(적색의 원) 과 진동센서(검은 사각형)을 위치시켜 해석을 수행하였으며 3장과 마찬가지로 정합기법의 성능은 기법 적용 전/후에 대해 2x2 전달함수의 대각성분별 차이로 비교하였다.

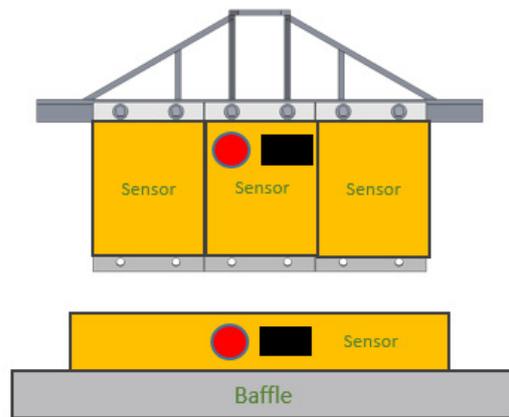


Fig. 7. (Color available online) Three sensor module combined with experimental jig.

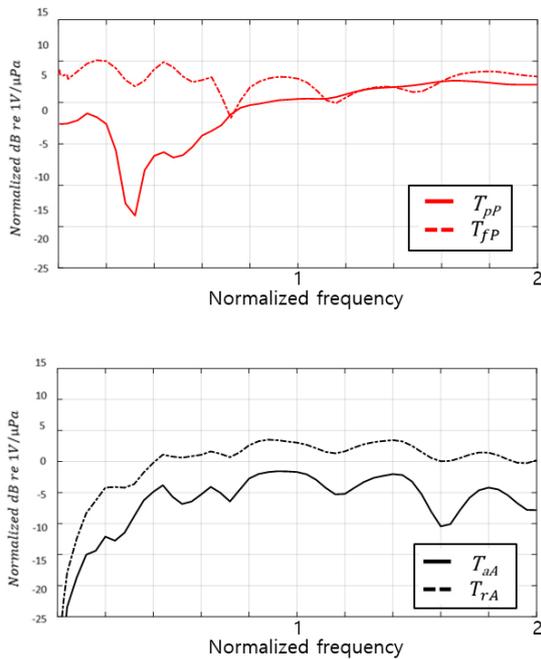


Fig. 8. (Color available online) Diagonal components comparison of transfer function before and after matching method.

Fig. 8는 3개 모듈 형상에 대한 정합기법 전/후 전달 함수의 대각성분을 나타낸 그래프이다. 전방센서 음향감도의 경우, 음향센서 음향감도 대비 국소적인 부분을 제외하고 전 주파수에 걸쳐 약 6 dB까지 증가하는 경향을 볼 수 있으며 특히, 저주파 대역의 Null 대역은 대폭 개선되었다. 후방센서 진동감도의 경우 역시 전 주파수 대역에 걸쳐 약 6 dB 상승하였다. Fig. 8의 대각성분들은 전반적으로 3장의 무한평면 모델과 유사한 경향을 보이지만, 모듈의 구조적 진동 모드, 그리고 3개 모듈로 인한 경계조건 변화로 인해 주파수별 편차가 급격히 변동하는 국소지점을 확인할 수 있다. 이러한 구조적인 진동 및 경계조건문제는 향후 배열단위로 구성하여 선체에 부착시 부분적으로 해결될 것으로 예측된다.

본 연구의 복합센서 정합기법은 특히, 기존 센서의 표적신호 탐지성능의 한계점을 극복하였는데 이는 음향센서의 전후방비, 그리고 전방센서의 전후방비를 통해 확인할 수 있다. 기존의 센서는 Fig. 7과 같이 센서조립체 후면에 배플조립체가 결합된 형태로 존재하며 이는 특성 임피던스 차이를 통해 진동유기 소음이 음향센서로 도달하지 않게 차음하는 역할을

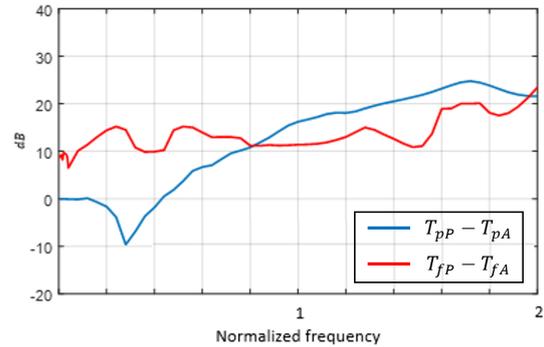


Fig. 9. (Color available online) Ratio comparison of sensor sensitivity under front and rear incident wave.

수행한다. 그러나 저주파 대역에서는 차음배플의 반사특성에 의해 오히려 감도가 크게 떨어지는 Null 현상이 불가피하게 발생한다. 이러한 현상에 의해 기존의 음향센서는 Fig. 9와 같이 특정 저주파 대역에서, 전방감도와 후방감도의 차이를 나타내는 전후방비가 0 dB 이하로 떨어지는 역전현상이 발생한다. 전후방비가 역전된 주파수 대역에서는 진동유기 소음에 의해 표적탐지가 성능이 크게 떨어질 수 있다.

그러나 정합기법 적용시, 전방감도에 Null 현상이 발생하지 않아 전후방 역전현상 또한 발생하지 않으며, 나아가 극저주파 대역을 제외한 주파수 대역에서 10 dB 이상 안정적으로 전후방비를 확보할 수 있다. 즉 정합기법이란, 단순히 표적신호 수신감도와 진동유기 소음을 각각 증폭시킬 뿐만 아니라, 복합센서의 물리적인 한계를 극복하고 감도 안정화를 이뤄 저주파 대역 탐지성능을 향상시킬 수 있다는 의미를 가진다.

V. 결론

본 연구에서는 선체부착형 수동소나 복합센서에 대하여, 표적신호탐지성능을 향상시키는 방법으로 음향/진동 정합기법을 제안하였다. 본 연구진은 복합센서 내 음향센서와 진동센서가 측정하는 압력과 입자속도의 방향성에 근거하여 신호처리를 통해 감도를 향상시키는 정합기법을 이론적으로 정립하였으며 유한요소해석 프로그램을 통해 해당 정합기법 검증이 수행되었다. 이론적 검증과 실제 설계 형상을 반영한 모듈단위 해석 결과, 정합기법 수행 시 표

적신호 수신감도와 진동유기 소음 감도를 약 6 dB 씩 상승시킬 수 있으며, 나아가 전 주파수 대역에서 표적신호에 대한 감도를 안정화할 수 있다는 결과가 산출되었다. 본 연구진은 현재 정합기법 결과를 기반으로 음향-진동 복합센서를 제작중이며 이를 통해 정합기법을 실험적으로 검증할 계획이다. 정합기법을 적용한 음향-진동 복합센서는 향후 고속함에 설치되어 효과적인 표적탐지를 수행할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2021년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No. KRIT-CT-21-002, 선체적응형 선측배열센서 제작/검증 기술 개발)

References

1. S. S. Young, D. H. Kim, and J. T. Kim, "A durability study on the acoustic baffle for underwater environment" (in Korean), Proc. Korean. Soc. for Noise and Vib. Eng. **26**, 449-457 (2016).
2. K. Kim, Y. Je, H.-J. Kim, Y.-H. Cho, J.-M. Lee, D. Kim, and W. Chang, "An experimental analysis of vibration-induced noise isolation characteristics of a sonar acoustic sensor" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **36**, 193-199 (2019).
3. A. Agarwal, A. Kumar, M. Aggarwal, and R. Bahl, "Design and experimentation with acoustic vector sensors," Proc. SYMPOL, 139-146 (2009).
4. M. Hawkes and A. Nehrai, "Acoustic vector-sensor processing in the presence of a reflecting boundary," IEEE Trans. on Signal Process. **48**, 2981-2993 (2000).
5. M. T. Silvia and R. T. Richards, "A theoretical and experimental investigation of low-frequency acoustic vector sensors," Proc. Oceans '02 MTS/IEEE. 1886-1897 (2002).
6. S. Pyo, J. Kim, H. Kim, and Y. Roh, "Development of vector hydrophone using thickness-shear mode piezoelectric single crystal accelerometer," Sens. Actuators A Phys. **283**, 220-228 (2018).
7. T. Roh, H. G. Yeo, C. Joh, Y. Roh, K. Kim, H.-S. Seo, and H. Choi, "Fabrication and underwater testing of a vector hydrophone comprising a triaxial piezoelectric accelerometer and spherical hydrophone," Sensors,

22, 9796 (2022).

8. D. T Blackstock, *Fundamentals of Physical Acoustics* (John Wiley & Sons, 2001), pp. 130-144.

저자 약력

▶ 서 동 완 (Dongwan Seo)



2019년 2월: 연세대학교 기계공학과 학사
2021년 2월: 연세대학교 기계공학과 석사
2022년 1월 ~ 현재: LIG넥스원 연구원

▶ 장 우 석 (Woosuk Chang)



1994년 2월: 한양대학교 기계공학과 학사
1996년 2월: Lehigh University 기계공학과 석사
2001년 2월: Pennsylvania State 기계공학 박사
2001년 ~ 2006년: National University in Singapore 연구원
2006년 ~ 현재: LIG 넥스원 수석연구원

▶ 김 동 현 (Donghyeon Kim)



2010년 2월: 고려대학교 기계공학과 학사
2012년 2월: 고려대학교 기계공학과 석사
2012년 ~ 현재: LIG넥스원 수석연구원

▶ 노 응 휘 (Eunghwy Noh)



2012년 2월: 연세대학교 기계공학과 학사
2019년 2월: 연세대학교 기계공학과 박사
2019년 ~ 현재: LIG넥스원 선임연구원

▶ 양 정 은 (Jeongeun Yang)



2016년 2월: 한국해양대학교 제어계측공학과 석사
2015년 5월: 국방기술품질원 연구원
2021년 1월 ~ 현재: 국방기술진흥연구소 연구원