

PZT와 PVDF의 복합다층구조에 의한 광대역 수중 초음파 트랜스듀서의 특성

Characteristics of the Wide-band Underwater Acoustic Transducer Made by Multi-Layered Structure of PZT and PVDF

김 동 현*, 김 무 준**, 하 강 열**

(Dong Hyun Kim*, Moo Joon Kim**, Kang Lyeol Ha**)

※이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

요 약

전기-기계변환효율이 좋은 PZT를 송신용으로, 대역특성이 우수한 PVDF를 수신용으로한 PZT/PVDF 복합구조 수중 초음파 트랜스듀서를 제안하고, 외부는 PZT, 내부는 PVDF로 된 동심원형의 트랜스듀서를 설계·제작하여, 그 특성을 이론적, 실험적으로 파악하였다. 삽입손실과 임펄스 응답파형에 대한 등가회로해석 및 측정결과로부터 제안한 트랜스듀서의 특성, 특히, 대역폭이 종래의 PZT 단일소자에 의한 트랜스듀서보다 향상될 수 있음을 알았다.

ABSTRACT

The multi-layered ultrasonic transducer made of the PZT and the PVDF was newly proposed and designed to improve the electro-acoustic performance. The PZT was employed as a transmitter for its high electro-mechanical coupling efficiency and the PVDF as a receiver for its wide-band characteristics, respectively. The theoretical results obtained by the equivalent circuit analysis as well as the experimental ones showed that the proposed transducer outperformed a conventional one with respect to the frequency bandwidth when it was operated in water.

I. 서 론

일반적으로 비파괴 검사용이나 의료용 초음파 진단장치에 널리 이용되는 압전세라믹 PZT는 전기-기계 결합계수 및 압전 d정수가 크므로 송신용으로 적합한 물질로 잘 알려져 있다. 이에 비하여 압전 고분자막인 PVDF는 내부손실이 크며, 전기-기계 결합계수 및 유전상수가 작으므로 송신용 트랜스듀서 재료로 사용하기에는 부적절한 점이 있지만, 압전 g정수가 클 뿐만 아니라 고유음향 임피던스가 물과 비슷하므로 수중에서 사용할 때는 별도의 임피던스 정합층이 불필요하며, 광대역의 주파수 특성을 가지므로 짧은 펄스파를 만들 수 있는 장점이 있다.^{[1]-[6]}

본 연구에서는 상술한 PZT와 PVDF의 장점을 각각 이

용한 광대역 수중 초음파 트랜스듀서를 개발하는 것을 목적으로 PZT송신, PVDF수신의 복합구조에 의한 초음파 트랜스듀서를 새로이 제안하고, 외부는 PZT, 내부는 다층의 PVDF로 된 동심원형 형태의 초음파 트랜스듀서를 설계·제작하여, 그 수중 사용시의 동작특성을 이론적, 실험적으로 평가하였다.

II. 복합다층구조 트랜스듀서의 구조 및 등가회로 해석

2.1 동심원형 트랜스듀서의 구조

본 연구에서는 수중에서의 음향계측은 물론, 비파괴검사나 의료진단용으로서의 이용을 고려하여 중심주파수는 5MHz로 하였다. 여기서 제안하는 초음파 트랜스듀서는 그림 1에서 나타낸 바와 같이 두 층으로된 음향정합층과 충분히 긴 배면 흡음층을 갖는 원통형 PZT 트랜스듀서의 중앙부에 소형의 수신용 PVDF 트랜스듀서를 장착

*부경대학교 대학원 음향진동공학과

**부경대학교 물리학과

접수일자: 1998년 1월 22일

한 형태이다. 여기서 PVDF는 세 겹으로 겹쳐져 있다. 일반적으로 초음파 트랜스듀서용의 PVDF는 두께가 수십 μm 이하이며, 수십 MHz 이상에서 공진이 일어난다. 따라서, 세 겹으로 사용함으로써 공진주파수가 약 5MHz가 되도록 하고, 수신감도가 향상되도록 하였다. 그림 2(a), (b)는 그림 1을 송신부와 수신부를 각각 분리하여 나타낸 것이다.

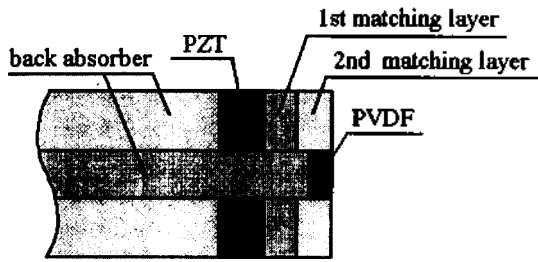
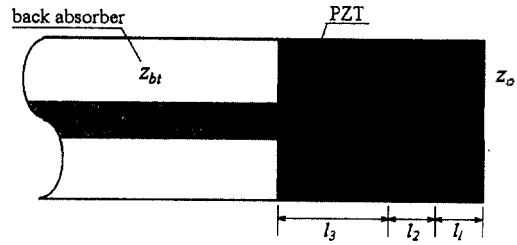
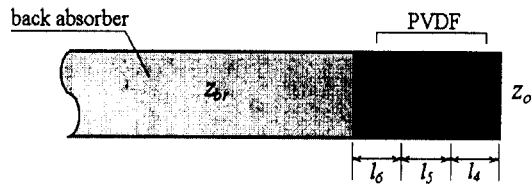


그림 1. 동심원형 트랜스듀서의 구조
Fig. 1. Schematic of the structure of the concentric circle type transducer



(a) Transmitting part



(b) Receiving part

그림 2. 동심원형 트랜스듀서 송, 수신 각 경우에 대한 구조
Fig. 2. Partial structures of the concentric circle type transducer

2.2 전송선로형 등가회로 해석

그림 2(a), (b)를 菊池 등¹⁷⁾이 제안한 전송선로형 등가회로로 표시하면, 각각 그림 3(a), (b)와 같이 나타내어진다.

그림 3의 등가회로에 있어서 $[M]$ 은 각 층의 전송파라미터 행렬로서 식(1)과 같이 주어진다.

$$[M_n] = \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_n l_n & jZ_n \sin \beta_n l_n \\ j \frac{1}{Z_n} \sin \beta_n l_n & \cos \beta_n l_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

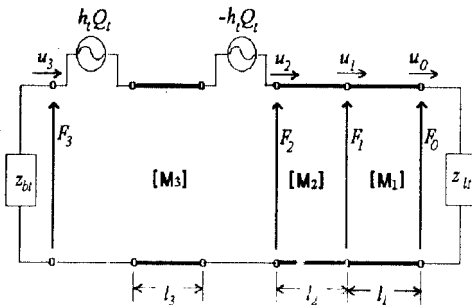
($n = 1 \sim 6$)

단, 그림 3과 식(1)에서,

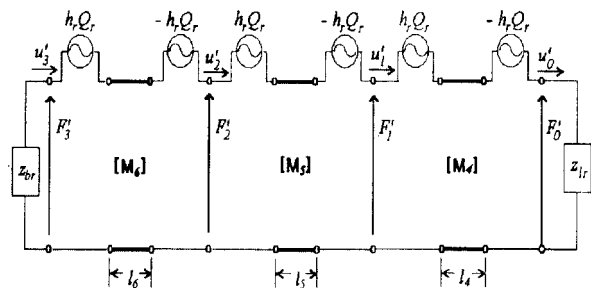
- F_n : n 층에서의 힘,
- l_n : n 층의 두께,
- h_t : PZT의 압전용력계수,
- z_n : 음향부하(물)의 특성임피던스,
- Z_n : n 층의 특성임피던스,
- u_n : n 층에서의 입자속도
- Q : 송신 또는 수신시 각 층에서의 전하량
- h_r : PVDF의 압전용력계수
- z_b : n 층의 전과정수,

이다. 전과정수 β 는 각층 내에서의 감쇠를 고려하면 $\beta = \frac{\omega}{c} (1 + j\delta)$ 와 같이 주어지는데, δ 는 감쇠계수, ω 는 각주파수, c 는 음속을 각각 나타낸다.

그림 3(a)에 나타낸 송신시의 등가회로로부터 식(2)가 얻어진다.



(a) Transmitting part



(b) Receiving part

그림 3. 동심원형 트랜스듀서의 전송선로형 등가회로
Fig. 3. Transmission line model equivalent circuits for the concentric circle type transducer

$$\begin{bmatrix} F_0 \\ u_0 \end{bmatrix} = [M_7]^{-1} \begin{bmatrix} -h_r Q_l \\ 0 \end{bmatrix} + [M_8]^{-1} \begin{bmatrix} h_r Q_r \\ 0 \end{bmatrix} + [M_9]^{-1} \begin{bmatrix} F_3 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

단, $[M_7] = [M_2] [M_1]$, $[M_8] = [M_5] [M_7]$.

식(2)로부터 전기-음향 변환과 관련하여 아래와 같이 정의되는 기본 계정수를 유도하면 식(3)~(7)과 같다.^{18, 19)}

[1] 기계 임피던스 (z_H): 전기단 개방시 트랜스듀서의 표면에 작용하는 힘과 입자속도의 비

$$z_H = \frac{F_0}{u_0} \Big|_{I=0} = \frac{D_8 z_{dr} - B_8}{-C_8 z_{dr} + A_8} \quad (3)$$

단, I 는 전원에서 공급되는 전류.

[2] 역계수 (A_I): 음향단 개방시 단위전류당 발생하는 구동력

$$A_I = -\frac{z_H}{I} u_0 \Big|_{F_s=0} = \frac{h_r}{j\omega} \{ z_H (C_8 - C_7) + D_8 - D_7 \} \quad (4)$$

[3] 계동 임피던스 (Z_{dt}): 음향단 계동시 전기단에서의 전압과 전류의 비

$$Z_{dt} = \frac{V}{I} \Big|_{u_s=0} = \frac{1}{j\omega C_t} + \left(\frac{h_r}{\omega} \right)^2 \{ z_H (C_8 - C_7)^2 + (D_8 - D_7)(C_8 - C_7) + C_3 \} \quad (5)$$

단, V 는 전원의 전압이고, $C_t = \epsilon_t^S \frac{S_t}{l_3}$ 는 PZT의 계동용량이며, S_t 는 PZT의 단면적, ϵ_t^S 는 PZT의 유전율.

[4] 음향부하 임피던스(z_H): 트랜스듀서의 면에서 음향 부하를 본 음향 임피던스

$$z_H = z_0 S_t \quad (6)$$

단, z_0 는 물의 고유음향 임피던스.

[5] 자유 임피던스(Z_{ft}): 트랜스듀서가 동작할 때 전기단에서 트랜스듀서를 본 전체 임피던스

$$Z_{ft} = Z_{dt} - \frac{A_I^2}{z_H + z_H} \quad (7)$$

송신시의 동일한 방법으로 그림 3(b)에 나타난 수신시의 등가회로부터 식(8)이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} F_0 \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -h_r Q_r \\ 0 \end{bmatrix} + [M_4]^{-1} \begin{bmatrix} h_r Q_r \\ 0 \end{bmatrix} + [M_4]^{-1} \begin{bmatrix} -h_r Q_r \\ 0 \end{bmatrix} + [M_9]^{-1} \begin{bmatrix} h_r Q_r \\ 0 \end{bmatrix} + [M_9]^{-1} \begin{bmatrix} -h_r Q_r \\ 0 \end{bmatrix} + [M_{10}]^{-1} \begin{bmatrix} h_r Q_r \\ 0 \end{bmatrix} + [M_{10}]^{-1} \begin{bmatrix} F_3 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

단, $[M_9] = [M_5] [M_4]$, $[M_{10}] = [M_6] [M_9]$

식(8)로부터 송신시의 길이 정의되는 전기-음향변환 관련 기본 계정수는 식(9)~(13)과 같이 구해진다.

[1] 기계 임피던스 (z_{tr}):

$$z_{tr} = \frac{D_{10} z_{dr} - B_{10}}{-C_{10} z_{dr} + A_{10}} \quad (9)$$

[2] 역계수 (A_r):

$$A_r = \frac{h_r}{j\omega} (z_{tr} C_{10} + D_{10} - 1) \quad (10)$$

[3] 계동 임피던스(Z_{dr}):

$$Z_{dr} = \frac{1}{3j\omega C_r} + \frac{1}{9} \left(\frac{h_r}{\omega} \right)^2 \{ z_{tr} C_{10}^2 + C_{10}(D_{10} - 1) + C_{10} \} \quad (11)$$

단, $C_r = \epsilon_r^S \frac{S_r}{l_5}$ 은 PVDF 한 상의 계동용량이며, S_r 은 PVDF의 단면적, ϵ_r^S 은 PVDF의 유전율.

[4] 음향부하 임피던스(z_{tr}):

$$z_{tr} = z_0 S_r \quad (12)$$

[5] 자유 임피던스 (Z_{fr}):

$$Z_{fr} = Z_{dr} - \frac{A_r^2}{z_{tr} + z_{tr}} \quad (13)$$

2.3 삽입손실 및 응답파형

송, 수신 각각의 경우에 전기-음향 변환에 따른 변환손실(Conversion Loss: CL)은 식(14)와 같이 구해진다.^{16, 10)}

$$CL[dB] = 10 \log \frac{V_o^2}{4 \operatorname{Re}\{Z_o\} \cdot \operatorname{Re}\{z_L\} \cdot |u_o|^2} \quad (14)$$

이거시, 입자속도 u_o 는

$$u_o = \frac{A \cdot V_o}{(z_r + z_{tr})(Z_o + Z_{fr})} \quad (15)$$

로 주어지며, *는 송신 또는 수신시 각 경우에 대하여 식(3)~식(13)으로 주어지는 값을 나타낸다.

트랜스듀서로부터 송신된 음파가 수신될 때까지의 과정에서 일어나는 모든 에너지 손실을 나타내는 삽입손실(Insertion Loss: IL)은 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$IL[dB] = CL_1 + CL_2 + ATT \quad (16)$$

여기서, CL_1 및 CL_2 는 송, 수신 각 경우의 변환손실을 나타내며, ATT 내에는 물 속에서 전파에 따른 감쇠 및 흡수 손실, 회절손실, 표적에서의 반사손실 등이 포함된다.

한편, 주파수영역의 값인 IL의 역수를 취하면 트랜스

듀서의 효율이 얻어지며, 그 효율을 부리에 역변환하면 트랜스듀서가 전기적 임펄스에 의해 구동되었을 때 수신되는 음파의 파형을 구할 수 있다.

III. 트랜스듀서의 제작

복합구조 트랜스듀서는 중심주파수를 5MHz로 하기 위하여 송신용 PZT의 두께를 460 μm 로 하였으며, 수신용 PVDF는 吳羽化學工業(株)에서 생산하는 KF 압전필름으로서 두께 40 μm 인 것을 그림 4와 같이 3회 접은 후 압착하여 청동에 접착시키고, 송신용 PZT트랜스듀서의 중앙부분에 삽입하여 제작하였다. 접착제로는 3M사의 다용도 접착제와 Chemtronics사의 CW2400 circuit works 전도성 에폭시를 혼용하였다.

그림 5에 제작한 트랜스듀서의 구조 및 규격을 나타내었으며, 그림 6은 그 실물사진이다.

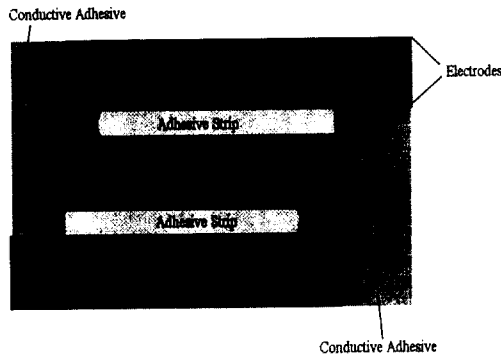
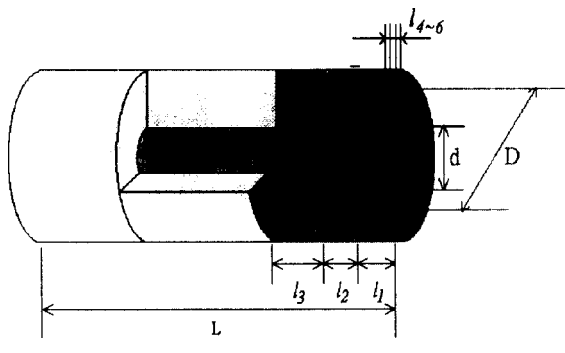


그림 4. 다층구조 PVDF의 제작
Fig. 4. Schematic of the structure of the multi-layered PVDF film



Thickness[mm]	Impedance[Mrayl]	Size[cm]
$l_1 = 127$	$z_0 = 1.5$ $z_4 = 4.58$	$D = 2$
$l_2 = 112$	$z_1 = 1.16$ $z_5 = 4.58$	$d = 1$
$l_3 = 460$	$z_2 = 4.20$ $z_6 = 4.58$	$L = 3.5$
$l_{4-6} = 40$	$z_3 = 33.5$ $z_{br} = 40.6$	
	$z_M = 17.1$	

그림 5. 동심원형 트랜스듀서의 구조 및 규격
Fig. 5. Structure and size of the fabricated concentric circle type transducer

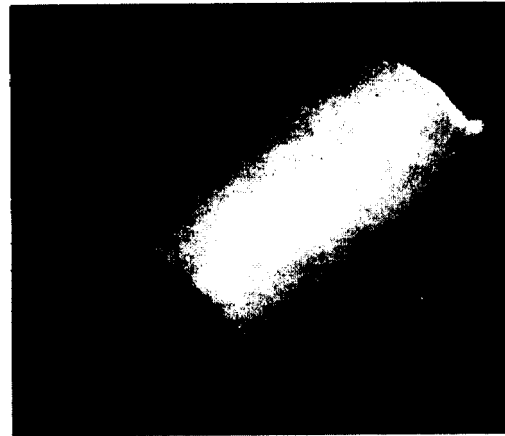
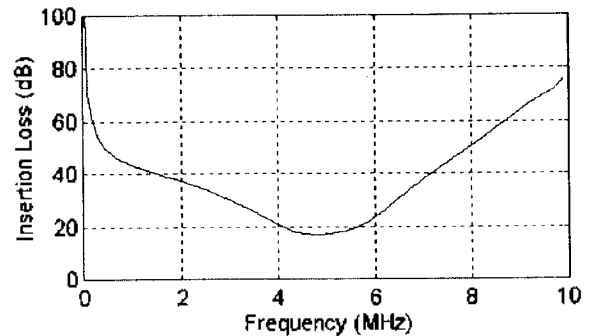


그림 6. 동심원형 트랜스듀서의 실물 사진
Fig. 6. Photograph of the fabricated concentric circle type transducer

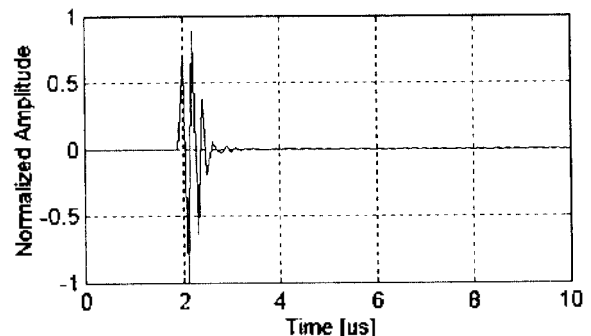
IV. 결과 및 고찰

4.1 수치해석 결과

표 1에 나타낸 PZT와 PVDF의 물성치 및 그림 5에 표시한 규격을 이용하여 삽입손실 및 임펄스 응답파형을 이론적으로 계산한 결과는 각각 그림 7(a), (b)와 같다.



(a) Insertion loss

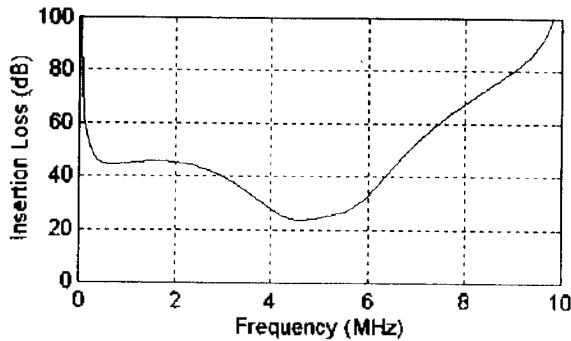


(b) Waveform of impulse response

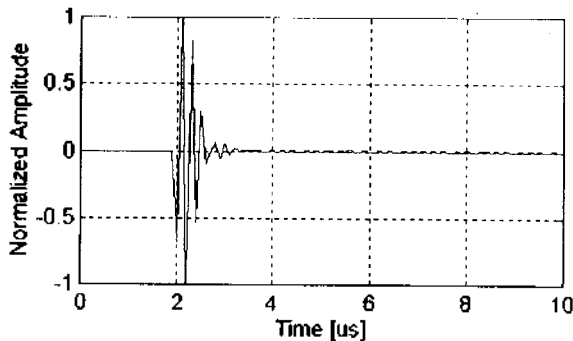
그림 7. 복합구조 동심원형 트랜스듀서의 특성(수치해석)
Fig. 7. Characteristics of the PZT/PVDF concentric circle type transducer (calculated)

표 1. 사용한 압전 PZT 및 PVDF의 물질상수
Table 1. Physical constants of the used PZT and the PVDF

	고유음향임피던스 (Mrayl)	유전상수	압전 h상수 ($\times 10^9 V/m$)	압전 e상수 (C/m^2)
PZT	33.5	1470	1.79	23.3
PVDF	4.58	6.2	2.48	0.14



(a) Insertion loss



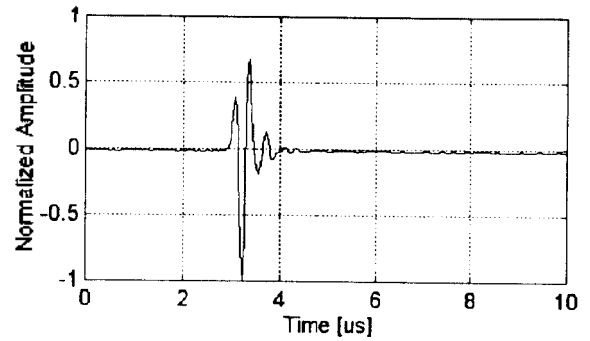
(b) Waveform of impulse response

그림 8. PZT로서 송수신한 경우의 특성 (수치해석)
Fig. 8. Characteristics of the PZT/PZT concentric circle type transducer (calculated)

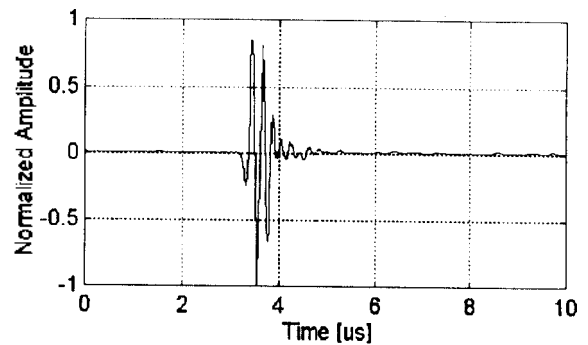
그림 7에서 최소 삽입손실은 중심주파수 4.8MHz에서 약 17dB, 비대역은 약 46%이며, 최대진폭으로부터 20dB 감소하는 시점까지의 시간으로 정의된 펄스지속시간은 0.46 μ s이다. 그림 8은 PZT로 수신하였을 경우에 대한 계산결과를 나타낸다. 이 경우 중심주파수 4.6MHz에서 삽입손실은 약 24dB, 비대역은 약 41%이다. 따라서, PZT/PVDF 복합구조에 의해 삽입손실은 약 7dB 감소하고, 대역폭이 약 5%증가될 뿐만 아니라, 중심주파수 부근 이외의 영역에서도 비교적 완만한 감소를 나타내어 효율 및 주파수 대역이 모두 향상되는 것으로 나타난다.

4.2 실험결과

제작한 트랜스듀서의 특성은 90cm \times 60cm \times 40cm 크기의 스테인레스 판을 반사체로 하여 펄스에코법으로 측



(a) PZT/PVDF



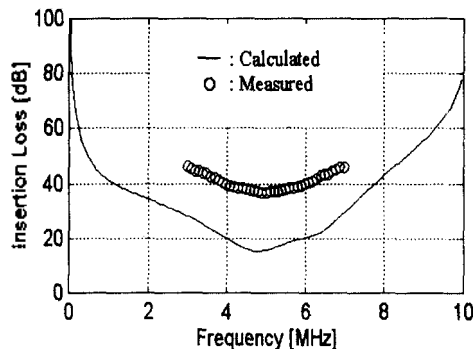
(b) PZT/PZT

그림 9. 임펄스 응답파형(측정)
Fig. 9. Waveforms of the impulse response (measured)

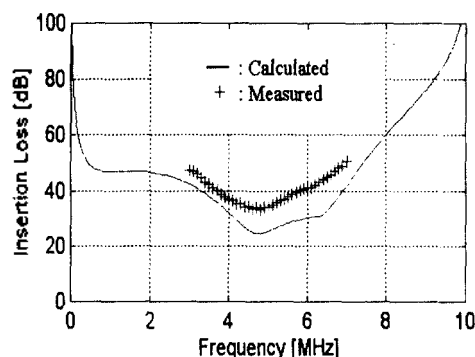
정하였다.

그림 9에 제작한 트랜스듀서의 임펄스 응답파형 측정 결과를 송수신한 PZT로 직접 수신한 파형과 비교하여 나타내었다. 그림 9를 그림 7 및 그림 8의 수치해석 결과와 비교하면 PZT의 경우 파형이 거의 일치하나, PVDF는 다소 변형되어 나타나는데, 이것은 집속층의 영향인 것으로 사료된다. 펄스 지속시간은 PVDF로 수신하는 경우 0.56 μ s, PZT로 수신하는 경우 0.84 μ s인 것으로 각각 측정되어, PVDF 트랜스듀서로 수신하는 경우가 PZT 트랜스듀서로 수신하는 경우에 비하여 지속시간을 1주기 이상 단축시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 10(a)는 복합구조 트랜스듀서의 삽입손실 측정결과를 이론해석 결과와 비교하여 나타낸 것인데, 최소 삽입손실은 5MHz에서 약 37dB, 비대역은 58%인 것으로 나타났다. 이에 비하여, 그림 10(b)에 나타난 PZT만으로 송·수신한 경우 최소 삽입손실은 5MHz에서 약 33dB, 비대역은 41%인 것으로 측정되어, 수치해석 결과와 다르게 복합구조의 경우가 삽입손실이 큰 것으로 나타났다. 그러나 비대역은 수치해석 결과보다도 증대되어 PZT수신의 경우보다 약 17%정도 크게 나타났다. 여기서 삽입손실의 절대값이 수치해석결과와 크게 다른 것 등의 차이는 트랜스듀서의 제작상의 문제, 특히 접착층에서의 손



(a) PZT/PVDF



(b) PZT/PZT

그림 10. 삽입손실의 비교

Fig. 10. Comparison of the insertion losses

실의 영향에 기인하는 것으로 사료되어 향후 개선이 필요하다.

V. 결 론

본 연구에서는 현재까지 주로 이용되고 있는 PZT만을 이용하여 송·수신하는 트랜스듀서의 성능, 특히 대역폭을 향상시키기 위하여 전기·기계 결합계수가 큰 PZT를 송신용으로, 광대역의 주파수 특성을 갖는 PVDF를 수신용으로 한 PZT/PVDF 복합다층구조 초음파 트랜스듀서를 제안하고, 그 수중 동작특성을 이론적, 실험적으로 파악하였다. 복합다층구조를 갖는 동심원형 형태의 트랜스듀서를 설계·제작한 후, 주파수 특성 및 임펄스 응답특성을 전송선로형 등가회로를 이용하여 해석하고, 필스에코법에 의해 측정된 결과, PZT/PVDF 복합다층구조는 종래의 PZT만에 의해 송수신하는 트랜스듀서의 대역폭을 상당히 향상시킬 수 있음을 알았다.

참 고 문 헌

1. C.S. Desilets, J.D. Fraser, and G.S. Kino, "The Design of Efficient Broad-Band Piezoelectric Transducers," *IEEE*

Trans. Sonics Ultrason., Vol. SU-25, No. 3, pp. 115-125, 1978.
 2. T.D. Sullivan and M. Powers, "Piezoelectric Polymer Flexural Disk Hydrophone," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 63, No. 5, pp. 1396-1401, 1978.
 3. H.W. Persson, C. H. Hertz, "Acoustic Impedance Matching of Medical Ultrasound Transducers," *Ultrasonics*, Mar, pp. 83-89, 1985.
 4. T. Inoue, M. Ohta, and S. Takahashi, "Design of Ultrasonic Transducers with Multiple Acoustic Matching Layers for Medical Application," *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, Vol. UFFC-34, No. 1, pp. 8-15, 1987.
 5. P.A. Lewin and M. E. Schafer, "Wide-Band Piezoelectric Polymer Acoustic Sources," *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, Vol. 35, No. 2, pp. 175-184, 1988.
 6. V. M. Ristic, *Principles of Acoustics Devices*, John Wiley & Sons, 1983.
 7. 菊池, 中鉢, 山水, "超高周波用多層膜超音波トランスジューサの解析," *日本電子通信學會論文集*, Vol. 55-a, No. 7, pp. 331-338, 1972.
 8. 하강일, "P(VDF-TrFE) 초음파현미경용 트랜스듀서의 특성에 관한 연구," *한국어업기술학회* 30(3), pp. 227-236, 1994.
 9. 김부준, 하강일, 김성부, 이종규, "다층 PZT 초음파 트랜스듀서에 대한 새로운 전송선로형 등가회로의 제안," *한국음향학회* 14(4), pp. 29-37, 1995.
 10. B.A. Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, Vol. 1, John Wiley & Sons, 1973.

▲김 동 현(Dong-hyun Kim)

1970년 1월 24일생



1996년 2월:부경대학교(구 부산수산대학교) 물리학과 졸업(이학사)
 1998년 2월:부경대학교 대학원 음향진동공학과 졸업(이학석사)
 1998년 3월~현재:(주) 대원전자 개발실 근무중.

※주관심분야: 초음파 트랜스듀서의 설계 및 음장해석과 의료용 초음파 진단장치 개발

▲김 무 준(Moo-joon Kim)

1961년 8월 3일생



1985년 2월:부경대학교(구 부산수산대학) 응용물리학과 졸업(이학사)
 1990년 2월:부경대학교 대학원 응용물리학과 졸업(이학석사)
 1994년 3월:일본동북대학 대학원 공학연구과 졸업(공학박사)
 1995년 3월~현재:부경대학교 물리학과 전임강사, 조교수.

※주관심분야: 초음파 트랜스듀서의 설계 및 특성해석

▲하 강 열(Kang-lycol Ha)

1955년 1월 17일생



1978년 2월:부경대학교(구 부산수산
대학) 어업학과 졸업(수
산학사)

1982년 8월:부경대학교 대학원 수산
물리학과 졸업(수신학석
사)

1990년 3월:일본동북대학 대학원 공
학연구과 졸업(공학박사)

1991년 3월~현재:부경대학교 물리학과 전임강사, 조교
수, 부교수.

※주관심분야:초음파 음장해석 및 트랜스듀서의 특성해석