공학석사 학위논문

기중 파라메트릭 음원의 특성 해석 및 방사 특성 개선에 관한 연구

2002년 2월

부경대학교 대학원

음향진동공학과 협동과정

문 병 천

공학석사 학위논문

기중 파라메트릭 음원의 특성 해석 및 방사 특성 개선에 관한 연구

지도교수 김 무 준

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2002년 2월

부경대학교 대학원

음향진동공학과 협동과정

문 병 천

문병천의 공학석사 학위논문을 인준함

2001년 12월 26일

주 심	공학박사	김 천 덕	㊞
위 원	공학박사	하 강 열	㊞
위 원	공학박사	김 무 준	㊞

목 차

A Study for Characteristics Analysis and Radiation Characteristics Improvement of Parametric Transmitter in Air.

Byung-Cheon Moon

Interdisciplinary Program of Acoustics and Vibration Engineering, Graduate School.

Pukyong National University

ABSTRACT

Recently, a sound source with high directivity has being studied for audio industry.

Parametric array performed by nonlinear effect of sound wave can make a sound source with high directivity. However, the sound source in air, generally, use a flexural type vibrator with the large amplitude in low frequency range. In such kinds of vibrators, it is difficult to analyze their characteristics on the assuming that the sound pressure distribution of vibrating surface is piston sound source. And its vibration center has 180。 out of phase with its edge in resonance modes so that the side-lobe levels are high.

In this paper, to be applied a parametric method to a sound transmitter, the directional sound source is made by arrayed devices to generate ultrasonic in air and with low resonance frequency relatively. Behaviors of primary wave radiating from the parametric transmitter and secondary wave generating in a propagating process are investigated. From the result of experiment, a possibility for development and directivity characteristics improvement of parametric transmitter in air is investigated.

Ⅰ. 서 론

최근 오디오 산업의 발달로 인하여 공기 중에서 지향성을 갖는 음원의 개발이 요구되어 지고 있는데, 특히 한 공간에서 방향을 달리하여 여러 가지 채널을 볼 수 있도록 개발된 다방향 멀티비젼 등과 같은 응용 분야에 있어서 지향성 음원의 개발이 많이 요구되고 있다.

한편, 두 개의 서로 다른 주파수의 음파를 동일한 축 상에서 같은 방향으로 방사하면, 유한 진폭 음파의 빔 내에서 비선형 상호작용에 의해 가상음원이 매질 중에서 발생하게 되고, 이렇게 발생하는 이차적인 음원으로부터 방사된 음파는 전파 방향에 대하여 근거리 영역에서 모두 동위상으로 가산되어 증가하면서 종형 어레이를 형성한다. 파라메트릭 어레이는 이렇게 형성된 이차적인 음파 가운데 차주파수의 음파에 주목하게 되는데, 차주파수의 음파는 일차파에 비해 상대적으로 먼 거리까지 전파하며, 저주파임에도 불구하고 인가해 주는 주파수에 의한 음파와 거의 같은 정도의 예리한 지향성을 가지고, 부엽이 거의 없다는 중요한 특성을 갖는다. 이러한 파라메트릭 어레이는 Westervelt의 이론적 해석 이후로 많이 연구되어지고 있다[1-6]. 파라메트릭 어레이의 응용 가운데 수중에서의 응용에 관한 연구는 현재까지 많이 되어져 있으며, 수중 해저 매설물 탐사나 심해의 측심, 수중 통신 등에 이용되어 왔다[7]. 그러나 공기 중에서의 파라메트릭 어레이에 대한 응용 연구는 현재까지도 충분하다고 할 수는 없다[8-11].

또한, 공기 중에서는 수중과는 달리 공기의 음향 임피던스가 낮기 때문에 공기 중에서 많은 음향 에너지를 방사하기 위해서는 큰 진동 변위를 갖는 음원이 요구된다. 그러므로 공기 중에서 큰 진동 변위를 발생시키기 위해서 보통 낮은 주파수 영역에서 큰 진폭을 갖는 굴곡 모드 진동자 (flexural type vibrator)가 사용된다. 이러한 굴곡 진동자의 경우에, 기본 공진 모드에 있어서 진동자의 중심과 가장자리의 진동 위상이 180° 차이가 나며, 이로 인

해 높은 부엽 레벨을 보인다.

파라메트릭 어레이가 인가하는 일차파의 지향 패턴이 생성되는 이차파의 지향 패턴에 크게 영향을 준다는 사실을 고려해 볼 때, 이러한 굴곡 모드 진동자를 파라메트릭 어레이에 적용할 경우, 방사되는 일차파의 부엽 레벨이 높기 때문에 빔이 예리하고 부엽이 거의 없다는 파라메트릭 어레이의 장점을 구현하기가 어렵게 된다.

또한, 일반적으로 파라메트릭 어레이의 이론 계산에서는 음원의 분포가 일정한 피스톤 음원으로 계산하여 오고 있는데, 수중에서의 경우에는 그 경향이 잘 일치하지만, 공기 중에서 이러한 굴곡 모드 진동자를 배열하여 파라메트릭 음원으로 사용하는 경우 생성되는 이차파의 음향 방사 특성을 피스톤 음원으로 가정하여 분석하는 것은 매우 곤란하다.

본 논문에서는 굴곡 모드 진동자를 이용한 공기 중에서의 파라메트릭 어레이의 정확한 특성 해석을 위해 음원의 진동 분포를 고려한 일차파 및 이차파의 시뮬레이션을 행하여 실험 결과와 비교 검토하였다. 또한, 굴곡 모드 진동자의 방사 특성 개선을 위해 굴곡 모드 진동자를 진동 면과 배열 면 사이에 각도를 주어 배열하는 방법을 제안하고, 제안된 모델의 파라메트릭 구동에 의한 일차파의 방사 특성을 시뮬레이션을 통해 분석하고 실험 결과와 비교하였으며, 생성된 이차파의 방사 특성을 고찰함으로써 공기 중에서의 굴곡 모드 진동자를 이용한 파라메트릭 어레이의 특성 해석 및 지향 특성 개선을 위한 연구를 행하였다.

Ⅱ. 굴곡 모드 진동자를 이용한 공기 중에서의 파라메트릭 음원의 특성 해석

Ⅱ-1. 이론

Westervelt는 반경 a인 피스톤 음원으로부터 방사되고, 흡수 감쇠 하지만 확산하지 않는 두 개의 주파수를 갖는 평면파의 일차파를 모델로 해서 상정하고, Lighthill의 유체 운동방정식에 의해 충분히 먼 거리 z, 천정각 θ의 점에 대한 이차파의 음압 p_d를 식 (1)과 같이 구했다.

$$
\begin{aligned}
p_d &= -\frac{j\beta k_d^2 a^2 p_{01} p_{02}}{4\alpha_T \rho_0 c_0^2} \frac{\exp(-\alpha_d z)}{z} D_W(\theta) D_A(\theta) \\
D_W(\theta) &= \frac{1}{1 + j2(k_d/\alpha_T)\sin^2(\theta/2)} \\
D_A(\theta) &= \frac{2J_1(k_d a \sin\theta)}{k_d a \sin\theta}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

여기서, $\beta = 1 + \frac{B}{2A}$,

$k_d = \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{c_0}$,

p_{01}, p_{02}는 음원에서의 2개의 일차파 음압 진폭,

$\alpha_T = \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_d$,

α_1, α_2는 일차파 주파수에서의 매질의 흡수 계수,

α_d는 차주파수에서의 흡수 계수.

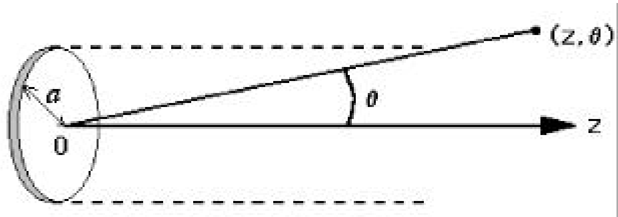


Fig. 1. **원형 피스톤을 음원으로 하는 파라메트릭 어레이**

Fig. 1 Parametric array for circular piston source

Fig. 1**에 보여진 것과 같은 이러한** Westervelt**의 모델에서는 음파의 회절 효과를 무시했지만**, **그 후**, Tjøtta **들에 의해 회절 효과를 고려한 현실적인 해석 해가 얻어져 있다**[12-13]. **즉 반경** a**의 축대칭 음원 상에서 일차파 음압 진폭이** $p_{0i}(r)$**일 때**, **위치** (r, z)**에서의 일차파 및 이차파의 복소 음압** p_i, p_d**는 아래와 같이 주어진다**.

$$p_i(r,z) = -j\frac{k_i}{z}\exp\left(-\alpha_i z + \frac{jk_i r^2}{2z}\right) \times \int_0^a \exp\left(\frac{jk_i r^2}{2z}\right) p_{0i}(r')\, J_0\left(\frac{r'r}{z}\right) r'\, dr' \quad (2)$$

$$\begin{aligned} p_d(r,z) = & -j\frac{\beta k_1 k_2 k_d}{2\pi\rho_0 c_0^2 z}\exp\left(-\alpha_d z + \frac{jk_d r^2}{2z}\right) \\ & \times \int_{z'=0}^{z}\int_{\phi=0}^{\pi}\int_{r_1=0}^{a}\int_{r_2=0}^{a}\exp\left(j\frac{k_1 r_1^2 - k_2 r_2^2}{2z}\right) \\ & \times \exp\left[-\alpha_T z' + jG\left(\frac{1}{z} - \frac{1}{z'}\right)\right] J_0\left(\frac{r}{z}\sqrt{F}\right) \\ & \times p_{01}(r_1)\,p_{02}(r_2)\frac{r_1 r_2}{z'}\, dr_2\, dr_1\, d\phi\, dz' \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $F = k_1^2 r_1^2 + k_2^2 r_2^2 - 2k_1 r_1 k_2 r_2 \cos\phi$,

$G = k_1 k_2 (r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos\phi)/(2k_d)$**이다**.

흡수가 작은 경우 혹은 근거리에 대해서는 $\alpha_T z' = 0, \alpha_d z = 0$ 으로 두는 것에 의해 식 (3)은 단순화되어 식 (4)와 같이 된다.

$$
\begin{aligned}
p_d(r,z) = & -j\frac{\beta k_1 k_2 k_d}{2\pi\rho_0 c_0^2 z}\exp\left(\frac{j k_d r^2}{2z}\right) \\
& \times \int_{\phi=0}^{\pi}\int_{r_1=0}^{a}\int_{r_2=0}^{a}\exp\left(j\frac{G}{z}+j\frac{k_1 r_1^2 - k_2 r_2^2}{2z}\right) \\
& \times E_1\left(j\frac{G}{z}\right)J_0\left(\frac{r}{z}\sqrt{F}\right)p_{01}(r_1)p_{02}(r_2)\,r_1 r_2\,dr_2\,dr_1\,d\phi
\end{aligned} \tag{4}
$$

단, $E_1(x)$는 지수 적분 함수 $\int_x^{\infty}\frac{\exp(-t)}{t}dt$ 이다.

음원 진동 분포가 피스톤 분포 형태인 경우에는 위 식에서 일차파의 음압 진폭인 $p_{0i}(r)$은 일정한 값을 갖게 되지만 Bessel 분포나 Gauss 분포 등과 같이 완전한 피스톤 분포를 갖지 않는 경우에는 그 분포 패턴에 따라서 일차파의 지향 패턴이 달라지게 되고, 생성되는 이차파의 지향 패턴 역시 달라지게 된다. 또한 공기 중에서는 음원이 진동할 경우 수중에서와는 달리 진동 분포가 피스톤 분포를 형성하기가 어렵다. 따라서, 음원의 진동분포를 측정하고 이를 고려함으로서 더욱 정확한 이론적 계산 및 예측이 가능하게 된다.

공기 중에서의 파라메트릭 어레이를 이용한 지향성 음원의 개발을 위해서는 큰 진폭을 갖고, 생성되는 이차파의 주파수를 낮은 주파수로 제어가 가능하게 하기 위해 굴곡 진동 모드의 음원이 필요로 되는데, 이 경우에 있어서 음원의 진동 분포를 고려하지 않을 경우, 일차파나 이차파의 정확한 지향 패턴을 예측하기가 어렵게 되므로 음원 표면의 진동분포를 측정하고 이를 고려하여 계산해야 할 필요가 있게 된다.

본 논문에서는 이러한 굴곡 모드 진동자를 공기 중에서의 파라메트릭 어레이에 적용할 경우의 일차파 및 이차파의 지향 특성을 식 (2)와 식 (4)를 이용하여 시뮬레이션 함으로서 특성 해석을 행하였다.

Ⅱ-2. 시뮬레이션 및 실험

Ⅱ-2-1. 음원의 진동분포 측정

본 논문에서 특성 해석을 위해 사용된 음원의 외형을 Fig. 2에 나타내었다. 음원은 반경 4.5㎜의 PZT에 반경 5.9㎜의 스틸이 접착된 유니몰프 타입의 진동자로서, Network Analyzer를 이용하여 공진 주파수를 측정한 결과 42.75㎑로 측정되었으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

주파수 특성 측정 결과로부터 공진 주파수 부근에서 일차파의 주파수로서 진동 효율이 비슷하고 1㎑의 차주파수를 갖도록 42.25㎑와 43.25㎑의 주파수를 일차파로 선택하였다.

사용된 음원의 진동 분포를 조사하기 위하여 Fig. 4와 같은 환경에서 GRAPHTEC AT3500 Laser Vibrometer를 이용하여 음원의 진동속도 분포를 측정하였다. 또한 측정된 결과를 최소 자승법을 이용, 원형 축대칭 음원의 주된 분포 형태인 Bessel 분포로 회기곡선을 구한 결과를 실제 측정된 결과와 같이 비교하여 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5의 결과를 보면 3㎜ 부근에서부터 속도가 (-)로 떨어지는 것을 알 수 있는데, 이는 음원의 중심 부분과 음원의 외곽 부분에서 진동 위상이 180°로 반전됨을 나타낸다. 즉, 중심에 (+)의 음원과 외곽에 (-)의 음원이 놓인 형태로 해석할 수 있는데, 이는 굴곡 진동 모드의 양단이 자유롭고, 중심과 끝 사이에 노드가 있는 형태와 같다. 이 경우에 빔 패턴은 음축 방향뿐만 아니라 반경 방향으로도 어느 정도 나타날 것으로 예측이 가능하다.

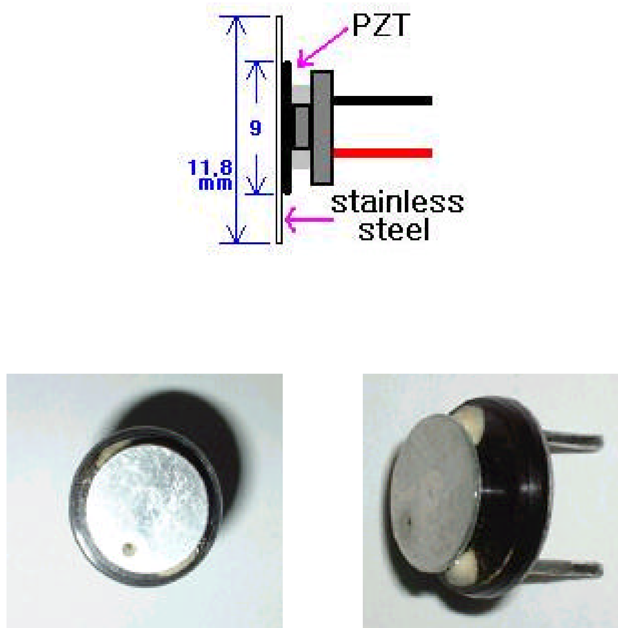


Fig. 2 **사용된 굴곡 모드 진동자의 외형**

Fig. 2 Shape of flexural type vibrator

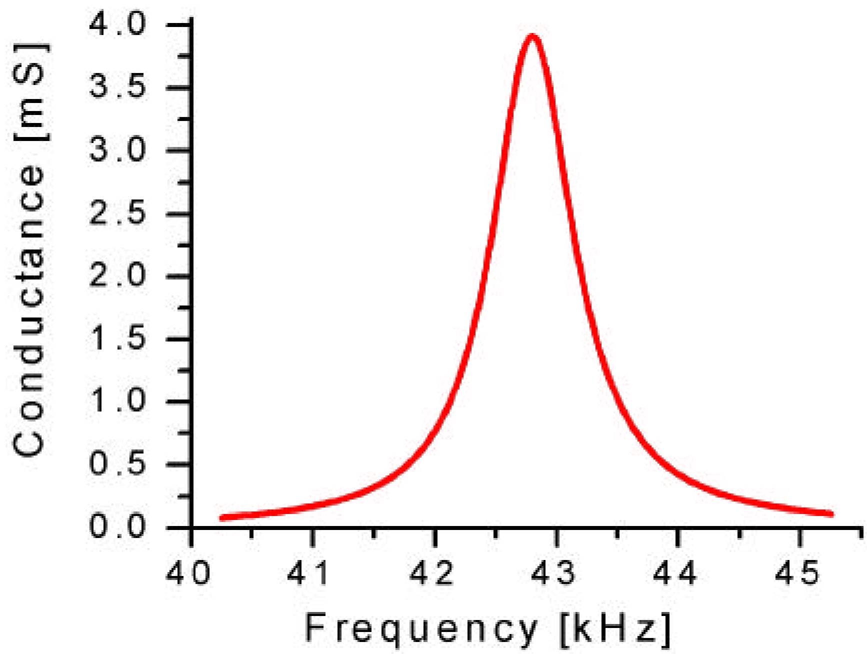


Fig. 3 **주파수 특성 측정 결과**

Fig. 3 Result of frequency response measurement

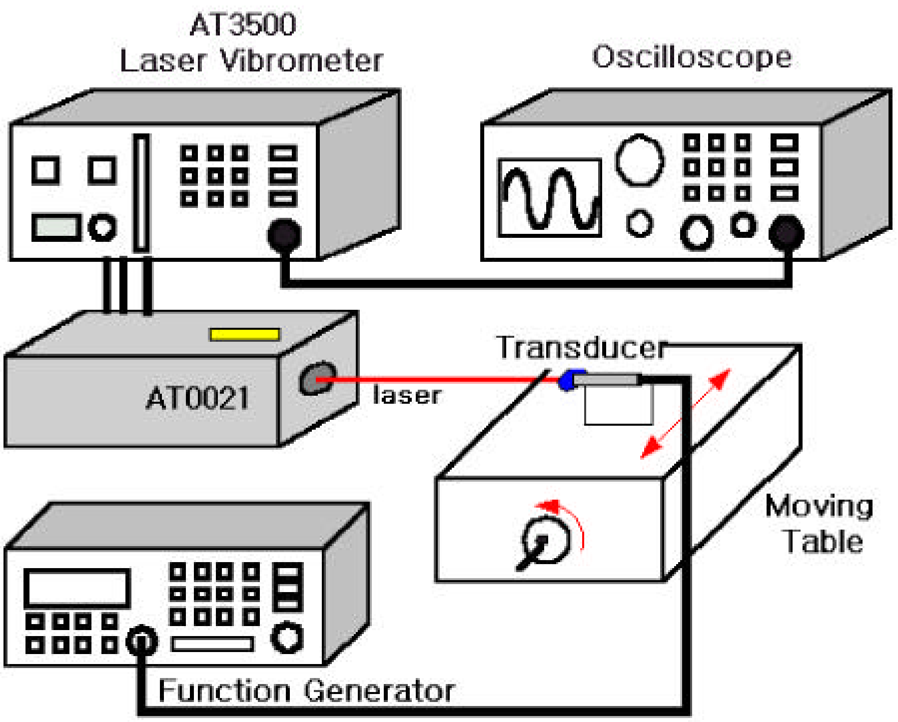


Fig. 4 **진동 분포 측정 환경 개략도**

Fig. 4 Block diagram of experimental setup
for vibration distribution measurement

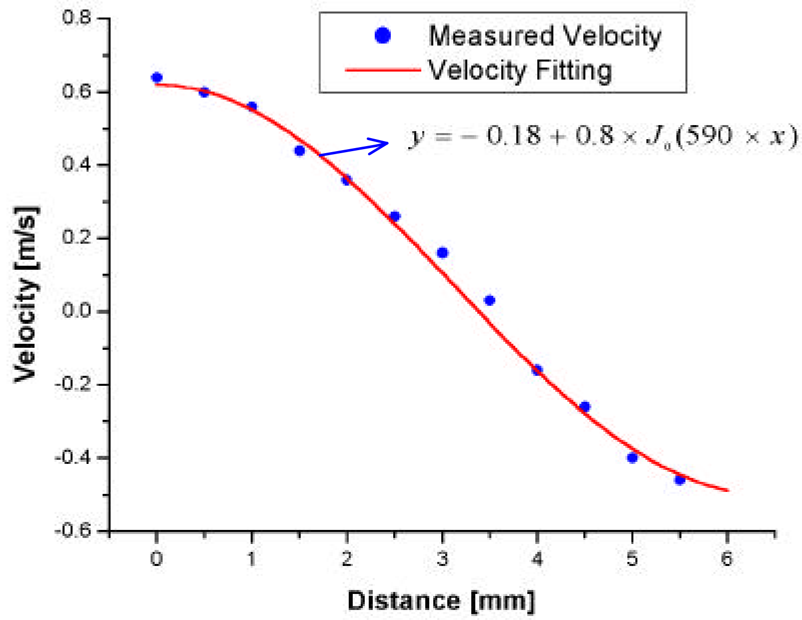


Fig. 5 **진동 분포 측정 결과 및 데이터 피팅**

Fig. 5 Measured result of vibration distribution and fitted curve

Ⅱ-2-2. 일차파 및 이차파의 시뮬레이션

측정된 진동 속도 분포로부터 피팅된 함수를 이용하여 식 (2)와 식 (4)에 대입하여 시뮬레이션을 통하여 음원의 일차파와 이차파에 대한 지향 특성을 계산하여 보았다. 먼저 측정 결과로부터 피팅된 Bessel 분포 함수를 고려한 경우와 피스톤 분포로 고려한 경우의 지향 특성을 비교하여 그 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다.

Fig. 6과 Fig. 7로부터 음원의 진동 분포를 피스톤 분포로 고려한 경우와 측정된 Bessel 분포를 고려하였을 경우에 그 지향 패턴이 크게 달라짐을 알 수 있는데, 특히 피스톤 분포일 경우에는 부엽 레벨이 현저하게 줄어드는 경향을 나타내지만, Bessel 분포로 고려한 경우에는 첫 번째 부엽인 45° 부근에서 주엽과 거의 비슷한 크기의 음압 레벨을 갖는 큰 부엽이 나타나는 특징을 나타낸 다는 것을 알 수 있었다.

또한, 음원 진동 분포에 있어서 Bessel 함수를 고려한 경우와 음원의 가장자리를 고정한 경우 및 중심을 고정한 경우에 대한 진동 속도 패턴을 Fig. 8에 나타내었으며, 이들에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9의 결과로부터, 음원의 중심을 고정한 경우에 생성되는 이차파의 지향 패턴이 빔 폭이 좁고 부엽 레벨이 낮은 좋은 특성을 나타냄을 알 수 있다. 하지만, 중심을 고정한 경우에는 방사효율이 매우 저하되어 실용성이 없기 때문에 공기 중에서는 거의 사용되지 않는다. 또한, 음원의 가장자리를 고정한 경우에는 부엽의 레벨은 낮지만 주엽의 빔 폭이 넓어지는 단점을 갖는다는 것을 알 수 있었다.

그리고, Bessel 분포에 대해 노드의 변화에 따른 지향 특성 변화와 Gauss 분포에 대해 분산의 변화에 따른 지향 특성 변화를 시뮬레이션을 통해 분석한 결과를 진동 속도 패턴과 함께 Fig. 10 Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 11의 Bessel 분포에 대해 노드의 변화에 따른 지향 특성 변화를 시뮬레이션 한 결과, 노드의 위치에 따라 생성되는 지향 패턴이 크게 변화하는

결과를 얻었으며, 가장자리에 노드가 형성되는 경우 이차파의 지향 패턴이 가장 좋은 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

또한, Fig. 13의 Gauss 분포에 대해 분산의 변화에 따른 지향 특성 변화를 시뮬레이션 한 결과, 분산 값이 커질수록 좋은 지향 패턴을 나타냄을 알 수 있었다.

이상의 시뮬레이션 결과로부터 공기 중에서의 파라메트릭 어레이의 응용에 있어서 음원의 진동 분포를 고려함으로서 더욱 정확한 일차파 및 이차파의 지향성 예측이 가능함을 알 수 있다. 또한, 굴곡 모드 진동자의 노드의 위치를 조절함으로서 목적하는 지향성을 갖는 파라메트릭 음원의 이론적 설계가 가능할 것으로 기대된다.

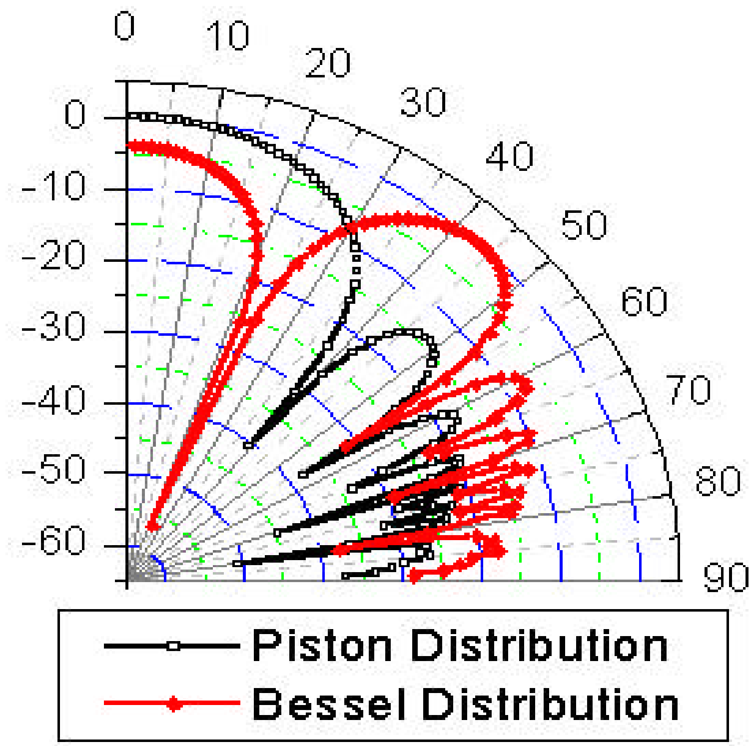


Fig. 6 **일차파**(42.25㎑)**의 지향 패턴 비교**

Fig. 6 Comparison to directivity pattern of primary wave (42.25㎑)

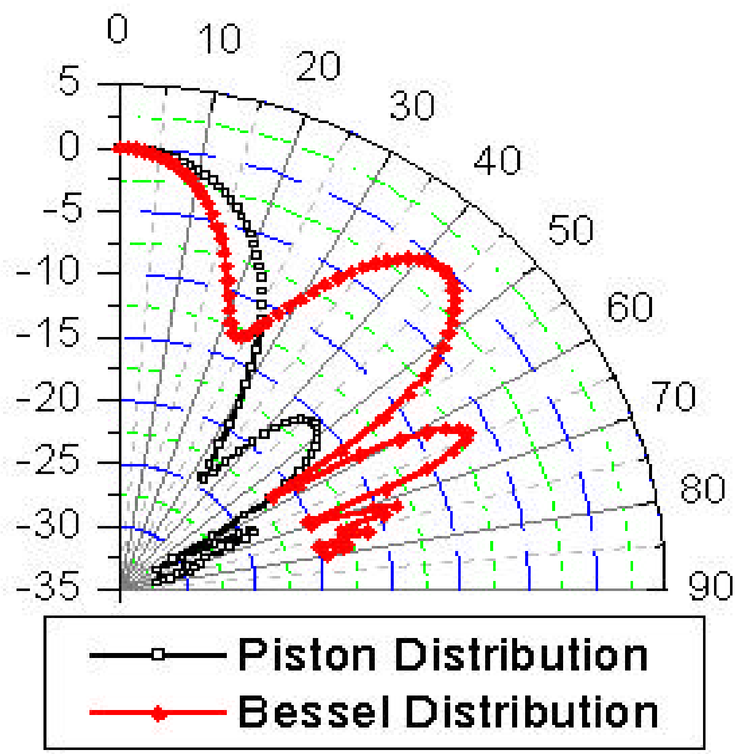


Fig. 7 이차파(1㎑)의 지향 패턴 비교

Fig. 7 Comparison to directivity pattern of secondary wave (1㎑)

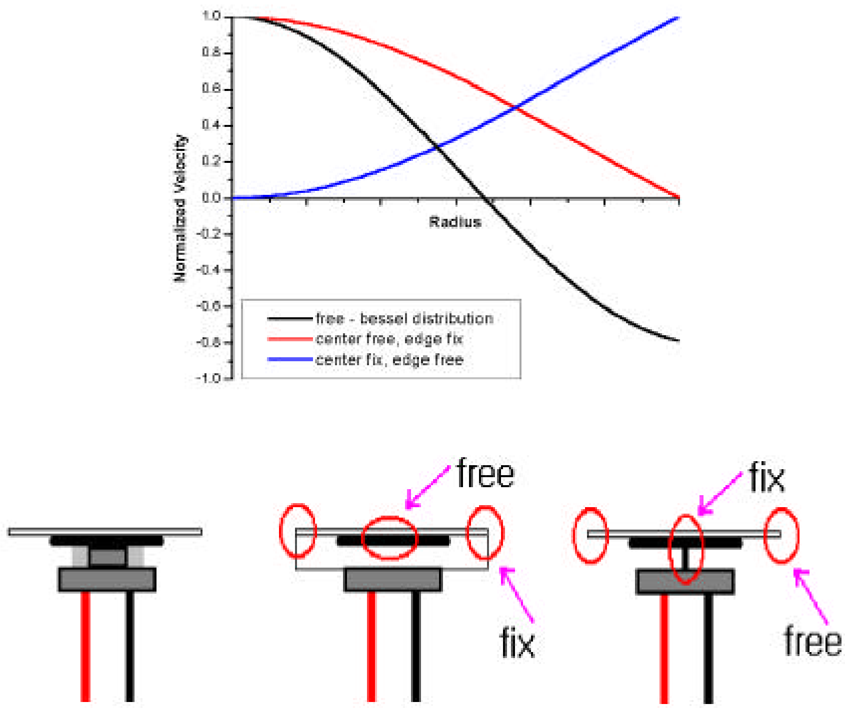
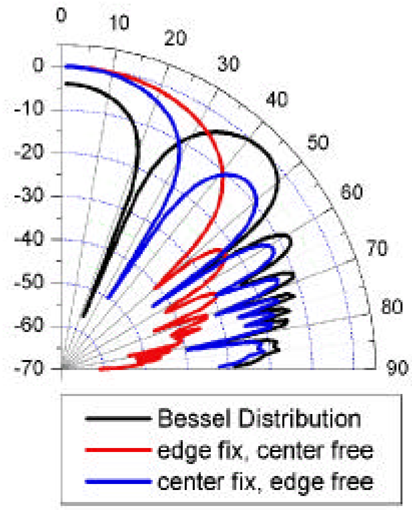
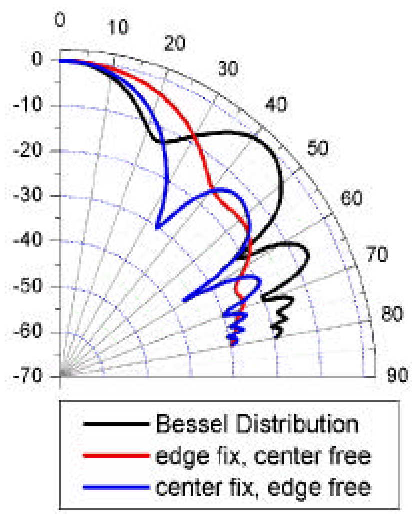


Fig. 8 **진동면의 경계 조건에 따른 진동 속도 분포 패턴**

Fig. 8 Change of vibration distribution pattern
by boundary condition of vibrator



(a) **일차파 시뮬레이션**



(b) **이차파 시뮬레이션**

Fig. 9 **진동 분포 패턴에 따른 파라메트릭 어레이의 시뮬레이션 결과 비교**

Fig. 9 Simulation results of parametric array
for vibration distribution pattern

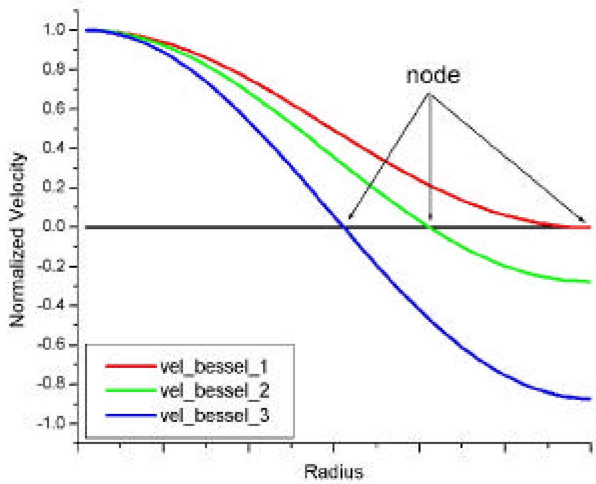
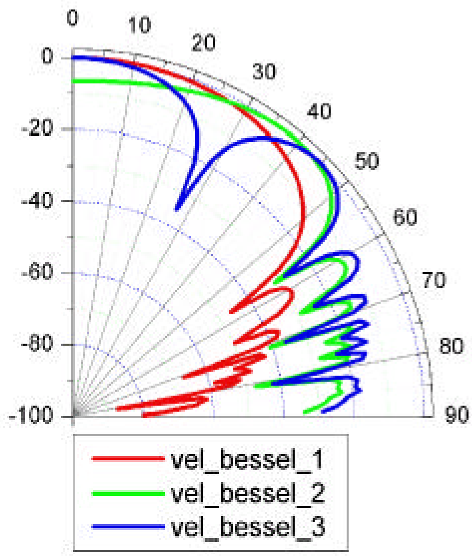
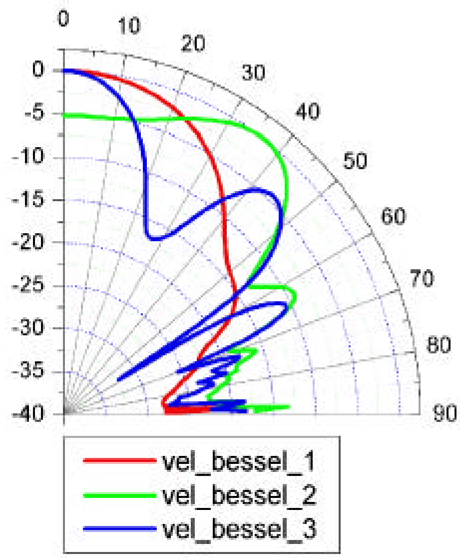


Fig. 10 Bessel **함수형 진동 모드의** node **변화에 따른 진동 분포 패턴**

Fig. 10 Change of vibration distribution pattern
by node of Bessel distribution type vibrating mode



(a) 일차파 시뮬레이션



(b) 이차파 시뮬레이션

Fig. 11 Bessel 분포의 node 변화에 따른 파라메트릭 어레이의 시뮬레이션 결과 비교

Fig. 11 Simulation results of parametric array for various with nodes of Bessel type vibrating distribution

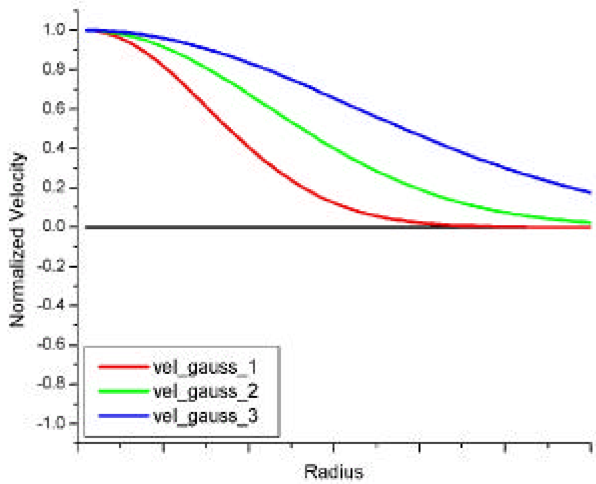
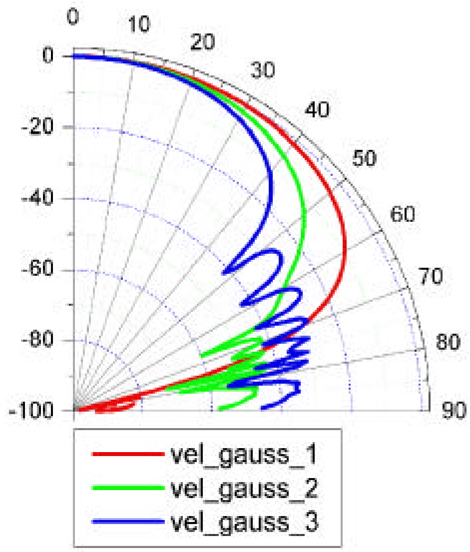
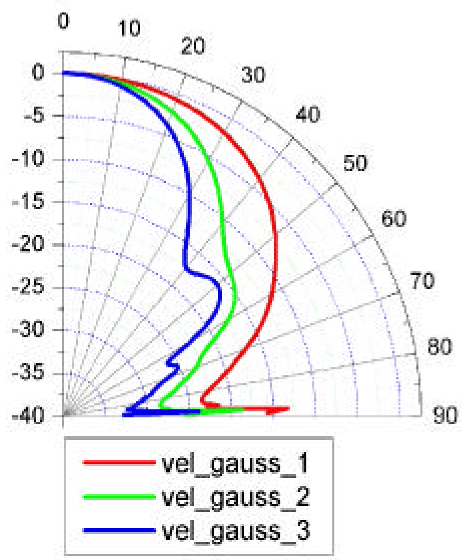


Fig. 12 Gauss **분포의 분산 변화에 따른 진동 분포 패턴**

Fig. 12 Change of vibration distribution pattern
by covariance of Gauss type vibrating mode



(a) 일차파 시뮬레이션



(b) 이차파 시뮬레이션

Fig. 13 Gauss 분포의 분산 변화에 따른 파라메트릭 어레이의 시뮬레이션 결과 비교

Fig. 13 Simulation results of parametric array for various covariance of Gauss type vibrating distribution

Ⅱ-2-3. 굴곡 모드 진동자를 이용한 파라메트릭 어레이의 실험 및 결과

앞에서 행한 시뮬레이션의 예측들을 가지고 Fig. 14와 같은 실험 환경에서 실험을 행하였다. 실험은 Function Generator (HP8904A)로부터 일차파의 주파수인 42.25㎑와 43.25㎑의 정현파 신호를 6V_{pp}로 인가하여 이를 파워 증폭기를 이용하여 60V_{pp}로 10배 증폭시킨 후 음원에 인가하고, Condenser type Microphone (B&K Type 4135)을 사용하여 인가해준 일차파 주파수 및 생성되는 이차파의 주파수 신호를 수신하였으며 수신된 음파를 FFT Analyzer 및 Digital Oscilloscope로 분석하였다

공기 중에서의 파라메트릭 어레이를 이용한 음원의 지향 특성 측정을 위하여 음원으로부터 음축 상 100㎜ 떨어진 지점에서 음압을 측정하였다. 지향성 측정 각도는 음축을 중심으로 0°에서 80°영역을 대상으로 1°간격으로 측정하였고, 측정 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 여기서 Primary는 42.25㎑의 일차파이고, Difference는 1㎑의 이차파이다.

Fig. 15의 측정 결과로부터 일차파와 이차파의 음축 상 음압 레벨은 약 45㏈ re 20㎛Pa 정도의 차이가 나타났다. 또한, 음축 상 음압보다 55°부근의 음압 레벨이 더 크게 측정되었는데, 이는 Bessel 분포로 가정한 경우의 시뮬레이션과 유사한 결과를 보였다. 측정된 일차파와 이차파의 지향 패턴을 Bessel 분포로 가정한 경우의 이론 결과와 비교하여 Fig. 16과 Fig. 17에 나타내었다.

일차파에 대한 Fig. 16의 결과를 살펴보면 피스톤 분포로 가정한 경우와는 달리 Bessel 분포의 이론과 실제 측정이 50°부근까지는 경향이 거의 일치함을 알 수 있다. 이차파에 대한 Fig. 17의 결과에서도 Fig. 16의 결과와 마찬가지로 약 50°부근까지는 경향이 비슷하게 나타났다. 이로부터 일차파의 지향패턴의 계산에 있어서 음원의 진동 분포를 피스톤 분포로 계산하기보다는 실제 진동 분포를 측정하여 고려함으로서 더욱 정확한 이론 계산이 가능함을 실험 결과와의 비교로부터 확인할 수 있었다.

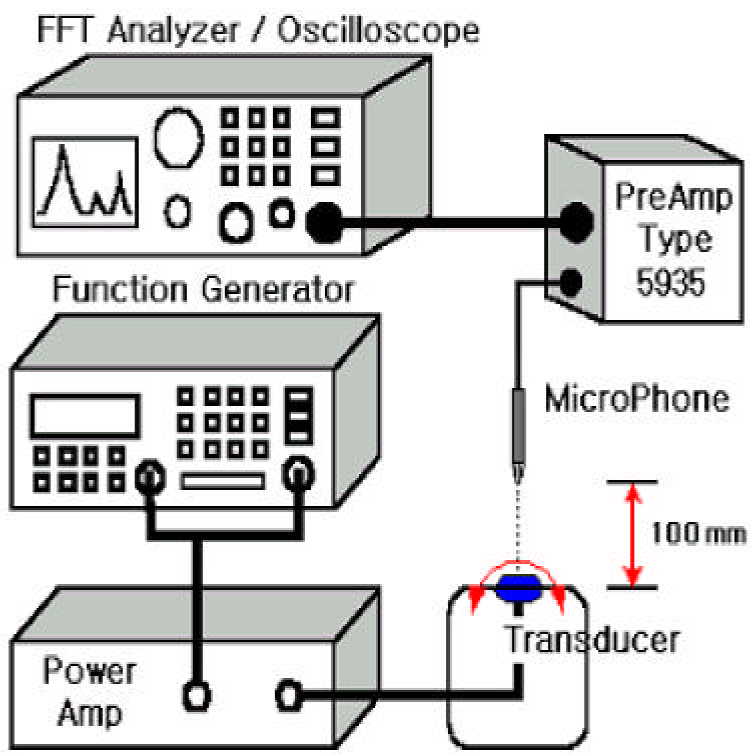


Fig. 14 실험 환경 개략도

Fig. 14 Experimental setup for directivity measurement

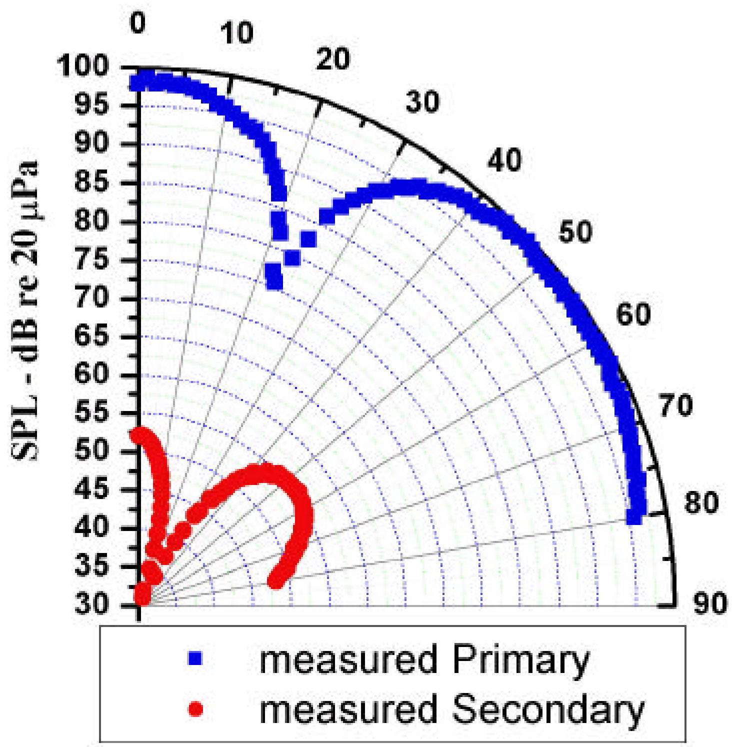


Fig. 15 **파라메트릭 어레이의 지향 특성 측정 결과**

Fig. 15 Result of directivity characteristics measurement of parametric array

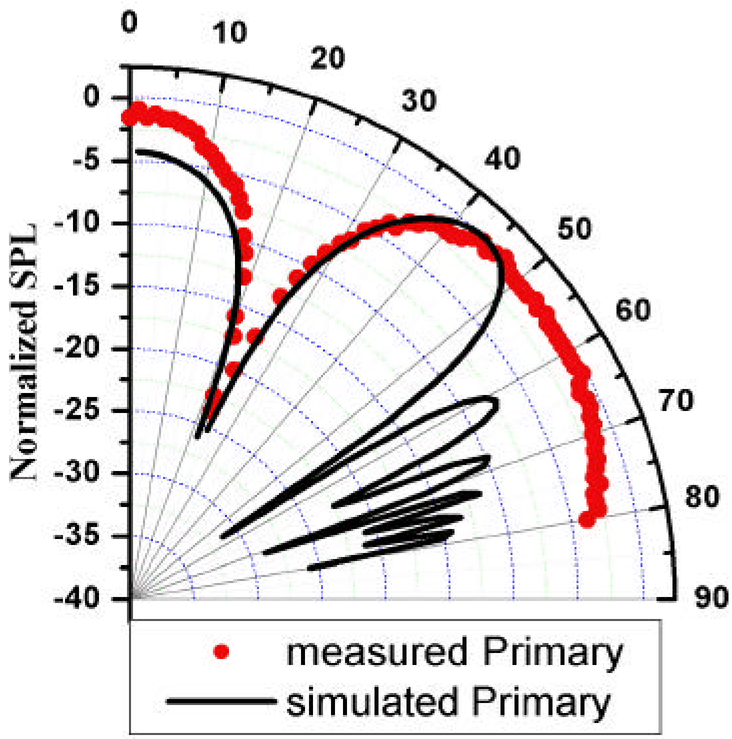


Fig. 16 일차파 지향 패턴의 비교

Fig. 16 Comparison of directivity pattern of primary wave

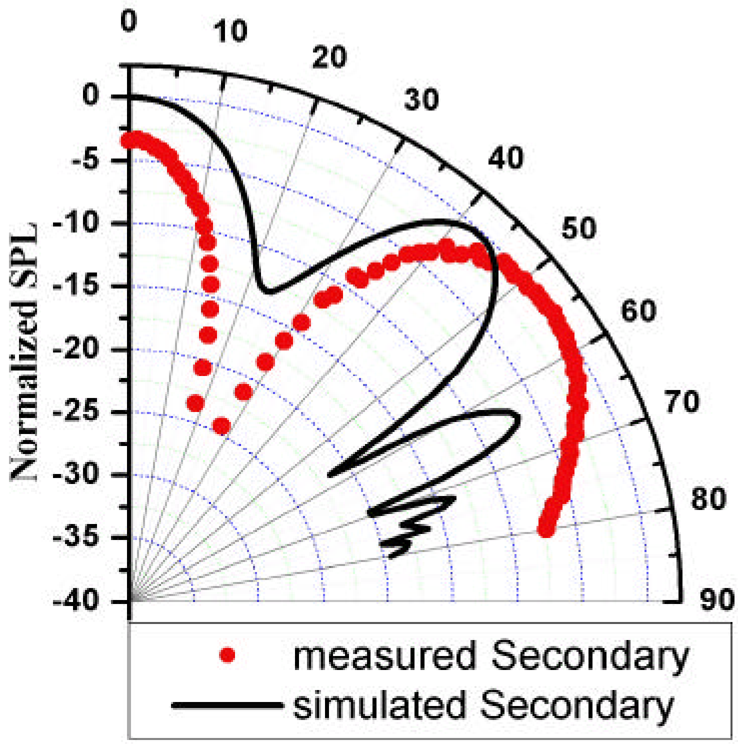


Fig. 17 **이차파 지향 패턴의 비교**

Fig. 17 Comparison of directivity pattern of secondary wave

Ⅲ. 굴곡 모드 진동자를 이용한 공기 중에서의 파라메트릭 어레이의 방사 특성 개선

Ⅲ-1. 방사 특성 개선을 위한 이론 모델

이전의 연구에서 단일의 굴곡 모드 진동자를 사용할 경우 그 방사 특성이 50° 부근에서 매우 큰 부엽 레벨이 나타남을 확인하였다.

본 논문에서는 이러한 굴곡 모드 진동자에 대해 50° 부근에서 나타나는 큰 부엽을 적극적으로 활용하고 음축 방향의 주엽의 영향을 감소시키는 방법으로서 Fig. 19에 보여진 것처럼 각각의 굴곡 모드 진동자에 각도 ϕ를 주어 배열하는 방법으로 굴곡 모드 진동자를 이용한 공기 중에서의 파라메트릭 어레이의 방사 특성을 개선하고자 하였다.

축 대칭의 원형 진동 면을 갖는 음원의 일차파와 이차파의 방사 특성은 Tjϕtta 등에 의해 식 (2) 식 (4)와 같이 이론 식이 주어져 있다. 그러나, 이 식은 음축으로부터 90° 이상의 영역에 대한 지향 특성의 계산이 불가능하기 때문에, 제안된 방법을 적용하여 시뮬레이션을 하기가 곤란하다. 따라서 본 논문에서는 제안된 방법의 특성 해석을 위해 일차원 등가 모델을 제안하고 이들에 대한 지향함수를 유도하였다.

먼저 공기 중에서의 굴곡 모드 진동자를 이용한 파라메트릭 어레이의 지향 특성을 분석하기 위해 단일 굴곡 모드 진동자에 대한 일차원 시뮬레이션 모델을 제안하였다. 굴곡 모드 진동자 하나에 대한 등가 모델로, 중심에 source strength mQ를 갖는 하나의 점음원과, 양쪽에 source strength Q를 갖고, 중심에 위치한 음원과 180°의 위상차를 갖는 두 개의 점음원을 배열한 모델로 Fig. 18에 나타내었다. 이 모델에 대한 지향함수는 식 (5)와 같이 유도된다.

$$H(\theta) = \frac{m}{m-2} - \frac{2}{m-2}\cos\left(\frac{kd}{2}\sin\theta\right) \tag{5}$$

다음으로 두 개의 등가 굴곡 모드 진동자가 Fig. 19에 보여진 것처럼 음축으로부터 각도 ϕ를 갖도록 배열된 경우를 고려하였다.

각 진동자의 중심 사이의 거리는 l 이다. 이 경우 배열된 굴곡 모드 진동자에 대한 지향 특성은 Product theorem[14]을 사용하여 다음 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$H(\theta) = \left[\frac{m}{m-2} - \frac{2}{m-2}\cos\left(\frac{kd}{2}\sin(\theta+\phi)\right)\right] \times \left[\frac{m}{m-2} - \frac{2}{m-2}\cos\left(\frac{kd}{2}\sin(\theta-\phi)\right)\right] \times \cos\left(\frac{kl}{2}\sin\theta\right) \tag{6}$$

본 논문에서는 식 (6)을 이용하여 공기 중에서의 파라메트릭 어레이에 의한 일차파의 시뮬레이션을 행하고 그 결과를 실험과 비교하였다.

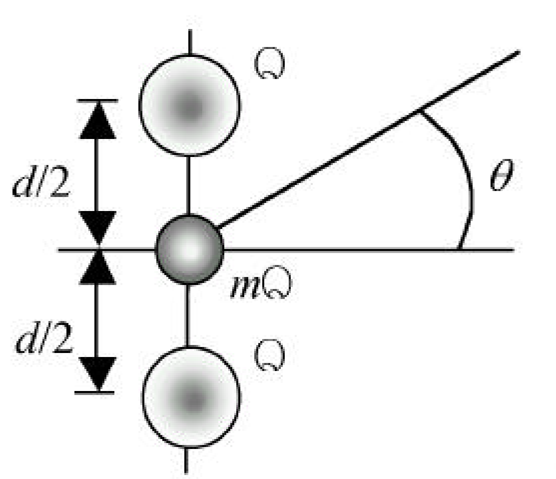


Fig. 18 **단일 굴곡 모드 진동자에 대한 시뮬레이션 모델**

Fig. 18 Simulation model for single flexural type vibrator

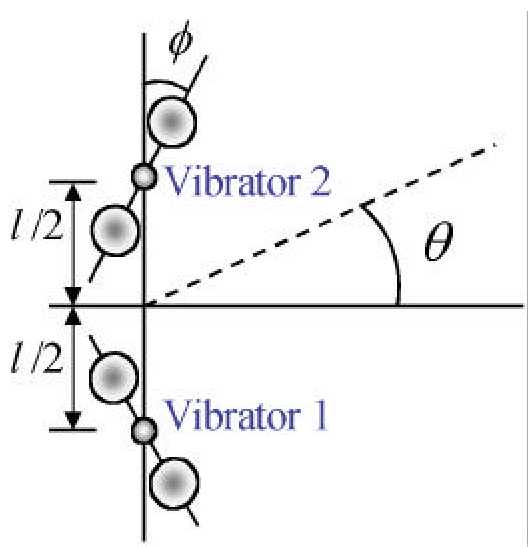


Fig. 19 **굴곡 모드 진동자를 배열한 시뮬레이션 모델**

Fig. 19 Simulation model for arrayed flexural type vibrator

Ⅲ-2. 시뮬레이션 및 실험 결과

실험에 사용된 굴곡 모드 진동자의 모양을 Fig. 20에 나타내었다. 이 굴곡 모드 진동자는 반경 3㎜인 PZT에 반경 4.5㎜인 스테인레스 스틸이 접착된 유니몰프 타입의 굴곡 모드 진동자이다. 본 논문에서는 이와 동일한 외형의 굴곡 모드 진동자 2개를 배열하여 지향 특성 개선을 위한 음원을 제작하였는데, 각각의 공진 주파수를 Network Analyzer로 측정한 결과 44.38㎑와 45.47㎑로 측정되었다.

굴곡 모드 진동자의 진동 분포를 Laser Vibrometer (GRAPHTEC AT3500)를 이용하여 측정한 결과, Fig. 21과 같이 측정되었다. Fig. 21의 결과에서 음(-)의 영역은 중심(+)에 비해 위상이 반전됨을 의미한다. Fig. 21의 결과로부터 굴곡 모드 진동자를 Fig. 18에 나타낸 것과 같은 점음원의 배열로 해석한 일차원적으로 등가 해석한 것이 타당함을 알 수 있다.

본 논문에서는 굴곡 모드 진동자에 대한 일차원 등가 모델을 선형 배열하고, 배열된 진동자의 중심간 거리 l과 배열 면과 진동 면 사이의 각도 ϕ를 변화시키는 방법으로 굴곡 모드 진동자의 지향 특성 개선을 위한 방법을 제안하였다. 실험에 앞서 먼저 시뮬레이션을 통해 중심간 거리 l과 배열 면과 진동 면 사이에 각도 ϕ를 결정함으로서 실험을 위한 가장 적절한 간격과 각도를 정하고 공기 중에서의 파라메트릭 어레이에 적용하여 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하여 특성 개선을 검토하였다. 시뮬레이션에는 식 (6)을 이용하였으며, 시뮬레이션으로부터 간격 l은 실험 환경을 고려하여 실험이 충분히 가능한 영역으로 18㎜와 20㎜로 선택하였다.

시뮬레이션 결과로부터 배열 면과 진동 면 사이의 각도 ϕ는 l이 18㎜ 일 때 50°, l이 20㎜ 일 때 62°로 나타났으며, 그 결과를 Fig. 22 및 Fig. 23에 나타내었다.

지향 특성을 측정하기 위한 실험 환경 개략도를 Fig. 24에 나타내었다.

실험에서는 Function Generator로부터 $10V_{pp}$의 연속 신호를 인가하고, 이

를 Power Amp를 이용하여 60V_{pp}로 증폭하여 공기 중에서의 파라메트릭 어레이를 위한 음원을 구동시키고, Condenser type Microphone (B&K Type 4135)을 이용하여 음원으로부터 음축 상 120㎜의 위치에서 음압을 수신하였다. 수신된 음압에 대한 지향특성을 FFT Analyzer 및 Digital Oscilloscope를 이용하여 분석하였다. 또한 인가한 일차파의 주파수는 45.29㎑와 46.29㎑로 각 진동자의 공진 주파수 부근에서 동일한 레벨을 갖고 차 주파수가 1㎑가 되도록 선택하였으며, 각각의 주파수에 대해 측정된 일차파의 지향 특성을 식 (6)을 이용한 시뮬레이션 결과와 함께 규격화하여 Fig. 25 및 Fig. 26에 나타내었다. Fig. 25의 측정 결과 (a)의 경우, 주엽의 음압과 최대 음압을 갖는 부엽의 음압비가 약 0.9로 부엽의 레벨이 높게 나타났으나, 제안된 방법인 (b)의 경우 약 1.25로 주엽의 레벨이 높게 개선되었으며, 50° 방향의 부엽에 대해서는 약 2.86으로 부엽의 레벨이 매우 낮아짐을 확인하였다. 또한 Fig. 26 (a)의 경우, 주엽의 음압과 최대 음압을 갖는 부엽의 음압비는 약 0.9로 부엽의 레벨이 높게 나타났으나, 제안된 방법인 (b)의 경우 약 1.54로 주엽의 레벨이 높게 개선되었으며, 50° 방향의 부엽에 대해서도 약 2로 부엽의 레벨이 매우 낮아짐을 확인하였다.

Fig. 25 및 Fig. 26의 결과로부터 굴곡 모드 진동자에 각도를 주지 않고 배열한 경우의 결과인 Fig. 25(a), Fig. 26(a)에 비하여 제안된 방법인 각각의 굴곡 모드 진동자에 각도 ϕ를 준 Fig. 25(b), Fig. 26(b)의 결과 부엽의 레벨이 낮고 주엽의 레벨이 큰 지향 특성을 나타냄을 시뮬레이션과 실험을 통해 확인할 수 있었다. 이로부터 파라메트릭 어레이에 의해 생성되는 이차파의 지향 특성이 일차파에 의존한다는 사실을 상기하여 볼 때, 생성되는 이차파의 지향 특성 또한 개선될 것으로 예상할 수 있다. 실험을 통해 파라메트릭 어레이에 의해 생성된 이차파의 측정 결과를 일차파의 측정 결과와 비교하여 Fig. 27 및 Fig. 28에 나타내었다.

Fig. 27의 측정 결과, (a)의 경우 이차파에 대한 주엽의 음압과 최대 음압

을 갖는 부엽의 음압비가 약 0.6으로 부엽의 레벨이 높게 나타났으나, 제안된 방법인 (b)의 경우 약 2.5로 주엽의 레벨이 크게 개선되었으며, 50° 방향의 부엽에 대해서는 약 20으로 부엽의 레벨이 현저하게 낮아짐을 확인하였다. 또한 Fig. 28 (a)의 경우, 주엽의 음압과 최대 음압을 갖는 부엽의 음압비는 0.5로 부엽의 레벨이 높게 나타났으나, 제안된 방법인 (b)의 경우 약 5.6으로 주엽의 레벨이 높게 개선되었으며, 50° 방향의 부엽에 대해서도 약 10으로 부엽의 레벨이 현저하게 낮아지고 주엽이 두드러지게 나타남을 확인하였다.

Fig. 25, Fig. 26, Fig. 27 및 Fig. 28의 결과로부터 본 논문에서 제안된 방법을 적용함으로서 굴곡 모드 진동자를 이용한 공기 중에서의 파라메트릭 음원의 방사 특성의 개선이 가능함을 확인할 수 있었다.

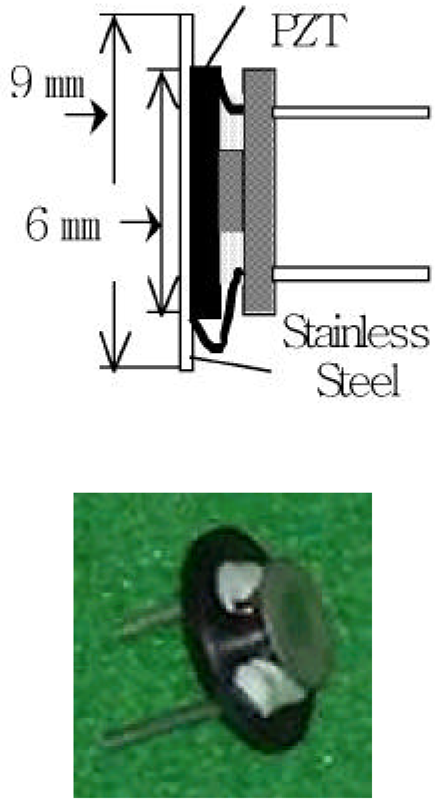


Fig. 20 **실험에 사용된 굴곡 모드 진동자의 외형**

Fig. 20 Shape of flexural type vibrator used in experiment

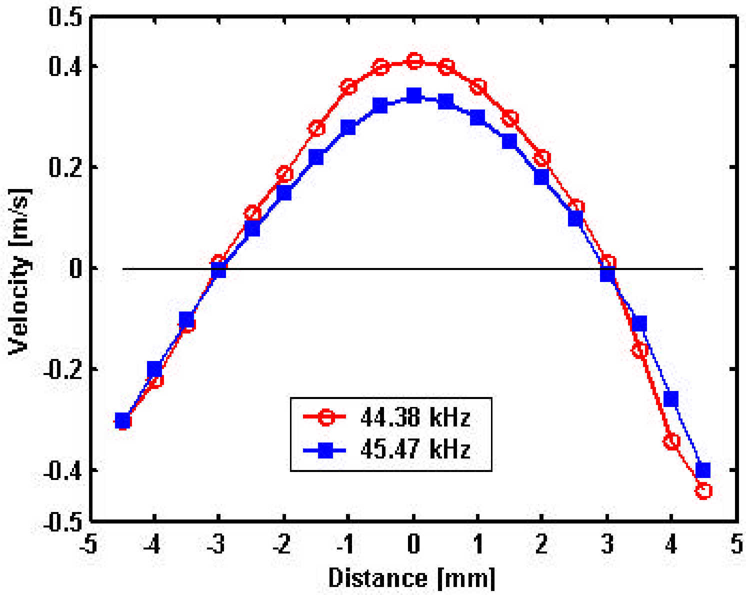
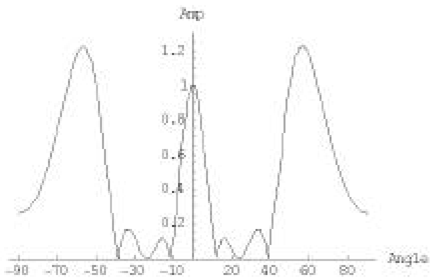
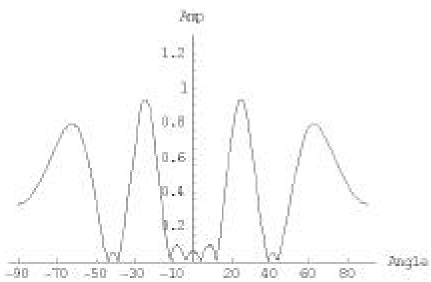


Fig. 21 진동 분포 측정 결과

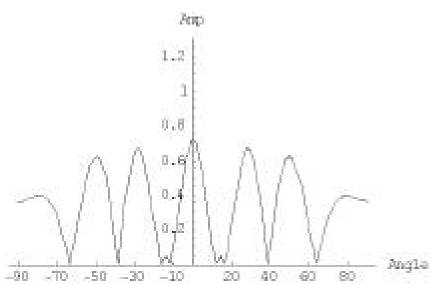
Fig. 21 Measurement results of vibration distribution



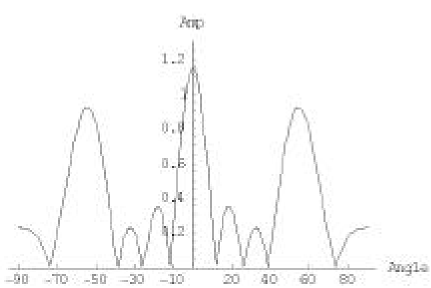
l = 18㎜, ϕ = 0 °



l = 18㎜, ϕ = 20 °



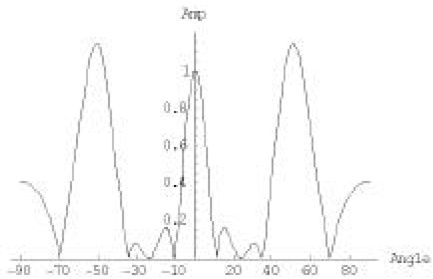
l = 18㎜, ϕ = 40 °



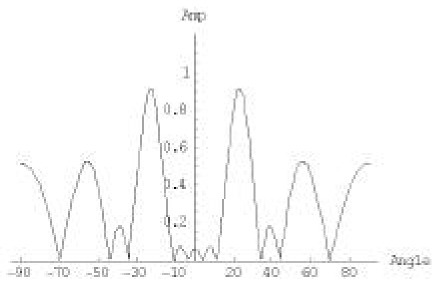
l = 18㎜, ϕ = 50 °

Fig. 22 l = 18㎜**에서** ϕ **의 변화에 따른 일차파 시뮬레이션**

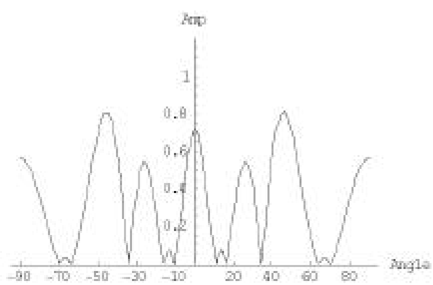
Fig. 22 Simulation results of primary wave for various ϕ at l = 18㎜



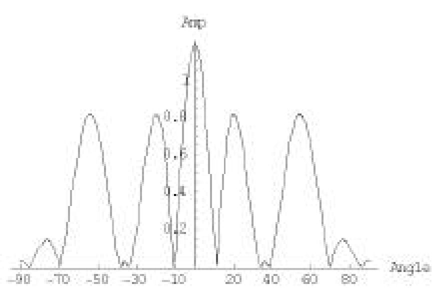
l = 20㎜, ϕ = 0 °



l = 20㎜, ϕ = 20 °



l = 20㎜, ϕ = 40 °



l = 20㎜, ϕ = 62 °

Fig. 23 l = 20㎜에서 ϕ 의 변화에 따른 일차파 시뮬레이션

Fig. 23 Simulation results of primary wave for various ϕ at l = 20㎜

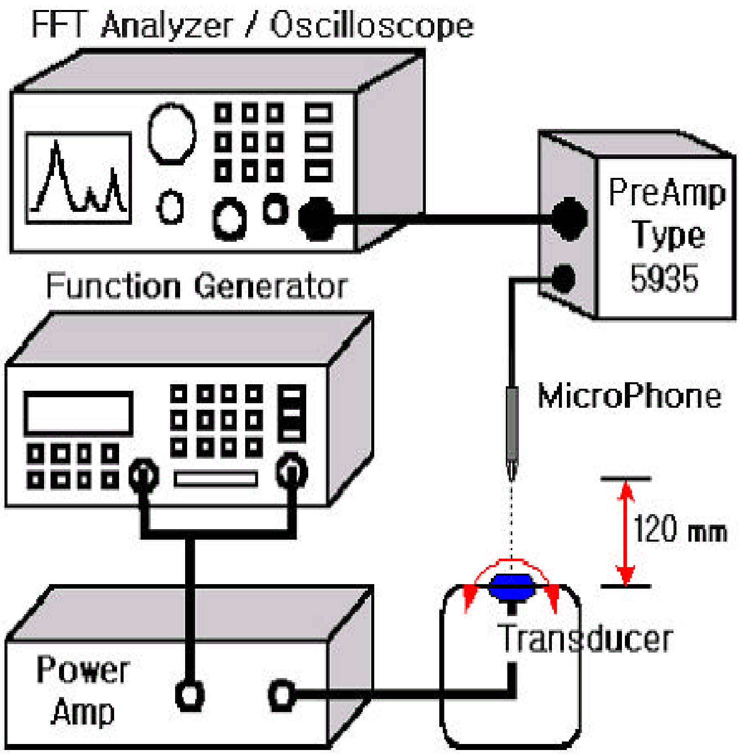
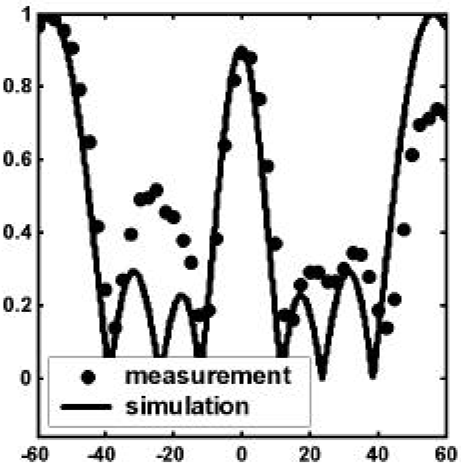
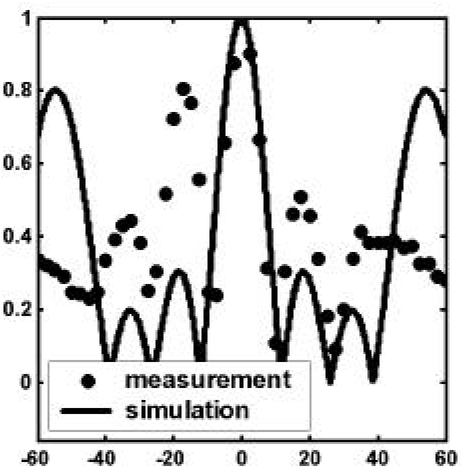


Fig. 24 실험 환경 개략도

Fig. 24 Experimental setup for directivity measurement



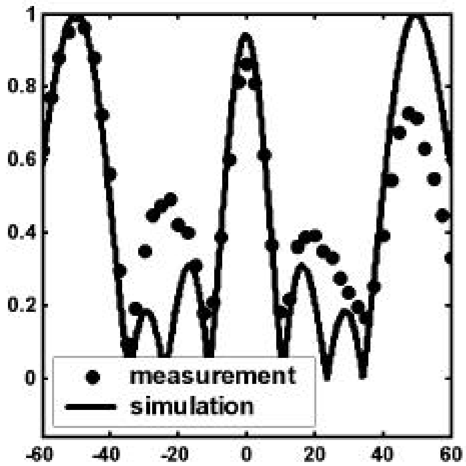
(a) ϕ = 0°



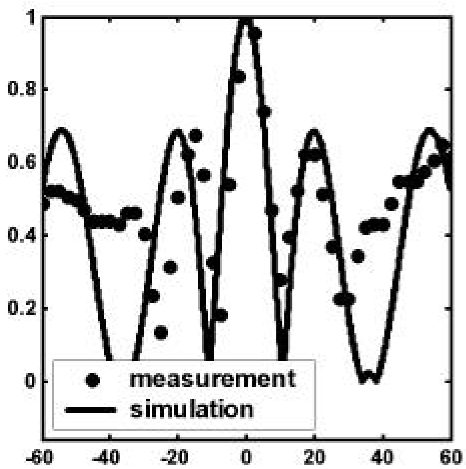
(b) ϕ = 50°

Fig. 25 l = 18㎜인 경우의 각도 ϕ에 따른 지향 특성 변화

Fig. 25 Change of directivity characteristics
for ϕ = 0° and ϕ = 50° at l = 18㎜



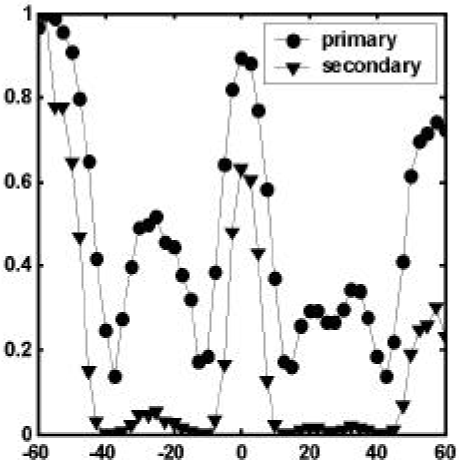
(a) ϕ = 0°



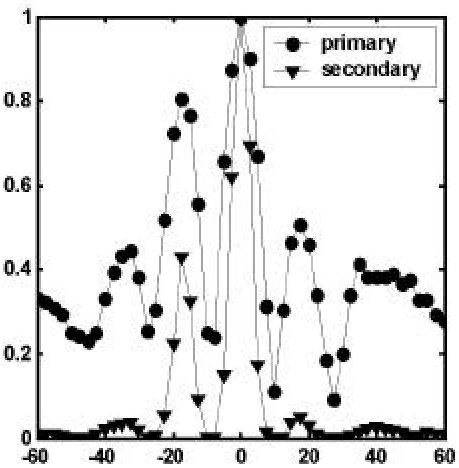
(b) ϕ = 62°

Fig. 26 l = 20 mm **인 경우의 각도** ϕ**에 따른 지향 특성 변화**

Fig. 26 Change of directivity characteristics
for ϕ = 0° and ϕ = 62° at l = 20㎜



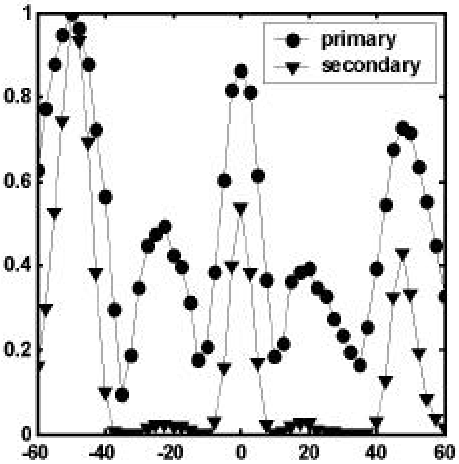
(a) ϕ = 0 °



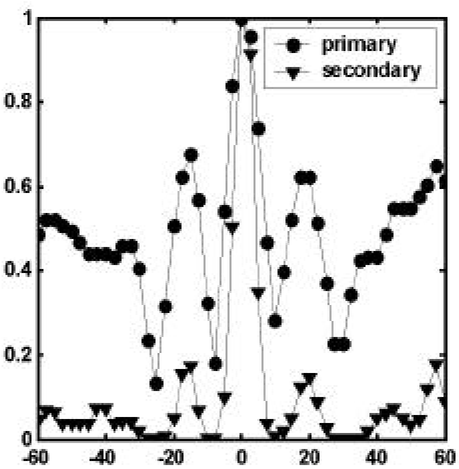
(b) ϕ= 50 °

Fig. 27 l = 18㎜인 경우의 각도 ϕ에 따른 지향 특성 변화

Fig. 27 Change of directivity characteristics
for ϕ = 0 ° and ϕ = 50 ° at l = 18㎜



(a) ϕ = 0°



(b) ϕ = 62°

Fig. 28 l = 20 mm **인 경우의 각도 ϕ에 따른 지향 특성 변화**

Fig. 28 Change of directivity characteristics
for ϕ = 0° and ϕ = 62° at l = 20㎜

VI. 결　　론

본 논문에서는 굴곡 모드 진동자를 이용한 공기 중에서의 파라메트릭 음원의 특성 해석 및 그 방사 특성 개선을 위하여 먼저 공기 중에서의 파라메트릭 어레이의 이론 계산에 있어서 음원의 진동 분포를 고려함으로서 좀 더 정확한 계산 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 실제로 사용된 음원의 진동 분포를 측정하고 측정된 결과의 회기곡선을 구해 최적의 진동 분포 함수를 선택, 이를 이용하여 일차파와 이차파의 지향 패턴에 대한 시뮬레이션을 행하고, 실험을 통해 측정된 결과와 비교해 보았다. 시뮬레이션 결과로부터 음원의 진동 분포를 피스톤 분포로 고려한 경우와 Bessel 분포로 고려한 경우에 있어서 지향 패턴의 차이가 크게 남을 확인하였고, 측정된 음원 진동 분포를 고려한 경우와 실제 실험을 통한 일차파와 이차파의 지향패턴 측정 결과와의 비교를 통하여 파라메트릭 어레이에 의한 일차파 및 이차파의 지향 패턴이 진동 분포를 고려한 경우 50° 부근의 영역까지 그 경향이 잘 일치함을 확인하였다. 이러한 지향성 측정 결과로부터 공기 중에서의 파라메트릭 어레이의 이론 계산에 있어서 음원을 피스톤 분포로 가정하여 계산하는 것은 상당한 오차의 원인이 될 수 있으며, 더욱 정확한 계산을 얻기 위해서는 실제 음원의 진동 속도 분포를 정밀하게 측정하여 이를 고려하여야 할 것으로 생각된다. 또한 다양한 시뮬레이션을 통해 목적하는 지향성을 갖는 파라메트릭 음원의 이론적 설계가 가능할 것으로 기대된다.

또한, 굴곡 모드 진동자를 이용한 공기 중에서의 파라메트릭 어레이의 지향 특성 개선을 위해 굴곡 모드 진동자의 진동 면과 배열 면 사이에 각도를 주어 배열하는 방법을 제안하였다. 실험 결과로부터 제안된 방법에 의해 일차파에 대한 주엽의 음압과 최대 음압을 갖는 부엽의 음압비가 음원의 중심간 간격 l 이 18㎜인 경우 약 1.25로 주엽의 레벨이 높게 개선되었으며, 50° 방향의 부엽에 대해서는 약 2.86으로 부엽의 레벨이 매우 낮아짐을 확인할 수 있었고, l 이 20㎜인 경우 약 1.54로 주엽의 레벨이 높게 개선되었으며,

50° 방향의 부엽에 대해서도 약 2로 부엽의 레벨이 매우 낮아짐을 확인할 수 있었다. 또한 이차파에 대한 주엽의 음압과 최대 음압을 갖는 부엽의 음압비가 l 이 18㎜인 경우 약 2.5로 주엽의 레벨이 크게 개선되었으며, 50° 방향의 부엽에 대해서는 약 20으로 부엽의 레벨이 현저하게 낮아짐을 확인할 수 있었고, l 이 20㎜인 경우 약 5.6으로 주엽의 레벨이 높게 개선되었으며, 50° 방향의 부엽에 대해서도 약 10으로 부엽의 레벨이 현저하게 낮아지고 주엽이 두드러지게 나타남을 확인할 수 있었다.

이로부터 굴곡 모드 진동자를 공기 중에서의 파라메트릭 어레이에 적용할 경우에 본 논문에서 제안된 방법을 통해 굴곡 모드 진동자의 지향 특성이 개선됨을 확인할 수 있었으며, 제안된 방법이 공기 중에서의 파라메트릭 어레이의 방사 특성 개선에 적용 가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] P. J. Westervelt : "Parametric Acoustic Array", J. Acoust. Soc. Am, 35(4), pp. 535-537, 1963.

[2] T. G. Muir and J. G. Willette : "Parametric Acoustic Transmitting Arrays", J. Acoust. Soc. Am., 52(5), pp. 1481-1486, 1972.

[3] M. B. Moffett, P. J. Westervelt and R. T. Beyer : "Large Amplitude Pulse Propagation-A Transient Effect", J. Acoust. Soc. Am., 47(5), pp. 1473-1447, 1970.

[4] Richard L. Rolleigh : "Difference Frequency Pressure within the Interaction Region of a Prarmetric Array", J. Acoust. Soc. Am., 58(5), pp. 964-971, 1975.

[5] H. O. Berktay and D. J. Leahy : "Farfield Performance of Parametric Transmitters", J. Acoust. Soc. Am., 55(3), pp. 539-546, 1974.

[6] **鎌 倉 友 男** : "Fundamentals of Nonlinear Acoustics", **愛智出版**, **東京**, 1996.

[7] H. O. Berktay : "Possible Exploitation of Nonlinear Acoustics in Underwater Transmitting Applications", J. Sound Vib., 2, pp. 435-461, 1965.

[8] M. B. Bennett and D. T. Blackstock : "Parametric Array in Air", J. Acoust. Soc. Am., 57(3), pp. 562-568, 1975.

[9] Masahide Yoneyama, Yukawamo, Jun'ichiroh Fujimoto, Shoichi Sasabe : "Application of Nonlinear Parametric Interaction to Loudspeaker", **電子情報通信學會技術研究報告**, EA81-65, pp. 41-48, 1981.

[10] A. I. Kalachev and D. B. Ostrovskii : " Experimental Study of the Near Field of a Parametric Sound Radiator", Sov. Phys. Acoust., 29(3),

pp. 241-242, 1983.

[11] Mark B. Moffett and Robert H. Mellen : “On Parametric Source Aperture Factors”, J. Acoust. Soc. Am., 60(3), pp. 581-583, 1976.

[12] **超音波便覽編輯委員會**, “**超音波便覽**”, **丸善株式會社**, 5**章**, 1999.

[13] J. N. Tjφtta and S. Tjφtta, "Nonlinear equations of acoustics, with application to parametric arrays", J. Acoust. Soc. Am., 69(6), 1644, 1981.

[14] Lawrence J. Ziomek : "Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-Time Signal Processing", CRC Press, Chapter 7, 1995.

감사의 글

논문이 완성되기까지 묵묵히 저를 믿고 지도해 주신 김무준 교수님께 가장 먼저 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 조언을 아끼지 않고 학문적으로 부족한 부분을 일깨워주신 김천덕 교수님과 하강열 교수님, 배민건 선배님께도 감사의 말씀을 전합니다. 또한 실험실에서 함께 생활하며 힘이 되어준 고영인 군과 현병국 군, 그리고 학부때부터 함께 해왔던 후배 이기욱 군과 채민구 군 그리고 다른 여러 후배님들에게도 아울러 감사를 전하며, 제 연구를 많이 도와 주셨던 김정호 선배님과 용당 실험실의 후배님들에게도 감사를 전합니다.

끝으로 부족하나마 이 한편의 논문이 있기까지 저를 믿고 힘이 되어준 저의 아내와 부모님 그리고 가족들과 이제 막 2달이 된 저의 아들 수영군에게 이 작은 결실을 바칩니다.