

Dicing-Filling 방법으로 제작된 1-3 압전복합변환자의 특성

Characteristics of The 1-3 Piezoelectric Composite Transducer Manufactured by Dicing-Filling Method

김우성*, 윤운하*, 옥치일*, 김성부*, 이종규*, 이종오**

W. S. Kim*, U. H. Yun*, C. I. Ok*, S. B. Kim*, J. K. Lee* and J. O. Lee**

초 록 압전 세라믹 PZT와 고분자 매질인 에폭시 수지를 사용하여 PZT 체적비가 75%인 1-3 압전복합변환자를 dicing-filling 방법으로 제작하여 임피던스 분석과 펄스 반사법으로 수신된 초음파 신호의 스펙트럼 분석을 통하여 전기 및 음향 특성을 조사하였다. 제작된 1-3 압전복합변환자의 경진동 모드 및 두께진동 모드의 기본진동수는 각각 0.95MHz와 1.63MHz이었고, 측면진동 모드는 관찰되지 않았다. 두께진동 모드에 대한 전기기계 결합계수는 PZT 단일상(0.52)보다 큰 0.54로 수신효율이 향상되었음을 알 수 있었다. 그리고 기계적 품질계수(Q)는 PZT 단일상(80)보다 상당히 작은 1.5이었고, 1-3 압전복합변환자의 축상 분해능이 크게 향상되었음을 알 수 있었다.

Abstract The 1-3 piezoelectric composite transducer with 75 volume percents PZT was fabricated by the dicing-filling method. The resonance modes of the 1-3 transducer have been studied with electric impedance measurement as a function of frequency. The fundamental frequencies of the planar and thickness mode were observed at 0.95MHz and 1.63MHz respectively, but the lateral mode was not observed. In the thickness mode, the electromechanical coupling coefficient of the 1-3 piezoelectric composite transducer, 0.54, was very closed to that of the single phase PZT(0.52). The pulse-echo response by exciting the 1-3 transducer with an electric pulse was observed from the water/reflector interface, and analyzed bandwidth by the spectrum of the impulse response. The quality factor Q for the 1-3 transducer was observed as 1.5 smaller than that of the single phase(80) and then the 1-3 transducer may be used to the broad band type transducer applications.

1. 서 론

초음파를 이용한 비파괴 시험은 초음파 영상화에 적용하려는 많은 시도가 진행되고 있다. 이러한 초음파 영상화에 사용될 압전변환자 혹은 탐촉자에 대한 기본적인 요구사항은 축상 고분해능과 고감도 수신능력이 다. 만약 수mm 혹은 그 이하의 결함을 영상화하기 위해서는 결함의 크기보다 더 짧은 펄스를 요구하게 된다. 따라서, 탐촉자의 축상 고분해능을 획득하기 위해서는 짧은 펄스를 발생시켜야 하고, 탐촉자의 고감도

수신을 위해서 높은 전기기계결합계수를 가져야 한다. 또한 계면에서 발생하는 에너지의 반사손실을 줄이기 위해서 임피던스 정합이 필요하게 된다. 그러나, 널리 사용되고 있는 압전 세라믹은 높은 전기기계 결합계수와 높은 기계적 품질계수(Q)를 갖고 있다. 높은 전기기계 결합계수로 인해 고감도 수신 능력은 있지만, 반대로 높은 기계적 품질계수를 갖고 있기에 펄스 상승 시간이 느리고 연속되는 ring-down에 의해 축 상 분해능이 낮아짐으로 후면재를 사용하여 개선하거나 혹은 향상시키고 있다. 특히 높은 음향 임피던스를 갖고 있

기 때문에 물과 같은 낮은 음향 임피던스 물질에서 상당히 불리하게 된다. 많은 연구자들이 필요에 따라서 압전변환자의 음향 임피던스, 기계적 품질계수 값, 방사 패턴을 조절하기 위한 연구가 진행되고 있음에도 불구하고, 실제로 초음파 변환자로 제작 시에 상당히 어려운 점이 존재하고 있다.

최근 연구동향에 의하면 단일 재질의 물리적, 기계적, 전기적인 성질을 극복하기 위하여 특수 목적에 사용하는 복합재의 개발이 이루어지고 있다. 특히 필요한 물성을 갖는 압전복합재의 개발이 가속화되어 필요에 따른 변환자의 음향 임피던스, Q값, 방사 패턴을 조절하고자 하고, 특수한 용도로 적용하기 위해서 적절한 복합재를 고안하거나 제작하는 것이 필요하게 되었다. 1973년 L. A. Pauer[1]는 음향 특성을 개선하기 위해 낮은 밀도를 갖는 물질을 이용하여 음향 임피던스를 낮추고, 기계적 특성을 보완하기 위해 유전율이 낮은 고분자 물질을 PZT와 혼합하여 이러한 문제점들을 해결하고자 하는 방법들이 처음으로 제안되었고, 1980년 R. E. Newnham[2-3]에 의해 구체화되기 시작하였다. T. R. Gururaja[4] 등은 높은 압전 결합계수, 낮은 음향 임피던스에 대한 최적의 압전복합체의 구조를 얻기 위한 연구를 하였고, B. A. Auld[5] 등은 역학적 특성에 대해 이론적으로 해석하였다. 또한 A. D. Nayfeh[6] 등은 저주파 영역에서 물과 복합 압전체의 경계면에 있어서의 음향 반사를 연구하였으며, 이러한 결과 압전성이 큰 세라믹과 유연성이 있는 고분자 매질을 복합화 한 복합 압전체가 개발되었다.

특히 두께방향 전기기계 결합계수($k_t=0.6\sim 0.7$)가 높고, 기계적 품질계수($Q=3\sim 10$)와 음향 임피던스($Z_{ac} < 7.5\text{Mrayl}$)가 낮아서 물과 같은 낮은 음향 임피던스를 갖는 피검체와의 임피던스 정합을 좋게 하며 적절한 감도를 조절할 수 있는 특성을 가진 1-3 압전복합체에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고, 1-3 압전복합체는 유전 및 기계적 손실이 적고 광대역 주파수 특성을 얻을 수 있으므로 고주파용 트랜스듀서 및 초음파용 탐촉자 등에 응용이 기대된다. W. A. Smith[7] 등은 1-3 압전복합체를 사용하여 물에 시편의 한쪽을 담그고 전원을 공급하여 음향 임피던스를 연구하였다. 그러나 아직 국내에서 사용하고 있는 초음파 변환자는 거의 단일상을 사용하고 있으며, 압전복합체에 대한 연구는 거의 이루어지고 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 압전 세라믹 PZT를 압전복합체 제작용 세라믹 filler로 사용하였고, 경화온도가 상온에 가

까운 에폭시 수지와 복합화하여 PZT 체적비가 75%인 1-3 복합압전체를 dicing-filling 방법을 이용하여 제작하였다. 이를 이용하여 초음파 변환자를 제작하였고, 이에 대한 각종 음향 특성을 조사하여 고주파용 트랜스듀서 및 초음파용 탐촉자로서의 응용가능성에 대해 연구하였다.

2. 1-3 압전복합변환자의 제작 및 실험방법

본 실험에서 1980년 R. E. Newnham[2]이 제안한 압전복합체의 상접속도 중에서 압전성이 우수한 압전세라믹(PZT-5A)과 고분자 재료인 에폭시 수지를 각각 1차원 및 3차원으로 결합된 1-3 압전복합체를 사용하여 초음파 변환자를 제작하였다. 1-3 압전복합체는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 연속적으로 접속되어 있는 고분자 매질 내에 PZT 막대들이 일정한 간격으로 평행하게 배열되어 있는 형상이고, 본 실험에 사용된 1-3 압전복합체는 dicing-filling방법으로 아래의 순서에 의하여 제작하였다. 직경이 23mm이고, 두께가 300 μm 인 압전 세라믹(PZT) 원판을 두께가 45 μm 인 다이아몬드 톱으로 300 μm 간격으로 dicing한 다음 그 사이에 에폭시 수지를 채워 넣었다. 처음 자른 방향과 수직인 방향에 대하여 위에서 언급한 방법과 같은 내용으로 작업하여 1-3 압전복합체를 제작하였다. 이 압전복합체에 대한 PZT의 체적비는 75%이었다. 초음파 변환자로 사용하기 위하여 상하 양면에 전극을 부착하였고, 중심주파수 파장의 1/4의 두께로 전면재를 부착하였으며 외장은 알루미늄으로 하여 압전복합변환자를 제작하였다.

제작된 압전복합변환자에 대한 유전 및 음향 특성을 평가하고 실제 초음파 탐촉자로서 응용가능성에 대해 조사하였다. Impedance/gain-phase analyzer (HP 4194A)를 사용하여 압전복합변환자의 정전용량

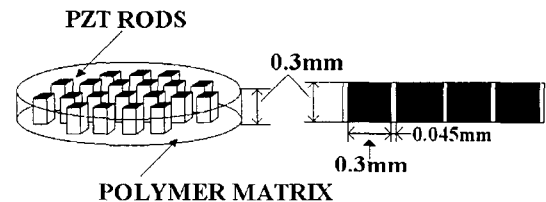


Fig. 1 Schematic representation of the 1-3 piezoelectric composite transducer with PZT rods in a polymer matrix

및 유전율을 포함한 기본 파라미터들을 구하고, 송·수 신호율을 조사하기 위해 전기음향 변환효율과 삽입손실율을 각각 측정하였다. 전기음향 변환효율을 계산하기 위해 공기중과 수중에서 각각 어드미턴스를 측정하여 근사식을 이용해서 값을 계산하였다. 또한, 펄스-에코 방법으로 압전복합변환자에 수신되는 반사판으로부터의 반사신호 중에서 에너지 손실이 가장 적은 첫번째 반사신호를 푸리에 변환(FFT)하여 주파수 대역폭을 조사하였다. 음파전달 시 에너지 손실을 최소화하기 위해 변환자는 반사판으로부터 근거리음장의 1/10인 15mm인 지점에 설치하였다. 압전변환자와 반사판 사이의 간격을 위와 같이 동일한 15mm로 하여 Toneburst pulse-echo method(8)를 이용하여 변환자에 인가되는 주파수의 변화에 따른 입력전압과 반사전압의 크기를 측정하여 삽입손실율을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 주파수 변화에 따른 입력 임피던스 및 위상의 변화를 측정한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 1-3 초음파 변환자의 공진 특성을 조사해 보면 0.95MHz와 1.63MHz에서 공진이 있음을 볼 수 있고, 1.16MHz와 2.03MHz에서 반공진이 있음을 알 수 있다. 1985년에 Gururaja et al. [4]에 의해 보고된 바에 따르면 압전복합변환자에 입력 임피던스로써 살펴본 진동양상은 3가지로 구분되어 나타난다고 보고하고 있으며, 진동형태는 경진동 모드, 두께진동 모드, 측면진동 모드로 구분하였다. 그는 원판형의 시편에 있어 경방향 진동이 가장 낮은 주파수에서 일어나며, 두께진동 모드는 경방향 진동에 비해 상대적으로 높은 주파수

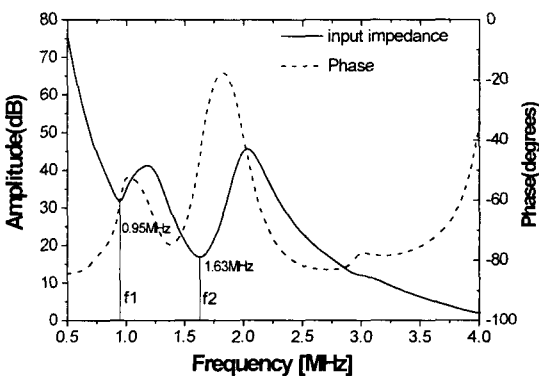


Fig. 2 Measured electrical input impedance of the 1-3 composite transducer

에서 일어나며, 측면진동 모드는 많은 에너지를 요구하기 때문에 상대적으로 가장 높은 주파수에서 일어난다고 하였다. Fig. 2를 보면 0.95MHz에서 나타나는 진동이 경방향으로 일어나는 진동이며, 1.63MHz에서 나타나는 진동이 두께방향으로 일어나는 진동이라 생각된다. 측면방향으로의 진동이 나타나지 않았는데 이는 PZT 막대(rod) 사이에 45 μ m의 간격이 존재하므로 막대들 사이의 상호 작용이 상당히 약화되어 사라진 것으로 생각된다.

이러한 여러 가지 진동형태 중에 두께방향으로 일어나는 진동모드를 조사하기 위해 1.63MHz를 중심으로 전기기계 결합계수 및 전기음향 변환효율을 조사하였다. Fig. 3은 전기기계 결합계수 및 전기음향 변환능률을 측정하기 위해 중심주파수 1.65MHz를 중심으로 공기중과 수중에서 어드미턴스 loop를 각각 측정한 결과이고, 이들 loop를 이용하여 전기기계 결합계수 및 전기음향 변환효율 값은 Fig. 3에서 두께방향 공진주파수와 반공진주파수를 이용하여 尾上의 근사식(10)을 사용하여 구하였다.

본 실험에 사용된 1-3형 압전복합변환자의 전기기계 결합계수는 약 0.54로 단일상 PZT 세라믹의 두께방향 전기기계 결합계수(0.52)보다 크게 나타났다. 두께방향에 대한 전기기계 결합계수는 PZT의 체적비가 15%~95%사이에서는 단일상 PZT(0.52)보다 높게 나타나고, 체적비가 25%~70%사이에서는 0.65정도라고 보고하였다. 본 실험에서 측정한 결과 단일상(0.52)보

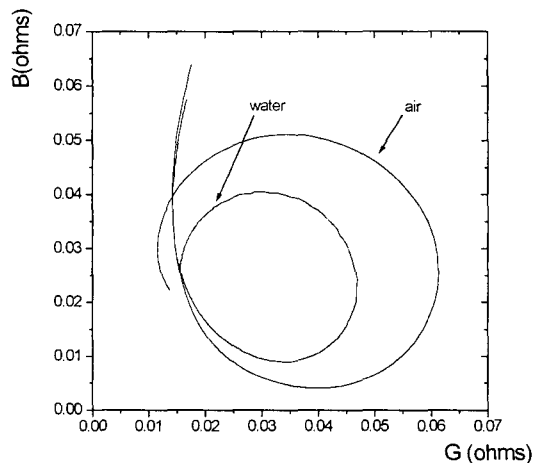


Fig. 3 Admittance diagram of the 1-3 composite transducer at the central frequency of 1.65MHz

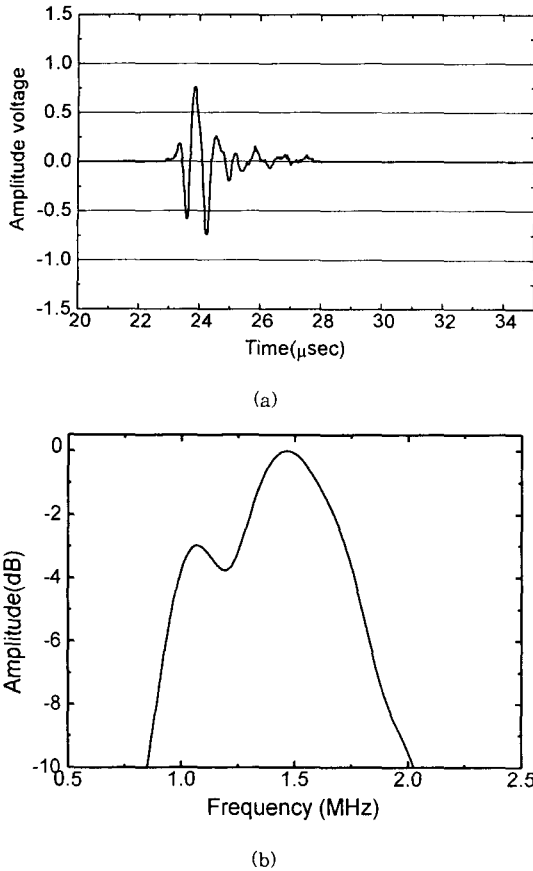


Fig. 4 (a) Impulse response and (b) Spectrum of the impulse response for the 1-3 composite transducer

다 큰 0.54로 얻어져 높은 전기기계 결합계수를 나타내고 있어서 전기음향 변환효율이 향상되었음을 알 수 있다.

Fig. 4(a)는 1-3 압전복합변환자를 통해 수신된 임펄스 응답파형을 나타낸 것이고, Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)의 임펄스 응답파형을 주파수 스펙트럼(spectrum)으로 나타낸 것이다. 1-3형 초음파 변환자의 주파수 대역폭(통상 -6dB)은 중심주파수 1.65MHz를 기준으로 약 66%로 나타났으며, 기계적 품질계수는 약 1.5정도다. 일반적으로 단일상 PZT의 주파수 대역폭은 20%내외로 보고되고 있으며, 기계적 품질계수는 80으로 상당히 높게 나타나고 있다. [9] PZT 체적비가 40%이하에서는 기계적 품질계수가 10이하로 단일상에 비해 상당히 작아진다고 하였으며, 이는 pulse 상승시간이 빠르고 반사파의 진폭이 상당

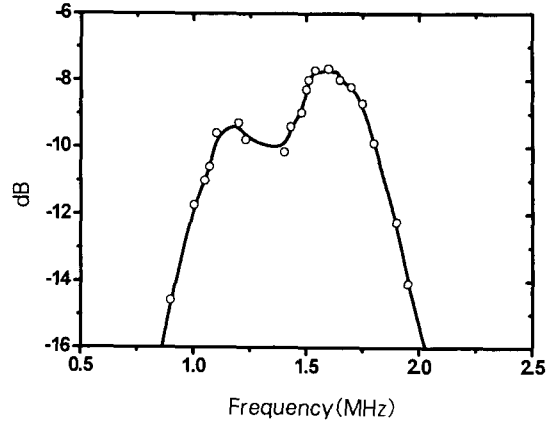


Fig. 5 Two-way insertion losses of the 1-3 composite transducer with a central frequency of 1.65MHz

히 커져 광대역 트랜스듀서로서의 응용 가능성이 아주 높다고 할 수 있다. 이는 광대역 변환자 및 수중 청음기로서의 응용 가능성을 효과적으로 보여주는 것이다.

Fig. 5는 제작된 1-3 초음파 변환자의 Toneburst pulse-echo 방법으로 측정된 주파수 변화에 따른 수중에서의 삽입손실을 나타낸 그래프이다. 한 개의 변환자를 송·수신 겸용으로 사용하여 측정하였다. 삽입손실은 변환자에 인가되는 전압의 크기와 반사판으로부터 반사되어 변환자에 수신되는 신호의 전압의 크기를 비교함으로써 측정할 수 있다. 변환자와 반사판 사이의 거리는 음파 전달 시 발생하는 에너지의 손실을 최소화 하기 위해 근거리 음장의 1/10인 지점에 설치하였으며, 함수 발생기의 주파수를 14.7KHz로 일정하게 하고 신호발생기의 주파수를 변환자의 두께방향 공진 주파수인 1.65MHz를 중심으로 100KHz간격으로 변화시키면서 반사파의 검출이 가능한 주파수까지 측정하여 입력전압에 대한 반사파의 전압의 비로 나타내었다. 그 결과 제작된 1-3 초음파변환자는 중심주파수 부근인 1.65MHz에서 약 8dB로 가장 낮은 손실을 가지는 것으로 나타났다. 이는 앞에서 측정한 임펄스 응답특성 곡선의 스펙트럼(spectrum)에 대한 결과와 아주 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 주파수 대역폭은 6dB 강하법을 이용한 결과 중심주파수 1.65MHz를 중심으로 약 67%(Q value = 1.5)로 나타남을 알 수 있었다.

4. 결 론

압전 세라믹인 PZT와 고분자 매질인 에폭시 수지를 dicing-filling 방법을 사용하여 1-3 압전복합체를 제작하였고, 이를 재료로 초음파 변환자를 제작하였으며, 두께방향 공진주파수인 1.63MHz를 중심으로 각종 음향 특성을 조사하였다.

1-3 압전복합변환자의 비유전율(733)은 단일상 PZT의 비유전율(1400)에 비해 상당히 낮아져 물을 매체로 한 음향 변환기에서 효율을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 1-3 압전복합변환자의 두께방향 전기기계 결합계수는 단일상(0.52) 보다 높은 0.54이고, 전기음향 변환효율이 양호함을 알 수 있었다. 기계적 품질계수는 1.65MHz를 중심으로 측정한 결과 1.5로 이는 주파수 대역폭이 67%임을 나타내고, 따라서 광대역 트랜스듀서로서의 응용 가능성을 효과적으로 보여주었다.

이상의 결과로 인해 실제 초음파용 변환자로 1-3 압전복합체가 응용될 경우 압전 및 음향 특성면을 고려하여 볼 때 기존의 단일상 PZT에 비해 광대역, 고효율의 변환자로써 더욱 효과적인 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] L. A. Pauer, "Flexible piezoelectric materials", IEEE Int'l. Conf. Res., pp. 1-5, (1973)
- [2] R. E. Newnham et al., Composite piezoelectric transducers, Mater. Eng., Vol. 2, pp. 93-106, (1980)
- [3] A. Safari, A. Halliyal and R. E. Newnham, "Transverse honeycomb composite transducers", Mat. Res. Bull., Vol. 17, pp. 301, (1982)
- [4] T. R. Gururaja, et al., "Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer applications. part 1: resonant modes of vibration of PZT rod-polymer composites", IEEE Trans. Sonics Ultrason., Vol. SU-32, No. 4, pp. 481-498, (1985)
- [5] B. A. Auld and W. Wang, "Acoustic

wave vibration in composite plate", in Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp. 528-532, (1984)

- [6] A. D. Nayfeh, R. L. Crane and W. C. Hoppe, "Reflection of acoustic waves from water/composite interfaces", J. Appl. Phys., Vol. 55, No. 3, pp. 685-689, (1984)
- [7] W. A. Smith, et al., "Properties of composite piezoelectric materials for ultrasonic transducers", in Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp. 539-544, (1984)
- [8] K. R. Erikson, "Tone-burst testing of pulse-echo transducers", IEEE Trans. Sonics and Ultrason., Vol. SU-26, No. 1, (1979)
- [9] Geon Sa-Gong, et al., "Poling study and piezoelectric/polymer composite for hydrophone application", J. of KIEE, Vol. 4, No. 1, pp. 27-31, (1991)
- [10] 尾上: "日本音響學會講演論文集", Vol. 11, (1964)