

원통 구조에서 공간 콘볼루션을 이용한 상호 방사 임피던스 계산

Calculation of the Mutual Radiation Impedance by the Spatial Convolution in the Cylindrical Structure

복 태 훈*, 이 잉*, 팽 동 국*, 이 종 길**, 신 구 균***, 조 처 영***
(Tae-Hoon Bok*, Ying Li*, Dong-Guk Paeng*, Jong-kil Lee**, Ku-Kyun Shin***
and Chee-Yong Joh***)

*제주대학교 해양과학대학 해양시스템공학과, **안동대학교 사범대학 기계교육과
***국방과학연구소 제6기술연구본부
(접수일자: 2008년 12월 15일; 수정일자: 2009년 6월 8일; 채택일자: 2009년 12월 3일)

공간 콘볼루션을 이용하여 원통형 구조에서 진동체 사이의 상호 방사 임피던스를 계산하였다. 본 계산 방식은 평면 배열을 공간 콘볼루션에 의해 원통 구조로 변환하고 이에 대한 상호 방사 임피던스를 계산하는 것으로서 정확한 형태의 원통형 배열을 고려하지는 못하지만 계산 시간을 단축할 수 있는 효과가 있다. 본 논문에서 제안하는 공간 콘볼루션 방식에 의한 계산 결과를 기존의 4중 적분 방식에 의한 계산 결과와 비교하여 계산 방식에 대한 오차를 분석하였고, 또한 배열 구조에서 발생하는 오차를 분석하기 위해 평면 배열에서의 결과와 비교하였다. 앞의 두 가지 형태의 비교를 통하여 본 계산 방식에 대한 오차를 확인하였고, 아울러 오차 범위 내에 있는 구간에서는 공간 콘볼루션에 의한 원통 구조라 할 지라도 제한적으로 사용할 수 있음을 확인하였다.

핵심용어: 원통형 배열, 공간 콘볼루션, 방사 임피던스, 수치 계산.

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4,3)

The mutual radiation impedance was calculated using the spatial convolution in the cylindrical structure. The Cartesian coordinate was transformed into the cylindrical coordinate using the spatial convolution for the cylindrical array structure. This method cannot consider the cylindrical baffle, but can reduce the computation time. The error for not considering the cylindrical baffle was analyzed by the comparison of the spatial convolution method with the quadruple integration method in the cylindrical structure. The mutual radiation resistance in the cylindrical structure was compared with the one in the planar baffle. Based on two kinds of the comparison, we presented the error of the suggesting method in this paper, confirming that the spatial convolution method could be applied to compute the mutual radiation impedance in the cylindrical structure at certain conditions.

Keywords: Cylindrical array, Spatial convolution, Radiation impedance, Numerical calculation

ASK subject classification: Ultrasonic and Elastic Waves (4,3)

1. 서론

음향 센서 설계 및 제작에 있어서 음향 방사 특성은 기본적인 요소이고, 이러한 특성은 음향 방사 임피던스 계산에 의해 해석된다 [1]. 단일 진동체의 방사 임피던스

해석 연구를 통해 센서의 방사 임피던스를 정확히 예측하여야 하고 진동체들을 배열할 때 발생하는 센서 상호 간의 간섭 현상을 해석할 수 있어야 한다 [2-4]. 센서 진동체의 방사 임피던스는 매질과 진동수, 방사면의 크기와 모양, 배열의 크기와 모양, 그리고 진동체 사이의 거리에 의해 영향을 받기 때문에, 센서의 설계, 제작 및 조립 과정에 영향을 미친다 [5]. 그러므로 방사 임피던스의 정확한 계산과 해석이 필요하다. 더구나 곡면 배열에 고정된

피스톤 음원의 방사 임피던스의 경우 계산식이 복잡하여 방대한 계산시간이 요구되고, 계산시간을 줄일 경우 오차를 크게 할 수 있어서 센서 설계/제작에 적용하는 데에 어려움이 많다. 곡면 배열 음향센서에서는 평면 배열과 달리 배플과 진동체가 곡면이기 때문에 방사 임피던스 계산 시에 좌표계의 설정이 복잡하여 해석과 계산이 어렵게 된다. 그러므로 이러한 계산 시간 문제점을 해결하고 수렴성이 좋은 근사해를 구하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

원통형 배열 구조는 선체 고정형 소나 (Hull Mounted Sonar)와 같은 형태로써 수중에서 널리 이용되고 있을 뿐만 아니라, 선박이나 잠수정의 외형을 고려한 음향 센서 설계 등의 이유로 인해 원통 배열 구조에서의 방사 임피던스에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다 [6-7]. 이러한 원통형 배열 센서에서 진동체의 자기 방사 임피던스와 배열 구조에 따른 상호 방사 임피던스 계산을 위해서는 적분식의 풀이 과정이 필요하기 때문에 많은 계산 시간이 필요하다. 따라서 최근에 보고된 연구 결과에 의하면, 배열 센서에서의 방사 임피던스 계산에 소요되는 시간을 단축하기 위한 다양한 방법들이 제시되고 있다. 프리처드 접근법 (Modal Pritchard Approximation)에 의한 상호 방사 임피던스 계산은 주파수, 진동체 크기 그리고 진동체 사이의 거리의 관계에 있어서 제한적으로 사용되었고 [8-9], 크로스 모델 커플링 (Cross-model coupling)을 통해 4중 적분을 여러 개의 2중 적분으로 나누는 방식으로 계산 시간을 단축하였지만 평면 배열 구조에만 적용되었다 [10]. 또한 단일 장방향 구경 (Single rectangular aperture)에서의 방사 임피던스의 수치 계산을 간소화하기도 하였고 [11], 평면 배열 상에서 공간 콘볼루션 (Spatial convolution)을 이용하여 방사 임피던스 계산 시간을 단축한 사례도 있다 [12]. 이렇듯 여러 가지의 방사 임피던스 계산 방식이 연구되고 있지만 원통형 배열 구조에서 방사 임피던스를 계산하는데 있어서 효율적인 수치 계산을 하기 위한 연구는 아직 미비하다.

본 논문에서는 이상에서 언급된 방사 임피던스 수치 계산을 간소화하기 위해 공간 콘볼루션을 이용하여 원통형 배열 센서의 방사 임피던스 특성을 모의하였다. 이러한 방식은 이미 평면 배열의 경우에 사용된 바 있으며 [12], 이를 응용하여 좌표변환을 통해 평면 배열을 원통 배열 구조로 모의한 후 상호 방사 임피던스를 계산하였다. 공간 콘볼루션을 이용한 계산 결과를 기존의 4중 적분 방식에 의한 결과와 비교하였다. 또한 원통 배열과 평면 배열에서의 상호 방사 임피던스를 비교함으로써 두

배열의 구조적인 관계를 분석하였으며, 이를 기반으로 본 논문에서 제안하는 계산 방식의 효율성과 한계를 제시하고자 한다.

II. 이론 및 수치 계산 방법

무한 평면 배플 상에서 놓인 두 사각 진동체를 공간 콘볼루션을 이용한 좌표 변환을 통해 원통 좌표계에 두고 상호 방사 임피던스를 계산하였으며, 다음에 자세한 내용을 나타내었다.

2.1. 좌표 변환과 공간 콘볼루션 (Spatial convolution)을 이용한 상호 방사 임피던스 계산

무한 평면 배열 ($x-z$ 평면) 상에서, 단위 속도로 진동하는 임의의 극소 사각 진동체 (A_2)의 진동이 다른 극소 진동체 (A_1)에 작용하는 상호 방사 임피던스 (Z_{12})는 식 (1)과 같다 [12].

$$Z_{12} = \frac{j\rho ck}{2\pi} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{e^{jkr}}{r} dA_1 dA_2 \quad (1)$$

여기서 ρc 는 음향 특성 임피던스, k 는 파수, dA_1 와 dA_2 는 각기 다른 두 진동체의 미소 면적이고, r 은 dA_1 와 dA_2 지점 사이의 거리이다. 위의 평면 배열을 그림 1과 같이 한 변의 길이가 a 인 진동체들의 원통 배열로 변환하

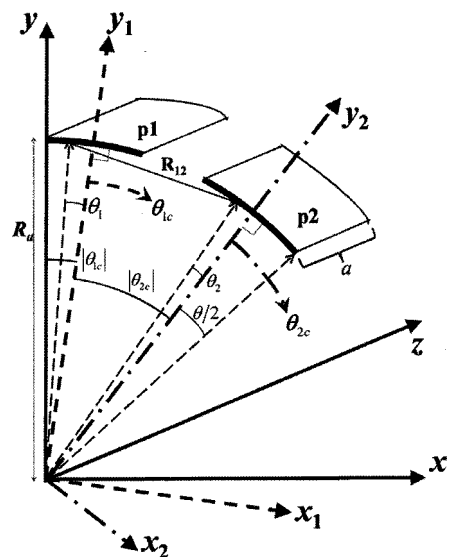


그림 1. 두 진동체의 배열에 대한 원통 좌표와 직교 좌표와의 관계
Fig. 1. Relation between the cylindrical and Cartesian coordinate with respect to the array of two pistons.

기 위하여 직교좌표 (x, y, z) 를 원통형 좌표 (R, θ, z) 로 변환하면 식 (2)와 같다.

$$Z_{12} = \frac{j\rho ck}{2\pi} \int_{a/2}^{a/2} \int_{a/2}^{a/2} \int_{a/2}^{a/2} \int_{a/2}^{a/2} R_0^2 \frac{e^{-jkR_{12}}}{R_{12}} d\theta_1 dz_1 d\theta_2 dz_2 \quad (2)$$

여기서 $R_{12} = \sqrt{R_0^2(\theta_2 - \theta_1 + \theta_2 - \theta_1)^2 + (z_2 - z_1 + z_2 - z_1)^2}$, a 는 z -방향으로 진동체의 길이, θ 는 한 진동체가 원호 상에서 중심축(z 축)과 이루는 각도이고, R_0 는 원통의 반지름. θ_{1c} 과 θ_{2c} 는 z 축을 중심으로 각각 $|\theta_{1c}|$ 과 $|\theta_{2c}|$ 만큼 회전된 x 축 (x_1 과 x_2), y 축 (y_1 과 y_2)의 조합에 의한 각각의 θ_{1c} , θ_{2c} 과 θ_2 는 거리가 R_{12} 인 두 지점의 각각의 θ 축 (θ_{1c} 와 θ_{2c})과 그 점 사이의 각도이다.

식 (2)에서 그린함수 (Green function)는 디랙델타 함수 (Dirac delta function)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{e^{-jkR_{12}}}{R_{12}} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(u - (\theta_2 - \theta_1)) \delta(v - (z_2 - z_1)) \frac{e^{-jkv}}{r} dudv \quad (3)$$

여기서 $r = \sqrt{R_0^2(\theta_{2c} - \theta_{1c} + u)^2 + (z_{2c} - z_{1c} + v)^2}$ 이고, 식 (3)을 식 (2)에 대입하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$Z_{12} = \frac{j\rho ck}{2\pi} R_0^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(u, v) \frac{e^{-jkv}}{r} dudv \quad (4)$$

$$S(u, v) = \int_{a/2}^{a/2} \int_{a/2}^{a/2} \int_{a/2}^{a/2} \int_{a/2}^{a/2} \delta(u - (\theta_2 - \theta_1)) \delta(v - (z_2 - z_1)) d\theta_1 dz_1 d\theta_2 dz_2$$

여기서 $S(u, v)$ 를 θ_1 과 z_1 에 대해 적분하고 공간 콘볼루션을 적용하면 식 (5)와 같고, 이를 다시 클로즈드 폼 (closed-form)을 사용하면 식 (6)와 같이 표현되며, 결과적으로 식 (1)의 상호 방사 임피던스를 식 (7)과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$S(u, v) = \int_{a/2}^{a/2} \int_{a/2}^{a/2} f_1(\theta_2, u) f_2(z_2, v) d\theta_2 dz_2$$

$$\begin{cases} f_1(\theta_2, u) = \begin{cases} 1, & -\theta/2 \leq u + \theta_2 \leq \theta/2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \\ f_2(z_2, v) = \begin{cases} 1, & -a/2 \leq v + z_2 \leq a/2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

$$S(u, v) = (\theta - |u|)(a - |v|) \quad (6)$$

$$Z_{12} = \frac{j\rho ck}{2\pi} R_0^2 \int_{a/2}^{a/2} \int_{a/2}^{a/2} (\theta - |u|)(a - |v|) \frac{e^{-jkv}}{r} dudv \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여 그림 2와 같은 형태의 평면 배열에 있는 원통형 배열 구조에서의 상호 방사 임피던스를 계산하였다. 원통의 높이와 반지름 (R)이 각각 1 m이고, 높이를 0.01 m 간격, 원호를 1° (≈ 0.0175 m) 간격으로 원통 배열 구조를 모의한 후, 기준 진동체 (■ 표시)를 제외한 원호 위에 놓여진 진동체들이 기준 진동체에 작용하는 상호 방사 임피던스를 계산하였다. 이는 기준 진동체를 중심으로 하는 곡면 배열 구조로 간주된다.

2.2. 상호 방사 임피던스 계산 비교

식 (7)에 의해 계산된 결과를 검증하기 위해 기존에 사용되어온 4중 적분에 의한 계산 결과 [6-7]와 비교하였다. 임의의 원통 크기를 정하고 평면 배열에서의 상호 방사 임피던스와의 비교를 통해, 본 논문에서 제안하는 계산 방식에 대한 제한 요소를 분석하였다. 원통 배열과 평면 배열에서 각각 상호 방사 저항을 계산한 후에 다음의 식 (8)을 이용하여 오차율 ($MRR_{\text{difference}}$)을 계산하였다.

$$MRR_{\text{difference}} = \frac{MRR_{\text{cylinder}} - MRR_{\text{plane}}}{\text{Max}[\text{Abs}(MRR_{\text{plane}})]} \quad (8)$$

여기서 MRR_{cylinder} 와 MRR_{plane} 은 각각 원통 배열과 평면 배열에서의 상호 방사 저항이다.

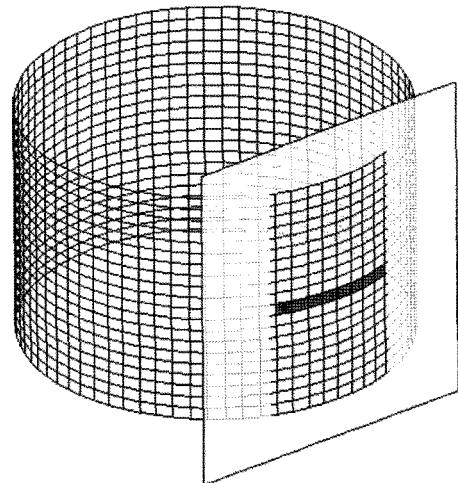


그림 2. 원통 배열 구조
Fig. 2. Cylindrical array structure.

III. 수치 계산 결과 및 토의

3.1. 공간 콘볼루션(Spatial convolution) 방식에 의한 상호 방사 임피던스에 의한 상호 방사 임피던스

kR 이 1, 5, 20, 40일 때 (k 는 파수, R 은 원통 반지름), 기준 진동체 (그림 2의 ■ 표시)를 중심으로 곡면 배열을 이루는 다른 진동체에서의 정규화된 상호 방사 임피던스를 실수부 (저항, Resistance, 그림 3(a)), 허수부 (리액턴스, Reactance, 그림 3(b)), 절대값 (임피던스, Impedance, 그림 3(c)) 별로 계산하였다. 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 저항의 경우, kR 이 5일 때 0이 되는 지점은 36° (원호 길이 62.8 cm)이고 반파장은 63 cm이다. 이는 각 진동체의 원호 길이가 1.75 cm이기 때문에 수치 계산에 있어서 무한 극소 진동체로 충분히 고려되지 못한 점에서 발생하는 오차라고 여겨진다. kR 이 20일 때 0이 되는 지점이 $9^\circ, 18^\circ, 27^\circ, 36^\circ, 45^\circ$ 이고, kR 이 40일 때 0이 되는 지점이 $4.5^\circ, 9^\circ, 13.5^\circ, 18^\circ, 22.5^\circ, 27^\circ, 31.5^\circ, 36^\circ, 40.5^\circ$ 이다. 이는 각각의 kR 에 대하여 반 파장 ($\lambda/2$)에 비례하여 나타나는 현상이다. 하지만 이 경우도 마찬가지로 같은

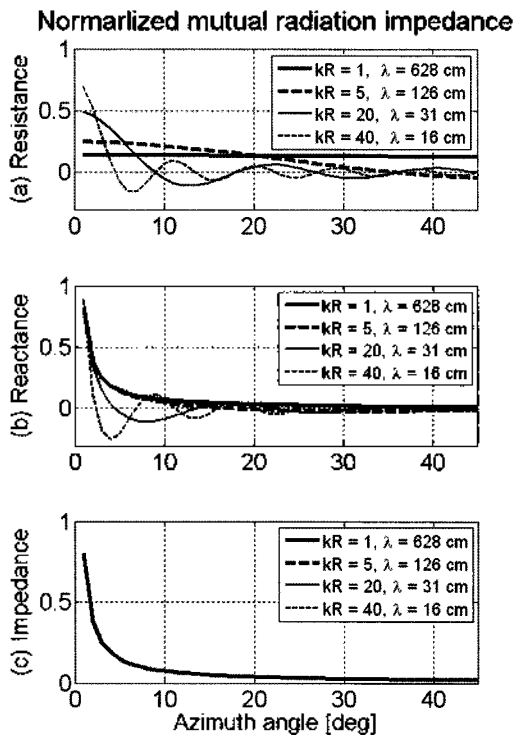


그림 3. 원통 배열 구조에서 원호 각도에 따라 기준 진동체에 작용하는 정규화된 상호 방사 임피던스: 저항(a), 리액턴스(b), 임피던스(c), $kR=1, 5, 20, 40$

Fig. 3. Normalized mutual-radiation impedance as a function of the azimuth angle; resistance. (a), reactance (b), impedance (c), $kR=1, 5, 20, 40$

이유에 의해서 정확한 반파장의 길이와 일치하지는 않는다. 리액턴스의 경우 (그림 3(b)), 저항이 0이 되는 위치에서 극값을 나타내고 있다. 한편, 리액턴스가 0이 되는 위치에서 저항은 극값을 나타낸다. 이는 리액턴스가 0이 될 때 공진 주파수가 되어 저항이 상대적으로 커짐을 뜻한다.

3.2. 4중 적분 방식과의 비교

공간 콘볼루션에 의한 계산 값을 4중 적분을 사용하는 기존 방식에 의한 계산 값 [6-7]과 비교하였다 (그림 4). 초기 조건은 $kR_a = 36, kz_{0i} = kz_{0j} = kR_a \Phi_{0i} = kR_a \Phi_{0j} = \pi/2$ 이다. 여기서 k 는 파수, R_a 는 원통의 반지름, z_{0i}, z_{0j} 는 진동체의 z 축 방향 길이의 반, Φ_{0i}, Φ_{0j} 는 각 진동체의 원호의 반각으로 5° 이다. 그림 4에서 가로축은 두 진동체 사이의 거리를 파장으로 나눈 값 (Separation in wave lengths, q)으로 정의되고, 이 값은 위의 조건 하에서 최소값이 0.5이다. 공간 콘볼루션에 의한 결과가 기존의 4중 적분에 의한 결과와 대체로 일치하고 있다 (그림 4 - Case 1). 한편, 가로축에서 0.5 이하의 경우를 고려하기 위하여 초기 조건을 $kz_{0i} = kz_{0j} = kR_a \Phi_{0i} = kR_a \Phi_{0j} = \pi/200$ 으로 하였다. 이는 진동체의 크기를 파장에 비해 매우 작게 하여 파장에 대한 두 진동체 사이의 거리를 최소화하기 위함이다. 이 경우 그림 4에서와 같이 가로축이 약 0.7까지 가면서 차이가 커지다가 그 후 다시 점차 줄어들면서 0으로 수렴하고 있으며, 주기적으로 차이가 커졌다가 작아지는 것을 반복한다. 초기 조건이 달라짐에 따라 결과값에 차이가 나타나지만 파장에 대한 두 진동체

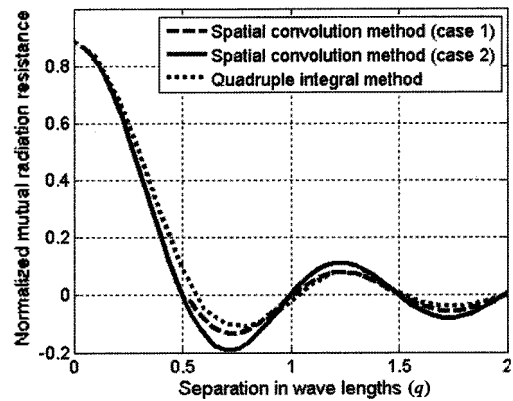


그림 4. 공간 콘볼루션 방식에 의한 계산 결과 비교

Case 1: $kz_{0i} = kz_{0j} = kR_a \Phi_{0i} = kR_a \Phi_{0j} = \pi/2$,
Case 2: $kz_{0i} = kz_{0j} = kR_a \Phi_{0i} = kR_a \Phi_{0j} = \pi/200$

Fig. 4. The comparison between the spatial convolution method and reference.

Case 1: $kz_{0i} = kz_{0j} = kR_a \Phi_{0i} = kR_a \Phi_{0j} = \pi/2$,
Case 2: $kz_{0i} = kz_{0j} = kR_a \Phi_{0i} = kR_a \Phi_{0j} = \pi/200$

사이의 거리가 근접할수록 (가로축이 0에 가까울수록) 기존의 4중 적분 (그림 4-점선)과 공간 콘볼루션 (그림 4-실선) 결과값의 차이는 작아지는 것을 알 수 있다. 그리고 계산 시간의 경우, 공간 콘볼루션을 사용하여 본 연구를 수행하였을 때 약 60초의 시간이 소요된 반면, 4중 적분을 사용하는 기존의 방식은 약 1000배 이상의 시간이 소요된다 [12].

수식 (1)은 무한 평면 배플에 고정된 진동체의 상호 방사 임피던스이고, 배플이 없는 경우는 반사 효과가 고려되지 않아서 배플이 있는 경우의 1/2의 값을 갖는다. 반면, 원통 혹은 구형 배플이 있을 경우는 평면 배플이 있는 경우와 없는 경우의 중간 정도의 반사효과로 인해 음압의 표현 (수식 (1)의 피적분 함수)이 복잡한 양상을 띄게 된다 [6]. 그렇기 때문에 적분 방법만을 변화시켜 평면 배플을 원통형 배플로 변환시키는 데에는 제한이 따른다. 이러한 현상은 그림 4의 case 2 (실선)와 4중 적분 그림을 비교해 보면 나타난다. 가로축이 점점 커짐에 따라 두 경우의 상호 방사 저항의 차이가 커지고 있다. 즉 원통 배열에서 두 진동체 사이의 각도가 커질수록 (두 진동체의 거리가 멀어질수록) 공간 콘볼루션을 이용한 계산 결과의 차이가 커지고 있다. 이는 평면 배열에서의 음압식을 적분 방식만을 변화시켜서 원통형 배열에서 사용하기 때문에 발생하는 오차라고 여겨진다. 이 부분을 해결하기 위해 파장과 진동체의 크기 그리고 진동체 사이의 각도에 대한 한계를 규명하는 연구가 수행될 필요가 있다.

3.3. 평면 배열과의 비교

kR 이 30일 때, ka 에 따른 원통 구조와 평면 배열에서의 상호 방사 저항을 계산하였다. $ka=1, 5, 10$ 일 때, 각각에 대한 상호 방사 저항을 그림 5의 (a), (b), (c)에 나타냈다. 원통 구조에서 상호 방사 저항이 0으로 수렴하면서 변동하는 주기는 평면 배열에서의 경우보다 짧다. 이는 평면 배열에서 두 진동체 사이의 거리가 선형적으로 증가하는 반면, 원통 구조에서는 좌표 변환에 의해 비선형적으로 증가하고, 또한 두 진동체 사이 거리의 증가율이 감소하기 때문에 상호 방사 저항의 변동 주기가 짧아진다. 이러한 현상은 ka 가 달라지더라도 같은 경향을 보이고 있다. 한편, 동일한 kR 에서 ka 가 증가하면 파장에 대한 진동체의 크기가 커지기 때문에 상호 방사 저항의 크기는 커지게 된다.

본 논문에서 제시하는 원통형 구조에서의 상호 방사 임피던스는 공간 콘볼루션을 이용한 좌표 변환에 의한

배열 변화이기 때문에 4중 적분 방식을 이용한 원통 배열에서의 상호 방사 임피던스와는 차이가 있다. 즉, 평면 배열을 원통 구조에서 제한적으로 활용하는 방식이다. 여기서 제한 요소로는 kR 과 ka 이고, 이에 대한 분석이 필요하다. 이에 ka 가 1, 5, 10일 때, 각각의 kR 에 따른 상호 방사 저항을 계산하였다 (그림 6, 7, 8). 먼저, ka 가 1일 때, kR 이 1부터 40까지 변함에 따른 원통 구조와 평면 배열에서의 상호 방사 저항은 각각 그림 6 (a)와 (b)에서 보는 바와 같다. 평면 배열에서는 반지름 (R)이 독립적이기 때문에 kR 에 따른 상호 방사 저항의 변화는 없다. 하지만 원통 구조는 반지름의 영향으로 인해 kR 에 따른 변화가 있다. 두 결과의 차이를 그림 6 (c)에 도시하였다. 흑색으로 도시된 부분은 수식 (8)을 이용하여 평면 배열에서의 결과를 기준으로 두 결과의 차이가 5% 이내의 구간이다. 이 조건 하에서는 공간 콘볼루션을 이용하여 좌표 변환에 의한 원통 구조에서 상호 방사 저항 값으로 사용될 수 있다. 이 구간은 ka 가 커짐에 따라 좁아지는 것을 알 수 있다 (그림 6 (c), 7 (c), 8 (c)). 이는 ka 가 증가하면서 원통 구조에서 파장에 대한 진동체의 크기가 상대적으로 커지면서 평면 배열에서의 진동체와의 차이가 점점 커지기 때문이다. 그림 6 (b), 7 (b), 8 (b)에서 보듯이, ka 가 다르더라도, 평면 배열에서는 반지름에 대한 제한이 없

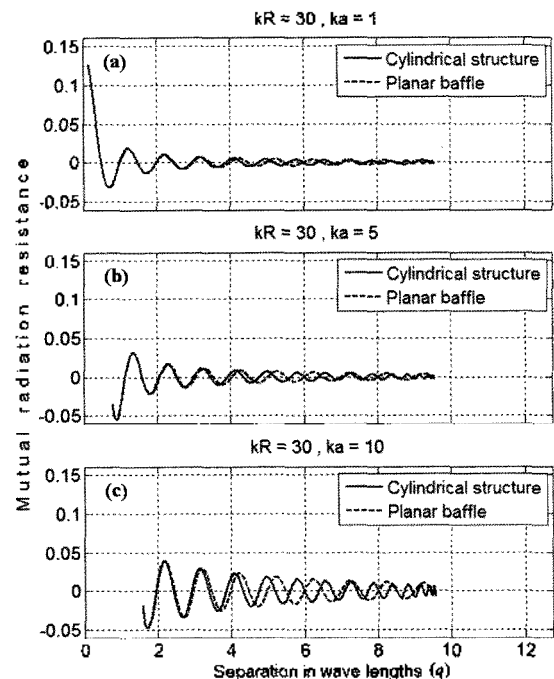


그림 5. $kR=30$ 일 때, 평면 배플과 원통형 구조에서의 상호 방사 저항: (a) $ka = 1$, (b) $ka = 5$, (c) $ka = 10$
 Fig. 5. Mutual radiation resistance both in the cylindrical structure and in the planar baffle at $kR=30$: (a) $ka = 1$, (b) $ka = 5$, (c) $ka = 10$.

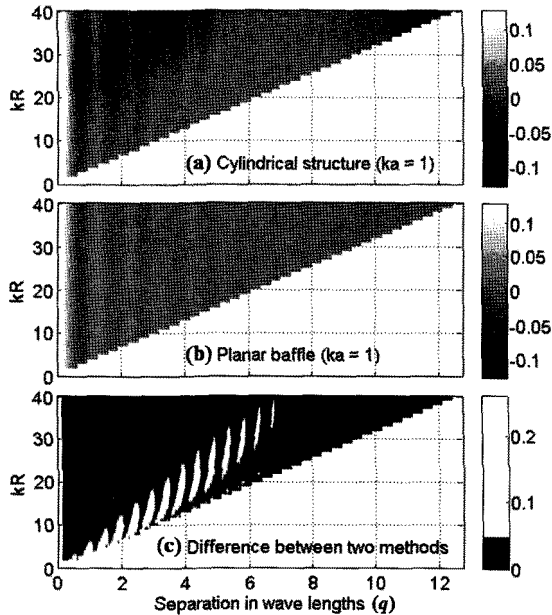


그림 6. $ka=1$ 일 때, kR 에 따른 상호 방사 저항의 변화 (a)원통형 구조, (b)평면 배플, (c)두 경우에서 상호 방사저항의 차이 - 평면 배플을 기준으로 오차율이 0.05 (5 %) 이하인 경우(흑)와 이상인 경우(백)

Fig. 6. Variation of the mutual radiation resistance depending on kR at $ka=1$: (a)Cylindrical structure, (b)Planar baffle, (c)Difference between two methods—lower part(black) than 0.05 (5 %) of the error rate and higher part(white).

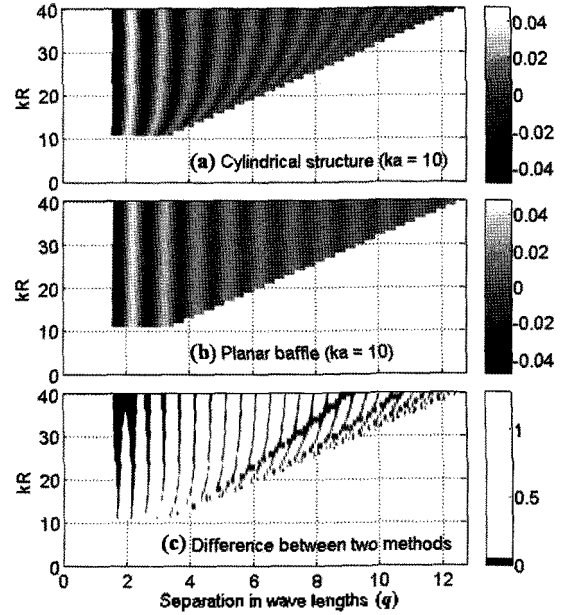


그림 8. $ka=10$ 일 때, kR 에 따른 상호 방사 저항의 변화 (a) 원통형 구조, (b) 평면 배플, (c) 두 경우에서 상호 방사 저항의 차이- 평면 배플을 기준으로 오차율이 0.05 (5 %) 이하인 경우 (흑)와 이상인 경우 (백)

Fig. 8. Variation of the mutual radiation resistance depending on kR at $ka=10$: (a) Cylindrical structure, (b) Planar baffle, (c) Difference between two methods—lower part (black) than 0.05 (5 %) of the error rate and higher part (white).

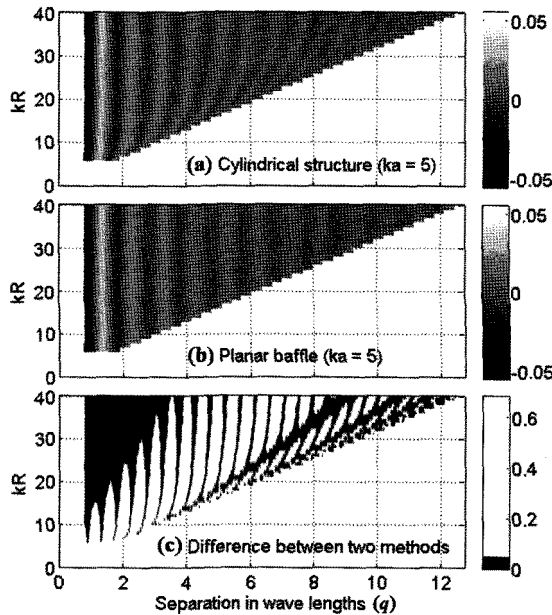


그림 7. $ka=5$ 일 때, kR 에 따른 상호 방사 저항의 변화 (a) 원통형 구조, (b) 평면 배플, (c) 두 경우에서 상호 방사 저항의 차이- 평면 배플을 기준으로 오차율이 0.05 (5 %) 이하인 경우 (흑)와 이상인 경우 (백)

Fig. 7. Variation of the mutual radiation resistance depending on kR at $ka=5$: (a) Cylindrical structure, (b) Planar baffle, (c) Difference between two methods—lower part (black) than 0.05 (5 %) of the error rate and higher part (white).

기 때문에 각각의 ka 에서는 상호 방사 저항 값이 kR 에 따른 변화가 없다. 반면, 원통 구조에서는 kR 과 ka 가 상호 영향을 미치기 때문에 임의의 ka 에서 상호 방사 저항의 kR 에 따른 변화가 보이고, 그 변화의 정도는 ka 가 달라짐에 따라 또한 차이가 난다(그림 6 (a), 7 (a), 8 (a)). 이러한 차이에 의해 ka 가 증가함에 따라 원통 구조에서의 상호 방사 저항과 평면 배열에서의 상호 방사 저항의 차이가 커지고 그 차이의 비율이 5% 이하인 구간이 감소하게 된다 (그림 6 (c), 7 (c), 8 (c)). 따라서 이 논문에서 제시한 평면배열상의 원통구조에서의 상호방사임피던스를 공간 콘블루션을 이용하여 계산할 때, $ka=1$ 이하이며 q 값에 따른 kR 값의 일부 구간을 제외하면, 5% 이내의 오차범위 내에서 사용할 수 있으며, ka 값이 줄어들수록 더 적은 오차범위 내에서 사용할 수 있다.

3.4. 원통 구조에서의 방사 임피던스

이상에서 살펴본 원통 구조에서의 상호 방사 임피던스 수치 계산 방법을 이용하여, 원통 구조에 놓여 있는 진동체들의 방사 임피던스를 계산하였다. kR 이 30이고 ka 가 1일 때, 그림 6 (c)에 의해 q 값은 4까지 제한된다. 즉, 평면

표 1. 그림 9, 10의 원통 구조에서 방사 임피던스 수치 계산에 사용된 입력 변수. q 는 두 진동체 사이의 거리를 파장으로 나눈 값, R 은 원통의 반지름, H 는 원통의 높이, a 는 진동체 한 번의 길이.

Table 1. Input parameters for the numerical calculation of the radiation impedance in the cylindrical structure as shown in the figure 9 and 10. q is the separation in the wave lengths, R is the radius of the cylinder, H is the height of the cylinder and a is the length of one side of the piston.

	kR	ka	q	R [m]	H [m]	a [m]
Figure 9	30	1	4	2	2	0.067
Figure 10	40	1	4	2	2	0.05

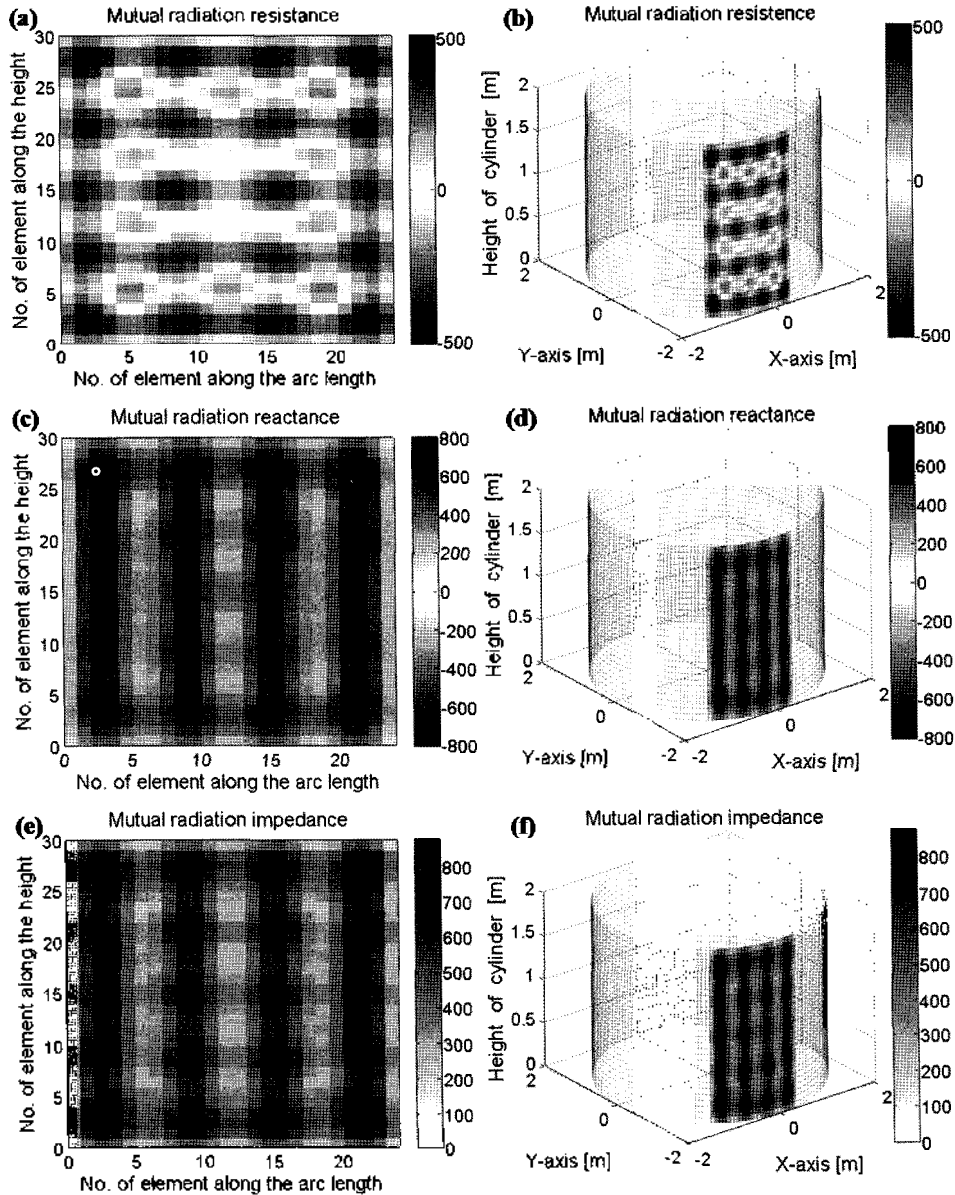


그림 9. 표 1에서 $kR=30$ 일 때, 원통 구조에서 진동 시 각 진동체에서의 방사 임피던스 저항(a), (b), 리액턴스(c), (d), 임피던스(e), (f)
Fig. 9. At $kR=30$ in the table 1, the radiation impedance at each element when the cylindrically-arrayed sensor vibrates: resistance (a), (b), reactance (c), (d), impedance (e), (f).

배플 상에 놓인 원통 구조로 간주되는 원통 배열 형태이다. 이를 기초로 하여 표 1에서와 같이, kR 을 30과 40으로 다르게 하고, 그 외 ka , q , R , H 를 같게 하여 입력 변수를 설정하였으며, 이 경우 a 는 각각 0.067 m, 0.05 m가 된

다. 이러한 배열 구조는 그림 9와 10에서 보듯이, 각각의 경우에 30×24 , 40×24 의 배열을 형성하고, 서로 다른 형태의 방사 저항 (그림 9 (a), (b), 그림 10 (a), (b)), 방사 리액턴스 (그림 9 (c), (d), 그림 10 (c), (d)), 방사 임피던스

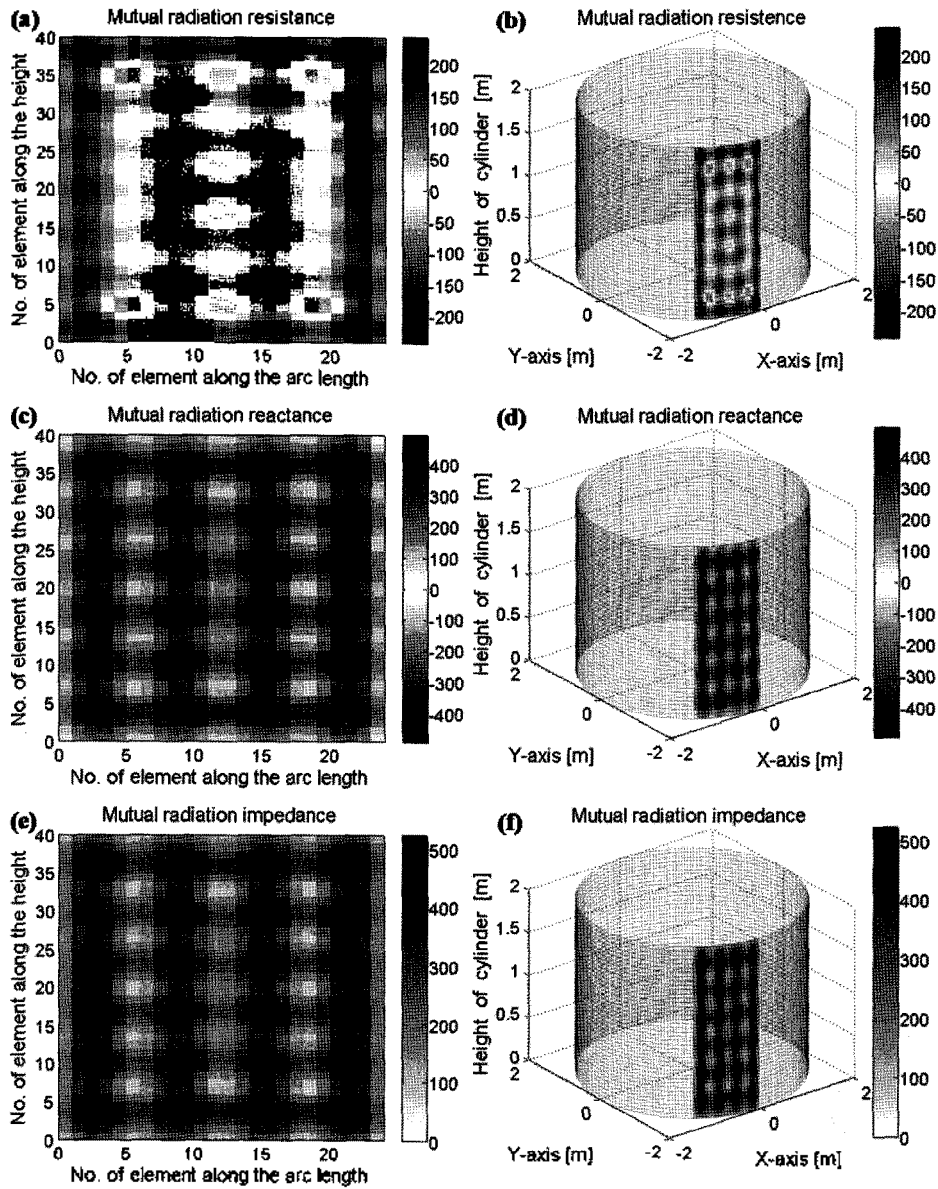


그림 10. 표 1에서 $kR=40$ 일 때, 원통 구조에서 진동 시 각 진동체에서의 방사 임피던스 저항 (a), (b), 리액턴스 (c), (d), 임피던스 (e), (f) Fig. 10. At $kR=40$ in the table 1, the radiation impedance at each element when the cylindrically-arrayed sensor vibrates: resistance (a), (b), reactance (c), (d), impedance (e), (f).

스 (그림 9 (e), (f), 그림 10 (e), (f))를 보여준다. 같은 크기의 원통에서 ka 가 고정되고 kR 이 커지면 a 가 상대적으로 줄어들기 때문에 파장도 짧아진다. 원통의 높이는 고정되었기 때문에 파장이 짧아짐에 따라 원통 높이에 따른 방사 저항, 리액턴스, 임피던스 등의 변동 주기는 짧아진다. 반면, a 값이 고정되었기 때문에 a 가 줄어든 만큼 원호의 길이도 짧아지면서 원호에 따른 변동 주기는 변함이 없게 된다. 이러한 방사 임피던스 해석은 선박의 측면과 같이 곡률 반경이 큰 원통 구조에 적용될 수 있고, 측면주사소나나 다중빔음향측심기 등의 센서 설계에도 활용될 수 있을 것이다.

IV. 결론

본 논문에서는 공간 콘볼루션 방식을 이용한 수치 계산을 통하여 원통형 구조에서의 상호 방사 임피던스 특성을 해석하였다. 원통 배열 구조는 공간 콘볼루션을 이용하여 평면 배열이 변환된 형태이기 때문에 정확한 원통형 배열을 고려할 수는 없지만 계산 시간을 단축할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 두 가지 방식의 결과를 비교하여 오차 범위를 계산하였다. 즉, 원통 배열에서 공간 콘볼루션 방식에 의한 상호 방사 저항 값과 4중 적분 방식에 의한 결과 값을 비교하여 계산 방식에 의한 오차를 확인

하였다. 또한, kR 과 ka 를 다르게 하여 공간 콘볼루션 방식으로 계산된 평면 배열에서의 상호 방사 저항과 원통 배열에서의 그것을 비교하고, 그 차이를 분석하여 kR 과 ka 의 제한된 범위 내에서 공간 콘볼루션 방식에 의한 원통 구조에서의 상호 방사 임피던스를 계산하여 특성을 확인할 수 있었다. 이러한 특성은 향후 원통 배열 센서의 설계 및 제작에 있어서 기초 자료로 활용될 것으로 여겨진다. 공간 콘볼루션 방식은 배열 구조의 형태를 확장하여 원통형 배열뿐만 아니라 구형 혹은 임의의 곡면 배열 구조에서의 상호 방사 임피던스 수치 계산에 활용될 수 있으며, 평면 배열이 아닌 다른 곡면 배열에서의 적용에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해 배열 구조의 수학적 해석과 공간 콘볼루션의 적용에 대한 기초 연구가 진행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다. (계약 번호 UD070054AD) 또한 심사위원의 건설적인 심사에 대해서 감사드립니다.

참고 문헌

1. O. B. Wilson, *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers*, Peninsula Publishing, Los Altos, pp. 109–126, 1988.
2. P. R. Stepanishen, "The time-dependent force and radiation impedance on a piston in a rigid infinite planar baffle," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 49, no. 3, pp. 841–849, 1971.
3. J. Lee and I. Seo, "Radiation impedance computations of a square piston in a rigid infinite baffle," *J. Sound Vib.*, vol. 198, no. 3, pp. 299–312, 1996.
4. T. Oishi and D. A. Brown, "Measurements of mutual radiation impedance between baffled cylindrical shell transducers," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 122, no. 3, pp. 1581–1526, 2007.
5. C. H. Sherman, "Mutual Radiation impedance of sources on a sphere," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 31, no. 7, pp. 947–952, 1959.
6. J. E. Greenspon and C. H. Sherman, "Mutual-radiation

- impedance and nearfield pressure for pistons on a cylinder," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 36, no. 1, pp. 149–153, 1964.
7. J. S. Kim, M. J. Kim, K. L. Ha and C. D. Kim, "Improvement of calculation for radiation impedance of the vibrators with cylindrical baffle," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 5B, pp. 3188–3192, 2004.
 8. R. L. Pritchard, "Mutual radiation impedance between radiators in an infinite rigid plane," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 32, no. 6, pp. 730–737, 1960.
 9. C. L. Scandrett, J. L. Day and S. R. Baker "A modal Pritchard approximation for computing array element mutual impedance," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 109, no. 6, pp. 2715–2729, 2001.
 10. W. L. Li and H. J. Gibeling, "Determination of the mutual radiation resistances of a rectangular plate and their impact on the radiated sound of power," *J. Sound Vib.*, vol. 229, no. 5, pp. 1213–1233, 2000.
 11. A. D. Pierce, R. O. Cleveland and M. Zampolli, "Radiation impedance matrices for rectangular interlaces within rigid baffles: Calculation methodology and applications," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 111, no. 2, pp. 672–684, 2002.
 12. K. Sha, J. Yang and W.-S. Gan, "A simple calculation method for the self- and mutual-radiation impedance of flexible rectangular patches in a rigid infinite baffle," *J. Sound Vib.*, vol. 282, no. 1–2, pp. 179–195, 2005.

저자 약력

•복 태 훈 (Tae-Hoon Bok)

한국음향학회지 제28권 제3호 참조

•이 잉 (Ying Li)

한국음향학회지 제24권 제4호 참조

•팽 동 국 (Dong-Guk Paeng)

한국음향학회지 제24권 제5호 참조
현재, 제주대학교 해양시스템공학과 부교수

•이 종 길 (Jong-kil Lee)

한국음향학회지 제21권 제7호 참조

•신 구 균 (Ku-Kyun Shin)

한국음향학회지 제26권 제6호 참조

•조 치 영 (Chee-Yong Joh)

한국음향학회지 제14권 제5호 참조