

두께 불균일 압전 초음파 트랜스듀서의 형태에 따른 특성변화 해석

Characteristics Variation Analysis by Shape of Piezoelectric Ultrasonic Transducer with Non-Uniform Thickness

김 동 현*, 김 정 순**, 김 무 준***, 하 강 렬***
(Donghyun Kim*, Jungsoon Kim**, Moojoon Kim***, Kanglyeol Ha***)

*프로소닉(주), **동명대학교, ***부경대학교
(접수일자: 2008년 5월 26일; 수정일자: 2008년 7월 31일; 채택일자: 2008년 8월 3일)

압전판의 길이나 폭에 따라 두께가 변화하는 압전 세라믹을 사용하여 광대역 특성을 구현하는 초음파 트랜스듀서에 대하여 압전진동자의 측면에서 본 형태에 따른 전기-유향적 특성해석을 이론적으로 수행하였다. 압전진동자의 길이방향에 따른 두께 변화를 지수함수의 조합으로 표현하고 이 함수를 이용하여 압전진동자의 전기단자에서 본 자유 어드미턴스 및 파워전달함수에 대한 식을 도출하였다. 대표적인 PZT 압전 세라믹을 예로 들어 압전 진동자의 측면 형태변화에 따른 바 대역폭을 고찰해본 결과 넓은 대역폭을 얻기 위한 최적의 형태가 존재함을 알 수 있었으며, 압전진동자의 최대두께에 대한 최소두께 비가 작아짐에 따라 대역폭은 100%이상까지도 넓어질 수 있으나 파워전달함수는 반대로 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 또 압전진동자의 길이가 길어 질수록 전달함수의 크기는 증가하나 광대역 특성을 갖는 압전진동자의 형태는 매우 한정적이 됨을 확인할 수 있었으며 이는 고효율의 광대역 초음파 트랜스듀서 제작에 있어서는 정밀한 가공이 요구됨을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 초음파, 트랜스듀서, 압전세라믹, 광대역, 두께불균일

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.3)

The electro-mechanical characteristics were theoretically analyzed for the wideband ultrasonic transducer made of non-uniform thickness piezoelectric vibrator. This paper proposes a combination of exponential functions which describes the thickness variation along the length of the vibrator to derive the input admittance and power transfer function of the transducer. The bandwidth and the power transfer function of the transducer were investigated while the lateral shape of the vibrator changes. The results showed there is an optimum shape for the wideband characteristics of the transducer, and the bandwidth has increased up to over 100% as the ratio of minimum value of thickness to maximum value decreases. However, the power transfer function had a downward trend as the ratio of thickness decreases. Also we confirmed that even though the value of transfer function increases as the length of the piezoelectric vibrator increases, the shape providing wideband characteristics is very limited. It means that precision processing is required to manufacturing a wideband ultrasonic transducer with high efficiency.

Keywords: Ultrasonic, Transducer, Piezoelectric ceramic, Broadband, Tapered thickness

ASK subject classification: Ultrasonic and Elastic Waves (4.3)

I. 서론

압전체를 이용한 초음파 트랜스듀서는, 의료용 초음파 진단, 비파괴 검사, 각종 초음파 계측 장치 등에 폭넓

게 사용되고 있다. 이러한 초음파 계측에 있어서는 높은 분해능이나 넓은 주파수대에 걸친 계측이 요구되고 있어 광대역 초음파 트랜스듀서의 실현이 큰 과제가 되고 있다. 종래, 이러한 초음파 트랜스듀서에는 분극율과 압전상수가 일정한 압전판이 사용되고 있어 이 경우, 압전상수의 위치에 따른 미분에 비례하는 여진력은 압전판의 양 표면에 집중된다. 따라서 이러한 트랜스듀서에 임펄

책임저자: 김 무 준 (kimmj@pknu.ac.kr)
608-737 부산시 남구 대연3동 599-1
부경대학교 자연과학대학 물리학과
(전화: 051-629-5572; 팩스: 051-629-5549)

스 (impulse) 전압을 인가했을 경우에는 압전판의 양 표면으로부터 펄스 음파가 여진 되어 짧은 단일 펄스의 발생은 불가능하다. 이 때문에 임펄스 응답의 퓨리에 변환으로 표현되는 트랜스듀서의 주파수 특성은 협대역이 되어 중심 주파수는 압전체의 두께에 강하게 의존하게 된다. 따라서 종래에는 이러한 특성을 둔화시키기 위하여 압전판의 뒷면에서 발생하는 편스음파를 흡수시키는 배면재질을 접착하여 압전판의 전면으로 반사되어 전파되는 것을 막아 비교적 짧은 펄스를 얻는 방법이 제안되어 왔다 [1-3]. 그러나 이러한 방법은 이론적으로는 상당히 넓은 대역폭을 얻을 수 있으나 이상적인 배면재질의 실현이 불가능하고 에너지의 많은 부분을 배면체로 손실시킨다는 점에서 높은 전기-음향효율을 기대하기가 어려웠다. 또 다른 시도로는 두께가 상이한 압전판 혹은 탄성체의 조합 및 적층을 이용하여 특정 주파수 대역 내에 다수의 공진특성을 갖도록 설계한 광대역 초음파 트랜스듀서가 제안되어 있다 [4-5]. 그러나 이러한 적층형 트랜스듀서의 경우 두께가 매우 얇아야 하는 고주파대역의 광대역화가 힘들고 이론적인 예측과 동일한 제작에는 많은 한계가 있음이 확인되고 있다. 또 다른 방법으로 압전판 내부의 분극을 두께 방향으로 경사시킨 압전 경사 기능재료를 이용하는 광대역 초음파 트랜스듀서가 제안되어 있다 [6]. 이것은 압전 상수의 크기가 두께에 따라서 변하고 있기 때문에 초음파 여진원이 되는 체적력이 압전판의 한쪽 표면 부근에서만 발생하여 짧은 펄스의 발생이 가능하게 된다. 그러나 이 경우도 압전상수를 두께에 따라 변화시키는 방법에 있어서 큐리온도 이상의 열을 압전판의 한쪽 면에 가하여 일정두께까지 분극을 없애는 방법을 사용하게 되는데 이러한 공정이 매우 까다로우며 분극을 없애므로 해서 효율의 측면에서는 그리 바람직한 방법이라고 할 수 없다. 유사한 방법으로 압전 단결정의 분극 방향을 서로 다른 방향으로 성장시키는 방법이 있으나 이 역시 제작 방법이 쉽지 않으며 제작비용이 많이 든다는 단점이 있다 [7].

최근 압전 초음파 트랜스듀서의 중심주파수는 그 두께에 크게 의존한다는 점에 착안하여 일정한 두께가 아닌 압전판의 길이나 폭에 따라 두께가 변화하는 압전 세라믹을 사용하여 광대역 특성을 구현하는 연구가 수행되고 있다 [8-10]. 특히 초음파 진단장치에 사용되는 초음파 프로브의 배열진동 소자의 경우 압전판의 한쪽 면을 오목하게 하여 두께변화와 동시에 음파의 집속을 구현한 모델이 시판되고 있다 [11-12]. 이는 광대역 특성을 이용한 짧은 펄스의 구현과 집속 초음파 음장으로 인한 예리한

공간 분해능으로 초음파 진단화상의 질을 많이 향상시키는 성과를 가져왔다. 그러나 이러한 연구는 두께가 선형적으로 변하는 경우 혹은 원호의 형태를 갖는 경우 등 일정한 형태에 대한 특성 평가에 그치고 있으며 트랜스듀서의 설계에 있어서 각 설계변수에 따른 성능예측에 관한 연구는 충분하지 못하다 [13-15].

특히 압전진동자의 측면에서 본 형태에 따른 전기-음향적 특성해석법은 트랜스듀서의 최적설계에 기초적인 이론적 수단을 제공하므로 본 연구에서는 압전 진동자의 두께를 길이방향의 위치의 함수로 선택하고 이 함수에 의해 변화하는 압전 진동자의 형태에 따른 전기적인 입력 임피던스 특성과 파워 전달함수를 계산하여 그 특성변화를 검토하였다.

II. 이론

그림 1에 나타난 것과 같이 장방향의 진동변을 갖는 압전 진동자의 두께가 길이방향의 위치 x 에 따라 변할 때 그 두께를 다음과 같은 위치의 함수로 선택하였다.

$$l(x) = \frac{l_{min}(e^{gx} - e^{gT}) + l_{max}(e^{gx} - 1)}{e^{gx} - 1} \quad (1)$$

여기서 g 는 두께변화의 형태를 결정하는 형태결정지수라 하고, l_{min} 및 l_{max} 는 각각 $x=0$ 및 $x=T$ 에서의 두께를 나타내고 있다.

또한 g 의 극한값에 대하여 다음의 관계를 가진다.

$$\lim_{g \rightarrow \infty} l(x) = l_{max} \quad (2a)$$

$$\lim_{g \rightarrow 0} l(x) = \frac{(l_{max} - l_{min})}{T} x + l_{min} \quad (2b)$$

$$\lim_{g \rightarrow -\infty} l(x) = l_{min} \quad (2c)$$

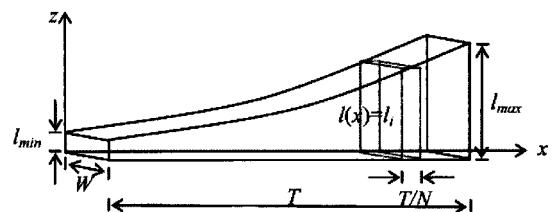


그림 1. 두께가 일정치 않은 압전 진동자
Fig. 1. Piezoelectric vibrator with non-uniform thickness.

그림 1에 나타낸 것과 같은 압전 진동자의 특성을 해석하기 위하여 길이 T 인 압전진동자를 거리에 따라 N 등분하였다고 가정했을 때 i 번째 요소에 대한 전기적 입력 어드미턴스는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 음향학적 경계조건은 그림 2에 나타낸 것과 같이 특성임피던스가 Z_1 인 음향매질을 방사면에 두고 배면의 음향매질은 없다고 가정하였다 [16].

$$(Y_1)_i = \frac{j\omega \frac{\epsilon_{33}^S}{l_i} W}{1 + \frac{k_T^2}{\left(\frac{\omega l_i}{v_{33}^D}\right) \left[j \frac{\bar{Z}_l}{Z_0} - 2 \tan\left(\frac{\omega l_i}{2v_{33}^D}\right) \right] \left[1 - j \frac{\bar{Z}_l}{Z_0} \cot\left(\frac{\omega l_i}{v_{33}^D}\right) \right]}} \frac{T}{N} \quad (3)$$

단, ω : 각진동수, ϵ_{33}^S : 유전상수, W : 압전진동자의 폭,
 k_T^2 : 전기-기계결합계수, v_{33}^D : 음속, Z_0 : 압전진동자의 특성임피던스

각 진동요소의 길이 T/N 을 Δx 라 두고 분할요소의 수 N 을 무한히 크게 하면 $\Delta x \rightarrow dx$ 이 되어 압전 진동자 전체에 대한 어드미턴스는 다음과 같이 적분식으로 나타낼 수 있다.

$$Y_1|_{0,x} = \int_0^T \frac{j\omega \frac{\epsilon_{33}^S}{l(x)} W}{1 + \frac{k_T^2}{\left(\frac{\omega l(x)}{v_{33}^D}\right) \left[j \frac{\bar{Z}_l}{Z_0} - 2 \tan\left(\frac{\omega l(x)}{2v_{33}^D}\right) \right] \left[1 - j \frac{\bar{Z}_l}{Z_0} \cot\left(\frac{\omega l(x)}{v_{33}^D}\right) \right]}} dx \quad (4)$$

식(4)에 식(1)에서 정한 두께 $l(x)$ 의 표현식을 대입하여 수치적분을 수행한다.

한편 제동임피던스는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_0|_{0,x} = \frac{1}{\int_0^T j\omega \frac{\epsilon_{33}^S}{l(x)} W dx} \quad (5)$$

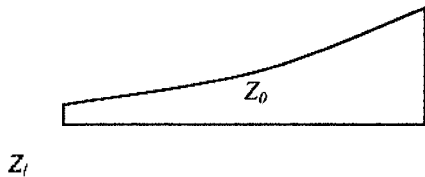


그림 2. 트랜스듀서의 음향매질과 배면체
 Fig. 2. Ultrasonic transducer with acoustic load and backing material.

따라서 다음과 같은 동 임피던스 (motional impedance)에 대한 표현식에 식(4) 및 식(5)의 결과를 대입하면 동 임피던스를 구할 수 있다.

$$Z_m|_{0,x} = \frac{1}{Y_1|_{0,x}} = Z_0|_{0,x} = R_m + jX_m \quad (6)$$

따라서 규격화된 파워 전달함수 $H_p(\omega)$ 는 식(6)으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다 [1].

$$H_p(\omega) = \frac{4R_x R_m}{\{R_x + R_m\}^2 + \left\{X_m - \frac{1}{\omega C_0}\right\}^2} \quad (7)$$

여기서 R_x 는 전원의 내부저항이다.

III. 결과

계산의 예로써 식(1)에 있는 형태결정지수 g 에 따른 압전 진동자의 측면 형태를 그림 3에 나타내었다. 이 그림에서는 압전 진동자의 길이 T , 최대두께 l_{max} 및 최소두께 l_{min} 에 대한 관계를 다음과 같이 설정하였다.

$$T = l_{max} \quad (8a)$$

$$l_{min} = \frac{l_{max}}{2} \quad (8b)$$

그 외 계산에 필요한 압전 진동자의 물질상수는 표 1과 같이 대표적인 PZT계의 압전 세라믹에 대한 물질상수를

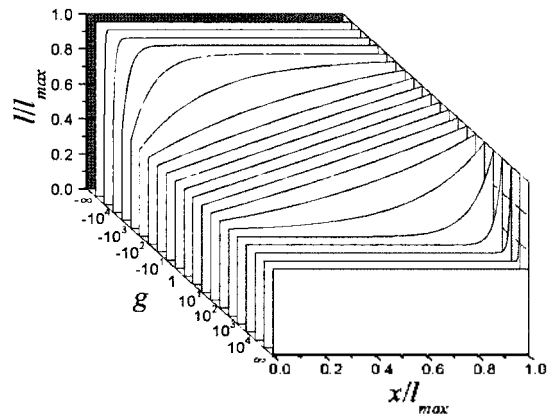


그림 3. 상수 g 에 따른 압전 진동자의 형태변화
 Fig. 3. Shape of piezoelectric vibrator change with constant g .

표 1. 압전진동자의 크기 및 물질상수

Table 1. Size and material constants of the piezoelectric vibrator.

Density [kg/m ³]	7649.9
Electro-mechanical Coupling constant k_T	0.381
Dielectric constant $\epsilon_{33}^s/\epsilon_0$	839
Phase velocity v_{33}^p [m/s]	4116.3
Maximum thickness [mm]	12

사용하였다.

압전진동자에 대한 어드미턴스 특성을 조사하기 위하여 그림 3에 나타난 여러 형태에 대하여 식(4)를 이용하여 계산한 결과를 그림 4에 나타내었다. 이때 음향매질은 물로 두었다. 이 결과는 어드미턴스의 절대치를 나타내고 있으며 형태결정지수 g 에 따라 공진특성이 변화하는 경향을 잘 나타내고 있다. g 의 값이 양의 극한인 $+\infty$ 일 경우 그림 3에 나타난 바와 같이 압전진동자의 두께가 l_{min} 으로 일정한 경우에 해당되며 이때의 어드미턴스 특성은 약 250 kHz부근에서 강한 공진 특성을 나타내고 있다. 한편 g 의 값이 음의 극한인 $-\infty$ 인 경우는 압전진동자의 두께가 l_{max} 로 일정한 경우에 해당되며 이때의 어드미턴스 특성은 약 150 kHz부근에서 기본공진과 약 500 kHz부근에서 배수공진모드가 강하게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 이 결과로부터 형태결정지수 g 의 값이 0에 가까워질수록 어드미턴스의 공진특성은 매우 부드러워지고 이는 광대역 특성을 예측할 수 있게 한다. 이 경우에 대한 파워전달함수의 특성변화를 알아보기 위하여 식(7)을 이용하여 계산한 결과를 그림 5에 나타내었다. 이 결과를 보면, 그림 4의 결과로부터 예측할 수 있었듯이 형태결정지수의 범위가 $-200 \leq g \leq 200$ 에서 비교적 평탄한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 1에 나타난 압전진동자의 최소두께 (l_{min})와 최대두께 (l_{max})의 비에 따른 특성변화를 고찰하기 위하여 두께 비에 따른 파워전달함수를 $-200 \leq g \leq 200$ 의 범위에서 10간격으로 계산하여 그림 6에 나타내었다. 이 결과를 보면 두께 비 l_{min}/l_{max} 가 작아짐에 따라 대역폭은 넓어지거나 파워전달함수는 작아지는 경향을 확인할 수 있으며 형태결정지수 g 의 값이 약 -170 부근에서 가장 평탄하며 넓은 대역특성을 나타냄을 알 수 있다. 두께 비의 변화에 따른 파워전달함수의 변화를 고찰하기 위하여 본 연구에서는 그림 7에서와 같이 -3 dB 비 대역폭 및 등가 최대파워 P_e 를 정의하였다. 즉, 어떤 형태결정지수 g 에 대하여 주파수에 따른 파워전달함수특성의 최대치를 P_m 이라 두

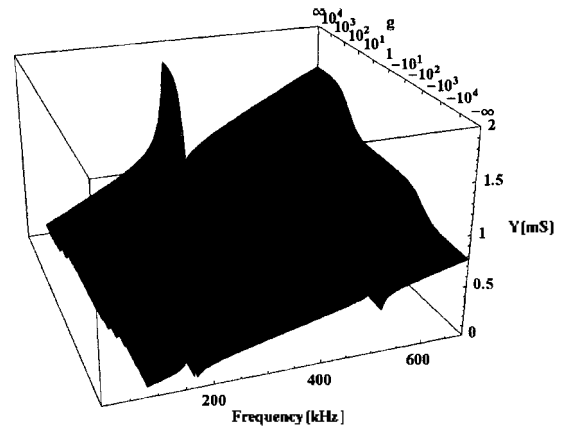


그림 4. 형태에 따른 어드미턴스 특성의 변화
Fig. 4. Admittance change with vibrator shape.

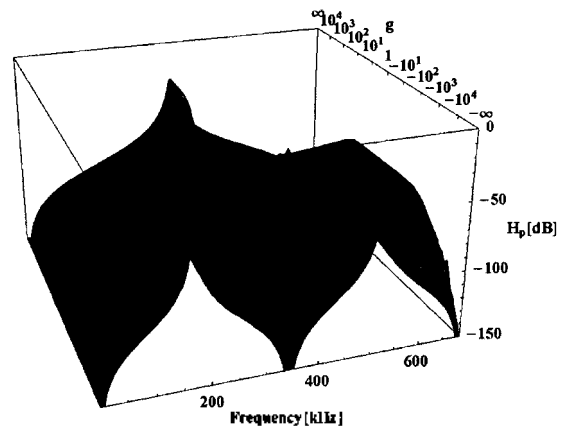


그림 5. 형태에 따른 파워 전달함수 특성의 변화
Fig. 5. Power transfer function change with vibrator shape.

고, 이 최대치로부터 -3 dB떨어지는 부분의 양 주파수를 각각 f_1 및 f_2 라 두고 중심주파수를 $f_c=(f_1+f_2)/2$ 라 두면 이 경우의 비 대역폭은 다음과 같이 정의된다.

$$BW = \frac{f_2 - f_1}{f_c} \times 100 \tag{9}$$

또한 f_c 를 공진주파수로 갖는 일정두께 $l=v_{33}^p f_c/2$ 의 압전진동자를 가정하고 이 진동자의 파워전달함수 최대치를 P_e 라고 두었을 때 P_m 과의 차이를 다음과 같이 정의하였다.

$$\Delta P = P_m - P_e \tag{10}$$

이상의 정의를 사용하여 그림 6의 결과에 대한 비 대역폭과 파워전달함수의 차이를 계산하여 그림 8에 나타내었다. 이 결과를 보면 두께 비에 따라 비 대역폭이 증가하는 경향을 보이다가 0.25이하가 되면 급격히 감소하는

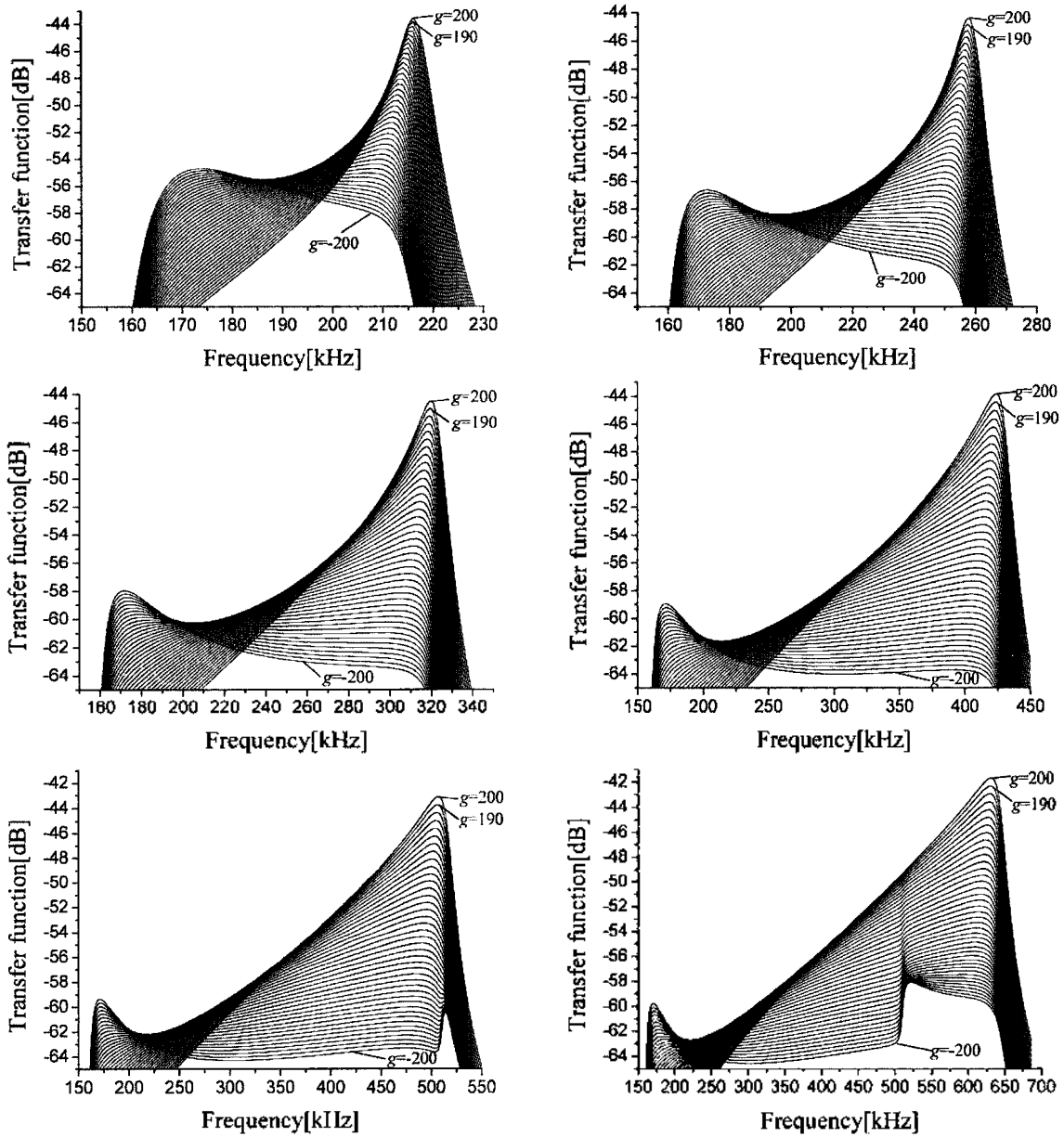


그림 6. 두께 비에 따른 파워 전달함수 특성의 변화
 Fig. 6. Power transfer function change with thickness ratio.
 (a) $l_{min}/l_{max} = 6/8$ (b) $l_{min}/l_{max} = 5/8$ (c) $l_{min}/l_{max} = 4/8$

(d) $l_{min}/l_{max} = 3/8$ (e) $l_{min}/l_{max} = 2.5/8$ (f) $l_{min}/l_{max} = 2/8$

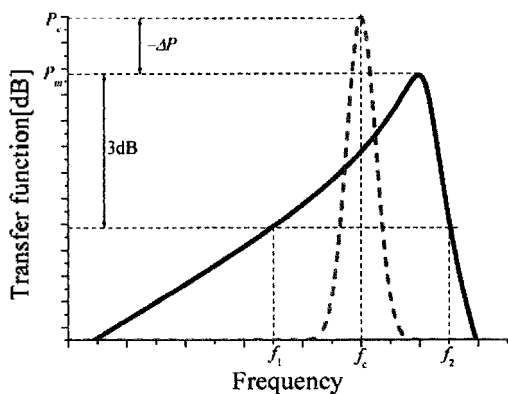


그림 7. 비 대역폭과 ΔP 의 정의를 위한 모식도
 Fig. 7. Figure for definition of bandwidth and ΔP .

것을 볼 수 있다. 또한 주어진 결과에서 최대 비 대역폭이 가장 큰 경우인 그림 8(e)를 보면 $g = -150$ 부근에서 약 105%이상의 넓은 비 대역폭을 나타내고 있지만 이 때의 ΔP 는 약 -23 dB를 나타내고 있어 파워의 전달효율이 매우 낮음을 알 수 있다. 사용목적에 따라 비 대역폭과 파워 전달효율을 결정할 수 있겠으나 예를 들어 두께비가 0.375인 경우의 결과인 그림 8(d)를 보면 ΔP 가 -20 dB 이상이며 대역폭이 85%이상인 형태결정지수를 선택할 경우 $g = -75$ 부근으로 결정할 수 있다.

압전진동자의 가로길이 T 에 대한 최대두께 l_{max} 와의 비에 따른 특성변화를 고찰하기 위하여 두께 비는 식(8(b))

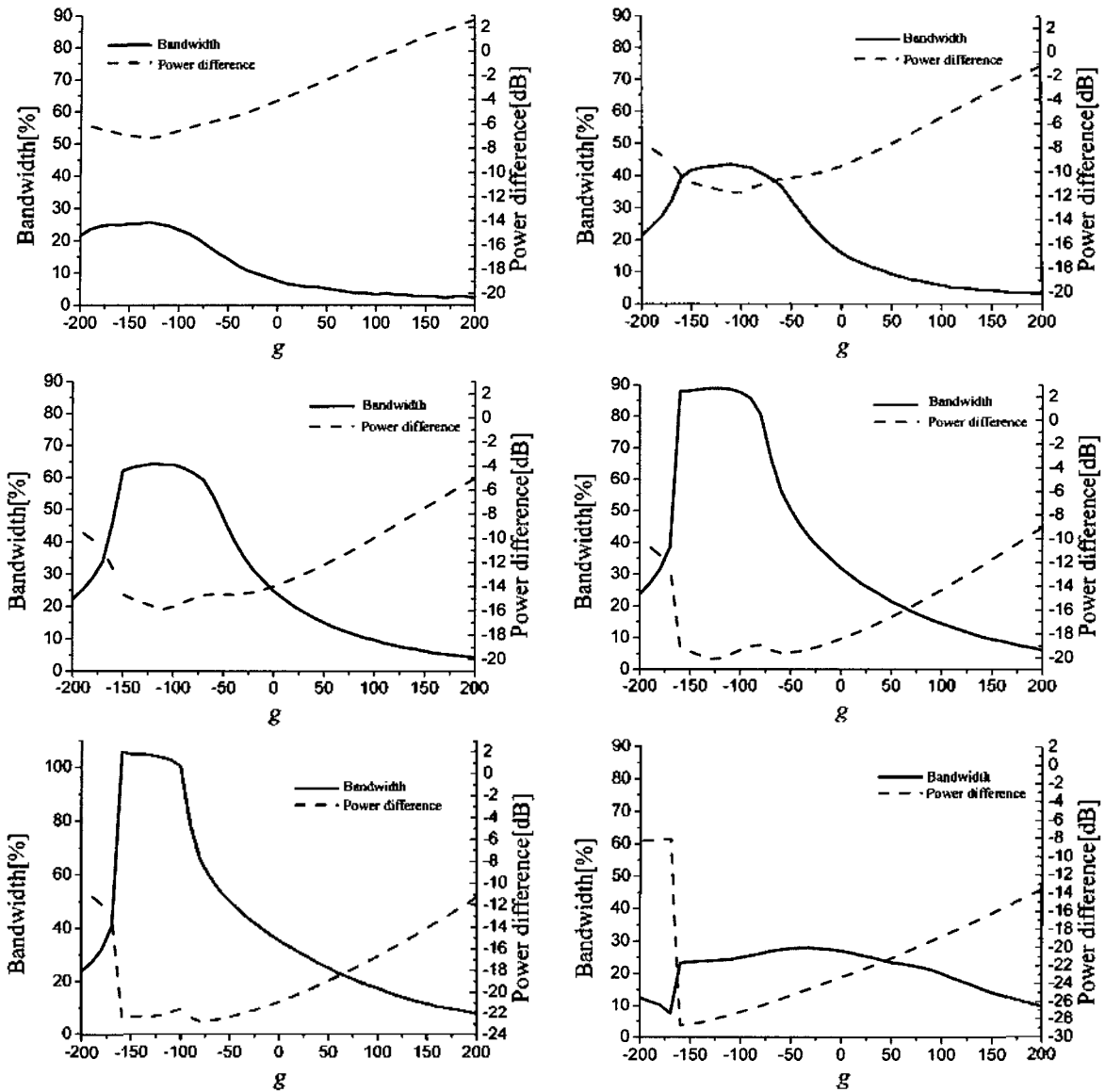


그림 8. 두께 비에 따른 비 대역폭의 변화와 ΔP 의 변화
 Fig. 8. Change of bandwidth and ΔP with thickness ratio.
 (a) $l_{min}/l_{max}=6/8$ (b) $l_{min}/l_{max}=5/8$ (c) $l_{min}/l_{max}=4/8$

(d) $l_{min}/l_{max}=3/8$ (e) $l_{min}/l_{max}=2.5/8$ (f) $l_{min}/l_{max}=2/8$

서와 같이 0.5로 고정하고 가로길이 T 를 식(8(a))과는 달리 $T=0.5 l_{max}, l_{max}, 2 l_{max}, 4 l_{max}$ 로 바꾸어가며 계산한 파워 전달함수 특성변화를 그림 9에 나타내었다. T 의 길이가 길어질수록 전달함수의 크기는 증가하나 형태결정지수의 변화에 따른 전달함수의 변화가 급격해져 광대역 특성을 갖는 g 의 범위가 매우 좁아짐을 알 수 있다. 이것은 엄밀한 설계와 정밀한 가공에 의한 트랜스듀서 제작에 의해 광대역 및 고효율의 초음파 트랜스듀서의 구현이 가능함을 말해주고 있다.

IV. 결론

두께가 불균일한 압전 진동자는 일정한 공진특성이 아닌 비교적 넓은 주파수 대역에서 공진 특성을 나타내게 된다. 이에 대한 이론적 검토를 위하여 압전진동자의 길이 방향에 따른 두께 변화를 지수함수의 조합으로 표현한 두께함수를 설정하고 이 함수의 변화경향을 결정하는 형태결정지수를 정의하였다. 이 두께함수를 이용하여 압전 진동자의 전기단자에서 본 자유 어드미턴스에 대한 식을 도출하였으며 주파수에 따른 파워전달특성을 나타내는 파워전달함수에 대한 식을 도출하였다.

대표적인 PZT 압전 세라믹을 예로 들어 압전 진동자의

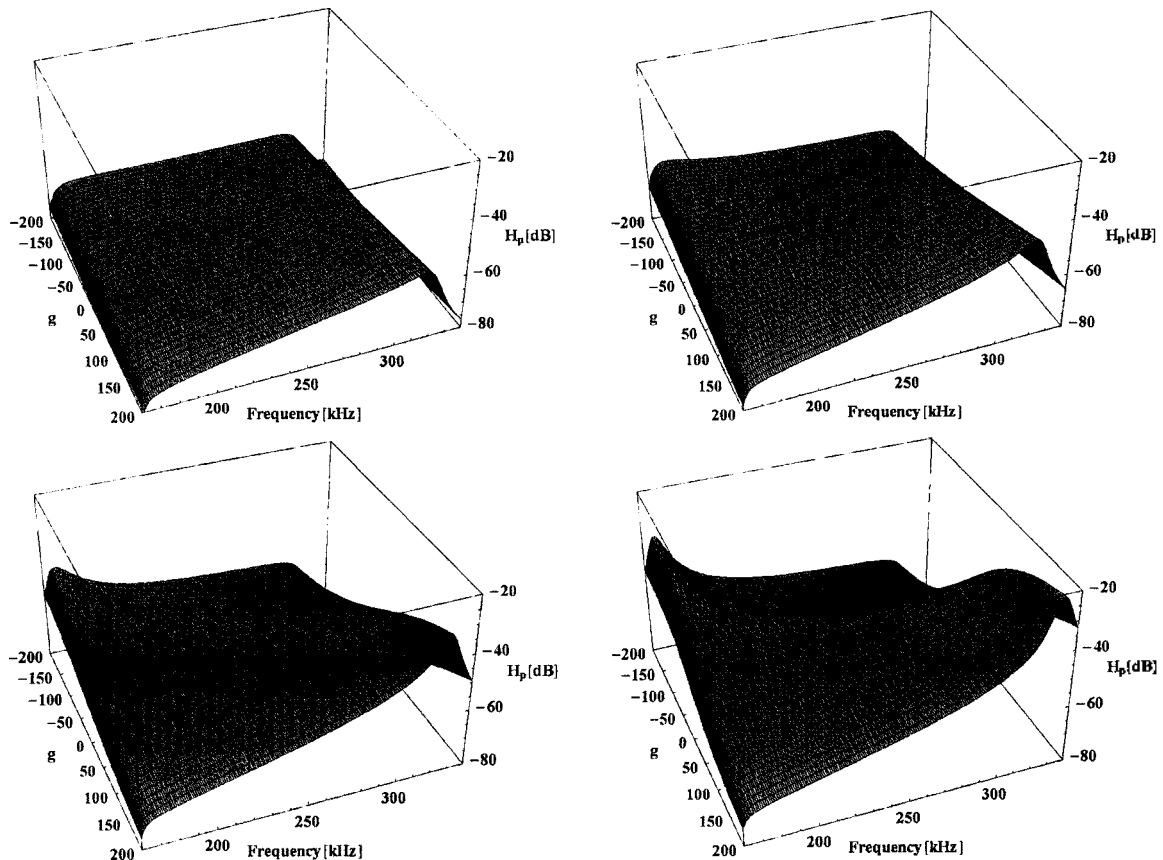


그림 9. 압전체의 길이변화에 따른 파워 전달함수 특성의 변화
 Fig. 9. Change of power transfer function with length.
 (a) $T=0.5 l_{max}$ (b) $T=l_{max}$ (c) $T=2 l_{max}$ (d) $T=4 l_{max}$

측면 형태변화에 따른 자유 어드미턴스의 특성변화를 계산한 결과 형태결정지수 g 에 따른 공진특성의 변화를 확인할 수 있었다. 파워전달함수의 계산결과로부터 형태결정지수 g 에 따른 -3 dB 비 대역폭을 확인한 결과 $g=-170$ 부근에서 가장 넓은 대역폭을 나타내었으며 압전진동자의 최대두께에 대한 최소두께 비 l_{min}/l_{max} 가 작아짐에 따라 대역폭은 최대 100%이상으로 넓어질 수 있으나 파워 전달함수는 반대로 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 압전진동자의 길이에 따른 특성변화를 고찰하기 위하여 최대두께 및 최소두께를 고정하고 길이만을 변화시켜가며 파워전달함수를 계산한 결과, 길이가 길어질수록 전달함수의 크기는 증가하나 형태결정지수의 변화에 따른 전달함수의 변화가 급격해져 광대역 특성을 갖는 g 의 범위가 매우 좁아짐을 확인할 수 있었다. 이것은 엄밀한 설계와 정밀한 가공에 의한 트랜스듀서 제작에 의해 광대역 및 고효율의 초음파 트랜스듀서의 구현이 가능함을 의미하고 있어 본 연구에서 고찰한 해석법 및 계산결과는 광대역 트랜스듀서의 최적화 설계에 크게 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-531-D00005)

참고 문헌

1. V. Ristic, *Principles of Acoustic Devices*, (John Wiley & Sons, New York, 1983).
2. G. Kino, *Acoustic waves: Devices, Imaging, and Analog Signal Processing*, (Prentice-Hall, New Jersey, 1987).
3. J. Rosenbaum, *Bulk Acoustic Wave Theory and Devices*, Artech House, Boston, 1988.
4. 吉元 進, 塩川 淳一, 橋本 研也, 山口 正恢, "浮き構造を有する多層薄膜構造超音波トランス 듀ーサ", 電子情報通信学会技術研究報告, US超音波, 93(95), 35-40, 1993.
5. 中村 貞良, 清水 洋, "ZnO/SiO₂/Si 다이아프램構造의 UHF 帯圧電共振子", 第11回EMシンポジウム, 55-63, 1982.
6. 山口 顯, 坂村 純一, 中村 貞良, "圧電定數に傾斜を持つ圧電板を用いた超音波トランス 듀ーサの等価回路解析", 電子情報通信学会超音波研究会資料, US 99-25, 23-28, 1999.
7. K. Nakamura, H. Koyama, S. Odakura, K. Yamada and S.

- Saito, "LiNbO₃ Ultrasonic Transducers with an Inverted-Domain Layer for Radiation to Solid Media", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, 6B, 4482-4484, 2005.
8. Y. Tomikawa, A. Yamada, and M. Onoe, "Wide Band Ultrasonic Transducer Using Tapered Piezoelectric Ceramic for Non-Destructive Inspection," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23**, suppl. 23-1, 113-115, 1984.
9. P. G. Barthe and P. J. Benkeser, "A Staircase Model of Tapered-thickness Piezo-electric Ceramics," *J. Acoust. Soc. Am.*, **89**, 1434-1442, 1991.
10. B. N. Alekseev, D. B. Dianov, and S.P. Karuzo, "Tapered-Bar Transducer," in *Proceedings of the Eighth All-Union Acoustics Conference* [in Russian], Moscow, 1973.
11. A. M. Hanaly, "Broadband Phased Array Transducer Design with Frequency-Controlled Two-Dimensional Capability," *SPIE* 3341, 64-82, 1998.
12. C. S. Desilets, J. D. Fraser and G. S. Kino, "The Design of Efficient Broad-band Piezoelectric Transducers," *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, **SU-25**, 115-125, 1978.
13. C. H. Chou, J.E. Bowers, A. R. Selfridge, B. T. Khuri-Yakub and G. S. Kino, "The Design of Broadband and Efficient Acoustic Wave Transducers," *IEEE Trans. Ultrason. Symp. Proc.*, **2**, 984-988, 1980.
14. D. Kim, J. Han, J. Yang, M. Kim, K. Ha, "Characteristic Evaluation for a PZT Transducer with Cylindrical Rear Surface," *Journal of the Acoustical Society of Korea*, **26(1E)**, 14-20, 2007.
15. P.J. Benkeser, "A Pulse-Echo Ultrasound Tapered Phased Array Transducer," *Proc. 13th NE Bioengineering Conf.*, 286-288, 1987.
16. T. Ikeda, *Fundamentals of piezoelectricity*, (Oxford University Press, New York & Tokyo, 1990).

저자 약력

• 김 동 현 (Donghyun Kim)

한국음향학회지 제26권 1E호 참조

• 김 정 순 (Jungsoon Kim)

한국음향학회지 제25권 3E호 참조

• 김 무 준 (Moojoon Kim)

한국음향학회지 제25권 3E호 참조

• 하 강 렬 (Kanglyeol Ha)

한국음향학회지 제25권 3E호 참조