

초음파 변환기의 음장 분포 예측을 위한 평면 주사 모의실험

김 용 태*, 조 문 재*, 은 희 준*
한국표준과학연구원 음향진동그룹, 대전 305-600

Planar Scanning Simulation Technique for Prediction of the Field Distribution Radiated From Ultrasonic Transducers

Yong Tae Kim*, Moon Jae Jho*, Hee Joon Eun*

Acoust. & Vib. Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600

요약

원형단면을 갖는 수신용 하이드로폰과 같은 면적의 정사각형 단면을 가정하여, 상온의 증류수를 매질로 초음파 변환기에서 방사되는 음장의 공간적 분포를 모의실험하였다. 이러한 “정사각형 평면 근사 평균법(이후 평면 근사 평균법)”을 이용하여, x-축 주사, z-축 주사, xy-평면 주사 및 xz-평면 주사를 모의실험하여 실제 실험에서 나타날 수 있는 여러 가지 현상을 조사하였다. z-축 주사 모의 실험 결과는 Beissner의 이론과 비교하여 비교적 잘 일치하였다.

I. 서론

의료용 초음파 장치는 진단용과 치료용으로 나눈다. 의료용 초음파 장비의 인체에 대한 안전성의 여부와 최근의 국제적 관심으로 대두되고 있다.[1] 참고문헌 [1]에 의하면 초음파 음장의 인체 노출은 온도상승과 공동(cavitation)화를 유발하는 것으로 보고하고 있다. 이러한 온도상승 효과와 공동화를 음장 세기의 함수로 정량화하기 위해서는 음장 세기를 정밀하게 측정하는 기술이 필요하다. 또한 초음파 변환기의 성능평가와 제작 기술 개발을 위해서는 초음파 변환기의 출력특성(방사 컨덕턴스, 지향성, 대칭성, 방사 유효면적 등)을 정밀하게 측정할 수 있어야 한다.

초음파 음장의 공간적 음향세기 분포 측정 기술은 전술한 요구사항을 만족하는 측정 기술로 알려져 있다.[2] 음향세기의 공간분포를 정밀하게 측정하는 방법으로는 교정된 하이드로폰을 사용하여 초음파 음장을 주사(scanning)하여 결정하는 방법[3-5], 광-음향 회절현상을 이용하는 방법[6] 및

초음파 홀로그래피를 이용하는 방법[7] 등이 있다.

이들 방법 중에서 광-음향 회절현상을 이용한 측정기법과 홀로그래피를 이용한 측정기법은 시스템의 구성이 매우 복잡하고 측정장비의 가격이 비싸며, 외부 진동과 같은 환경 영향에 대해 매우 민감하게 반응하기 때문에 산업체의 측정표준으로 사용하기에는 부적합하다. 교정된 하이드로폰을 이용한 평면 음장 주사법(이후 평면 주사법)은 가장 고전적인 방법으로, 시스템 구성이 비교적 간단하고 10 MHz 이상의 주파수 영역에서도 측정이 가능하기 때문에 산업체의 측정표준으로 사용하기에 가장 적합하다. 또한 평면 주사법은 교정된 초음파 변환기를 이용하여 하이드로폰의 절대교정 방법으로 사용되고 있다.

본 논문에서는 초음파 음장의 공간적 분포 예측 기술을 확립하기 위해 평면 주사법 모의실험을 수행하였으며, 실제 평면 주사 실험에서 나타날 수 있는 오차의 요인을 재현하여, 그 영향을 계산하였고 이를 줄이는 방법을 제시하였다.

II. 이론적 배경

그림 1과 같이 반경이 a 인 발신용 초음파 변환기가 각진동수 ω 로 진동하여 방사되는 음파가 형성한 음장을 반경 b 인 수신용 하이드로폰으로 측정한다고 가정하자. 이때 변위 r_1 에서의 음압 $p(r_1, t)$ 은 다음과 같다.[8]

$$p(r_1, t) = j \frac{\rho_0 c u_0 k}{2\pi} \iint_S \frac{\exp[j(\omega t - kr_2)]}{r_2} dA, \quad (1)$$

여기서 $j = \sqrt{-1}$, ρ_0 는 정상 상태의 매질의 밀

도, c 는 매질에서의 음파의 속도, u_0 는 초음파 변환기 표면에서의 입자속도, $k=\omega/c$ 는 파수, r_2 는 초음파 변환기 표면의 면적소(dA_s)에서 하이드로폰 표면의 면적소(dA_r)까지의 거리, r_1 은 초음파 변환기 중심에서 dA_s 까지의 거리이다.

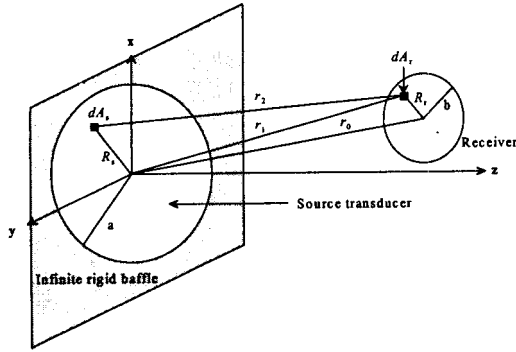


그림 1. 좌표 설정.

초음파 음장 내에 반경이 b 인 하이드로폰이 존재할 경우 하이드로폰 표면의 각 지점에 도달하는 음압이 같지 않다. 따라서 중심이 r_0 지점에 위치한 하이드로폰에서 측정된 음압은 하이드로폰의 표면에 대한 면적 평균으로 다음과 같다.

$$\bar{p}(r_0, t) = \frac{1}{A_r} \int_{A_r} p(r_1, t) dA_r \quad (2)$$

여기서 $A_r = \pi b^2$ 은 하이드로폰의 표면적, r_0 는 초음파 변환기 중심에서 하이드로폰 중심까지의 거리이다. 이 때 평균 음압은 $\bar{p} = \bar{p}(r_0, t)$ 로 r_0 와 t 의 함수이다. 식 (2)에서 $p_0 = \rho_0 c u_0 e^{j\omega t}$ 를 나누어 주면 0에서 2 범위의 값을 갖는 시간에 무관한 평균 상대 음압 진폭 \bar{p}/p_0 으로 표현할 수 있다.

식(2)의 면적평균은, 수신용 하이드로폰 상의 변위 R_r 로의 좌표변환과 식 (1)의 2 중 적분을 포함하여 4 중 적분을 수행하여야 하므로 수치연산에 오랜 시간이 소요된다. 이를 줄이기 위하여, 본 연구에서는 원형의 하이드로폰 면적과 같은 면적의 정사각형, 즉 가로와 세로가 모두 $\sqrt{\pi b^2/2}$ 인 정사각형을 가정하여, 이를 일정한 간격의 격자로 나누고, 각 격자에서의 음압을 식 (1)을 이용하여 구하고, 이를 산술 평균하는 방법을 사용하였다. 이 같은 방법을 사용하면 식 (2)의 면적 적분을 수행하지 않기 때문에 수치 연산에 소요되는 시간을 단축할 수 있다. 이러한 방법을 편의상 "평면 근사 평균법"으로 부르기로 한다.

이러한 방법으로 구한 모의실험의 결과를 검증하기 위해 Beissner[9]의 이론과 비교하였다. 그의 이론은 하이드로폰과 초음파 변환기가 같은 축 상에 일직선으로 배치되는 경우에 한정된 것으로, 대칭에

의해 적분의 회수를 1번으로 줄여 평균 상대 음압 진폭을 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{\bar{p}}{p_0} = e^{-jkz} - \frac{2}{\pi b^2} \int_{g=a-b}^{a+b} \int_{h=0}^{h_u} \exp(-jk\sqrt{g^2+z^2}) dh dg \quad (3)$$

여기서 적분 변수들은 $h_u = \sqrt{a^2 - (a^2 - b^2 + g^2)/4g^2}$ 와 $g = \sqrt{a^2 - R_r^2 \sin^2 \phi} - R_r \sin \phi$ 이고, ϕ 는 R_r 과 g 가 이루는 각이다.

$b/a \rightarrow 0$ 으로 하이드로폰의 반경을 무시할 수 있는 경우, 따라서 평균 상대 음압 진폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\bar{p}}{p_0} = \frac{jk}{2\pi} \int \int_{A_r} \frac{\exp(-jkr_2)}{r_2} dA_r \quad (4)$$

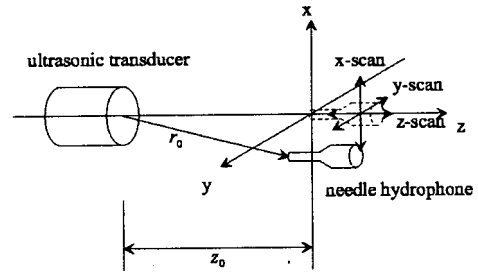


그림 2. 음장주사법 개요도.

III. 모의 실험

모의 실험은 주사하는 축의 수에 따라 1축 주사와 2축 주사로 나눈다. 1축 주사는 그림 2에서 보는 바와 같이 주사하는 축에 따라, x-scan y-scan z-scan 세 가지 분류가 가능하나, 모의실험에서는 초음파 변환기가 완전한 대칭으로 가정하므로, y-scan의 결과와 x-scan의 결과가 같다. 따라서 여기서는 x-scan과 z-scan 만을 사용한다. 2축 주사(평면 주사)의 경우 xy-scan과 xz-scan으로 나눈다.

모의실험 조건으로는 상온(20 °C, 음속 $c=1481$ m/s)의 종류수와 완전 대칭인 반경 6.35 mm인 초음파 변환기 및 수조 벽에 의한 반사파는 없는 경우를 가정하였다. 수치 연산에서 Romberg 적분[10]을 사용하였으며, Romberg 적분의 반복 행렬은 7×7 을 사용하였다.

z-scan에서는 반경이 6.35 mm 인 초음파 변환기에 1 MHz 주파수로 구동한 경우를 Beissner의 이론, 즉 식 (3)을 사용한 수치 연산 결과와 평면 근사 평균법을 이용한 모의실험 결과를 비교하였다. 이 때 하이드로폰의 반경은 0.5 mm와 0.25 mm 두가지를 비교하였다.

x-scan에서는 식 (4)를 이용한 수치 연산 결과와 평면 근사 평균법을 이용한 모의실험 결과를 비교하였다. 초음파 변환기의 반경은 6.35 mm로 고정하였으며, 하이드로폰의 반경은 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm 4 가지 경우를 각각 후방 최대점과 후방 최소점에서 조사하였다.

xy-scan과 xz-scan은 역시 하이드로폰의 반경을 무시할 수 있는 경우를 가정하여 조사하였다. 따라서 수치 연산에는 식 (5)을 사용하였다. $f = 2.25$ MHz 인 경우만을 조사하였다. xz-scan은 $y = 0$ 인 xz 평면을 기준으로 초음파 변환기의 반경이 6.35 mm, 3.175 mm 인 경우를 모의실험 하였다.

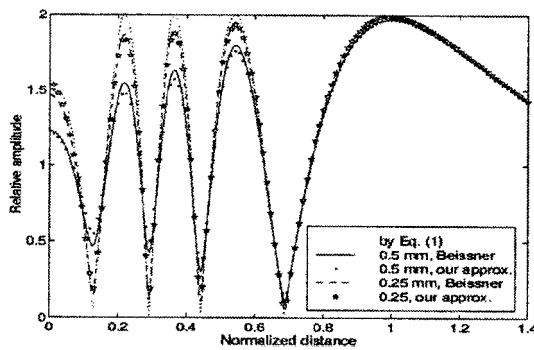


그림 3. z-축 주사 평면 근사 평균법의 결과 및 Beissner 이론의 비교.

IV. 결과 및 토의

1. z-scan

그림 3은 z-축 주사 결과로 Beissner의 식 (3)을 이용하여 수치 연산한 결과와 평면 근사 평균법을 이용하여 모의실험한 결과를 비교한 것이다. 모의실험의 조건은 구동 주파수 1.0 MHz이고, 초음파 변환기의 반경은 6.35 mm이다. 수평좌표에 나타난 규격화 거리(normalized distance)는 파장과 초음파 변환기의 반경을 포함하는 무차원 변수로 다음과 같다.

$$ND = \sqrt{\lambda z/a^2} \quad (5)$$

초음파 변환기로부터 음파의 진행방향인 z축 상에서의 음압 진폭의 분포는 후방에서 최대인 음압 진폭이 나타나는 지점(천이점 : transition point)을 기준으로 근접장(near field)과 자유음장(free field, or far field) 영역으로 나눈다. 그림에 나타난 바와 같이 하이드로폰의 반경이 큰 경우가 작은 경우 보다 근접장에서 상대 음압 진폭의 상하 진폭이 작아지는 현상이 나타난다. 제품화된 초음파 변환기는 진동면 전체가 일정한 진폭으로 진동하지 못하여, 유효 진동 면적을 갖는다. 이를 방사 유효 면적이라

하며, 이는 천이점과 후방 최소 음압 진폭지점(후방 최소점 : last axial minimum point)을 실험을 통해 구한 다음 계산하여 구한다. 따라서 천이점과 후방 최소점은 매우 중요한 의미를 갖는다. 그러나 하이드로폰의 단면적이 커지면 근접장에서의 파형이 완만해 지고, 그 결과 기울기 연장선을 이용한 후방 최소점을 찾는 데 오차가 발생한다.

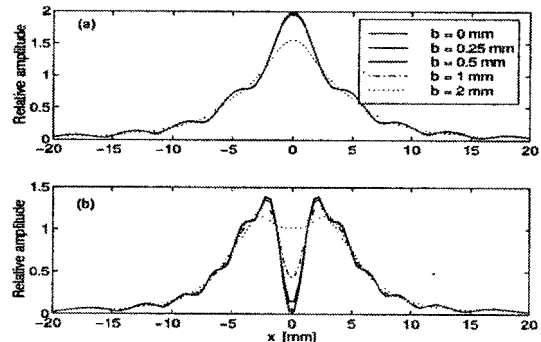


그림 4. 천이점과 후방 최소점에서의 x-scan 모의 실험 결과. (a) 천이점, (b) 후방 최소점.

2. x-scan

그림 4은 구동 주파수 $f = 1$ MHz, 반경 $a = 6.35$ mm인 완전한 대칭을 이루는 초음파 변환기를 가정하여 x-scan을 모의 실험한 결과이다. 그림 (a)는 천이점(16.83 mm)에 해당되며, (b)는 후방 최소점(12.86 mm)에 해당된다.

그림에서 보는 바와 같이 하이드로폰의 반경이 작을수록 피크의 모양이 더 뾰족하게 나타나며, 이러한 형상은 자유음장 영역에서 보다, 근접장 영역에서 더욱 심각하다. 이는 하이드로폰의 반경이 작을수록 분해능이 좋아지고, 반경이 커질수록 분해능이 낮아짐을 의미한다. 이러한 현상 자체는 별로 새로울 것도 없으나, 이를 모의 실험을 통하여 확인한 것이 처음이라는 점에서 의미가 있다. 또한 비록 자유음장 영역이라 할 지라도 하이드로폰의 반경이 커지면 분해능의 저하로 올바른 음장 분포를 측정할 수 없음을 의미하므로 음향 파워의 측정에 심각한 오차의 요인이 될 수 있다.

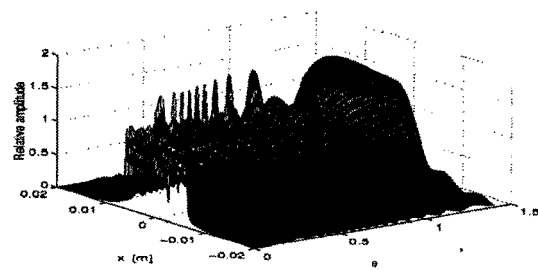


그림 5. xz-scan 모의 실험 결과.

3. xz-scan

그림 5는 반경 6.35 mm 인 초음파 변환기를 2.25 MHz의 주파수로 구동하면서, xz-scan을 모의 실험한 것으로 $y = 0$ 인 평면의 음장의 분포를 입체도로 나타낸 것으로 x 좌표는 초음파 변환기 표면과 평행한 축의 실제 거리를 사용하였고, y 좌표는 규격화 거리를 사용하였다.

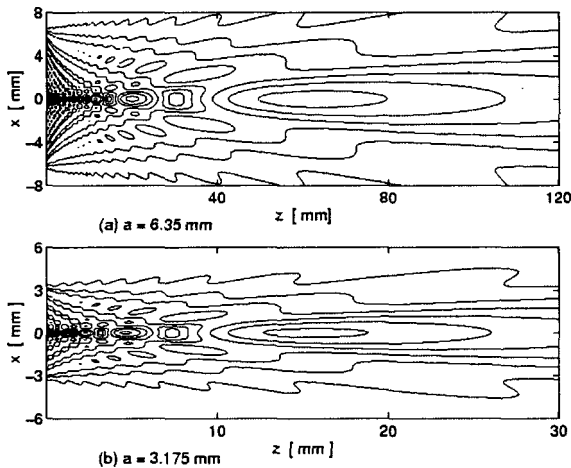


그림 6. xz-scan 모의 실험 결과. 지향성 무늬를 나타낸다. (a) $a = 6.35$ mm, (b) $a = 3.174$ mm.

그림 6은 주파수를 2.25 MHz로 고정하고 초음파 변환기의 반경을 6.35 mm 인 것과 3.175 mm 인 것 두 가지를 모의 실험하여 얻은 결과로 등고선 형태로 표현한 것이다. 그림 6에서 수평 좌표는 실제 거리(그림 2의 z축 거리)를 사용하여 나타내었고, 수직 좌표는 x 축 거리로 나타내었다. 그림 (a)와 (b)를 살펴보면, x 축과 z 축의 구간이 그림 (a)의 경우가 (b)보다 더 넓다. 이는 초음파 변환기의 반경이 작은 경우가 패턴이 더 복잡하고 짧은 거리의 영역에서 나타남을 의미한다.

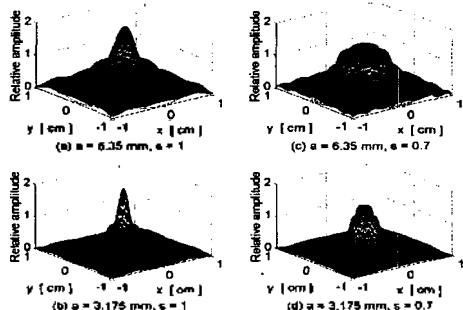


Fig 7. xy-scan 모의 실험 결과. (a) 천이점 $a = 6.36$ mm, (b) 후방 최소점, $a = 6.35$ mm, (c) 천이점, $a = 3.175$ mm, (d) 후방 최소점, $a = 3.175$ mm.

4. xy-scan

그림 7은 주파수 2.25 MHz에서 xy 평면에서 음장을 모의 실험한 결과이다. 그림 (a)와 (c)는 초음파 변환기의 반경이 6.35 mm인 경우이고, 그림 (b)와 (d)는 초음파 변환기의 반경이 3.175 mm 인 경우이다. xy 평면 주사 실험 결과를 면적 적분하면 초음파 변환기에서 방사된 음장의 음향 파워를 구할 수 있다. 이를 그림 7의 모의실험 결과와 비교하여 대칭성과 하이드로폰 및 초음파 변환기의 설치 각도의 오차를 찾는 데 이용될 수 있다.

초음파 변환기의 음장 분포에 영향을 미치는 가장 큰 물리적 변수는 초음파 변환기의 기하학적 크기이다. 실제 실험에서는 측정된 초음파 변환기의 면적이 실제 구동되는 면적과 잘 일치하지 않으며, 이를 보상하기 위해, 유효 면적을 많이 사용한다.[11] 유효면적을 구하는 방법은 참고문헌 [11]에 제시되어 있다. 이 방법을 이용하기 위해서는 후방 최소점과 후방 최대점을 측정하여 사용하는데, 이를 정확하게 측정하기 위해서는 하이드로폰의 설치 각도와 초음파 변환기의 설치 각도가 정확하여야 하며, 3축 이송 장치의 분해능이 좋아야 한다.

IV. 결론

본 연구에서는 음장주사법을 이용한 초음파 음장의 공간적 세기분포 모의실험하여 초음파 변환기와 하이드로폰의 반경에 따른 음장 분포의 영향을 조사하였다.

참고문헌

- [1] IEC/TC 87 CDV., 61861-1(1999).
- [2] D. G. Shombert, *et al.*, *Med. Phys.* 9, 484 (1982).
- [3] IEC/TC 87, 1101(1994)/ 1102(1994)/ 1220 (1994).
- [4] B. A. Herman and R. G. Harris, *J. Acoust. Soc. Am.* 72, 1357(1982).
- [5] S. M. Jones, *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.* 70(5), 1220(1981).
- [6] W. R. Klein and B. D. Cook, *IEEE T-SU*, 14, 123(1967).
- [7] R. Reibold, *Acoustica*, 38, 253(1977).
- [8] L. E. Kinsler, *et al.*, *Fundamentals of Acoustics*, (Wiley, New York, 3rd ed., 1982).
- [9] K. Beissner, *Acustica*, 19, 212(1981).
- [10] A. L. Garcia, *Numerical methods for physics*, (Prentice-Hall, New Jersey, 1st ed., 1994).
- [11] R. C. Chivers, *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.* 68, 80(1980).