

파라메트릭 스피커의 근접음장 방향성 특성연구 Directional Characteristics of Parametric Loudspeakers in Near-field

주형식[†]·김양한^{*}
Hyeong Sick Ju, Yang-Hann Kim

Key Words: Directivity (방향성), Parametric Loudspeaker(파라메트릭 스피커), Near-field(근접음장), Intermodulation(혼변조)

ABSTRACT

A parametric loudspeaker is a device to generate highly directional sound using ultrasounds. The parametric loudspeaker could be used to focus sound in a limited space, so it is important to study the characteristics of the parametric loudspeaker in near-field. Mechanism of the audible sound generation in the parametric loudspeaker is explained by nonlinear interaction of the ultrasounds and is modeled as KZK equation, the nonlinear wave equation which contains attenuation, nonlinearity and diffraction. To measure the directional characteristics of the parametric loudspeaker precisely, a method to reduce the spurious signal which taints the measured signal was invented. With the method, directivity patterns of the parametric loudspeaker were measured and compared to the approximated solution and piston sources.

1. 서론

파라메트릭 스피커란 초음파를 이용하여 가청 주파수 대역의 초지향성 소리 빔을 생성해 내는 스피커를 말한다. 이는 수중음향에서 소나(SONAR)등에 이용되어 왔던 파라메트릭 어레이(Parametric array)의 원리를 공기 중에 적용한 장치이다. 파라메트릭 스피커는 인접한 주파수의 두 초음파를 같은 방향으로 진행시켜, 초음파의 비선형적 상호작용으로 공기 중에 두 주파수의 차에 해당하는 가청음을 내는 가상의 음원(Virtual sources)을 생성하게 된다(Fig. 1). 그리고 이 가상의 음원들이 일렬로 배열되게 되어 지향성의 소리 빔이 형성된다. 거리를 진행함에 따라 초음파는 소산되고 이 지향성 가청음만 전파되게 되는데, 이것이 파라메트릭 스피커의 원리이다. 여기서 초음파가 가상음원을 생성하는 영역을 근접음장으로, 초음파가 소산되고 가청음만이 전파되는 구간을 원거리 음장으로 규정할 수 있다.

파라메트릭 스피커는 다음과 같이 발전하였다. Thuras^[1]는 차 주파수의 생성을 실험적으로 증명하였으며, Westervelt^[2]는 파라메트릭 어레이의 개념을 최초로 도입하였다. Berklay^[3]는 포락 분석방법(Envelope analysis)을 통해 단일 톤(Tone)이 아닌 스펙트럼(Spectrum)을 파라메트릭 어레이에서 구현하는 방법을 고안하였으며, Bennett^[4]는 이러한

파라메트릭 어레이를 수중이 아닌 공기중에서 구현하였다. 그리고 Yoneyama^[5]는 파라메트릭 어레이를 이용하여 초지향성 소리빔을 생성해 내는 파라메트릭 스피커를 구현하였다. Yoneyama의 연구 이후, 파라메트릭 스피커에 관하여 원거리 음장 특성 및 신호처리 등을 포함한 다양한 연구들이 진행되어 왔다.^{[6]-[9]}

이러한 파라메트릭 스피커의 지향성은 좁은 공간내에 소리를 집중시켜, 박물관, 슈퍼마켓, 차량 등에 개별적인 소리공간을 만드는 데 응용 될 수 있다. 그런데 파라메트릭 스피커를 이용하여 소리를 공간상에 집중시킬 경우, 파라메트릭 스피커가 설치되는 차량 내부가 좁거나, 건물 천장이 낮을 때, 공간상의 제약으로 인해 많은 경우 근접음장내에 청취자 위치하게 된다. 이 근접음장은 초음파가 계속 소리를 생성해 내는 구간이므로 초음파가 소산된 원거리 음장과는 다른 특성을 보이게 된다. 이 특성을 잘 이해하는 것은 파라메트릭 스피커를 근접음장에서 효과적으로 사용하고, 그 성능을 평가할 수 있는 출발점이 된다.

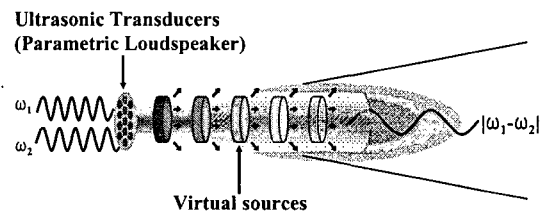


Fig. 1 Schematic of the parametric speaker

† 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : petra00@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8220

* 한국과학기술원 기계공학과

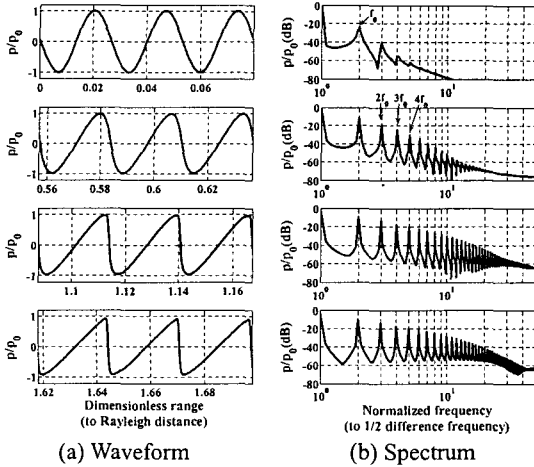


Fig. 2 Generation of the harmonics wave in a nonlinear medium.

2. 이론적 배경

2.1 파라메트릭 스피커에서 발생하는 음파의 전파현상

선형 음향학에서는 압력의 변화에 따른 체적의 변화를 선형적으로 가정하고 일정한 음파의 위상속도를 가정하지만, 실제로는 음압의 증감에 따라 체적변화율이 차이가 생겨, 파형의 각 부분마다 다른 위상속도를 가지게 된다^[1]. 따라서 음압이 큰 경우나, 주파수가 높아 이 변동이 더 자주 일어나는 경우, 음파가 진행함에 따라 이 위상속도의 차로 인해 파형이 왜곡되게 되어 추가적인 주파수 성분들이 생성되게 된다.

음파의 비선형적 거동을 컴퓨터 시뮬레이션 (Simulation)한 결과를 통해 이러한 추가적인 주파수 생성 현상을 확인할 수 있다(Fig. 2). p_0 의 음압과 f_0 의 기본 주파수를 가진 음파가 진행할 때, 정현파로 출발한 파형은 음압이 큰 부분은 더 빨리 진행하고 음압이 작은 부분은 더 천천히 진행하여 톱날형 파형에 가까워 지며, 이에 따라 스펙트럼에서 $2f_0, 3f_0$ 등 파 같은 하모닉스들이 생성된다. 만일 정현파가 아닌 f_a 과 f_b 라는 인접한 두 고주파수를 가진 음파가 전파되게 된다면, 이러한 비선형성으로 인해 역시 파형이 왜곡되어 두 주파수의 차주파수에 해당되는 성분이 생성된다(Fig. 3). 또한 매질에서의 감쇠로 인해 거리를 진행함에 따라 고주파 성분들은 소산되고 차주파수 성분만 남게 되는데, 이것이 가장 간단한 일차원의 경우 파라메트릭 스피커의 차주파수 생성원리를 설명한다.

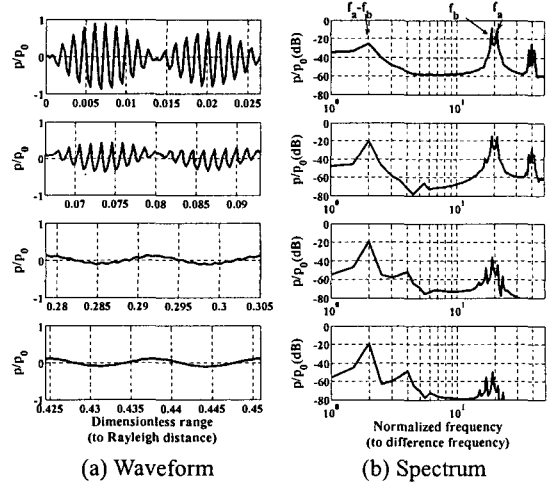


Fig. 3 Generation of the difference frequency wave in a nonlinear medium.

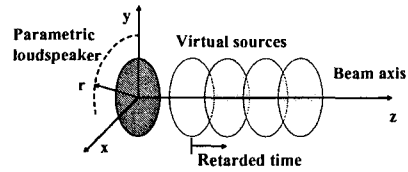


Fig. 4 Coordinate system of the parametric loudspeaker

2.2 파라메트릭 스피커의 모델 방정식

음파의 비선형적 거동에서 우리가 다루고자 하는 지향성 있는 소리 빔의 특성을 고려하여 Fig. 4의 좌표계에서 다음과 같이 비선형 음파 방정식인 KZK 방정식^[10]을 도입할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z \partial \tau} - \frac{c_0}{2} \nabla_{\perp}^2 p - \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^3 p}{\partial \tau^3} = \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p^2}{\partial \tau^2} \quad (1)$$

$$\nabla_{\perp}^2 = \partial^2 / \partial r^2 + r^{-1}(\partial / \partial r)$$

p : Sound pressure

$\tau = t - z/c_0$: Retarded time

c_0 : Speed of sound

ρ_0 : Density of medium

δ : Diffusivity of the medium

β : Nonlinearity coefficient

이 KZK 방정식은 거리에 따른 감쇠, 비선형성과 더불어 소리 빔의 축과 수직인 평면으로의 퍼짐을 고려하게 된다. KZK 방정식은 닫힌 형태의 해가 존재하지 않으므로, 약한 비선형성과 유한한 크기의 음압을 고려한 준선형(Quasi-linear) 근사화를

통해 반경 a 의 피스톤 음원을 가정하여 다음과 같이 원거리 음장의 근사해를 구할 수 있다^[11].

$$q_-(r, z) = -\frac{jP_{0a}P_{0b}\beta k_-^2 e^{-\alpha_- z}}{4\rho_0 c_0^2 \alpha_T} D_w(\theta) D_A(\theta) \times \exp\left(-\frac{jk_- \tan^2 \theta}{2} z\right) \quad (2)$$

$$D_w(\theta) = \frac{1}{1 + j(k_- / 2\alpha_T) \tan^2 \theta} \quad (3)$$

$$D_A(\theta) = \frac{2J_1(k_- a \tan \theta)}{k_- a \tan \theta} \quad (4)$$

$$\theta = \tan^{-1}(r/z)$$

$P_{0a,b}$: Pressure amplitude of the first and second primary wave

k_- : Wave number of the difference wave

$\alpha_T = \alpha_a + \alpha_b - \alpha_-$: Total absorption coefficient

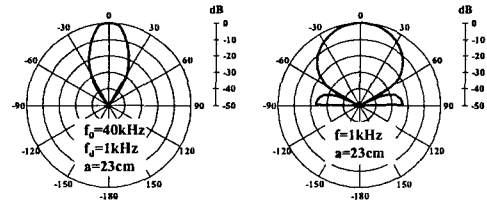
$\alpha_{a,b,-}$: Absorption coefficient of the first primary, second primary and difference wave

이 근사해의 방향성은 웨스터벨트 방향성 (Westervelt directivity, D_w)과 구경 요소(Aperture factor, D_A)의 조합으로 나타내며, 웨스터벨트 방향성은 지향성 있는 빔의 특성을, 구경 요소는 동일 크기의 피스톤 음원과 유사한 방향성을 나타낸다. 근사해의 방향성과 일반 피스톤 음원의 방향성을 비교해 보면, 같은 구경과 주파수에 대해 파라메트릭 스피커의 근사해가 훨씬 더 큰 지향성을 나타냄을 알 수 있다(Fig. 5).

3. 근접음장의 차주파수 측정

3.1 근접음장 측정과 거짓신호

근사해가 존재하지 않는 근접음장에 대해서는 실험을 통해서 음장특성을 파악할 수 있다. 파라메트릭 스피커에서 초음파의 상호작용이 일어나는 근접음장이란 가상 음원들이 이루는 가상 어레이 길이(Virtual array length)로 규정되는데, 이는 총 흡음계수(α_T)의 역수로 정의된다. 이 근접음장에서는 초음파와 가청주파수가 동시에 존재하여 측정에 어렵게 된다. 이는 인접한 주파수의 두 초음파가 마이크로폰을 통해 측정되면 되면 공기가 비선형성을 가지고 가청음을 생성하듯, Fig. 6와 같이 마이크로폰 내부의 비선형성으로 인해서 가청음에 해당되는 신호를 발생시키게 되기 때문이다.



(a) Parametric loudspeaker (b) Piston source
Fig. 5 Comparison of the directivities between the parametric loudspeaker and the piston source. Normalized sound pressure level (to beam axis)

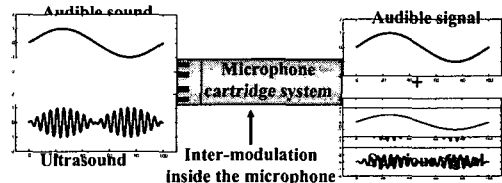


Fig. 6 Spurious signal generation inside the microphone cartridge system.

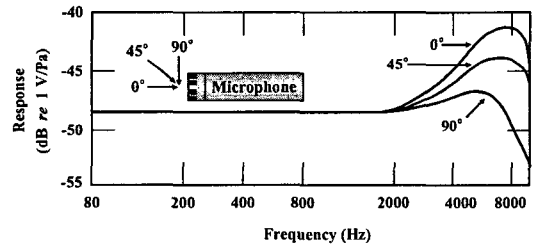


Fig. 7 Free-field sensitivity of a typical condenser microphone.

이를 혼변조(Intermodulation)에 의한 거짓신호 (Spurious signal)라 부르는데, 이 거짓신호가 가청음과 함께 측정되어 측정된 신호를 왜곡시키므로 정확한 측정을 위해서는 가청음 측정 시 포함되는 이 거짓신호를 감소시킬 필요가 있다.

돔형 필터(Dome-shaped filter)를 마이크로폰 앞에 씌우게 되면 저대역 통과필터(low-pass filter)와 같은 역할을 해서 초음파의 영향에 따른 거짓신호를 감소시킬 수 있다.^[4] 하지만 이 경우 가청신호도 일부 감소하게 되어 정확한 측정이라 볼 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 콘덴서 마이크로폰의 음파입사각에 따른 주파수 특성을 고려하여 거짓신호를 감소하는 방법을 제안하였다. Fig. 7에서 나타나는 것처럼, 자유음장 측정용 콘덴서 마이크로폰의 경우 90° 입사각에 대해 마이크로폰의 측정 범위 내에서는 영향을 미치지 않으나, 측정범위를

넘어선 초음파 영역의 민감도가 크게 저하되어 초음파의 영향이 억제된다. 그러므로 빔 축에 대해 90° 각도로 기울여서 근접음장을 측정하게 되면 측정되는 가청신호 레벨을 유지시키면서 초음파에 의한 거짓신호의 영향을 감소시킬 수 있다.

3.2 차주파수 생성 및 거짓신호 감소 확인실험

이러한 방법을 바탕으로 근접음장에서의 차주파수 생성을 확인하고 이 거짓신호 감소방법의 타당성을 증명하고자 Fig. 8과 같이 실험장치를 구성하고 실험을 수행하였다. 신호발생기를 통해 발생된 1 kHz 순음의 가청신호를 다시 신호발생기로 입력 받아 40 kHz 순음의 중심 주파수를 크기 변조시켜 1 kHz의 차 주파수를 갖는 두 개의 음파를 합친 것과 같은 음파를 만들어 낸다. 이 변조된 신호를 파워앰프로 증폭하여 37 개의 초음파 트랜스듀서로 이루어진 파라메트릭 스피커를 가진시켰다. 40 kHz의 경우 근접음장은 약 3.5m 로 계산되므로 이 범위 안에 있는, 음원으로부터 80cm 떨어진 위치에서 마이크로폰으로 음압을 측정하여 신호분석기로 확인하였다. 측정범위가 5 kHz인 ¼인치 마이크로폰 B&K 4935 로 가청음을 측정하였으며, 측정범위가 100 kHz인 ¼인치 마이크로폰 B&K 4135 로 초음파를 측정하였다.

3.3 측정결과 및 고찰

마이크로폰 B&K 4135 로 40 kHz 초음파 측정 시 입사각에 다른 영향이 없음을 확인 한 후, 마이크로폰 B&K 4935 로 0° 입사각과 90° 입사각에 대해 측정해 보았다. 40 kHz를 측정하였을 때, 90° 입사각의 경우 0° 보다 11 dB 더 낮게 측정되었다 (Fig. 9). 이러한 입사각의 차이가 초음파가 아닌 가청음의 측정에도 영향을 미치는 지 알기 위해서 일반적인 스피커로 입사각을 달리해서 측정하였다. 측정된 결과 0° 입사각과 90° 입사각이 0.4 dB의 차이만을 보였고(Fig. 10), 따라서 가청음을 측정할 때는 대해서는 입사각의 영향이 거의 없음을 알 수 있었다. 파라메트릭 스피커에서 생성되는 가청음을 측정할 때, 입사각의 차이가 미치는 영향을 확인하였다(Fig. 11). 이 경우 가청음압이 입사각이 0° 일 때 보다 90° 일 때 약 8 dB가 감소함을 확인하였고, 따라서 이 음압 감소량은 초음파에 의해 공기중에 생성된 가청음이 아닌 초음파가 마이크로폰 내부에서 생성된 거짓신호임을 알 수 있다. 이 실험을 통해서 파라메트릭 스피커에서의 차주파수 생성과 거짓신호 감소방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

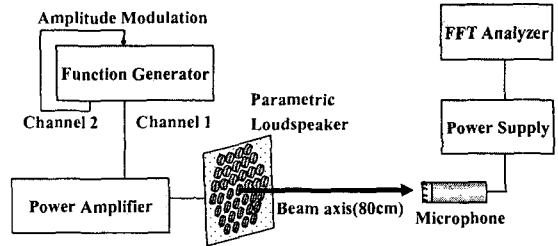


Fig. 8 Experimental setup of the parametric loudspeaker. Ultrasonic transducers: (SensorTec) ST-203L, Function generator: (Sony) AFG320, Power Amplifier: (Vellaman) VM100, FFT analyzer: HP 35670A, Microphone: B&K type 4135(with power supply B&K type 2807), B&K type 4935

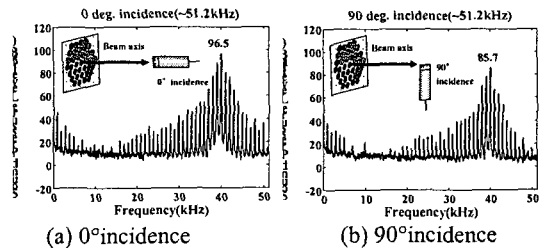


Fig. 9 Effects of the incidence angle on 40 kHz ultrasound of the parametric loudspeaker

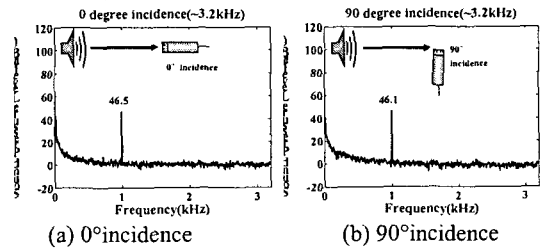


Fig. 10 Effects on the incidence angle on 1 kHz audible sound of the conventional speaker

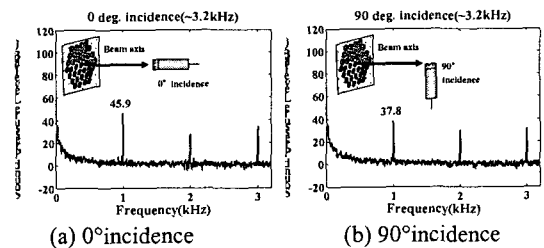


Fig. 11 Effects of the incidence angle on 1 kHz audible sound of the parametric loudspeaker

4. 근접음장의 방향성 측정

4.1 파라메트릭 스피커의 구현

3.3의 차주파수 생성 확인 실험 및 거짓신호 감소방법을 바탕으로 근접음장에서의 소리빔의 특성 중 지향성을 측정하였다. 이를 위해 중심주파수가 40 kHz인 초음파 트랜스듀서 196 개를 이용하여 Fig. 12과 같이 가로, 세로 약 40cm의 파라메트릭 스피커를 제작하였다.

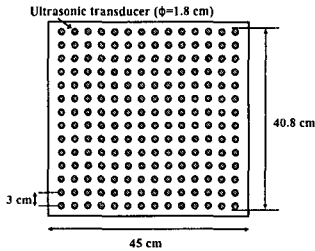


Fig. 12 Feature of the parametric loudspeaker

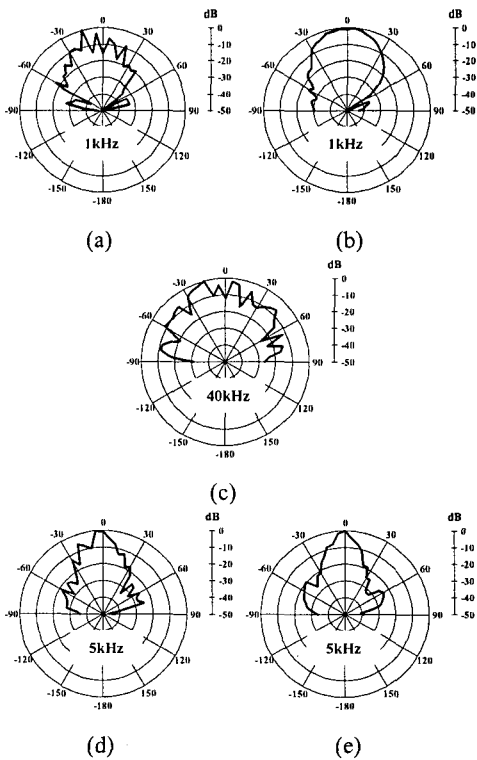


Fig. 13 Directivity of the parametric loudspeaker at 1m Normalized sound pressure level (to beam axis) (a)1 kHz (spurious signal not reduced) (b)1 kHz (spurious signal reduced) (c)40 kHz primary frequency (d) 5 kHz(spurious signal reduced) (e) 5 kHz(spurious signal not reduced)

4.2 방향성 측정 실험

파라메트릭 스피커의 방향성을 측정하기 위하여 3.2와 동일하게 2 가지 마이크로폰을 사용하였다. 그리고 방향성을 측정하기 위하여, 5°의 분해능을 갖는 턴 테이블을 이용하여 빔 축을 기준으로 -90°에서 90°까지 회전시키면서 각도에 따른 음압을 측정하였다. 1m, 3m에서 측정을 수행하였다. 차주파수는 1 kHz와 5 kHz에 대해 측정하였으며 3.2의 거짓신호 감소방법을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 대해 각각 실험을 수행하였다

4.3 결과 및 고찰

1m 거리에서의 방향성은 Fig. 13과 같이 측정되었다. (a)는 1 kHz 측정 시 거짓신호 감소방법이 적용되지 않은 경우로서 빔 축인 0°가 아닌 -15°에서 최대음압을 나타낸다. 40 kHz 중심주파수의 방향성인 (c)를 볼 때, -15°에서 초음파의 최대음압이 측정되므로, 초음파가 마이크로폰 내부에서

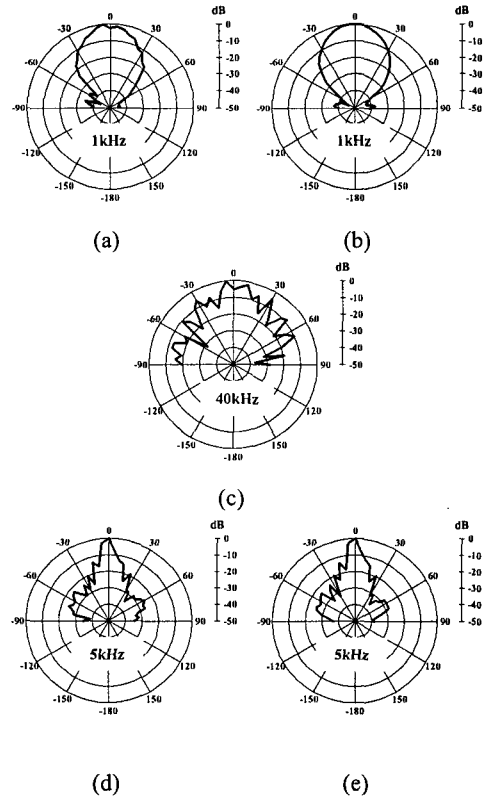


Fig. 14 Directivity of the parametric loudspeaker at 3m Normalized sound pressure level (to beam axis) (a)1 kHz (spurious signal not reduced) (b)1 kHz (spurious signal reduced) (c)40 kHz primary frequency (d) 5 kHz(spurious signal reduced) (e) 5 kHz(spurious signal not reduced)

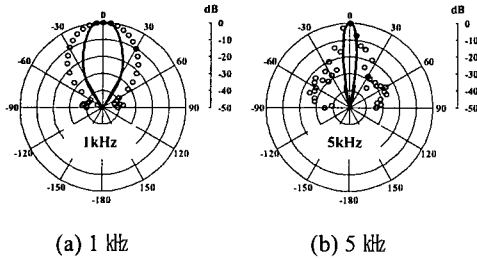


Fig. 15 Comparison of the directivities of the parametric loudspeaker between measured result and approximated solution
 Normalized sound pressure level (to beam axis), circle mark: measured result in near-field, solid line: approximated solution in far-field

발생시킨 거짓신호가 방향성 측정에 영향을 미침을 확인할 수 있다. (b)는 거짓신호 감소방법이 적용된 경우인데 빔 축인 0°에서 최대음압을 나타내며, (a)보다 부엽성분이 적은 부드러운 방향성 패턴(Directivity pattern)을 보여주고 있다. 5 kHz 측정의 경우인 (d)와 (e)에서도 거짓신호 감소방법이 적용되면 좀더 부드러운 방향성 패턴을 볼 수 있다.

3m 거리에서의 방향성은 Fig. 14와 같이 측정되었다. (a)와 (b), (d)와 (e)의 비교를 통해, 초음파에 의한 거짓신호의 영향을 역시 확인할 수 있었고, 거짓신호 감소방법이 적용되면 방향성 패턴이 좀더 부드러워지나 그 영향은 1m에 비해서 감소했음을 볼 수 있다. 이는 측정거리가 40 kHz 초음파가 소산되는 거리인 가상 어레이 길이(3.5m)에 근접하면서 초음파의 영향이 감소했기 때문이다.

3m에서 측정된 파라메트릭 스피커의 방향성을 동일한 유효반경(effective radius)의 근사화된 원거리 음장해에 대해 비교하였다(Fig. 15). 1 kHz에서 측정된 값은 근사화된 해에 비해서 방향성이 약간 떨어지며, 5 kHz에서 측정된 결과는 근사해에 비해 큰 부엽들을 보여주고 있다. 이를 통해서 신호 측정 시스템에서의 거짓신호는 감소되었지만, 또 다른 신호가 가청음에 첨가되고 있으며, 이는 공기중이 아니라 파라메트릭 스피커 자체에서 발생하는 가청음 성분들로 유추할 수 있다. 따라서 추후에는 이러한 영향을 고려한 실험 및 연구가 수행되어야 할 것이다.

5. 결론

파라메트릭 스피커를 활용하는 데는 청취거리에 따른 공간상의 제약이 있으며, 이에 따라 근접

음장의 특성에 관한 연구가 필요함을 확인하였다. 파라메트릭 스피커의 원리를 물리적 접근과 비선형 음파방정식의 근사해를 통해 설명하였다. 또한 거짓신호를 감소시켜 근접음장의 특성을 보다 정확하게 측정하는 방법을 제시하고, 이 방법을 토대로 실제 근접음장에서 파라메트릭 스피커의 방향성을 측정하였다. 실험 및 측정결과 근접음장에서 초음파에 의한 거짓신호의 영향을 감소시킬 수 있었고, 지향성을 확인할 수 있었다. 추후에는 초음파 트랜스듀서 자체가 발생시키는 가청음을 억제하는 방법 등에 대한 연구가 필요하며, 파라메트릭 스피커의 물리적 변수들이 근접음장의 특성에 미치는 영향에 대한 연구 등이 수행되어 근접음장 특성을 측정할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부의 BK21 사업에 의한 연구지원으로 수행되었으며, 지원에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- [1] A. L. Thuras et al., "Extraneous frequencies generated in air carrying intense sound waves," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 6, pp. 173-180, 1935.
- [2] P. J. Westervelt, "Parametric acoustic array," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, No. 4, pp. 535-537, 1963
- [3] H. O. Berkta, "Exploitation of non-linear acoustics in underwater transmitting applications," J. Sound Vib., Vol. 2, No. 4, pp. 435-461, 1965.
- [4] M. Benett et al., "Parametric array in air," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 57, No. 3, pp. 562-568, 1975.
- [5] M. Yoneyama et al., "The audio spotlight: an application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 73, No. 5, pp. 1532-1536, 1983.
- [6] F. J. Pompei, "The use of airborne ultrasonics for generating audible sound beams," J. Audio Eng. Soc., Vol. 47, No. 9, pp. 726-730, 1999.
- [7] T. Nakazawa, et al., "A high directional sound for hands-free systems by focusing parametric array sound," International Workshop on Hands-Free Speech Communication(HSC2001), pp. 83-86, 2001.
- [8] F. A. Karnapi et al., "Method to enhance low frequency perception from a parametric array loudspeaker," in 112th Convention of Audio Eng. Soc., Paper 5636, 2002.
- [9] W. Kim et al., "Audio application of the Parametric Array-Implementation through a numerical model," in 113th Convention of Audio Eng. Soc., Paper 5652, 2002.
- [10] B. K. Novikov et al., *Nonlinear Underwater Acoustics*, American Institute of Physics, New York, pp. 23, 1987.
- [11] M. Hamilton et al., *Nonlinear Acoustics*, Academic Press, pp. 233-252, 1998.