

Tonpiliz 트랜스듀서에 적용 가능한 전면추 형상에 따른 방사 패턴 해석

Analysis of the Radiation Pattern in Relation to the Head Mass Shape Applicable to a Tonpiliz Transducer

김 회 용*, 노 용 래*
(Hoeyong Kim*, Yongrae Roh*)

*경북대학교 기계공학과

(접수일자: 2010년 7월 10일; 수정일자: 2010년 9월 1일; 채택일자: 2010년 9월 9일)

Tonpiliz 트랜스듀서의 방사 패턴은 구조 변수들에 의해 많은 영향을 받는다. 본 연구에서는 단일 모드 Tonpiliz 트랜스듀서에 대해서 동일한 유효 면적을 가지는 다양한 전면추 형상에 따른 방사 패턴을 계산하였다. 트랜스듀서의 전면추 형상은 가장 많이 사용되는 원형과 정삼각형, 정사각형, 정육각형 및 정팔각형에 대해 분석하였으며, 각 형상에 대해 방사 패턴 수식을 유도하였다. 유도한 수식을 바탕으로 전면추 형상과 크기에 따른 방사 패턴의 변화를 해석하고, 서로의 특성을 비교하였다. 계산 결과의 타당성은 유한 요소 해석을 이용하여 확인하였다.

핵심용어: Tonpiliz 트랜스듀서, 전면추, 방사패턴, 유한 요소

투고분야: 수중음향 분야 (5.3)

The radiation property of a Tonpiliz transducer is influenced by the structural variables of the transducer. In this study, with respect to a single mode Tonpiliz transducer, the radiation patterns were calculated for different head mass geometries of the same effective radiation area. The shapes of the head mass analyzed were the most popular circular, regular triangular, square, regular hexagonal and regular octagonal types, and radiation pattern equations were derived for each of the head mass shapes. Based on the derived equations, radiation patterns in accordance with the shape and size of the head mass were calculated and the results were compared with each other. Validity of the calculation results were confirmed by means of finite element analysis.

Keywords: Tonpiliz transducer, Head mass, Radiation pattern, Finite element analysis

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.3)

I. 서론

수중 음향 트랜스듀서는 다양한 목적으로 사용되는데, 트랜스듀서가 가지는 음압 분포 및 지향 특성은 주어진 목적에 맞는 트랜스듀서를 설계하고 제작하는데 매우 중요하다. 수중에서 음파를 이용하여 표적을 탐지하고 식별하기 위한 트랜스듀서로는 전면추, 압전소자, 후면추의 구조로 이뤄진 Tonpiliz 트랜스듀서가 가장 널리 사용되고 있다 [1-2]. Tonpiliz 트랜스듀서를 수중 탐지용으로 효율적으로 사용하기 위해서는 트랜스듀서 전면으로의

음파의 방사 패턴에 대한 해석이 반드시 필요한데 [3], Tonpiliz 트랜스듀서에서 방사 패턴을 결정하는 가장 중요한 요소 중의 하나가 전면추의 크기 및 형상이다 [4-7].

Tonpiliz 트랜스듀서의 전면추 형상에 따른 방사패턴 변화에 관한 연구는 방사면의 형상이 원형 또는 사각형인 경우에 대해서는 다수의 보고가 있으나 [8-13], 정삼각형이나 정육각형 및 정팔각형과 같은 여타 정다각형일 경우에 대한 방사 패턴 연구는 미미한 상태이다. 나아가 최근에 사용되는 수중 탐지 센서의 경우, 트랜스듀서를 개별적으로 사용하기 보다는 보다 우수한 특성을 구현 할 수 있도록 다수의 트랜스듀서를 어레이 형태로 배열하여 많이 사용하고 있는데, 그 배열 방식과 형상에 따라 개별 Tonpiliz 트랜스듀서의 전면추 형상이 달라지게 된다. 트

랜스듀서가 어레이 형태로 사용될 경우 전체 어레이의 방사 특성은 결국에는 각 트랜스듀서들의 특성이 어우러져 나타나기 때문에, 개별 트랜스듀서의 방사 특성을 정확히 해석하는 것이 우선적이다. 따라서 단일 트랜스듀서로서의 용도를 포함하여 최근에 중요성이 더 부각되고 있는 다양한 배열 센서로의 용도를 위해서도, Tonpilz 트랜스듀서의 전면추 크기와 형상에 따른 방사 패턴의 변화를 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 Tonpilz 트랜스듀서의 방사특성을 결정하는데 중요한 설계 변수인 전면추의 형상에 따른 방사 패턴 함수를 이론적으로 유도하였으며, 이를 바탕으로 전면추의 크기에 따른 방사 특성 변화를 해석하였다. 해석에 사용된 Tonpilz 트랜스듀서는 길이 방향으로만 진동하는 단일 진동 모드를 가진다고 설정하였다. 먼저 Tonpilz 트랜스듀서 제작 시 전면추 형상으로 자주 사용되는 원형, 정삼각형, 정사각형, 정육각형 및 정팔각형에 대한 방사 패턴을 수식으로 전개하였다. 나아가 전면추 크기의 영향을 보기 위하여 Tonpilz 트랜스듀서의 전면추 직경을 0.5λ (λ : 중심 주파수에서의 파장)와 1.3λ 가 되도록 하여 각 경우에 대한 방사 패턴의 차이를 관찰하였다. 여기서 전면추 직경을 0.5λ 로 설정한 것은 Tonpilz 트랜스듀서를 어레이로 사용할 때 트랜스듀서 간의 간격 즉 트랜스듀서의 최대 직경으로 가장 널리 채택되는 값이기 때문이고, 1.3λ 는 이러한 통상적인 트랜스듀서 직경보다 월등히 큰 값 중의 하나로서 전면추 크기의 영향을 명확히 나타낼 수 있도록 임의로 채택한 값이다. 원형 전면추는 이러한 직경들을 직접 적용할 수 있고, 여타 형상의 경우 이러한 직경을 가지는 원형과 동일한 면적을 가지는 각 형상 별 크기를 구하여 방사 패턴을 계산하였다. 나아가 전면추의 유효 직경이 1.3λ 인 경우에 대한 해석 결과의 타당성을 유한요소해석 결과와 비교함으로써 검증하였다.

II. 원형 전면추의 방사 패턴

먼저 Tonpilz 트랜스듀서의 전면추 형상으로 가장 널리 사용되는 원형에 대한 방사 패턴을 계산하였다. 그림 1에 나타난 것처럼 원의 반경은 a , Z축과 측정 지점인 P점이 이루는 각은 θ 라 하였으며, XY 평면상에서 X축과 빗금친 부분의 끝이 이루는 각도를 ϕ 로 정의 하였다. x 는 원 점에서 계산하고자 하는 미소 면적까지의 거리를 나타낸다. r 는 좌표축의 중심과 측정 지점까지의 거리이고, r' 는 계

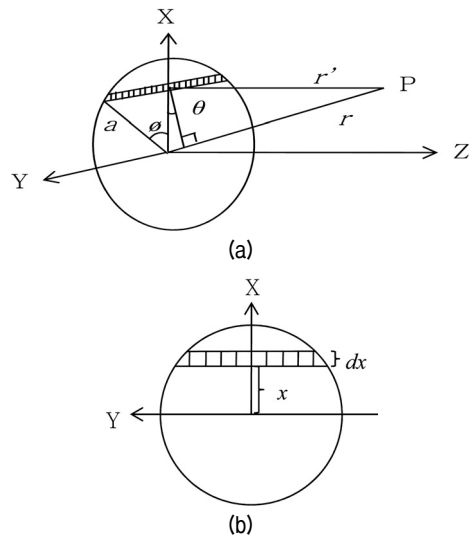


그림 1. 반경이 a 인 원형 전면추: (a) 좌표계 (b) XY 면 형상
Fig. 1. Circular head mass of radius a : (a) coordinates (b) XY plane view.

산하고자 하는 미소 면적에서 측정 지점까지의 거리이다. 그림 1을 바탕으로 음압을 구하기 위해 식 (1)을 이용하여 수식을 전개하였다 [8].

$$dp = i\rho_0 c \frac{dQ}{\lambda r} e^{i(\omega t - kr')} \quad (1)$$

여기서 Q 는 source strength 이고 ρ_0 는 방사 매질의 밀도, k 는 파수, λ 는 파장, ω 는 각주파수, c 는 음속을 나타낸다. 먼저 빗금친 미소 면적의 X방향 변위를 dx 라고 정의하여 식을 전개하면 아래와 같이 식 (2)와 (3), (4)를 얻을 수 있다.

$$x = a \cos \phi$$

$$dx = -a \times \sin \phi \times d\phi \quad (2)$$

$$r' = r - a \times \cos \phi \times \sin \theta \quad (3)$$

$$dQ = 2 \times a \sin \phi \times dx \times U_0 \quad (U_0: \text{particle velocity}) \quad (4)$$

식 (2), (3), (4)를 식 (1)에 대입하여 음압을 계산하면 식 (5)와 같다.

$$p = -i\rho_0 c \frac{2a^2 U_0}{\lambda r} e^{i(\omega t - kr)} \int_0^\pi e^{ika \cos \phi \sin \theta} \times \sin^2 \phi d\phi \quad (5)$$

따라서 원형의 전면추에 대한 최종 directivity 함수는

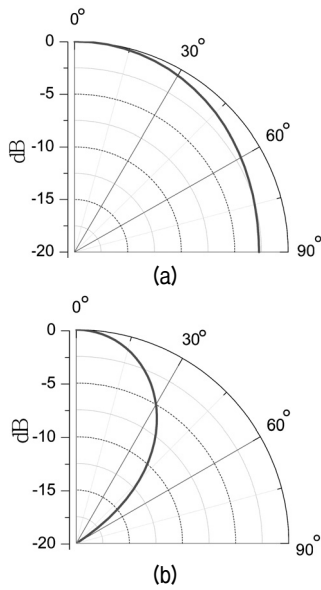


그림 2. 원형 전면추의 방사 패턴: (a) 직경 = 0.5λ (b) 직경 = 1.3λ
 Fig. 2. Radiation pattern of the circular head mass: (a) diameter = 0.5λ (b) diameter = 1.3λ.

식 (6)으로 나타낼 수 있다 [8].

$$\text{Directivity function} = \int_0^\pi e^{ika \cos \phi \sin \theta} \times \sin^2 \phi d\phi \quad (6)$$

식 (6)을 이용하여 원형 피스톤의 직경이 0.5λ일 때와 1.3λ일 때를 계산하여 방사 패턴을 구하였으며, 그 결과를 그림 2에 나타내었다.

III. 정삼각형 전면추의 방사 패턴

그림 3의 정삼각형 전면추에 대한 방사 패턴 계산은 II 절에서와 동일한 방법으로 수행하였으며, 음압을 구하는 기본적인 수식으로 식 (1)을 사용하였다. 정삼각형의 한 변의 길이를 a 로 하고 Z축과 측정 지점까지의 각을 θ 로 정의하여 그림 3 (a)에 나타내었다. 원점에서 X축 방향으로 미소 변위까지의 거리를 나타내는 x 의 변화를 ϕ 에 대한 수식으로 나타내기 위해 그림 3 (b)에 나타낸 것처럼 선 d 를 그어 활용하였으며, X축과 선 d 가 이루는 각도를 ϕ 로 정의하였다. 또한, 굵은 선으로 이뤄진 삼각형에서 Y축 방향으로 변하는 길이를 나타내기 위해서 계산하고자 하는 미소 면적의 Y축 방향 길이를 삼각형의 한 변의 기울기에 대한 수식 형태로 그림 3 (b)에 나타내었다.

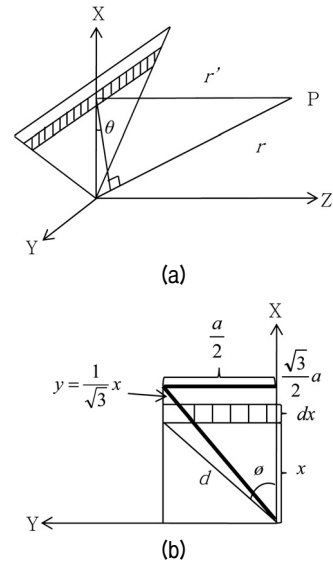


그림 3. 정삼각형 전면추: (a) 좌표계 (b) XY 면 형상
 Fig. 3. Regular triangular head mass: (a) coordinates (b) XY plane view.

II절에서 계산한 방법과 동일하게 계산하면 식 (7), (8), (9)를 얻을 수 있다.

$$d = \frac{a}{2 \sin \phi}, \quad x = d \cos \phi = \frac{a}{2 \sin \phi} \times \cos \phi, \quad (7)$$

$$dx = -\frac{a}{2 \sin^2 \phi} d\phi \quad (8)$$

$$r' = r - \frac{a}{2 \sin \phi} \times \cos \phi \times \sin \theta \quad (9)$$

$$dQ = -\frac{a^2}{2\sqrt{3}} \times \frac{\cos \phi}{\sin^3 \phi} \times d\phi \times U_0 \quad (10)$$

식 (7), (8), (9)를 식 (1)에 대입하면 P지점에서의 음압을 나타내는 식 (10)을 구할 수 있다.

$$p = i\rho_0 c \frac{U_0}{\lambda r} e^{i(\omega t - kr)} \times \frac{-a^2}{2\sqrt{3}} \times \int_{\tan^{-1}(\frac{1}{\sqrt{3}})}^{\frac{\pi}{2}} e^{ik \frac{a}{2 \sin \phi} \cos \phi \sin \theta} \times \frac{\cos \phi}{\sin^3 \phi} \times d\phi \quad (11)$$

따라서 정삼각형 전면추에 대한 최종 directivity 함수는 식 (11)과 같으며, 방사 패턴을 계산한 결과는 그림 4와 같다.

$$\text{Directivity function} = \int_{\tan^{-1}(\frac{1}{\sqrt{3}})}^{\frac{\pi}{2}} e^{ik \frac{a}{2 \sin \phi} \cos \phi \sin \theta} \times \frac{\cos \phi}{\sin^3 \phi} \times d\phi \quad (12)$$

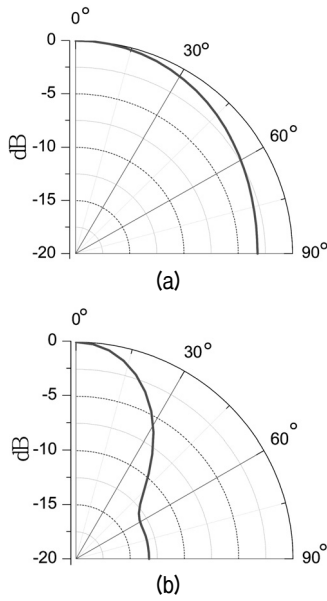


그림 4. 정삼각형 전면추의 방사 패턴: (a) 유효직경 = 0.5λ (b) 유효직경 = 1.3λ
 Fig. 4. Radiation pattern of the regular triangular head mass: (a) effective diameter = 0.5λ (b) effective diameter = 1.3λ.

그림 4 (a)와 (b)는 각각 0.5λ 와 1.3λ의 직경을 가지는 원형 피스톤과 같은 면적의 정삼각형 전면추에 대한 방사 패턴이다. 원거리 음장에서 방사 패턴은 주엽을 축으로 각도에 관계없이 모두 동일한 형상을 나타내었다.

IV. 정사각형 전면추의 방사 패턴

정사각형 형상의 전면추에 대한 수식 전개는 원형과 동일하다. 다만 원형에서의 φ 범위는 0 ~ π인 반면에, 정사각형에서의 범위는 π/4 ~ 3π/4이며, 한 변의 길이는 a로 정의하였다. 나머지 치수에 대한 정의는 그림 5에 나타내었다.

앞에서와 같은 방법으로 정사각형 형상의 전면추에 대한 음압을 구하면 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$p = -\frac{i}{2} \rho_0 c \frac{a^2 U_0}{\lambda r} e^{i(\omega t - kr)} \int_{\pi/4}^{3\pi/4} e^{ik \frac{a}{2 \sin \phi} \cos \phi \sin \theta} \times \frac{1}{\sin^2 \phi} d\phi \quad (12)$$

따라서 정사각형 형상의 전면추에 대한 최종 directivity 함수는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있으며, 이 계산 식을 바탕으로 앞서 계산한 것과 동일한 방법으로 0.5λ와 1.3λ의 직경을 가지는 원형 피스톤과 같은 면적을 가지는

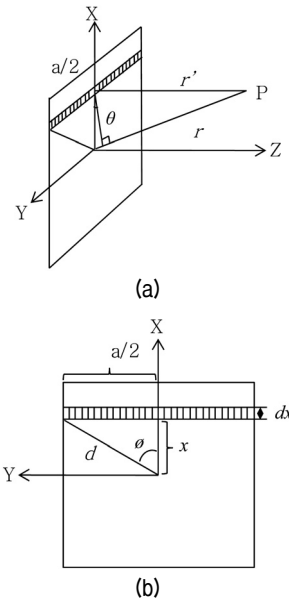


그림 5. 정사각형 전면추: (a) 좌표계 (b) XY 면 형상
 Fig. 5. Square head mass: (a) coordinates (b) XY plane view.

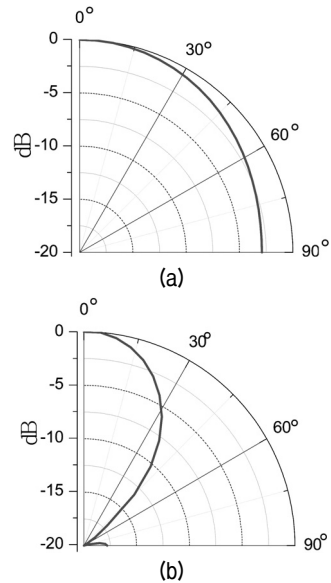


그림 6. 정사각형 전면추의 방사 패턴: (a) 유효직경 = 0.5λ (b) 유효직경 = 1.3λ
 Fig. 6. Radiation pattern of the square head mass: (a) effective diameter = 0.5λ (b) effective diameter = 1.3λ.

정사각형 전면추의 방사 패턴을 구해보면 그림 6과 같다.

$$\text{Directivity function} = \int_{\pi/4}^{3\pi/4} e^{ik \frac{a}{2 \sin \phi} \cos \phi \sin \theta} \times \frac{1}{\sin^2 \phi} d\phi \quad (13)$$

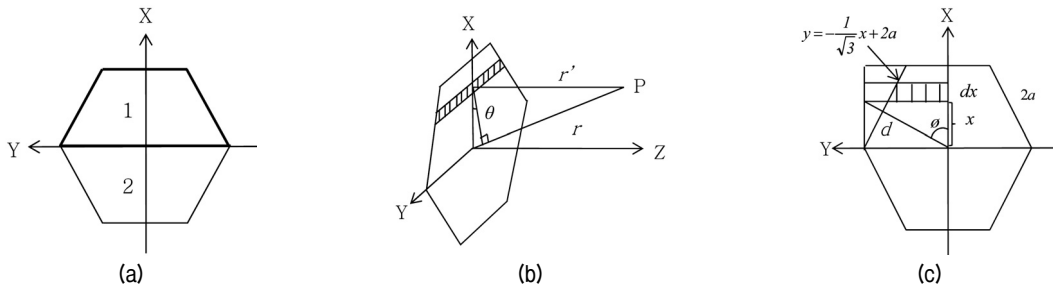


그림 7. 정육각형 전면추: (a) 전면추 구간 분할 (b) 좌표계 (c) XY 면 형상
 Fig. 7. Regular hexagonal head mass: (a) division of the head mass region (b) coordinates (c) XY plane view.

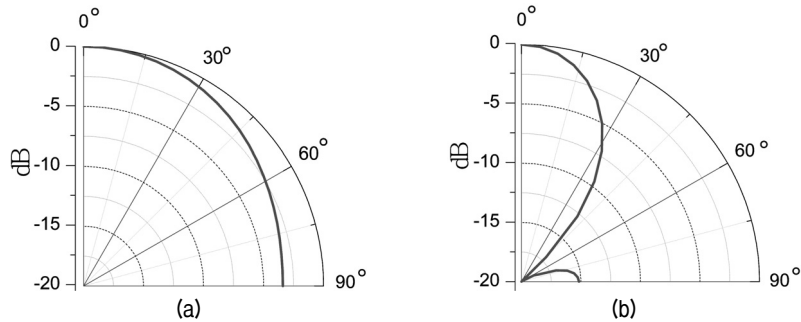


그림 8. 정육각형 전면추의 방사 패턴: (a) 유효직경 = 0.5λ (b) 유효직경 = 1.3λ
 Fig. 8. Radiation pattern of the regular hexagonal head mass: (a) effective diameter = 0.5λ (b) effective diameter = 1.3λ.

V. 정육각형 전면추의 방사 패턴

정육각형 전면추는 방사 패턴을 하나의 수식으로 계산 하기에는 형상이 복잡하여, 그림 7 (a)에 나타난 것처럼 두꺼운 선으로 둘러 쌓인 1번 구간과 얇은 선으로 쌓인 2번 구간으로 나누어서 음압을 계산한 다음, 각각의 계산 결과를 더하여 최종 방사 패턴 식을 구하였다. 치수와 변의 기울기에 대한 정의는 그림 7 (b)와 그림 7 (c)에 나타 내었다. 앞에서 정의한 것과 달리 한 변의 치수를 계산상 편의를 위해 2a로 정의하였다.

앞 절에서 계산한 것과 같은 방법으로 1번 구간에 대한 수식을 전개하면 식 (14)와 같은 결과를 얻을 수 있다

$$p = i\rho_0 c \frac{(4a^2)U_0}{\lambda r} e^{i(\omega t - kr)} \times \int_{\tan^{-1}(\frac{2}{\sqrt{3}})}^{\frac{\pi}{2}} e^{ik\frac{2a}{\sin\phi}\cos\phi\sin\theta} \times \left(-\frac{1}{\sqrt{3}\times\tan\phi} + 1\right) \times \frac{-1}{\sin^2\phi} d\phi \quad (14)$$

따라서 1번 구간에 해당하는 directivity function은 식 (15)와 같다.

$$\text{Directivity function} = \int_{\tan^{-1}(\frac{2}{\sqrt{3}})}^{\frac{\pi}{2}} e^{ik\frac{2a}{\sin\phi}\cos\phi\sin\theta} \times \left(-\frac{1}{\sqrt{3}\times\tan\phi} + 1\right) \times \frac{-1}{\sin^2\phi} d\phi \quad (15)$$

같은 방법으로 2번 구간에 해당하는 directivity function은 식 (16)과 같이 구할 수 있다.

$$\text{Directivity function} = \int_{\frac{3\pi}{2}}^{\pi + \tan^{-1}(\frac{2}{\sqrt{3}})} e^{ik\frac{2a}{\sin\phi}\cos\phi\sin\theta} \times \left(-\frac{1}{\sqrt{3}\times\tan\phi} - 1\right) \times \frac{-1}{\sin^2\phi} d\phi \quad (16)$$

따라서, 정육각형 전면추 전체에 대한 최종 directivity 함수는 식 (15)와 (16)을 더한 것으로 식 (17)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Directivity function} = & \int_{\tan^{-1}(\frac{2}{\sqrt{3}})}^{\frac{\pi}{2}} e^{ik\frac{2a}{\sin\phi}\cos\phi\sin\theta} \times \left(-\frac{1}{\sqrt{3}\times\tan\phi} + 1\right) \times \frac{-1}{\sin^2\phi} d\phi \\ & + \int_{\frac{3\pi}{2}}^{\pi + \tan^{-1}(\frac{2}{\sqrt{3}})} e^{ik\frac{2a}{\sin\phi}\cos\phi\sin\theta} \times \left(-\frac{1}{\sqrt{3}\times\tan\phi} - 1\right) \times \frac{-1}{\sin^2\phi} d\phi \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)로 0.5λ와 1.3λ의 직경을 가지는 원형과 동일한 면적을 가지는 정육각형 전면추의 방사 패턴을 계산하면 그림 8과 같다.

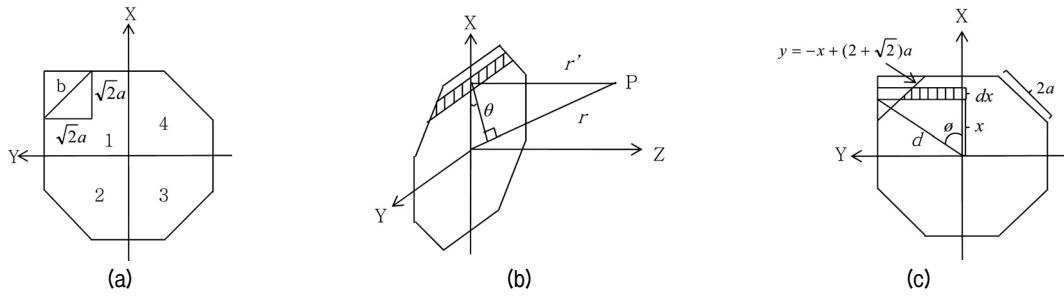


그림 9. 정팔각형 전면추: (a) 전면추 구간 분할 (b) 좌표계 (c) XY 면 형상
 Fig. 9. Regular octagonal head mass: (a) division of the head mass region (b) coordinates (c) XY plane view.

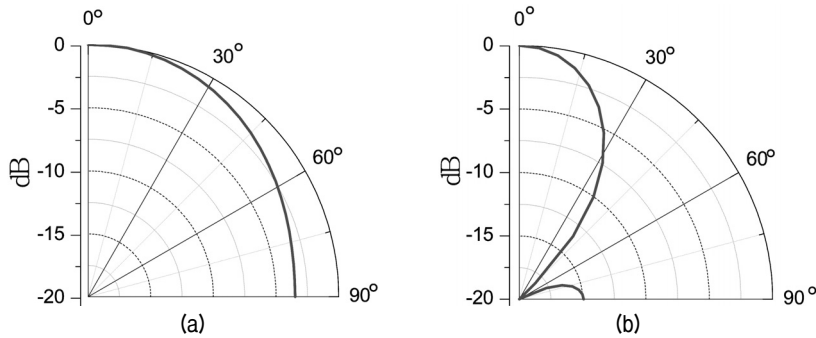


그림 10. 정팔각형 전면추의 방사 패턴: (a) 유효직경 = 0.5λ (b) 유효직경 = 1.3λ
 Fig. 10. Radiation pattern of the regular octagonal head mass: (a) effective diameter = 0.5λ (b) effective diameter = 1.3λ.

VI. 정팔각형 전면추에 대한 방사 특성

정팔각형의 경우도 정육각형과 마찬가지로 복잡한 형상을 가지고 있기 때문에 그림 9 (a)에 보이는 것처럼 나눠서 각각 방사 패턴 식을 전개 한 다음 결과를 모두 더하는 방식으로 계산하였다. 계산에 사용된 변수로는 한 변의 길이를 2a로 정의하였고, 다른 변수는 그림 9에 나타난 것과 같다. 그림 9 (a)에 보이듯이 먼저 정팔각형을 1, 2, 3 그리고 4의 네개 구간으로 나누고, 나눠진 사각형의 음압에서 삼각형으로 된 b부분의 음압을 빼주는 방식으로 각 구간의 음압을 구하였다. 구해진 4개의 음압을 모두 더하여 정팔각형 전면추에 대한 방사 패턴을 구하였다.

1번 구간에 대한 Directivity 함수를 구하기 위해서 먼저 IV절에서와 같은 방법으로 사각형에 대한 directivity 함수를 구하면 식 (18)을 얻는다.

$$\text{Directivity function} = \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} e^{ik \frac{(1+\sqrt{2})}{\sin \phi} a \cos \phi \sin \theta} \times \left(-\frac{(1+\sqrt{2})}{\sin^2 \phi} a \right) d\phi \quad (18)$$

다음으로 III 절에서와 같은 방법으로 삼각형 형상의

b부분에 대한 directivity 함수를 구하면 식 (19)와 같다.

$$\text{Directivity function} = \int_{\frac{\pi}{4}}^{0.375\pi} e^{ik \frac{(1+\sqrt{2})}{\sin \phi} a \cos \phi \sin \theta} \times \left(\frac{1+\sqrt{2}}{\tan \phi} - 1 \right) \times \left(-\frac{(1+\sqrt{2})}{\sin^2 \phi} a^2 \right) \times d\phi \quad (19)$$

따라서 1번 구간에 대한 최종 directivity 함수는 식 (18)에서 (19)를 빼 것과 같으며 그 결과를 식 (20)에 나타내었다.

$$\text{Directivity function} = \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} e^{ik \frac{(1+\sqrt{2})}{\sin \phi} a \cos \phi \sin \theta} \times \left(\frac{1}{\sin^2 \phi} \right) d\phi - \int_{\frac{\pi}{4}}^{0.375\pi} e^{ik \frac{(1+\sqrt{2})}{\sin \phi} a \cos \phi \sin \theta} \times \left(\frac{1+\sqrt{2}}{\tan \phi} - 1 \right) \times \frac{a}{\sin^2 \phi} \times d\phi \quad (20)$$

위와 같은 방식으로 2, 3, 4번 구간에 대한 수식을 구하여 더해 주면 정팔각형 전면추에 대한 최종 방사 패턴 함수로 식 (21)을 얻을 수 있다. 그림 10은 식 (21)을 이용하여 앞에서 계산한 것과 같이 직경이 0.5λ와 1.3λ인 원형과 동일한 면적을 가지는 정팔각형 전면추에 대해 계산한 결과이다.

Directivity function=

$$\begin{aligned}
 & \int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} e^{ik\frac{(1+\sqrt{2})}{2}a\cos\phi\sin\theta} \times \left(\frac{1}{\sin^2\phi}\right) d\phi - \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}} e^{ik\frac{(1+\sqrt{2})}{2}a\cos\phi\sin\theta} \times \left(\frac{1+\sqrt{2}}{\tan\phi} - 1\right) \times \frac{a}{\sin^2\phi} \times d\phi \\
 & + \int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} e^{ik\frac{(1+\sqrt{2})}{2}a\cos\phi\sin\theta} \times \left(-\frac{1}{\sin^2\phi}\right) d\phi - \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}} e^{ik\frac{(1+\sqrt{2})}{2}a\cos\phi\sin\theta} \times \left(\frac{1+\sqrt{2}}{\tan\phi} + 1\right) \times \frac{a}{\sin^2\phi} \times d\phi \\
 & + \int_{-\frac{3\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} e^{ik\frac{(1+\sqrt{2})}{2}a\cos\phi\sin\theta} \times \left(\frac{1}{\sin^2\phi}\right) d\phi - \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}} e^{ik\frac{(1+\sqrt{2})}{2}a\cos\phi\sin\theta} \times \left(\frac{1+\sqrt{2}}{\tan\phi} + 1\right) \times \frac{a}{\sin^2\phi} \times d\phi \\
 & + \int_{-\frac{3\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} e^{ik\frac{(1+\sqrt{2})}{2}a\cos\phi\sin\theta} \times \left(-\frac{1}{\sin^2\phi}\right) d\phi - \int_{\frac{3\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{ik\frac{(1+\sqrt{2})}{2}a\cos\phi\sin\theta} \times \left(\frac{1+\sqrt{2}}{\tan\phi} - 1\right) \times \frac{a}{\sin^2\phi} \times d\phi
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

VII. 토론

이상에서 각각 다른 5개의 전면추 형상에 대한 방사 패턴 함수를 유도하였다. 유도한 수식을 바탕으로 각 형상의 전면추가 직경이 0.5λ와 1.3λ인 원형과 동일한 면적을 가지는 경우에 대해 방사 패턴을 계산하였으며, 그 결과를 그림 11에 모두 모아서 나타내었다. 먼저, 유효 직경이 0.5λ인 경우 그림 11 (a)에 나타나듯이 전면추 형상이 바뀌더라도 방사 패턴은 모두 유사한 형상을 보이고 있다. 여기서 더 나아가 전면추 직경이 0.5λ 보다 더 작아질수록 방사 패턴은 더욱 더 동일한 형태를 띠는 것으로 나타났다. 반면에 그림 11 (b)에 나타난 유효 직경이 1.3λ인 경우를 보면 주엽은 모두 유사한 형상을 보이지만, 부엽의 경우에는 전면추의 형상에 따라 절대값뿐만 아니라 모양에서도 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 특히 정삼각형 전면추에서 나타난 부엽은 나머지 4개의 전면추 형

상에 따른 부엽과 다른 형태를 보이고 있다. 추가 계산을 통해 이러한 전면추 형상에 따른 방사 패턴의 차이는 전면추 크기가 커지면 커질수록 특히 부엽에서 더 두드러지게 나타나는 것으로 확인되었다. 해석에 사용된 전면추들은 각각 형상은 다르되 모두 동일한 면적을 가지도록 설정하였으므로, 다른 형상들에 비해서 삼각형은 모서리가 기하학적 중심에서 상대적으로 많이 멀어지게 된다. 특히 전면추의 유효직경이 1.3λ일 경우에는 삼각형의 모서리가 전면추의 중심에서 너무 멀리 멀어짐으로 인해 전면추 상의 각 점 음원들 간에 정확한 동위상이 되지 않게 되고, 이러한 원인에 의해 다른 전면추 형상들과는 다른 부엽 형태를 보이는 것으로 판단된다.

이렇게 전면추 형상에 따라 특히 삼각형 형상일 때 부엽이 다르게 나타나는 현상을 확인하기 위하여 직경이 1.3λ인 원형 전면추와 그와 동일한 면적의 여타 형상의 전면추를 가지는 Tonpilz 트랜스듀서의 방사 패턴에 대한 유한 요소 해석을 수행하였다. 유한 요소 해석에 사용된 원형과 정삼각형 전면추에 대한 모델을 그림 12와 13에 보였고, 모델에 사용된 치수와 물성은 표 1과 2에 나타내었다. 유한 요소 해석 결과를 보면 정삼각형을 제외한 다른 4개의 전면추 형상의 경우 그림 12에서 보는 바와 같이 트랜스듀서 전체가 길이 방향으로 진동하는 단일 진동모드를 나타내는데 반해, 정삼각형의 경우, 그림 13에 나타나듯이 전체가 길이 방향으로 진동함과 동시에 그림에

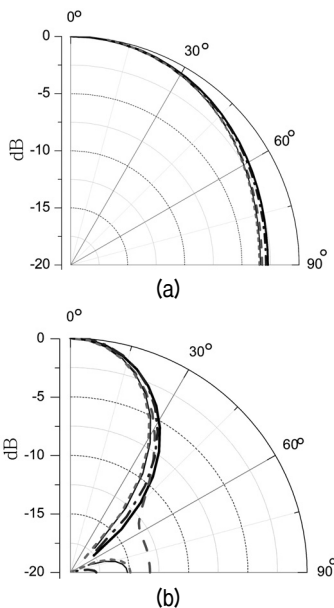


그림 11. 방사 패턴 비교: (a) 유효직경 = 0.5λ (b) 유효직경 = 1.3λ
 Fig. 11. Comparison of the radiation patterns: (a) effective diameter = 0.5λ (b) effective diameter = 1.3λ.

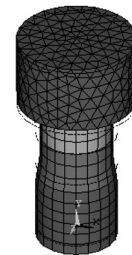


그림 12. 원형 전면추의 진동 모드
 Fig. 12. Vibration mode of the circular head mass.

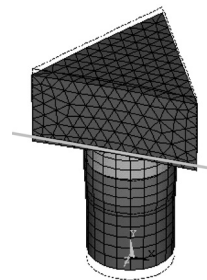


그림 13. 정삼각형 전면추의 진동 모드
 Fig. 13. Vibration mode of the regular triangular head mass.

표 1. 유한요소 모델의 치수

Table 1. Dimension of the finite element model.

	Thickness [mm]	Inner radius [mm]	Outer radius [mm]
Piezoelectric ceramic	8.0 x 2	4.0	9.0
Tail mass	16.0	2.5	9.0
Head mass	16.0	직경 1.3λ인 원형과 동일한 면적	

표 2. 유한 요소 모델의 물성

Table 2. Material properties of the finite element model.

	Material	Young's modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio
Tail mass	steel	206	7960	0.30
Head mass	aluminum	70.3	2770	0.33
Piezoelectric ceramic	PZT-4			

그어진 선과 비교했을 때 삼각형 모서리 부분이 자체적으로 아래 위로 움직이는 진동 모드가 추가적으로 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 이러한 추가적인 진동 모드의 발생은 실제 상황에서는 단일 진동 모드로 설정하고 해석한 결과인 그림 11 (b)에 나타난 값 이상의 방사 패턴 차이를 일으키는 것으로 확인되었다. 이상의 결과를 종합해 보면, Tonpilz 트랜스듀서가 가지는 방사 패턴은 전면추가 0.5λ이하인 작은 직경을 가질 때에는 전면추 형상에 별 영향을 받지 않는다. 하지만 전면추의 크기가 이보다 커질수록 전면추 형상에 따라 부엽의 형상이 달라지게 되어 방사 패턴에 차이를 일으키게 되므로, 큰 유효 직경의 전면추를 가지는 Tonpilz 트랜스듀서의 방사 패턴의 해석을 위해서는 전면추의 형상을 정확히 고려해야 하는 것으로 결론 내려진다.

VIII. 결론

본 연구에서는 수중 음향센서로 가장 널리 사용되고 있는 단일 모드 Tonpilz 트랜스듀서의 전면추 형상에 따른 방사 패턴을 이론적으로 계산하였다. 전면추의 형상으로는 Tonpilz 트랜스듀서가 어레이로 사용될 때 가장 널리 채택되는 원형과 정삼각형, 정사각형, 정육각형 및 정팔각형의 형태를 분석하였으며, 각각의 전면추 형상에 대한 directivity 함수를 수식으로 유도하고, 유도된 수식을 바탕으로 각 형상의 전면추에 대해 유효 직경이 0.5λ와 1.3λ인 경우의 방사 패턴을 계산하였다. 계산 결과 유효 직경이 0.5λ 이하인 경우에는 전면추의 형상에 무관하게 방사 패턴이 모두 유사한 형태를 보였으나, 유효 직경이 1.3λ일 경우에는 전면추의 형상에 따라 차이가 있었다. 특히 정삼각형의 경우는 다른 형상의 전면추와 달리 부엽

의 크기뿐만 아니라 모양도 상당히 다른 형상을 보였는데, 이는 다른 형태일 때에 비해 삼각형은 모서리가 기하학적으로 중심에서 너무 멀리 떨어짐으로 인해 각 점 음원들 간에 정확한 동위상이 되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 유한요소 해석에서는 정삼각형의 경우, 전체가 길이 방향으로 진동함과 동시에 삼각형 모서리 부분이 자체적으로 아래 위로 움직이는 진동 모드가 추가적으로 발생하는 것을 확인하였다. 결론적으로, 전면추의 유효 직경이 0.5λ이하로 작은 경우에는 전면추 형상이 트랜스듀서의 방사 패턴에 큰 영향을 끼치지 않지만, 전면추 면적이 이보다 클 경우에는 전면추의 형상에 따른 특성을 트랜스듀서의 방사 패턴 계산에 정확히 고려해야 하는 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다 (계약번호 UD070054AD).

참고 문헌

1. 강국진, 노용래, "유한요소법을 이용한 Tonpilz 트랜스듀서의 최적구조 설계," *한국음향학회지*, 22권 8호, 637-644쪽, 2003.
2. O. B. Wilson, *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers*, Peninsula Publishing Co., Los Altos, 1988.
3. H. A. Schneck, "Improved integral formulation for acoustic radiation problem," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 44, no. 1, pp. 41-58, 1968.
4. S. Kaneko, S. Nomoto, H. Yamamori, and K. Ohya, "Load characteristics of a bolted Langevin torsional transducer," *Ultrasonics*, 34, pp. 239-241, 1996.
5. K. R. Dhilsha, G. Markandeyulu, B. V. P. S. Rao, and K. V. S. R. Rao, "Design and fabrication of a low frequency giant

magnetostrictive transducer," *Journal of Alloys and Compounds*, 258, pp. 53–55, 1997.

6. D. W. Hawkins, and P. T. Gough, "Multiresonance design of a Tonpilz transducer using the finite element method," *IEEE UFFC*, vol. 43, no. 5, pp. 782–790, 1996.
7. M. B. Moffett, A. E. Clark, M. Wu–Fogle, J. Linberg, J. P. Teter, and E. A. McLaughlin, "Characterization of Terfenol–D for magnetostrictive transducers," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 89, no. 3, pp. 1448–1455, 1991.
8. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, New York, 2000.
9. L. J. Ziomek, *Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space–Time Signal Processing*, CRC Press, Boca Raton, 2000.
10. F. P. Mechel, *Formulas of Acoustics*, Springer, San Diego, 1998.
11. P. R. Stepanishen, "Transient radiation from pistons in an infinite planar baffle," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 49, no. 5, pp. 1629–1638, 1971.

12. R. J. Freund and W. J. Wilson, *Regression analysis: Statistical modeling of a response variable*, Academic Press, San Diego, 1998.
13. J. A. Jensen and N. B. Svendsen, "Calculation of pressure fields from arbitrarily shaped, apodized, and excited ultrasound transducers," *IEEE UFFC*, 39, pp. 262–267, 1992.

저자 약력

• **김 회 용 (Hoeyong Kim)**

2005년: 영남대학교 기계공학과 (학사)
 2007년: 경북대학교 기계공학과 (석사)
 2007년 ~ 현재: 경북대학교 기계공학과 (박사과정)

• **노 용 래 (Yongrae Roh)**

한국음향학회지 제26권 제2호 참조