

평면 주사법을 이용한 초음파 변환기의 특성 조사

조 문 재*, 김 용 태*, 은 회 준*

한국표준과학연구원 음향진동그룹, 대전 305-600

Characteristics of Ultrasonic Transducers using Planar Scanning Technique

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

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

요 약

초음파 변환기의 음향 특성 평가항목으로는 주파수에 따른 출력특성, 입력 전압에 대한 출력의 선형성(방사컨덕턴스), 방사음장의 지향성 및 대칭성 등을 들 수 있다. 평면 주사기법은 교정된 하이드로폰을 이용하여, 초음파 변환기에서 방사된 음파가 형성하는 음장의 분포를 측정하는 기법이다. 본 연구에서는 이들을 측정할 수 있는 장치로 DC servo 모터를 장착한 3 축 이송 장치와 가로 400 mm, 세로 800 mm, 높이 400 mm를 갖는 수조를 제작하고 제어프로그램을 개발하여 상온의 증류수에 형성된 초음파 음장의 공간 분포를 실험하여, 이론적 예측값과 비교하였다.

I. 서론

의료용 초음파 장비 산업은 기술 집약적 산업으로 고 부가가치를 창조하는 분야이다. 그러나 의료용 초음파 장비의 기초 부족이라 할 수 있는 초음파 변환기의 국내 제작 기술 기반이 미약하여 고가의 초음파 변환기를 수입하여 사용하고 있는 실정이다. 초음파 장비의 제작 단가를 줄이기 위해서는 초음파 변환기 자체의 생산 기술이 필요하다. 이를 위해서는 PVDF 등과 같은 초음파 변환기의 원료 소재의 생산 기술과 초음파 변환기 및 센서로의 가공을 위한 설계 기술 개발이 필요하며, 아울러 초음파 변환기의 성능 평가 기술이 절실히 요구된다.

초음파 변환기의 성능은 입력 전압에 대한 출력의 크기로 정의되는 방사 컨덕턴스와 선형성 및 방사 음장의 지향성과 변환기의 기하학적 대칭성 등으로 평가할 수 있다. 방사 컨덕턴스의 측정은 음향 파워와 입력 전압을 측정하면 쉽게 구할 수 있다. 방사 음장의 지향성과 변환기의 기하학적 대칭성은 음장의 공간적 분포를 측정하여야 하며, 측정된 공간 분포의 대칭성으로 변환기의 대칭성을 평가할 수 있다. 또한 초음파 변환기에서 방사된 음장의 공간 분포를 측정하여 이를 적분하면 음향 파워를 구

할 수 있다.

평면 주사법은 교정된 하이드로폰을 3-축 이송 장치에 설치하여 임의의 평면에 분포된 음장을 주사하는 방법으로, 국제 표준[1-3]으로 채택되어있다.

본 논문에서는 평면 주사법으로 초음파 변환기에서 방사되어 상온의 증류수 내에서 형성된 음장의 공간적 분포를 측정하여 본 연구진[4]의 모의 실험 결과와 비교하였다.

II. 이론적 배경

일반적으로 “교정된(calibrated)”이란 용어는 음압에 대한 전압 출력값 즉, 감도를 알고 있는 것을 의미한다. 교정된 하이드로폰을 사용하여 평면 주사법으로 초음파 변환기에서 방사된 음압의 공간 분포를 측정하면 음장을 구할 수 있으며, 이를 주사한 평면 영역에서 적분하면 초음파 변환기의 파워를 구할 수 있다. 감도가 $M = p/V$ 인 하이드로폰 진단의 음압을 p 라 할 때, 음향 세기는 $I = p^2/2\rho_0c$ 이다. 여기서 V 는 하이드로폰에 검출된 신호 전압, ρ_0 는 매질의 밀도, c 는 음속이다. 일반적으로 음향 파워는 음향 세기의 면적 적분으로 다음과 같다.[5]

$$W = \frac{M^2}{\rho_0 c} \iint_S V(x)^2 dS \quad (1)$$

초음파 변환기에 공급하는 입력 신호의 실효 전압을 V_i 라 할 때, 초음파 변환기의 방사 컨덕턴스 G 는 다음과 같이 정의한다.

$$W = GV_i^2 \quad (2)$$

일반적으로 방사 컨덕턴스 G 는 주파수의 함수이다. 초음파 변환기의 성능 평가에 사용되는 초음파 변환기의 선형성은 이 방사 컨덕턴스로 판단한다.

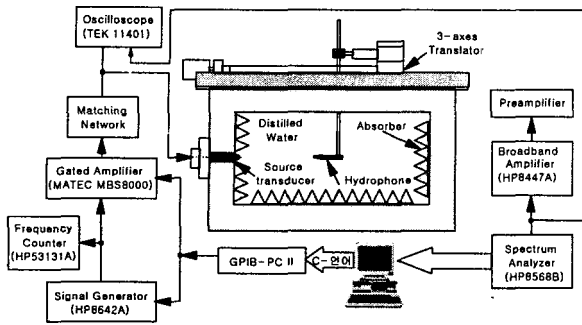


그림 1. 실험 배치도

III. 초음파 음장 분포 측정 시스템 구성

그림 1은 교정된 하이드로폰을 이용하여 초음파 변환기에서 방사된 초음파 음장을 주사하는 측정 시스템의 구성도이다. 신호발생기(HP 8642A)는 연속 신호 또는 펄스 신호를 만들어 주는 장치로 주파수와 신호의 크기를 조절할 수 있을 뿐만 아니라, 펄스 신호들 사이의 지속시간을 조절할 수 있다. Gated Amplifier (MATEC MBS8000)는 초음파 변환기가 초음파의 방사 및 수신을 동시에 수행하는 펄스 에코(pulse echo) 방법을 사용할 경우 입력신호와 수신신호를 구별하여 증폭하는 기능을 가지며, 하이드로폰과 같은 별도의 수신 장치에 의해 수신된 신호를 증폭하는 기능을 갖고 있다. 주파수 계수기(HP 53131A)는 신호발생기에서 출력된 신호의 주파수를 검증하는데 사용한다. 임피던스 매칭 네트워크는 초음파 변환기의 방사 임피던스를 조절하여 매질의 고유 임피던스와 맞추어 주는 역할을 수행한다. 오실로스코프(TEK 11401)는 파형의 왜곡을 감시하는 역할을 수행한다.

수신용 장치로 직경이 서로 다른 4 가지(1 mm, 0.5 mm, 0.2 mm, 0.025 mm : PVDF PA. Co.) 바늘 형태의 하이드로폰을 준비하였다. 이중 직경이 1 mm인 것과 0.5 mm인 것 두가지를 본 연구에서 사용하였으며, 감도는 각각 870 mV/MPa과 190 mV/MPa 이다. 하이드로폰에서 수신된 신호는 전치 증폭기(PA. Co. P106)와 광대역 증폭기(HP 8447A)를 통해 증폭된 후, 스펙트럼 분석기(HP 8568B)에서 특정 주파수의 진폭 값으로 읽혀진다.

수조 벽면에 무반사 흡음재를 설치하고, tone burst 신호를 사용하여 반사파의 영향을 최소화하였다. 또한 안정된 신호를 얻기 위해, 변조신호와 같은 주파수의 동기신호를 이용하여, 스펙트럼 분석기를 동기 시켰다.

측정 시스템의 제어를 위하여 제작한 하드웨어는 제어용 PC와 MMC 인터페이스, 및 GPIB 인터

페이스로 구성된다. 제어대상은 3축 이송장치와 신호발생기 및 스펙트럼 분석기이다. 3축 이송장치는 MMC 인터페이스를 사용하고, 신호발생기와 스펙트럼 분석기는 GPIB 인터페이스를 사용하여 제어한다.

천이점에서 음향 파워를 측정하므로, 천이점보다 큰 z-축 상의 이송 거리를 가져야 한다. 천이점은 $z = (4a^2 + \lambda^2)/4\lambda$ 지점에서 나타나므로, 초음파 변환기의 반경이 6.35 mm 인 경우, 천이점까지의 실제 거리는 15 MHz 일 때 407 mm, 20 MHz 일 때 542 mm 이다. 따라서 3축 이송장치의 z축은 이보다 큰 유효 이송 거리를 가져야 한다. 이를 감안하여 3축 이송장치의 최대 이송 거리를 x축 380 mm, y축 350 mm, z축으로 750 mm, 분해능은 약 10 μ m 이내로 설계 제작하였다. 또한 하이드로폰의 설치 각도를 미세 조정할 수 있는 반달 각도 변환기(goniometer)를 체결하였다.

또한 측정용 수조는 이보다 큰 규격을 가져야 하기 때문에, 3축 이송장치의 규격과 비슷한 약 400×800×400 mm³ 의 크기로 설계하였으며, 두께 10 mm 유리판과 스테인리스 스틸 기억 자앵글로 제작되었다.

IV. 결과 및 토의

초음파 음장의 공간적 세기 분포 측정 시스템의 성능 평가를 위해 사용되는 음원용 초음파 변환기는 시간과 온도변화에 대해 안정도가 좋아야 하며, 선형성이 좋은 음장을 형성하여야 한다. 초음파 변환기의 선형성은 식 (2)와 같이 정의되는 방사 컨덕턴스 값을 입력전압에 따라 측정하여 평가할 수 있다. 그리고 조사된 초음파 변환기는 공칭(nominal) 주파수가 2.25 MHz (Panametrics V306), 10 MHz (Panametrics V311)인 두 가지가 이용되었다.

표 1. 두 종류의 초음파 변환기의 방사 컨덕턴스.

초음파 변환기	공칭 주파수 (MHz)	입력 전압 (V _{eff})	음향 파워 (mW)	방사 컨덕턴스 (mS)
V306	2.25	2.0	2.76	0.69
		3.0	6.12	0.68
		4.0	10.82	0.68
		5.0	17.31	0.69
V311	10	2.0	9.30	2.33
		3.0	21.25	2.36
		4.0	37.88	2.37
		5.0	59.35	2.37

표 1은 차후에 “평면 주사법을 이용한 하이드로폰의 절대교정”[1]에 표준 음원으로 사용 예정인 두 초음파 변환기에 대한 방사 컨덕턴스의 측정 결과이다. 음향 파워의 측정은 천이점에서 주사된 xy-평면 주사 음장을 적분하여 구하였다. 입력전압 V_{eff} 는 초음파 변환기 전단에 입력되는 정현신호의 실효전압 값이다. 표에 나타난 바와 같이 2.25 MHz 변환기의 방사 컨덕턴스는 약 0.69 mS(milli Simen), 10 MHz 변환기의 경우에는 약 2.35 mS으로 분석되었다. 두 초음파 변환기의 방사 컨덕턴스의 값이 각각 상수로 선형성이 우수한 것으로 판단된다.

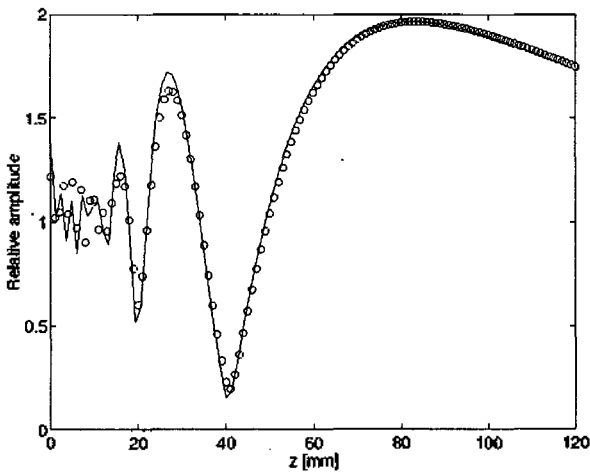


그림 2. z-축 주사 실험 결과 및 모의 실험 결과의 비교.

그림 2는 초음파 음장을 z-축으로 주사한 결과로서, 반경 0.5 mm인 하이드로폰으로 측정한 결과와 모의실험으로 예측한 결과를 비교한 것이다. 이 때 공칭 주파수 2.25 MHz, 공칭 반경 6.35 mm인 초음파 변환기를 3 MHz로 구동하였다. 그림에서 실선은 모의실험에 의한 예측값이고, 기호는 측정값이다. 그림에서 보는 바와 같이 천이점의 위치는 81.3 mm, 후방 최소점은 약 40.47 mm 지점에 나타났다.

일반적으로 후방 최소점 z_m 과 천이점 z_x 은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} z_m &= (a_e^2 - \lambda^2)/2\lambda \\ z_x &= (4a_e^2 - \lambda^2)/4\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 a_e 는 초음파 변환기의 유효 반경이고, λ 는 파장이다. 식 (3)을 이용하면 초음파 변환기의 유효 반경을 구할 수 있다. 따라서 초음파 변환기의 유효반경은 6.36 mm로 공칭 반경 보다 크게 나타났다. 이때 매질(중류수)의 온도는 23.1

℃로 음속이 1491.5 m/s이다.[1]

표 2. 초음파 변환기의 주파수에 따른 유효반경.

f (MHz)	c (m/s)	λ (10^{-6} m)	후방 최소 (mm)		유효 반경 (mm)	천이점 (mm)	온도 (℃)
			계산	측정			
1.75	1493.3	853.28	23.20	21.14	6.07	42.92	23.7
2	1485.6	742.82	26.77	24.59	6.09	49.74	21.1
2.25	1486.9	660.82	30.18	28.43	6.17	57.36	21.5
2.5	1490.1	596.04	33.53	32.17	6.22	64.79	22.6
3	1491.5	497.18	40.30	40.47	6.36	81.31	23.1

표 2는 주파수를 변화시키면서 후방 최소점을 측정하여 유효 반경을 구한 것이다. 표에 나타난 바와 같이 3 MHz 에서는 유효 반경이 초음파 변환기의 실제 반경보다 큰 값을 갖지만 그외의 주파수에서는 작은 값을 가지며, 주파수에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다.

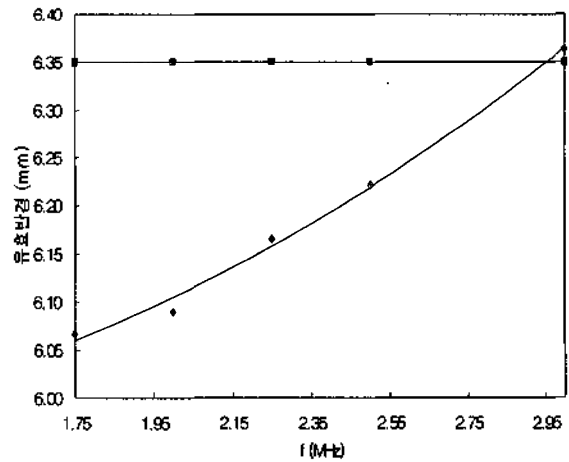


그림 3. 구동 주파수에 따른 초음파 변환기의 유효반경.

그림 3은 표 2의 유효 반경을 그래프로 나타낸 것으로, 주파수에 따른 유효 반경의 변화를 나타낸다. 따라서 유효 반경은 주파수의 함수이다. 특히 유효 반경을 초음파 변환기 실제 진동면의 반경으로 생각할 경우, 기하학적 반경보다 큰 값을 갖는 것을 설명하기 어렵다. 따라서 유효 반경의 의미를 재 고찰할 필요가 있다. 이것은 본 논문의 범위를 벗어나는 것으로 차후의 연구 대상으로 남겨둔다.

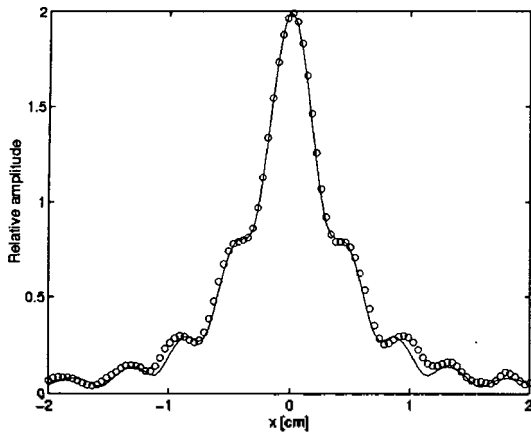


그림 4. x-축 2.25 MHz 주파수의 주사 실험 결과와 모의 실험 결과의 비교.

그림 4는 2.25 MHz의 주파수로 실효 전압 3 V로 구동하여, 천이점에서 x-축 주사를 실험한 결과를 모의실험 결과와 비교한 것으로, 모의 실험에 의한 예측 결과와 잘 일치하고 있다. 최대 음압은 24.7 kPa이다.

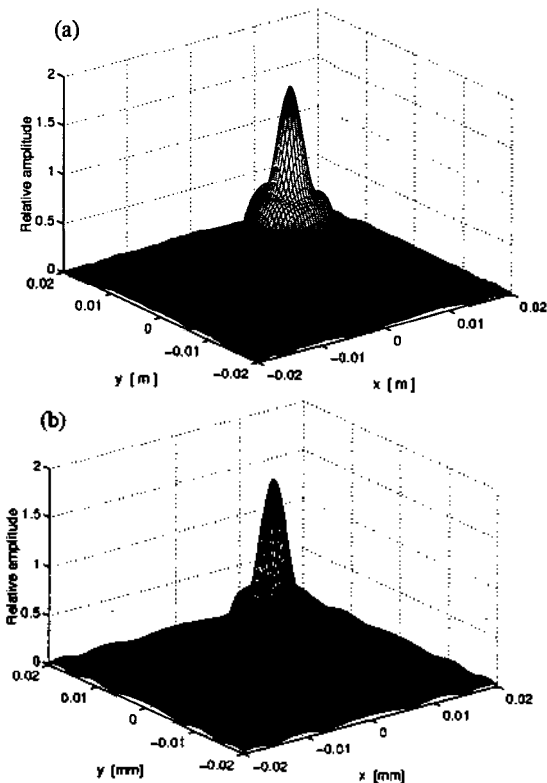


그림 5. xy-평면 주사 결과. (a) 실험 (b) 예측

그림 5는 그림 4와 같은 조건으로 천이점에서 xy-평면 주사로 음장 분포를 측정된 결과와 예측한 결과를 비교한 것이다. 그림 4와 그림 5를 실험하기 전에, z-축 주사를 통해 후방 최소점까지의 거리를 측정하여 28.43 mm 지점에 나타남을 확인한 후, 유효반경을 계산한 결과는 6.17 mm였다. 이를 근거로 천이점의 위치를 계산한 결과 57.36 mm의 값을 얻었으며, 이 지점에서 xy-평면 주사를 실시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 표준 음원으로 사용 예정인 초음파 변환기는 대칭성이 우수하고, 예측값과 잘 일치한다. 이 때 그림 4와 5는 최대 음압 24.7 kPa 을 2로 규격화하여 나타낸 것이다.

V. 결론

지금까지 초음파 변환기 2종을 특성 분석하였다. 공칭 주파수가 2.25 MHz인 V306 변환기는 대칭성 및 선형성이 우수하였으며, 이를 논문에 제시하였다. 공칭 주파수가 10 MHz인 것 또한 우수한 성능을 가지고 있음을 확인하였으나, 지면관계로 생략하였다.

측정 결과들과 예측값들이 잘 일치하여, 본 연구에서 제작한 초음파 음장의 공간적 세기분포 측정 시스템의 성능은 만족할 수준으로 평가된다.

참고문헌

- [1] BS EN 61101: "Absolute calibration of hydrophones using the planar scanning technique in the frequency range 0.5 MHz to 15 MHz" 1994, IEC 1101.
- [2] BS EN 61102: "Measurement and characterization of ultrasonic field using hydrophones in the frequency range 0.5 MHz to 15 MHz", 1994 IEC 1102.
- [3] BS EN 61220: "Ultrasonics -Fields- Guidance for the measurement and characterization of ultrasonic field generated by medical ultrasonic equipment using hydrophones in the frequency range 0.5 MHz to 15 MHz", 1994, IEC 1220.
- [4] 김용태, 조문재, 은희준, "초음파 변환기의 음장 분포 예측을 위한 평면주사 모의실험", 본 학술회의 논문집 (1999).
- [5] B. A. Herman and G. R. Harris, "Calibration of miniature ultrasonic receivers using a planar scanning technique." J. Acoust. Soc. Am. 72(5), 1357(1982).