

PZT-고분자 3-3형 복합압전체 소자로 제작된 초음파 트랜스듀서의 펄스에코 응답특성



Pulse-echo Response of Ultrasonic Transducer Fabricated with PZT-Polymer 3-3 Type Composite

박 정학*, 최 현일*, 손 무현**, 사공 건*
(Jung-Hak Park, Hun-Il Choi, Mu-Heon Shon, Geon Sa-Gong)

Abstract

The pulse-echo response of the piezoceramics PZT polymer 3-3 type composite transducers with various PVA additions were investigated. The PZT powder was prepared by the molten salt synthesis method. The porous PZT specimens will be used as a filler to make 3-3 type composite were prepared from a mixture of PZT and polyvinylalcohol(PVA) sphere by utilizing BURPS(Burnout Plastic Sphere) technique.

It was shown that the transmitting and receiving sensitivity of 3-3 type piezoelectric composite transducers could be improved than that of solid PZT transducers. The reason is that 3-3 type piezoelectric composite have low dielectric constant, density and acoustic impedance. The distance between transducer and reflector was in good agreement with the distance calculated from the longitudinal velocity of the specimens and receiving time observed pulse-echo responses on the ultrasonic transducer analyzer.

Key Words(중요 용어): Pulse-Echo Response(펄스-에코 응답특성), PZT-Polymer 3-3 Type Composite(PZT-고분자 3-3형 복합압전체), Molten Salt Synthesis(용융염합성법), Piezoelectric Composite Transducer(복합압전체 변환기)

1. 서 론

초음파 센서는 압전 진동자의 압전특성을 이용하여 기체, 액체 및 고체 매질에 음파를 방사하여 측정 대상물로부터 반사되어 오는 음파를 검출해 내는 소자로서 수위계 및 거리측정용 센서 등에 이용되고 있다.

지금까지 초음파 트랜스듀서 재료로 압전 세라믹 PZT(Lead Zirconate Titanate)가 널리 사용되고 있다. 그러나, 매질이 공기 및 물인 경우 PZT 소자만으로 제작된 압전 트랜스듀서는 소자의 밀도 및 비유전율이 높아 음향임피던스 정합이 어렵고, 감쇠계수가 적어서 좁은 주파수 대역에서 응용되고 있을 뿐아니라 울림시간이 길어서 감도를 가늠하는 성능지수가 낮다.^{1,2)} 이러한 PZT

소결체의 단점을 개선하기 위하여 낮은 밀도 및 비유전율을 가진 소재의 개발이 요구되고 있다.

이에 부응하기 위하여 본 연구에서는 압전성이 큰 세라믹과 밀도 및 유전율이 낮은 고분자 매질을 복합화하여 상접속도(phase connectivity)³⁾ 개념을 이용한 3-3형 복합압전체(piezoceramics-polymer composite) 시편을 제작하고자 비교적 낮은 온도에서 액상을 형성하는 NaCl-KCl 용융염합성법에 의해 압전세라믹 PZT분말을 제조하였다.⁴⁾ 이들 분말을 사용하여 3-3형 복합압전체 제조용 충전상으로 사용될 다공질 세라믹을 제조하기 위하여 기공형성을 위한 플라스틱 구체로는 PVA를 사용하여, BURPS(burnout plastic sphere)법에 의해 제조하였다.⁴⁾ 이들 다공질 세라믹에 에폭시 수지를 사용하여 PZT-고분자 3-3형 복합압전체 시편을 제작하고, 이를 탐촉자로 사용하여 초음파 트랜스듀서를 제작한 후, Tone-burst pulse-echo법⁵⁾에 의한 송수신 특성을 측정함으로써 거리측정용 트랜스듀서로서의 응용가능

* : 동아대학교 공대 전기공학과

** : 동명전문대학 전기과

접수일자 : 1996년 5월 17일

심사완료 : 1996년 9월 25일

성을 검토하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 다공질 세라믹 제조에 사용될 세라믹 분말은 동질이형 상경계(Morphotropic Phase Boundary ; MPB)근처의 조성을 가지는 PZT[Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃]를 용융염합성법으로 제조하였다.⁴⁾ 다공질 PZT 제조를 위한 기공형성을 위해 플라스틱 구체로는 74~88(μm)의 PVA를 사용하였으며, 이때 PVA구체의 중량비를 5~15(wt.%)범위로 칭량하여 건식 혼합한 다음, 20,000(psi)로 등압 성형하였다. 그 후 20(°C/hr)의 비율로 승온하여 500(°C)에서 2시간 유지하여 세라믹에 분산, 혼합되어 있는 플라스틱 구체를 burn-out시킨 다음 1,150(°C)에서 1시간 소결하여 다공질 시편을 얻었다.⁴⁾ 이들 다공질 시편을 권두계 진동모드⁶⁾에 적합한 시편으로 가공하고, 초음파 세척기로 세척한 후 에콰시 수지(Eccogel 1365-25; Emerson & Cuming Inc.)와 조합하여 70(°C)에서 8시간 경화시킴으로써 3-3형 복합압전체 시편을 제작하였다. 이들 시편에 상온 건조용 은전극을 도포한 후 75(°C)의 실리콘 기름 중에서 30~35(kV/cm)의 전계를 10분 인가하여 분극처리를 행하였다.

PZT-고분자 3-3형 복합압전체 소자로 제작된 트랜스듀서의 지지체로는 음향임피던스가 비교적 큰 동파이프(내경:15mm)를 사용하였으며, 탐촉자의 한쪽은 진동자를 고정하였고, 다른 한쪽은 BNC(Bayonet Neil-Concelman) 컨넥터를 부착하였다. 이때 진동자의 시효(aging)발생을 감소시키기 위하여 (+)전극을 안쪽으로 향하게 하였고, 신호선으로는 은선(silver wire)을 사용하였다. 또 바깥면에는 접지선을 BNC 컨넥터로 접속하고, 가능한 한 음성 접촉이 되도록 하기 위해 은전극을 사용하여 접착시킨 후 에콰시를 얇게 덧입혔으며, 후면은 air-backing구조로 하였다. 트랜스듀서의 펄스에코 응답특성은 Testpro System(Transducer Characterization System)과 Pulse Receiver(1010PR, ACCU-TRON Inc.)를 사용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

표 1은 초음파 트랜스듀서의 탐촉자로서 사용된 자체 제작한 PZT소결체 및 PZT-고

분자 3-3형 복합압전체 시편의 각종 특성치를 요약하여 나타내었다.⁷⁾ 표 1에서 보듯이 본 연구에서 제작한 3-3형 복합압전체로 제작된 탐촉자는 초음파 트랜스듀서의 요구조건을 비교적 잘 만족하고 있다.¹⁾

소결체 PZT세라믹스 및 PZT-고분자 3-3형 복합압전체 시편을 초음파 트랜스듀서용 탐촉자로 사용할 경우에 있어서 펄스-에코특성을 조사하기 위하여 그림 1과 같은 임펄스를 인가하여 시편 자체의 진동 및 펄스-에코 응답특성을 얻었으며, 이때 인가된 임펄스 신호의 크기는 10배의 프로브를 사용하여 측정 한 것이다.

표 1. PZT소결체 및 복합압전체 시편의 특성.⁷⁾

Table 1. Properties of solid PZT and PZT-polymer 3-3 type composite specimens.

특 성	소결체PZT	복합압전체
밀도(kg/m ³)	7.7	7.0~4.9
비유전율(K ₃₃)	2,100	1,100~849
압전정수 d ₃₃ (×10 ⁻¹² C/N)	364	328~290
압전정수 g ₃₃ (×10 ⁻³ Vm/N)	20	34~38
압전정수 d _h (×10 ⁻¹² C/N)	50	136~2,255
압전정수 g _h (×10 ⁻³ Vm/N)	2.7	14~30
전기기계결합계수(k _t)	0.7	0.54~0.5
기계적품질계수(Q _m)	80	6.0~6.2
음향임피던스(Mrayl)	31	18.5~13.0

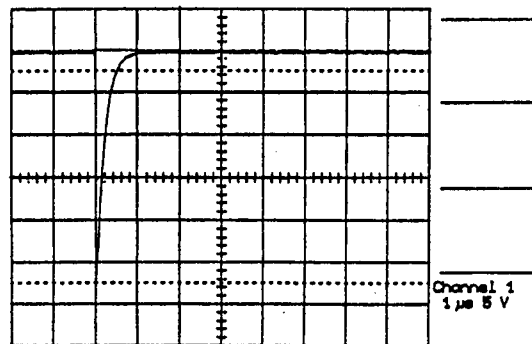


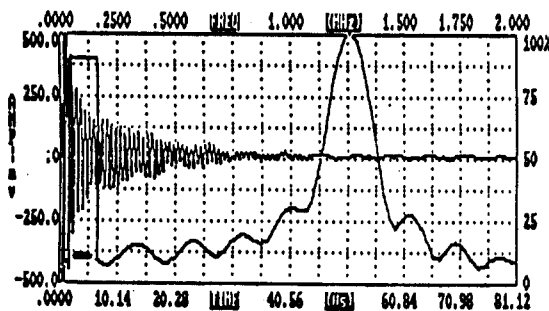
그림 1. 초음파 분석기의 입력 펄스.

Fig. 1. Input pulse of transducer analyzer.

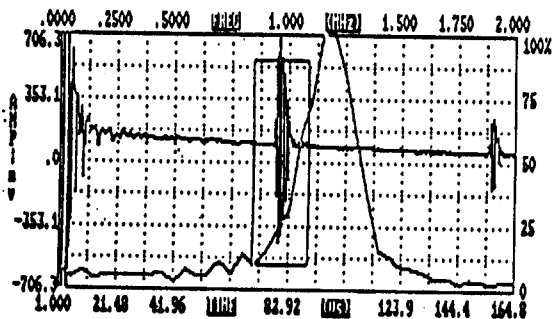
그림 2의 (a) 및 (b)는 PZT 소결체를 진동자로 사용하여 자체 제작한 초음파 트랜스듀서의 펄스-에코응답특성을 나타낸 것이다. 그림 (a)의 파형군은 인가된 임펄스에 의해 진

동자 자체의 진동에 의하여 나타난 파형이며, 그림 (b)는 수중에서의 펄스-에코 응답특성을 나타낸 것이다. 이때 시편 자체 및 펄스-에코 응답에서의 파형을 FFT(Fast Fourier Transform)분석을 했을 경우 공진주파수가 거의 일치되고 있음을 볼 수 있다.

그림 (a)에서 출력파형은 진동의 울림이 여러 주기동안 계속되고 있는데, 이는 압전 PZT 세라믹스의 정수압 전압정수 g_h 값이 작기 때문이라 생각된다.⁸⁾ 그리고 펄스가 인가되어 트랜스듀서에 수신된 시간(약 80 μ sec)과 음속(약 1,500m/s)으로부터 식 $c=L/t$ (c :수중의 음속, L :송수파기의 거리, t :지연시간의 차)에 의해 계산한 거리(5.97cm)는 탐촉자와 반사판과의 실제거리(6cm)와 거의 일치하였다.



(a) Vibrating waveform between electrodes



(b) Waveform of echo signal

그림 2. PZT 소결체로 제작한 트랜스듀서의 펄스-에코 응답.

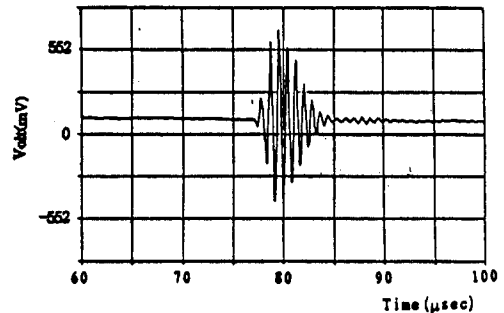
Fig. 2. Pulse-echo response of solid PZT transducer.

그림 3은 소결체 PZT세라믹스 탐촉자의 펄스-에코 응답(그림 2(b))중 제 1반사파의 응답특성을 정량적으로 해석하기 위해 나타낸 그림이다. 이때 피크의 10%레벨까지의 상승시간은 9.56(μ sec)이

었으며, -6(dB)레벨에서의 대역폭은 25.45%이었다.

그림 4~8은 PVA의 중량비(5~15wt%)를 달리하여 제작한 PZT-고분자 3-3형 복합압전체 시편을 진동자로 사용하여 제작한 초음파 트랜스듀서의 펄스-에코 응답특성을 나타낸 것이다. 각 그림에서 (a)의 파형군은 인가된 임펄스에 의해 진동자 자체의 진동에 의하여 나타난 파형이며, 그림 (b)는 수중에서의 펄스-에코 응답특성을 나타내고 있다.

PVA의 중량비(5~15wt%)를 달리한 PZT-고분자 3-3형 복합압전체 모두 소결체 PZT 세라믹스의 응답파형(그림 2)에 비하여 출력파형의 전압이 크게 나타나고 있으며, 또한

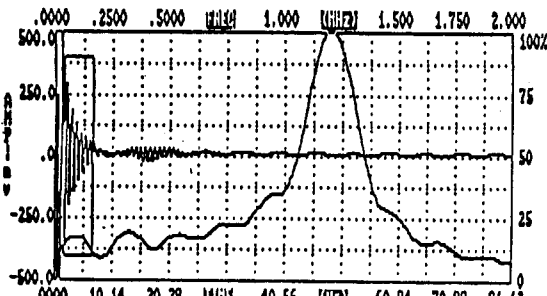


Absolute peak amplitude value (volt) : .6786802E+00
 Maximum peak-to-peak amplitude value (volt) : .1120098E+01
 Rise time 1% level to peak (μ sec) : .9559999E+01
 Rise time 10% level to peak (μ sec) : .9559999E+01
 Fall time peak to 10% level (μ sec) : .4440000E+01
 Fall time peak to 1% level (μ sec) : .1040000E+02
 Waveform duration 10% level (μ sec) : .1400000E+02
 Waveform duration 1% level (μ sec) : .1996000E+02
 Bandwidth at -3 dB level (Hz) : .1818182E+02
 Bandwidth at -6 dB level (Hz) : .2545455E+02
 sensitivity/loop gain (dB) : -.3424806+02

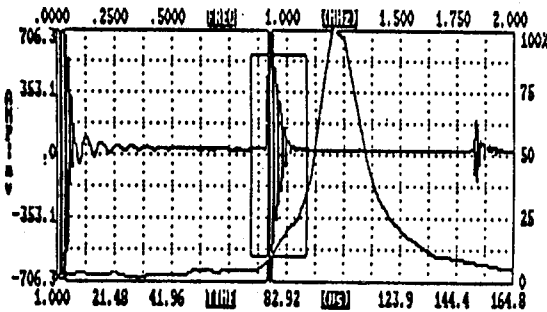
그림 3. PZT 소결체로 제작된 초음파 변환기의 제 1반사파.

Fig. 3. First echo signal of solid PZT transducer.

계속적인 진동의 울림은 나타나지 않고 시간에 따라 급격한 울림감쇠 현상이 일어나 송신 및 수신특성이 소결체 PZT에 비하여 양호하게 나타났다. 이는 표 1에서 처럼 복합압전체의 수중 압전정수 d_h 와 g_h 값이 단일상 PZT의 값보다 커졌기 때문에 송신 및 수신특성이 개선된 것으로 믿어진다.⁹⁾



(a) Vibrating waveform between electrodes



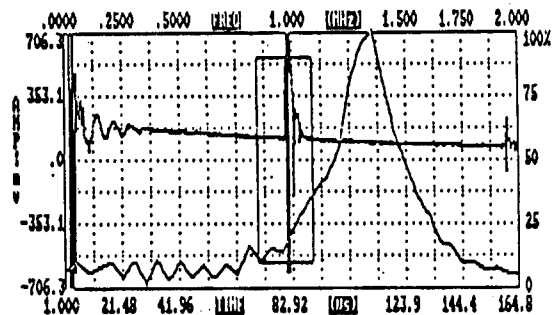
(b) Waveform of echo signal

그림 4. 3-3형 PZT-고분자 복합압전체로 제작된 초음파트랜스듀서의 펄스-에코응답 (PVA 5.0 wt%).

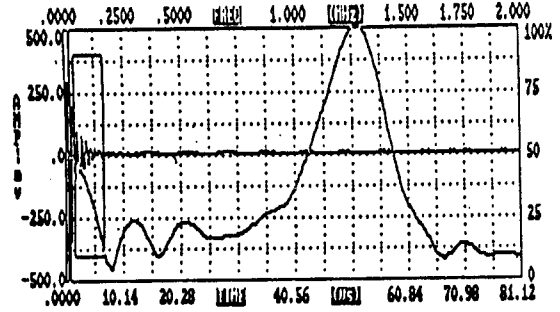
Fig. 4. Pulse-echo response of PZT-polymer 3-3 type transducer (PVA 5.0wt.%).

또한 PVA의 중량비(5~15wt%)를 달리하여 제작한 PZT-고분자 3-3형 복합압전체 시편을 진동자로 사용하여 제작한 초음파 트랜스듀서의 펄스-에코 응답특성에서는 소결체 PZT세라믹스 탐촉자에서와 같이 펄스가 인가되어 트랜스듀서에 수신된 시간(약 80μsec)과 음속(약 1,500m/s)으로부터 식 $c=L/t$ (c:수중의 음속, L:송수파기의 거리, t:지연시간의 차)에 의해 계산된 거리(5.78~6.08cm)는 초음파 탐촉자와 반사판과의 실제거리(6cm)와 거의 일치하였다. 그리고 시편 자체 및 펄스-에코응답에서의 파형을 FFT분석을 했을 경우 공진주파수도 거의 일치하였다.

그림 9는 PVA 10.0wt.%로 제작한 PZT-고분자 3-3형 복합압전체로 제작한 초음파 트랜스듀서의 펄스-에코 응답(그림 6(b))의 제 1반사파를 나타낸 파형으로 피크의 10%레벨까지의 상승 시간은 7.44(μsec)로 소결체 PZT세라믹스(9.56μ



(a) Vibrating waveform between electrodes



(b) Waveform of echo signal

그림 5. 3-3형 PZT-고분자 복합압전체로 제작된 초음파트랜스듀서의 펄스-에코응답 (PVA 7.5wt%).

Fig. 5. Pulse-echo response of PZT-polymer 3-3 type transducer (PVA 7.5wt.%).

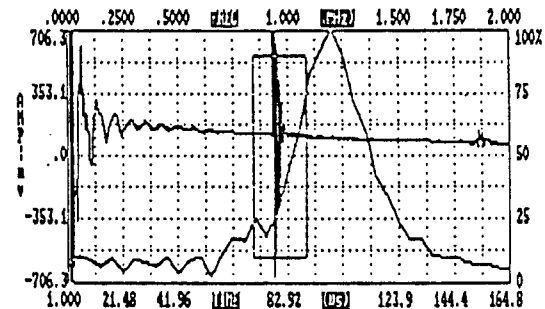
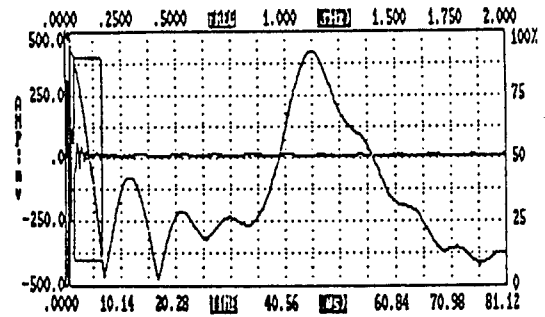
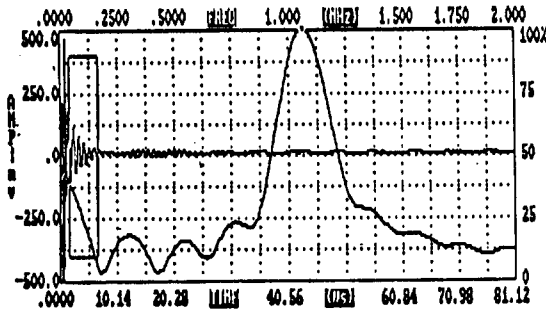
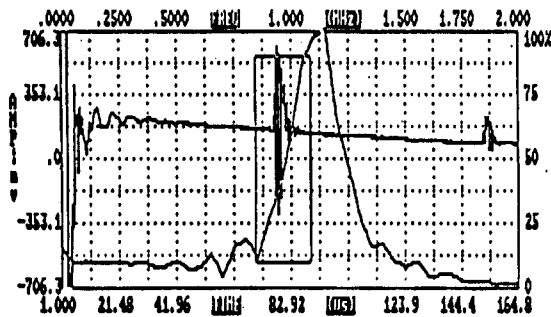


그림 6. 3-3형 PZT-고분자 복합압전체로 제작된 초음파트랜스듀서의 펄스-에코 응답(PVA 10.0wt%).

Fig. 6. Pulse-echo response of PZT-polymer 3-3 type transducer (PVA 10.0wt%).



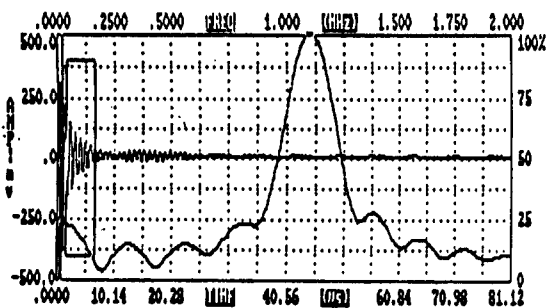
(a) Vibrating waveform between electrodes



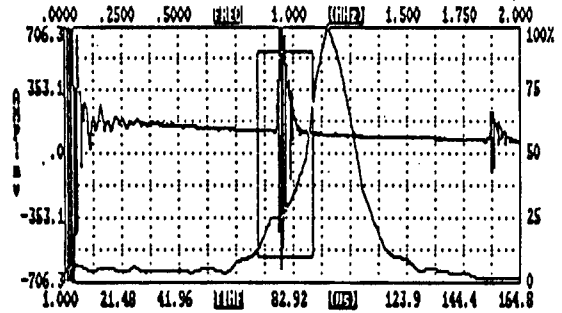
(b) Waveform of echo signal

그림 7. 3-3형 PZT-고분자 복합압전체로 제작된 초음파트랜스듀서의 펄스-에코 응답 (PVA 12.5wt%).

Fig. 7. Pulse-echo response of PZT-polymer 3-3 type transducer (PVA 12.5 wt.%).



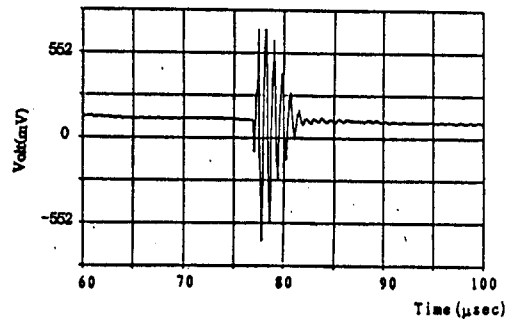
(a) Vibrating waveform between electrodes



(b) Waveform of echo signal

그림 8. 3-3형 PZT-고분자 복합압전체로 제작된 초음파 트랜스듀서의 펄스-에코 응답(PVA 15.0wt%).

Fig. 8. Pulse-echo response of PZT-polymer 3-3 type transducer (PVA 15.0wt.%).



Absolute peak amplitude value (volt) : .7007511E+00
 Maximum peak-to-peak amplitude value (volt) : .1368396E+01
 Rise time 1% level to peak (μsec) : .7440000E+01
 Rise time 10% level to peak (μsec) : .7440000E+01
 Fall time peak to 1% level (μsec) : .3600000E+01
 Fall time peak to 10% level (μsec) : .1252000E+02
 Waveform duration 10% level (μsec) : .1104000E+02
 Waveform duration 1% level (μsec) : .1996000E+02
 Bandwidth at -3 dB level (%) : .2727273E+02
 Bandwidth at -6 dB level (%) : .3636364E+02
 sensitivity/loop gain (dB) : -.5397009E+02

그림 9. 3-3형 PZT-고분자 복합압전체로 제작된 초음파 트랜스듀서의 제 1반사파.

Fig. 9. First echo signal of PZT-polymer 3-3 type transducer.

sec)보다는 짧았으며, 진동의 울림감쇠는 소결체 PZT세라믹스(4.44 μsec)에 비해 3.60(μsec)로 짧았다. 또한 -6(dB)레벨에서의 대역폭은 36.4%를 나타내어 PZT 소결체의 25.45%보다는 큰 값을

나타내었다. 이 결과로 부터 PZT-고분자 3-3형 복합압전체 시편을 초음파 트랜스듀서용 탐촉자로 사용할 경우 PZT 소결체보다는 성능이 향상 될 것임을 알 수 있다.

4. 결 론

PZT-고분자 3-3형 복합압전체 시편을 제작한 후 이를 진동자로 하여 제작된 트랜스듀서의 펄스에코 응답특성으로 부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PZT-고분자 3-3형 복합압전체 트랜스듀서는 소결체 PZT 트랜스듀서에 비하여 출력파형이 계속적인 진동의 울림은 나타나지 않고, 급격한 울림감쇠현상이 일어나 송신 및 수신특성이 소결체 PZT 트랜스듀서에 비하여 양호하게 나타났다.

2. 시편 자체 및 펄스-에코응답에서의 파형을 FFT분석을 했을 경우 공진주파수가 거의 일치하였다.

3. 트랜스듀서에 수신된 시간과 음속에 의해 구한 거리는 소결체 PZT세라믹스와 PZT-고분자 3-3형 복합압전체로 제조된 탐촉자 모두 탐촉자와 반사판과의 실제거리와 거의 일치하였다.

이상의 결과로 부터 3-3형 복합압전체 시편을 진동자로 하여 복합압전체 트랜스듀서를 제작함으로써 송수신특성이 향상되어 거리센서 및 수위계로 응용이 기대된다.

※ 본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었으며, 그 연구결과의 일부임.

참 고 문 헌

1. R.E. Newnham, A. Safari, G. Sa-Gong & I. Giniewicz, "Flexible Composites Piezoelectric Sensors", IEEE Proc., Int'l Ultrason. Sympo., p501, 1984.
2. G. Sa-Gong, A. Safari, S.J. Jang & R.E. Newnham, "Poling Flexible Piezoelectric Composites", Ferroel. Lett., 5(5), p131, 1985.
3. R.E. Newnham, D.P. Skinner & L.E. Cross, "Connectivity and Piezoelectric-Pyroelectric Composite", Mat. Res. Bull., 13, p.525, 1978.
4. 박 정학, 최 헌일, 사공 건, "다공질 PZT 세라믹의 제작 및 전기적 특성", 대한전기학회 논문집, 43권 10호, pp.1678~1683, 1994.
5. K.R. Erikson, "Tone-Burst Testing of Pulse-Echo Transducer", IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-26, pp. 7~14, 1979.
6. 日本電子材料工業會規格, EMAS-6003, 日本電子材料工業會, 1979.
7. 박 정학, 이 수호, 최 헌일, 사공 건, 배진호, "초음파 트랜스듀서용 PZT-고분자 3-3형 복합압전체의 유전 및 압전특성", 한국전기전자재료학회지, 9권 2호, pp. 146~151, 1996
8. 사공 건, 최 헌일, "사전 분극처리된 (Prepoled) 유연한 1-3 세라믹/고분자 복합압전체의 PZT 체적에 따른 전기적 특성", 대한전기학회 논문지, 42권, 11호, pp. 100~106, 1993.
9. W.R. Scott, "Durable Lead Attachment Techniques for PVDF Polymer Transducers with Application to High Voltage Pulsed Ultrasonics", Ferro., Vol.32, pp.79~83, 1981.

저자소개



박정학

1966년 8월 15일생. 1988년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(공학박). 현재 동아대학교 전기공학과 강사.



손무현

1944년 11월 18일생. 1967년 연세대학교 공대 전기공학과 졸업. 1982년 2월 동아대학교 대학원 졸업(석사). 1996년 2월 동 대학원 박사과정 수료. 현재 동명전문대학 전기과 교수.



최현일

1960년 9월 11일생. 1986년 2월 동아대학교 전기공학과 졸업. 1988년 2월 동 대학원 졸업(석사). 1994년 2월 동 대학원 졸업(공학박). 현재 동아대학교 공대 전기공학과 강사.



사공 건

1968년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 졸업(석사). 1986년 미국 Golden State Univ.(Ph.D). 1983년-85년 The Penn. State Univ.(MRL) Visiting Scientist. 1993년 일본 동경공업대학 객원연구원. 1994년 The State Univ. of New Jersey 객원연구원. 현재 동아대학교 전기공학과 교수.