

거리 측정용 1-3형 복합압전체 트랜스듀서의 펄스에코 응답 특성

논문
8-2-13

Pulse-echo Response of 1-3 Type Piezoelectric Composite Transducers for Distance Measurement

최현일*, 박정학*, 이수호*, 사공 건*

(Hun-Il Choi, Jung-Hak Park, Su-Ho Lee, Geon Sa-Gong)

Abstract

In this study, the piezoelectric ceramics/polymer composite transducers with 1-3 connectivity have been studied. A piezoelectric ceramics PZT prepared by Wet-Dry Combination method was used as a filler in polymer matrix Eccogel. We've got the pulse-echo response for 1-3 type piezoelectric composite transducers in water. It was shown that the transmitting and receiving sensitivity of 1-3 type piezoelectric composite transducers could be improved in comparison with that of solid PZT transducers. The reason is for that 1-3 type piezoelectric composites have low dielectric constant and density. There was in a good agreement between the resonant frequencies calculated from one period and observed results on the Ultrasonic Transducer Analyzer. According to these results we could be figured out the distance in water by virtue of the pulse-echo response.

Key Words(중요용어) : Transducer(변환기), Piezoelectric composite(복합압전체), Transmitting and receiving sensitivity(송 수신 감도), Hydrostatic voltage coefficient(수중 압전 전압정수).

1. 서 론

초음파 센서는 압전 진동자의 압전 특성을 이용하여 기체, 액체 및 고체 매질에 음파를 방사하여 측정 대상으로부터 반사되는 음파를 검출해 내는 소자에 응용되고 있다. 이 때 초음파는 전파속도가 아주 느리기 때문에 저주파 영역에서도 파장이 짧아 직진성이 뛰어나므로 거리 측정용 센서등에 이용되고 있다. 초음파 센서에 사용되고 있는 대표적인 소재로는 페로브스카이트형인 BaTiO₃와 PZT 압전 세라믹이 주로 사용되고 있으나 단일상 PZT의 경우 소결시 PbO의 증발로 인하여 압전특성이 저하되므로 변형된 2성분계 및 3성분계 복합 PZT계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한 단일상의 PZT계 압전 세라믹이 수중청음기에 사용될 경우 높은 유전율 및 밀도로 인하여

수중 음향 임피던스 정합(matching)이 어려워 물이 매질인 경우 송 수신 특성이 저하하게 된다.^{1,2)} 이를 개선하고자 압전성이 큰 세라믹과 비유전율이 작은 고분자 매질을 복합화한 Ceramic/Polymer 복합압전체가 연구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 습식-건식법(Wet-Dry Combination method)에 의해 입경이 균일한 PZT 소결체를 제조한 후, 이들을 기계적 품질계수, 음향 임피던스 및 유전율이 낮은 1-3형 복합압전체를 제작하기 위한 세라믹 filler로 사용하였으며, Epoxy 수지계(Eccogel Series)³⁾와 복합화하여 PZT 체적비를 20Vol.%로 고정하고 시편 두께에 따라 1-3형 복합압전체를 제작하였다.⁴⁾ 아울러 이들 1-3형 복합압전체를 진동자로 하여 초음파 트랜스듀서를 제작한 후, Pulse 응답특성을 측정함으로써 수중에서의 거리측정 용용에 대해 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1. 1-3형 복합압전체의 제작

* : 동아대학교 공대 전기공학과
접수일자 : 1994년 10월 22일
심사완료 : 1995년 1월 20일

PbO, ZrOCl₂·8H₂O 및 TiCl₄ 수용액을 출발 원료로 사용하여 동질이형 상경계 영역(MPB)인 Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃의 조성으로 습식-건식법에 의해 PZT 소결체를 제작하였다.^{5,6,7)} 이들을 실리콘 기름 중에서 30(kV/cm)의 전계로 10분간 분극처리를 행한 다음 탈분극이 일어나지 않도록 낮은 속도(30rpm)로 diamond saw를 이용하여 20Vol.%의 체적비로 가공하였다. 이들 PZT 소결체를 filler로 사용하여 Epoxy resin계 (Eccogel 1365-45:Emerson & Cuming Inc.)와 조합하여 경화한 후 표면을 마감질하여 초음파 세척기로 깨끗이 세척한 다음 상온용 은전극을 도포함으로써 사전 분극처리(prepoled)된 유연성(flexible)이 있는 1-3형 복합압전체를 제작하였다. 이때 1-3형 복합압전체의 직경은 12.5(mm)이다.

2.2. 1-3형 트랜스듀서의 제작

원(clamped) 두께 진동모드로 제작된 1-3형 복합압전체를 진동자로 사용하여 트랜스듀서를 제작하였다.(사진 1) 이들과 음향특성을 비교하기 위하여 자체 제작된 PZT소결체를 진동자로 한 단일상 트랜스듀서도 제작하였다.

트랜스듀서는 음향 임피던스가 비교적 큰 내경이 15(mm)인 알루미늄 파이프를 사용하였으며, 파이프의 한쪽은 진동자를 고정하였고, 다른 한쪽은 BNC 콘넥터를 부착하였으며, 진동자 주위는 silicon 고무로 밀폐시킴으로써 수중에서의 각종 초음파 특성을 조사할 수 있는 구조로 제작하였다.⁸⁾ 이때 은전극과 신호선으로 사용된 은선과의 분리를 방지하기 위하여 epoxy를 얇게 덧입혔다.

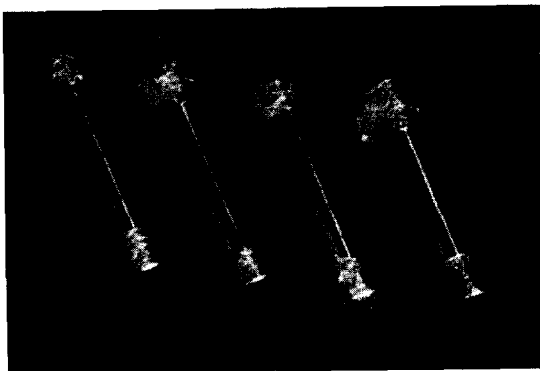


사진 1. 제작된 트랜스듀서의 사진
Photo. 1. Photograph of fabricated transducers.

2.3. 특성치의 측정

자체 제작한 단일상 PZT 및 1-3형 복합압전체

트랜스듀서의 pulse-echo 응답을 관찰하기 위하여 짧은 impulse 신호를 발생시킬 수 있는 초음파 트랜스듀서 분석기(ultrasonic transducer analyzer: BK-AEROTECH, UTA-4) 및 반사판을 측정할 수 있는 오실로스코프(LeCroy:9301M)를 사용하였다. 이때 pulse-echo 측정을 위한 평면 반사판은 스테인레스 강판으로 평면의 표면 처리는 2(μm)로 가공하였다. 후면으로 부터의 여러가지 반사파 간섭을 피할 수 있도록 충분한 두께 30(mm)로 하였으며, 반사판의 넓이는 측정할 트랜스듀서 빔 (beam)의 최대 지향성을 감안하여 150×130(mm)로 하였다.

초음파 트랜스듀서 분석기로부터 증폭된 임펄스에 의해 트랜스듀서는 여기되어 음파가 수중으로 방사되며, 수중으로 전달되는 음파는 바닥의 반사판에 도달한다. 이때 음향 에너지의 일부는 반사판에 투과되지만 물과 반사판의 음향 임피던스차에 의해 대부분의 음파는 반사되어 트랜스듀서에 수신되며, 수신된 반사파는 오실로스코프 상에 나타난다. 이때 반사판과 트랜스듀서 사이의 거리는 a^2/λ 이다. 여기서 a는 트랜스듀서의 반경, λ는 트랜스듀서 중심주파수의 파장을 나타내며, 본 연구에서는 $a^2/\lambda=3.60$ (cm)로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

1-3형 복합압전체가 트랜스듀서로 사용될 경우의 초음파 특성을 조사하기 위하여 측정 시스템에 사진 2와 같은 임펄스(impulse)를 인가하여 pulse-echo 응답특성을 얻었다.

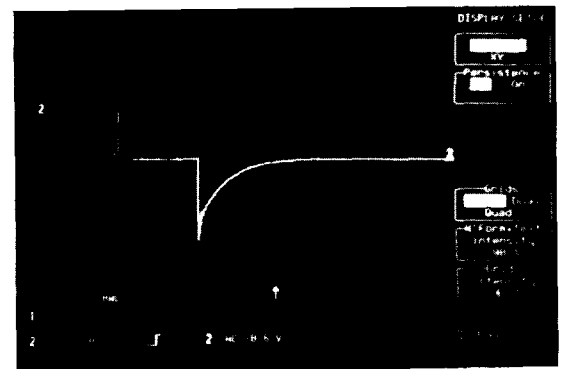
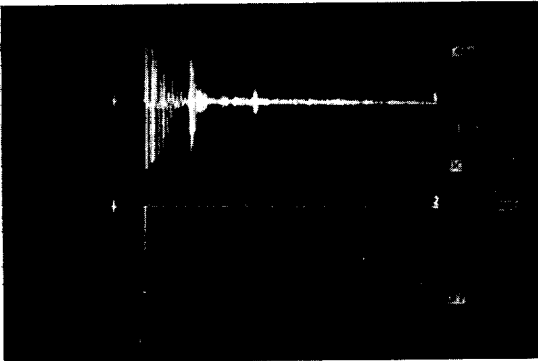


사진 2. 트랜스듀서 분석기로부터 인가된 임펄스
Photo. 2. Impulse from transducer analyzer.

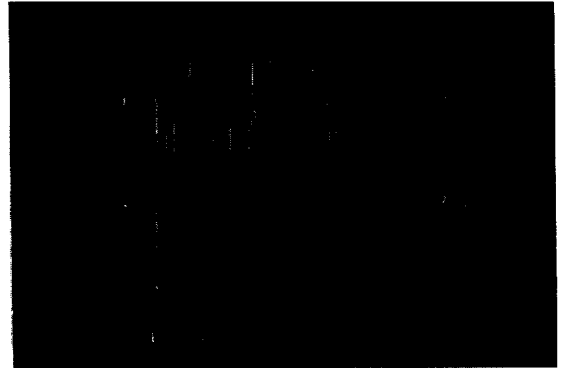
사진 3의 (a), (b), (c)는 단일상 PZT 진동자를

사용하여 자체 제작한 트랜스듀서의 pulse-echo 응답특성을 나타낸 것이다. (a)에서 채널 2에 나타난 입력 임펄스가 송신용 트랜스듀서에 가해지면 트랜스듀서는 여기되어 음파가 수중으로 전달된다. 전달된 음파는 반사판에 의해 반사되어 트랜스듀서에 수신되며, 이와 같은 과정의 반복을 거쳐 음파는 채널 1에 나타난 것과 같이 점차 감쇠되어 소멸된다. 채널 1의 첫번째 좌측에 나타나는 파형군(波形群)은 인가된 임펄스에 의해 진동자 자체의 진동에 의해 반복되어 나타난 파형이며, 두번째 파형군은 진동자의 진동에 의해 수중으로 진행하여 반사되어 오는 수신파로, 이 또한 앞의 경우와 같은 과정의 반복에 의해 파형군으로 나타난다. (b)와 (c)는 첫번째 및 두번째 파형군의 시간축을 5 ($\mu\text{s}/\text{div.}$)으로 확대하였을 경우의 출력 파형으로 진동의 울림(ringing)이 여러 주기동안 계속되어 수신 감도가 떨어지고 있음을 보여주고 있다.⁹⁾ 이와같이 수신감도가 저하하는 것은 압전 세라믹 PZT의 수중 압전 전압정수 $g_h(3 \times 10^{-3} \text{Vm/N})$ 가 낮기 때문이라 생각되어 진다. 그리고 입력 임펄스에 대한 echo 응답의 주기는 약 $1(\mu\text{s})$ 로 자체 제작한 PZT 트랜스듀서의 공진주파수 1(MHz)와 일치하였다.

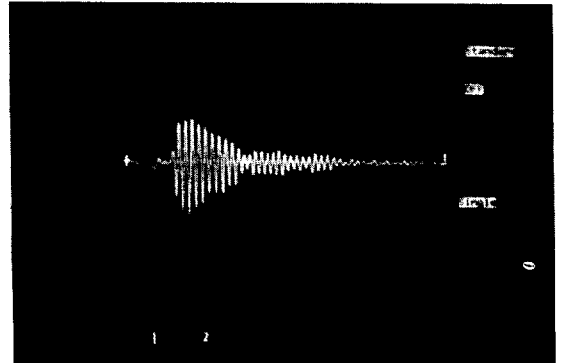


Channel 1 Channel 2
 X: 50 $\mu\text{s}/\text{div.}$ X: 50 $\mu\text{s}/\text{div.}$
 Y: 0.5V/div. Y: 5V/div. (a)

사진 4의 (a), (b), (c)는 PZT의 체적비가 20 Vol.%이고, 두께가 1.9(mm)인 1-3형 복합압전체를 진동자로 하여 제작한 트랜스듀서의 송신 및 수신 특성으로 (b)와 (c)는 시간축을 각각 1 및 2($\mu\text{s}/\text{div.}$)로 확대한 것이다. 단일상 PZT에서와 같이 진동의 계속적인 울림은 나타나지 않고 시간에 따라 급격한 울림감쇠(ringdown)현상이 일어나 송신 및 수신특성이 양호하게 나타났다. 이는 세라믹과 고분자를 복합화함으로써 수중 압전 전하정수 d_h



Channel 1 Channel 2
 X: 5 $\mu\text{s}/\text{div.}$ X: 5 $\mu\text{s}/\text{div.}$
 Y: 0.5V/div. Y: 5V/div. (b)



X: 5 $\mu\text{s}/\text{div.}$
 Y: 0.5V/div. (c)

사진 3. 단일상 PZT 트랜스듀서의 pulse-echo 응답특성

Photo. 3. Pulse-echo response of solid PZT transducer.

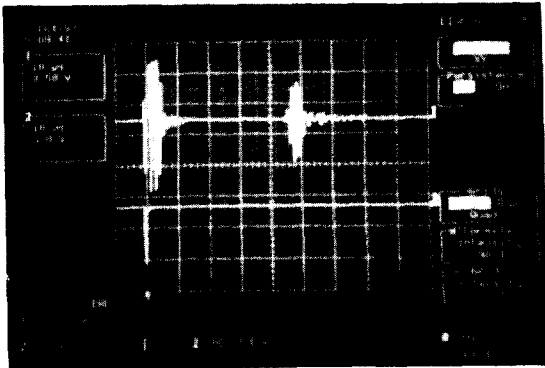
- (a) Transmitting and receiving of ultrasonic pulse
- (b) Vibrating waveform between electrodes
- (c) Waveform of echo signal

와 전압정수 g_h 가 높아져 송신 및 수신특성이 개선된 것으로 생각되며, 단일상 PZT와 1-3형 복합압전체의 d_h, g_h 값을 표 1에 요약하였다. 또 파형의 주기가 약 $1.3(\mu\text{s})$ 로 자체 제작한 트랜스듀서의 공진주파수 770(KHz)와 일치하였다.³⁾ 또한 펄스가 인가되어 트랜스듀서에 수신된 시간(약 $45\mu\text{s}$)과 물의 음속(약 1.500m/s)으로 부터 식 $c = \Delta L / \Delta t$ (c : 수중의 음속, ΔL : 송수파기 사이의 거리, Δt : 지연 시간의 차)에 의해 계산된 거리(3.62cm)는 트랜스

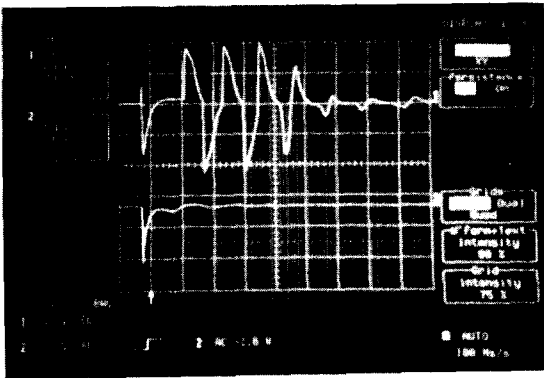
표 1. 단일상 PZT 및 1-3형 복합압전체의 d_h , g_h

Table 1. d_h , g_h of solid PZT and 1-3 type piezoelectric composites.

재료	$d_h (\times 10^{-12} \text{ C/N})$	$g_h (\times 10^{-3} \text{ Vm/N})$	$d_h \times g_h (\times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N})$
단일상 PZT	30~36	2~3	60~108
1-3 type piezoelectric composites (20Vol.%)	260~270	140~150	36.400~40.500



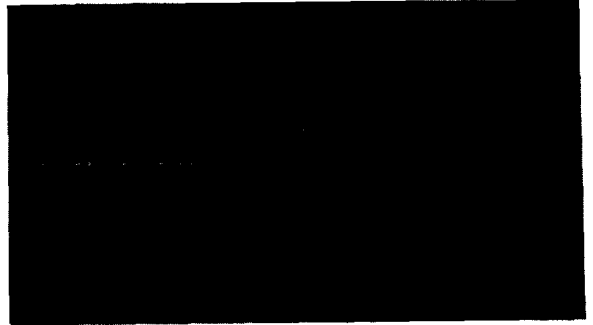
Channel 1 X: 10µs/div. Y: 0.5V/div.
Channel 2 X: 10µs/div. Y: 5V/div. (a)



Channel 1 X: 1µs/div. Y: 0.5V/div.
Channel 2 X: 1µs/div. Y: 5V/div. (b)

듀서와 반사판과의 거리 3.60(cm)와 거의 일치하므로 수중에서의 거리 측정에 응용이 기대된다.

사진 5의 (a), (b), (c)와 6의 (a), (b), (c)는 각각 PZT의 체적비가 20Vol.% 일 경우 진동자의 두께를 2.85(mm) 및 3.8(mm)로 하였을 경우 1-3형 복합압전체를 진동자로 사용하여 제작된 트랜스듀서의 pulse-echo 응답특성을 나타낸 것이다. 이것도 마찬가지로 연속적인 진동의 울림 현상은 나타나



(X: 2µs/div., Y: 100mV/div.)

(c)

사진 4. 체적비 20Vol.%, 두께 1.9(mm) 1-3형 복합압전체의 pulse-echo 응답특성

Photo. 4. Pulse-echo response of 1-3 type composite transducer (20Vol.%, 1.9mm)

(a) Transmitting and receiving of ultrasonic pulse

(b) Vibrating waveform between electrodes

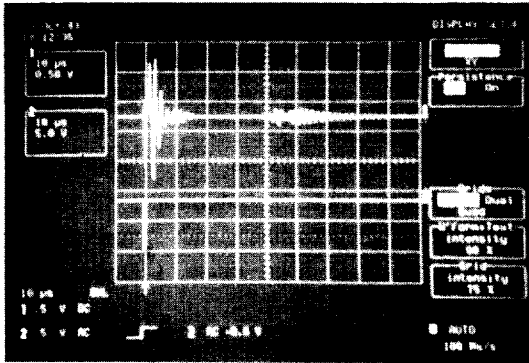
(c) Waveform of echo signal

지 않았으며, 비교적 양호한 송·수신 특성을 얻을 수 있었다. 주기는 각각 2 및 2.7(µs)로 관찰되었으며, 자체 제작한 트랜스듀서의 공진주파수 500 및 370(KHz)와 일치하였다. 또한 실제 거리(3.60cm)와 파형으로 계산된 거리(3.62cm)는 거의 일치하였다.

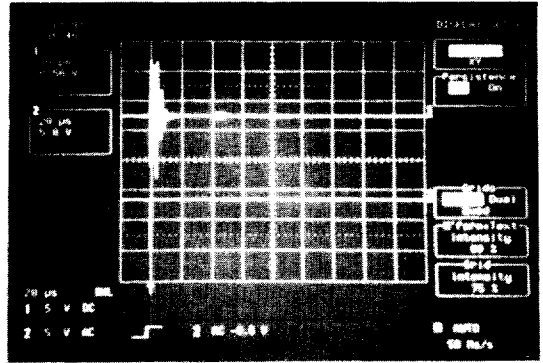
4. 결 론

습식-건식법에 의해 제조된 PZT 시편을 filler로 사용, 고분자 매질로 Epoxy 수지계인 Eccogel Series와 조합하여 유연성이 있는 1-3형 복합압전체를 제작한 후, 이들을 진동자로 사용하여 제작된 트랜스듀서의 펄스 응답특성으로 부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

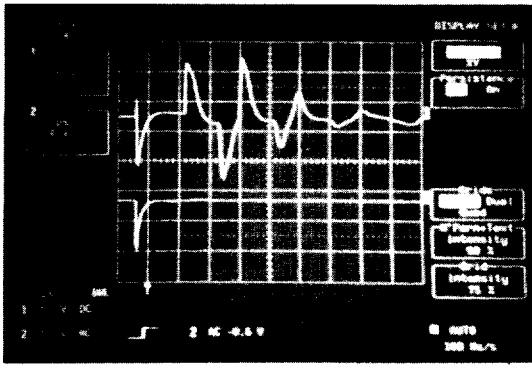
1. 자체 제작한 단일상 PZT 트랜스듀서는 낮은 g_h 정수로 인하여 진동의 울림이 여러 주기 계속되어 수신감도가 저하되었다.
2. 두께가 1.9, 2.85 및 3.8(mm)인 1-3형 복합압전체 트랜스듀서는 급격한 울림감쇠 현상이 일어나 송신 및 수신특성이 개선되었다.
3. 파형의 주기로 부터 구한 공진 주파수는 두께 모드를 이용하는 진동자의 두께 변화에 따른 공진 주파수와 잘 일치하였다.



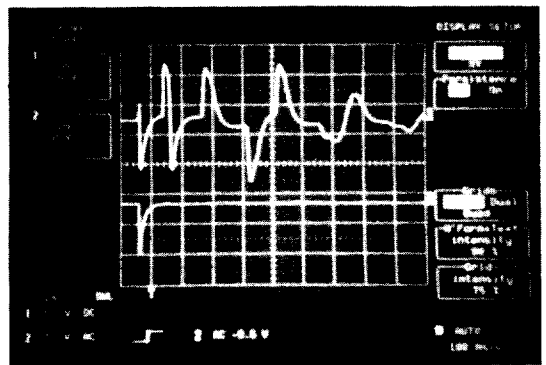
Channel 1 Channel 2
 X: 10µs/div. X: 10µs/div. (a)
 Y: 0.5V/div. Y: 5V/div.



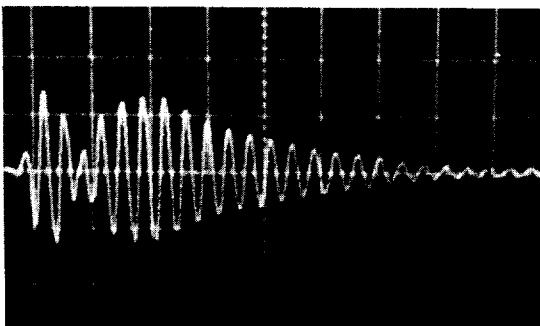
Channel 1 Channel 2
 X: 20µs/div. X: 20µs/div. (a)
 Y: 0.5V/div. Y: 5V/div.



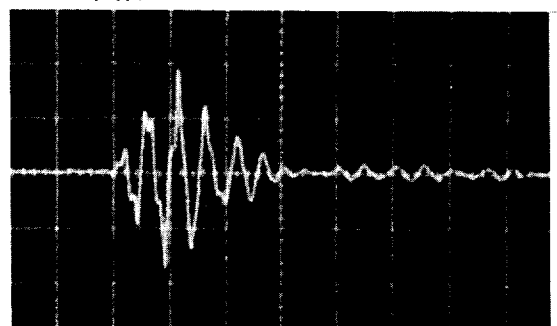
Channel 1 Channel 2
 X: 1µs/div. X: 1µs/div. (b)
 Y: 0.5V/div. Y: 5V/div.



Channel 1 Channel 2
 X: 1µs/div. X: 1µs/div. (b)
 Y: 0.5V/div. Y: 5V/div.



(X: 5µs/div., Y: 100mV/div.) (c)



(X: 5µs/div., Y: 100mV/div.) (c)

사진 5. 체적비 20Vol.%, 두께 2.85(mm) 1-3형 복합압전체의 pulse-echo 응답특성

Photo. 5. Pulse-echo response of 1-3 type composite transducer(20Vol.%, 2.85mm)
 (a) Transmitting and receiving of ultrasonic pulse
 (b) Vibrating waveform between electrodes
 (c) Waveform of echo signal

사진 6. 체적비 20Vol.%, 두께 3.8(mm) 1-3형 복합압전체의 pulse-echo 응답특성

Photo. 6. Pulse-echo response of 1-3 type composite transducer(20Vol.%, 3.8mm)
 (a) Transmitting and receiving of ultrasonic pulse
 (b) Vibrating waveform between electrodes
 (c) Waveform of echo signal

4. 트랜스듀서에 수신된 시간 및 물의 음속으로부터 계산한 거리(3.62cm)와 트랜스듀서와 반사판과의 실제 거리(약 3.60cm)가 거의 일치하였다.

이상의 결과로부터 1-3형 복합압전체를 진동자로 하여 복합압전체 트랜스듀서를 제작함으로써 수중에서 송 수신특성이 향상되어 거리 센서로 활용이 기대된다.

※ 본 연구는 한국과학재단(과제번호 941-0900-025-2)의 핵심전문 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 그 연구 결과의 일부임.

참 고 문 헌

1. G. Sa-Gong, A. Safari, S. J. Jang & R. E. Newnham, "Poling Flexible Piezoelectric Composites", *Ferroelectrics*, Vol. 5, No. 5, p.131, 1985
2. G. Sa-Gong, R. E. Newnham, A. Safari & I. Giniewicz, "Flexible Composite Piezoelectric Sensors", *IEEE Proc., Int'l, Ultrason Sympo.*, p. 501, 1984
3. 사공 건, 최현일, "사전 분극처리된(prepoled) 유연한 1-3 세라믹/고분자 복합압전체의 PZT 체적비에 따른 전기적 특성", *대한전기학회 논문지*, 42권. 11호. pp.100-106, 1993.
4. 최현일, 박정학, 이수호, 사공 건, "압전 세라믹-고분자 1-3형 복합 압전체 트랜스듀서의 필스에코 특성", *대한전기학회 하계학술대회 논문지*, pp.1403-1405, 1993.
5. K. Kakegawa, J. Mohri, T. Takahashi, H. Yamamura and S. Shirasaki, "A Compositional Fluctuation and Properties of $Pb(Zr, Ti)O_3$ ", *Solid State Communication*, Vol. 24, pp.769-772, 1977.
6. K. Kakegawa, J. Mohri, T. Takahashi and S. Shirasaki, "Sluggish Transition Between Tetragonal and Rhombohedral Phases of $Pb(Zr, Ti)O_3$ Prepared by Application of Electric Field", *J. of Ame. Cer. Soc.*, Vol. 65, No. 10, pp. 515-519, 1982.
7. 이수호, 박정학, 최현일, 사공 건, "습식-건식법에 의해 제작된 1-3형 복합 압전체의 음향 특성", *대한전기학회 춘계학술대회 논문집*, pp.81-83, 1994.
8. 최현일, "수중청음기용 압전세라믹-고분자 1-3형 복합압전체의 제작과 특성에 관한 연구", *박사학위논문*, 동아대학교, 1994.
9. W. R. Scott, "Durable Lead Attachment Techniques for PVDF Polymer Transducers with Application to High Voltage Pulsed Ultrasonics", *Ferroelectrics*, Vol. 32, pp.79-83, 1981.

저자소개



최현일

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



박정학

1966년 8월 15일생. 1988년 2월 동아대학교 전기공학과 졸업. 1991년 2월 동 대학원 졸업(석사). 1994년 2월 동 대학원 박사과정 수료.



이수호

1964년 1월 8일생. 1989년 2월 동아대학교 전기공학과 졸업. 1991년 2월 동 대학원 졸업(석사). 1995년 현재 동 대학원 박사과정 수료.



사공 건

1968년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 졸업. 1986년 미국 Golden State Univ.(Ph.D.). 1983-1985년 The Penn. State Univ.(MRL) Visiting Scientist. 1993년 일본 동경공업대학 객원 연구원. The State Univ. of New Jersey 객원연구원. 현재 동아대학교 공대 전기공학과 교수.