

“Dice와 fill” 방식을 이용한 1-3 압전복합체의 제조와 횡방향 단위 크기에 따른 압전특성 평가

Fabrication of 1-3 Piezo-composites with a “Dice & Fill” Method and Characterization of Their Piezoelectric Properties as a Function of Lateral Spatial Scale

김영덕*[†], 김광일*, 정우철*, 김홍락*, 김동수*

Young-Deog Kim*[†], Kwang-Il Kim*, Woo-Cheol Jeong*, Heung-Rak Kim* and Dong-Su Kim*

초 록 NDT나 의료용 영상장치에 응용되는 압전복합체는 일반적인 세라믹이나 고분자 압전재료에 비하여 많은 장점을 가진다. 이들 응용분야에서는 전기기계결합계수가 높아야 하고, 음향임피던스가 낮아야 한다. 그러나, 압전복합체의 횡방향 단위 크기가 조밀하지 못할 경우 횡방향으로 진행되는 판파에 의한 불필요한 진동이 표면에 발생하게 된다. 횡방향 단위 크기와 세라믹 체적비에 따른 압전 특성을 조사하기 위하여 PMN-PZT 세라믹과 Epofix 에폭시로 에폭시의 폭의 달리하면서 1-3 형 압전복합체를 제작하였다. 제작된 1-3 형 압전복합체의 두께방향 진동모드의 전기기계결합계수, 음향임피던스는 각각 0.36~0.64, 9.8~22.7 MRayl로 나타났으며, 횡방향 단위크기가 줄어들수록 횡방향 모드 공진 주파수가 증가하였다.

주요용어: 압전복합체, 초음파변환자, PZT, 에폭시, 전기기계결합계수, 음향임피던스

Abstract The piezoelectric composites had many advantages in comparison with conventional piezoelectric ceramics and piezopolymers for ultrasonic transducers used in NDT and in medical ultrasonic imaging. The electromechanical coupling coefficient should be high and the acoustic impedance should be low in these applications. However, the cross-coupling with spurious oscillations caused by laterally running plate waves exhibited complex motions in the surfaces of piezoelectric composites with coarse lateral spatial scale. The thickness mode electromechanical coupling coefficient of 1-3 type of piezoelectric composites were 0.36 to 0.64, and the acoustic impedance of them were 9.8 to 22.7 MRayl. The lateral resonance frequency of 1-3 type piezoelectric composites shifted to high frequency region with decreasing lateral spatial scale.

Keywords: piezo-composite, ultrasonic transducer, PZT, epoxy, electromechanical coupling coefficient, acoustic impedance

1. 서 론

의료용 진단기구나 비파괴검사 기기에서 초음파 변환

자(ultrasonic transducer)는 초음파를 발생시키고 받아들이는 가장 핵심부품으로, 전기적 에너지를 기계적 에너지로 또는 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 압

전효과를 이용한 기기이다. 이러한 응용분야에 사용되는 초음파 변환자는 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하고 또 역으로 변환하는 효율이 높아야 하고, 매질과의 임피던스 정합이 적절해야 하며, 초음파 변환자를 구동하고 신호를 받아들이는 전자장치와의 전기적인 임피던스 정합이 적절해야 한다[1]. 이들과 관련되는 압전상수는 전기기계 결합계수(k_t), 음향임피던스(Z), 유전상수(ϵ)이다. 즉, 높은 감도의 초음파 변환자를 얻기 위해서는 초음파를 발생하고 수신하는데 사용되는 압전재료의 전기기계결합계수가 높아야 한다. 발생한 신호가 매질인 인체나 탐상하고자 하는 물질 내부로 손실없이 투과 되기 위해서는 재료의 음향 임피던스의 조절(3~15 Mrayl)이 가능해야 한다. 또한 초음파를 발생하기 위한 전자장치의 구동부와 반사된 신호를 수신하는 전자장치 수신부와의 전기적인 정합을 위해서 재료의 유전상수 값(비유전상수 : 100이상)을 조절할 수 있어야 한다.

전기기계 결합계수가 높고, 압전성이 우수한 장점을 가진 PZT[Pb(Zr,Ti)O₃] 세라믹스가 초음파변환자용 재료로 가장 많이 이용되고 있지만, 의료용이나 비파괴검사 분야에서 초음파변환자의 부하는 생체 또는 접촉매질로 액체를 사용한 고체이므로, 이들의 음향임피던스는 PZT 보다 아주 낮은 값을 가지므로 음향 임피던스 부정합으로 인한 감도 특성 저하가 불가피하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Jeffrey[2] 등이 초음파 파장의 1/4이 되는 두께의 정합층(matching layer)을 압전진동자 전면에 부착하여 감도 특성 및 주파수 특성을 개선할 수 있는 구조를 제안하였다. 그러나, 수 MHz 대의 주파수를 사용할 경우 정합층의 두께가 0.1~0.2mm 정도를 가지므로 제작하기가 어려운 단점이 있다.

한편, 압전 특성이 우수한 세라믹과 음향 임피던스가 낮은 고분자를 혼합한 압전 복합체가 세라믹과 고분자 압전재료 각각의 장점을 살릴 수 있으므로 1980년대 부터 많은 연구가 진행되고 있다[3]. 이들 압전복합체 중 1-3 형 압전복합체가 k_t 값이 0.6 에서 0.75 정도로 세라믹에 비해 크고, 음향 임피던스는 10MRayl 이하로 줄일 수 있으며, 유전상수 값도 10~1000 정도로 조절할 수 있어 초음파변환자용 재료로 각광받고 있다. 그러나, 이러한 1-3 형 압전복합체는 횡방향으로 전파하는 판파가 횡방향 단위크기에 의하여 Bragg 회절되어 나타나는 stop-band 주파수[4]에 따라 응용에 제한이 따르게 된다.

이에 본 연구에서는 (Pb_{0.95}Ba_{0.05})(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.1}Zr_{0.45}Ti_{0.45}O₃(PMN-PZT) 세라믹과 Epofix(Struers Inc.) 에폭

시를 이용하여 "Dice와 Fill" 방식으로 1-3 형 압전복합체를 세라믹상의 크기는 각각 0.2mm로 고정하고, polymer 상의 크기를 0.042mm~0.166mm로 변화시키면서 제조하여, 세라믹 단위크기에 따른 압전특성을 측정하고, bulk PMN-PZT와 Epofix 에폭시 재료의 기본물리상수를 이용하여 Smith 모델로 계산한 이론적인 결과와 비교, 분석하였으며, 또한 횡방향 단위크기에 따른 횡방향 진동모드의 공진주파수의 변화를 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 1-3 형 압전복합체의 제조

직경 15mm, 두께 2mm로 연마된 PMN-PZT 세라믹을 가로와 세로가 각각 40mm인 실리콘 웨이퍼 윗면에 5분 에폭시(araldite corp.)로 접착하고, 실리콘 웨이퍼 아래면에 웨이퍼용 접착비닐을 접착하여 dicing saw(DAD-2H/6T, Disco Corp.)에 진공 흡착하였다. 흡착된 PMN-PZT 시편을 0.5mm/sec의 feed 속도로 0.2mm 간격으로 1mm 깊이의 홈을 가공한 후, 시편을 90° 회전하여 먼저 가공된 홈에 수직인 방향으로 0.2mm 간격으로 1mm 깊이로 홈을 가공하여 바둑판 모양이 되도록 하였다. 상기 방법으로 가공된 세라믹의 전자현미경(SEM) 사진을 Fig. 1에 나타내었다.

이때 절단에 사용된 blade의 회전속도는 30,000 rpm 이었고, 두께는 각각 0.03mm, 0.04mm, 0.07mm, 0.12mm, 0.15mm로 변화시켰으며, 시편 가공에 의한 stress를 제거하기 위하여 시간당 150°C 승온하여 800°C에서 2시간 동



Fig. 1 SEM image of diced PMN-PZT ceramic

안 열처리 하였다. 열처리된 시편을 상온에서 경화가 가능하고 수축이 적으며, 온도 변화에 비교적 안정한 Epofix(Struers corp.) 에폭시(이하 에폭시)를 진공 충전시키고, 원하는 두께로 연마한 후 진공 공정을 거쳐 2.5kV/cm의 전기장 하에서 분극처리 하여 1-3 형 압전복합재를 제조하였다. Fig. 2에는 1-3형 압전 복합재의 제조공정을 나타내었고, Fig. 3에는 최종 제작된 1-3 형 압전복합재의 사진을 나타내었다. 그림에서 짙은 검은색 부분이 Epofix 에폭시이고, 표면에 거칠게 나타난 부분이 PMN-PZT 이다. 절단부의 형상이 깨끗하게 나타나 mechanical dice 상태가 양호한 것으로 판단되며, 시편은 외경이 17mm이고 두께는 0.49mm~0.51mm 사이의 원판형 모양으로 제작되었다.

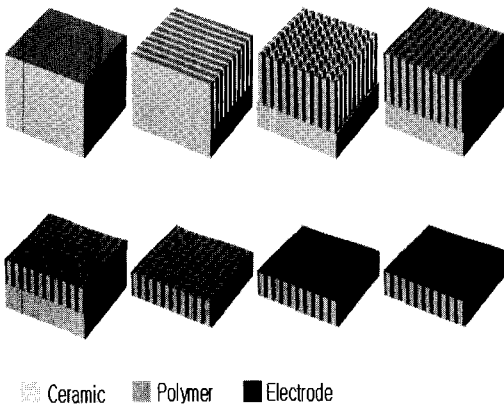


Fig. 2 Fabrication flow of 1-3 type piezocomposites

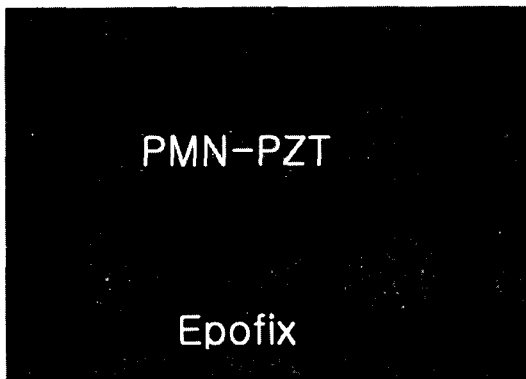


Fig. 3 A photograph of fabricated 1-3 piezocompoistes

2.2. 압전특성 측정

초음파변환자에서 압전재료의 두께방향모드(thickness mode)가 초음파를 송, 수신하는 데 사용되는 가장 중요한 진동모드이므로, 본 연구에서는 두께방향모드의 압전 특성을 조사하였다. 압전전하상수는 d33 meter(Channel Products, Inc.)를 사용하여 측정하였고, 유전상수는 1kHz에서 정전용량으로부터 계산하였다. 전기기계결합계수와 기계적 품질계수는 임피던스 분석기(HP 4194A)를 이용하여 직렬과 병렬 공진주파수를 측정하여 IRE[5] 표준공진법에 주어진 아래의 식으로 구하였다.

$$k_t^2 = \frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_p} \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{\Delta f}{f_p}\right) \quad (1)$$

$$\frac{1}{Q_m} = 4\pi\Delta f|Z_m|(C_0 + C_1) \quad (2)$$

$$N_t^D = f_p t \quad (3)$$

여기서, f_s , f_p 는 각각 직렬과 병렬 공진주파수, $\Delta f = f_p - f_s$, $|Z_m|$ 은 임피던스가 최소가 되는 공진주파수에서의 임피던스, $(C_0 + C_1)$ 은 1kHz에서 측정된 정전용량 값이고, t 는 시료의 분극방향에 대한 두께이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 1-3 형 PZT-에폭시 압전복합재의 기본물성

Mechanical dice 방법으로 구조물을 만들 때 시간이 지나면서 blade 날이 닳거나 회전방향에 수직인 방향으로의 진동 발생에 의해 하나의 압전 복합재 재료 안에서 만들어진 내부 구조물 각각의 크기가 달라질 수 있으므로 구조물의 크기를 직접 측정하여 각 성분의 체적비를 계산하는 것은 거의 불가능하여 본 연구에서는 아래에 언급한 간접적인 방법으로 체적비를 구하였다. 복합재를 구성하는 각 성분의 밀도를 알고 있을 때 1-3 형 PZT-에폭시 압전복합재의 밀도는

$$\bar{\rho} = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 \quad (4)$$

으로 주어진다. 여기서, 아래첨자 1은 PMN-PZT 세라믹을, 아래첨자 2는 Epofix 에폭시를 나타낸다. 식 (4)에서 $V_1 + V_2 = 1$ 이므로 각 성분의 밀도를 알고 1-3 형 PZT-

에폭시 압전복합체의 밀도 $\bar{\rho}$ 를 직접 측정하면 각 성분의 체적비를 구할 수 있다. PMN-PZT와 Epofix 밀도는 각각 7.696g/cm^3 과 1.17g/cm^3 이므로, 측정된 1-3 형 PZT-에폭시 압전복합체 밀도와 그로부터 식 (4)를 이용하여 계산한 세라믹 체적비를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Density and volume fraction of ceramic components for fabricated 1-3 type piezocomposites

시료 번호	두께 (mm)	세라믹폭 (mm)	polymer폭 (mm)	외경 (mm)	밀도 (g/cm^3)	체적비 (%)
1	0.5	0.175	0.166	17	2.545	21.0696
2	0.499	0.175	0.142	17	2.805	25.0536
3	0.492	0.180	0.089	17	3.533	36.209
4	0.5	0.165	0.068	17	4.014	43.5795
5	0.5	0.165	0.046	17	4.722	54.4284

1-3 형 PZT-에폭시 압전복합체의 유전특성을 살펴보기 위하여 주파수 1kHz에서의 정전용량과 유전손실을 LCR meter(HP4274)로 측정하여 원판형 축전기의 정전용량에 대한 관계식

$$C = \frac{\epsilon_{33}^T A}{t} \quad (5)$$

으로부터 비 유전상수를 계산하였다. 여기서 ϵ_{33}^T 는 1-3 형 PZT-에폭시 압전복합체의 분극방향에 대한 유전상수, A는 전극면적, t는 시료의 두께를 나타낸다.

병렬구조를 가지는 1-3 형 PZT-에폭시 압전복합체의 유전상수 ϵ_{33}^T [6]은

$$\epsilon_{33}^T = V_1 [\epsilon_{33}^T - d_{33}^2 \frac{V_2}{V_1 s_{11} + V_2 s_{33}^E}] + V_2 \epsilon_{11} \quad (6)$$

으로 주어진다. 여기서 V_1, V_2 는 세라믹 체적비와 에폭시의 체적비를 나타내고, $\epsilon_{33}^T, s_{33}^E$ 는 PMN-PZT 세라믹의 분극방향 유전상수, elastic compliance이며, ϵ_{11}, s_{11} 은 에폭시의 유전상수와 elastic compliance로써 각각의 값을 Table 2에 나타내었다.

세라믹 체적비에 따른 비 유전상수의 변화를 분석하기 위하여 1-3 형 PZT-에폭시 압전복합체의 세라믹 상과 polymer 상의 상호작용을 고려한 식 (6)의 이론적인 결과와 실제 측정결과를 Fig 4에 나타내었다. 식 (6)에서 우변 두 번째 항은 세라믹 상과 에폭시 상의 상호작용을 고려한 항으로써 이의 도입으로 인하여 1-3 형 PZT-에폭시 압전복합체의 비 유전상수 값이 줄어들 것으로 예측된다. 비 유전상수는 세라믹 체적비가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 특성을 가져 실제 측정값과 이론적인 결과가 잘 일치하였다.

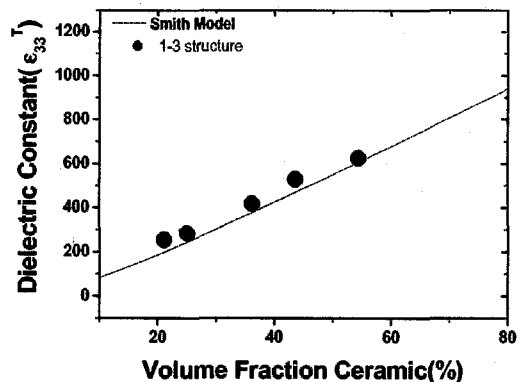


Fig. 4 Variation of dielectric constant (ϵ_{33}^T) with volume fraction of ceramic

Table 2 Elastic and dielectric constants of PMN-PZT ceramic and Epofix epoxy

구분	Epofix 에폭시		PMN-PZT 세라믹	
elastic compliance	$s_{11} (10^{-10} \text{m}^2/\text{N})$	3.1544	$s_{11}^E (10^{-11} \text{m}^2/\text{N})$	1.497
	$s_{12} (10^{-10} \text{m}^2/\text{N})$	-1.2666	$s_{12}^E (10^{-11} \text{m}^2/\text{N})$	-0.449
	$s_{44} (10^{-10} \text{m}^2/\text{N})$	8.8362	$s_{33}^E (10^{-11} \text{m}^2/\text{N})$	2.778
elastic stiffness	$c_{11} (10^{10} \text{N/m}^2)$	0.6902	$c_{11}^E (10^{11} \text{N/m}^2)$	1.80835
	$c_{12} (10^{10} \text{N/m}^2)$	0.4638	$c_{12}^E (10^{11} \text{N/m}^2)$	1.506
	$s_{44} (10^{10} \text{N/m}^2)$	0.1132	$c_{33}^E (10^{11} \text{N/m}^2)$	1.17

압전전하상수와 압전전압상수는 각각 초음파변환자의 송, 수신특성을 결정하는 물리상수이다. 일반적으로 두 상수의 곱을 초음파 변환자의 이점상수(figure of merit)로 정의하여 초음파변환자의 효율을 나타내는 척도로 삼는다. d_{33} -meter는 균질한 재료에 대해서는 정확한 측정 결과를 얻을 수 있지만 1-3 형 PZT-에폭시 압전복합재의 경우 d_{33} -meter 접촉부가 세라믹상에 접촉될 때와 에폭시 상에 접촉될 때 측정값이 달라져 오차가 생길 수가 있으므로, 시료의 여러 부위에 대하여 20회 측정한 값을 평균하여 구하였으며, 분극 후 24시간이 경과한 다음 측정하였다. 그리고, 압전전압상수(g_{33})는 측정된 압전전하상수와 유전상수로부터

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_{33}} \quad (7)$$

을 이용하여 구할 수 있다. 세라믹상의 폭 d_c 와 polymer상의 폭 d_p 의 비에 따른 1-3 형 PZT-에폭시 압전복합재의 압전전하상수(d_{33})와 압전전압상수(g_{33})의 변화를 Fig. 5에 나타내었다.

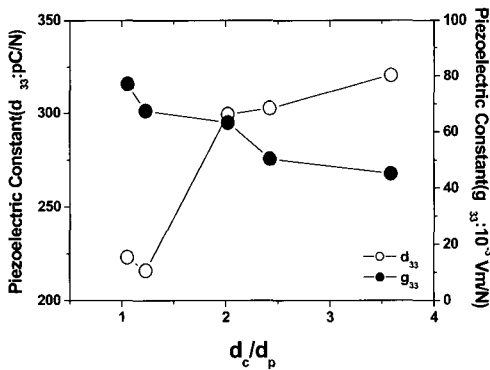


Fig. 5 Variation of piezoelectric constant(d_{33} , g_{33}) with ratio of d_c and d_p

d_c / d_p 가 커질수록 즉, 에폭시 상의 폭이 줄어들수록 d_{33} 은 증가하고, g_{33} 은 감소하는 경향을 나타내었다. 세라믹 상 폭이 폴리머 상 폭의 2배가 될 때까지는 d_{33} 이 급격히 증가하였다가 그 이상의 값에서는 완만히 증가하는 특성을 나타내어, 세라믹 체적비의 증가와 거의 같은 기울기를 가졌다. 이로부터 d_c / d_p 가 2 이하에서는 압전전하상수 값이 에폭시 상에 의한 clamping 효과로 급격하게 줄어들며, d_c / d_p 가 2 이상의 값을 갖게 되면 세라믹 체적비의 증가에 따라 점진적으로 증가하는 것으로 해석

할 수 있다. 실제 응용을 위한 1-3 형 PZT-에폭시 압전복합재의 설계시 원하는 압전전하상수를 얻기 위해서는 d_c / d_p 를 2 근처로 제조하는 것이 압전전하상수 값을 유지하면서 세라믹 최적비를 최소로 하여 음향 임피던스 값을 낮출 수 있음을 알 수 있고, 또한 d_c / d_p 가 2 일때 이점상수가 18,931로 가장 커 초음파변환자 응용시 효율이 가장 높음을 알 수 있었다.

3.2. 1-3 형 PZT-에폭시 압전복합재의 압전특성

제조한 1-3 형 PZT-에폭시 압전복합재는 직경이 17mm이고, 두께가 0.5mm인 원판형으로 두께에 비하여 직경이 34배 정도 큰 값을 가진다. 이러한 모양을 갖는 압전체의 주 공진모드는 경방향(planar) 모드 이고, 두께방향 진동 모드도 존재한다. 또한 1-3 형 압전복합재의 횡방향 단위 크기인 주기 d (period, d_c+d_p)와 압전체에서 발생하는 판파의 Bragg 회절에 의한 횡방향 모드가 존재한다. 실제 응용에서는 두께방향모드가 중요한 진동모드이므로, 세라믹 상의 폭은 고정하고 polymer 상의 폭을 변화시켜 횡방향 단위 크기에 따른 두께방향모드의 압전특성과 이때 횡방향 단위크기인 주기 d 에 따른 횡방향 모드의 변화를 관찰하였다.

1-3 형 압전복합재에 대한 두께방향 진동모드의 모양을 Fig. 6에 나타내었다. 외부에서 인가한 전기장에 의해 세라믹 상이 분극방향과 그에 수직인 방향으로 번갈아 수축과 신장을 반복하게 된다. 이때 분극방향에 수직한

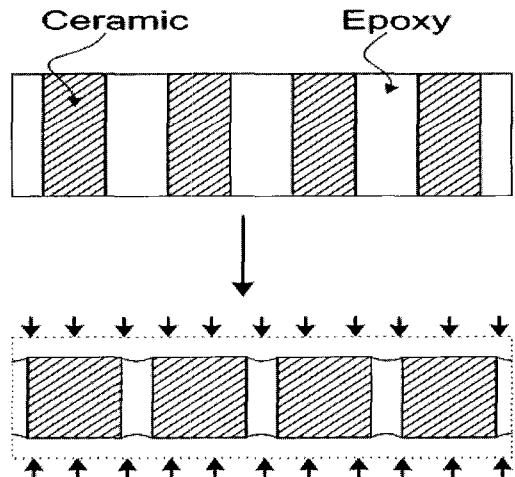


Fig. 6 Thickness mode resonance of 1-3 type piezocomposites

방향으로 세라믹의 신장을 에폭시 상이 흡수하게 되어 전체적인 구조에서 보면 횡방향으로의 strain은 0이 되는 laterally clamping 상태를 유지하게 된다.

두께방향모드의 직렬과 병렬 공진주파수는 3MHz~4MHz 이고, d_c / d_p 가 증가함에 따라 즉, 세라믹 체적비가 증가함에 따라 증가하는 경향으로 나타났으며, PMN-PZT bulk 세라믹에 비하여 1-3 형 PZT-에폭시 압전복합체의 직렬과 병렬 공진 주파수는 각각 27%, 22% 정도 줄어들었다. 세라믹 상의 폭과 에폭시 상의 폭 비에 따른 전기기계결합계수(k_t)와 기계적 품질계수(Q_m) 및 음향 임피던스를 Fig. 7에 나타내었다.

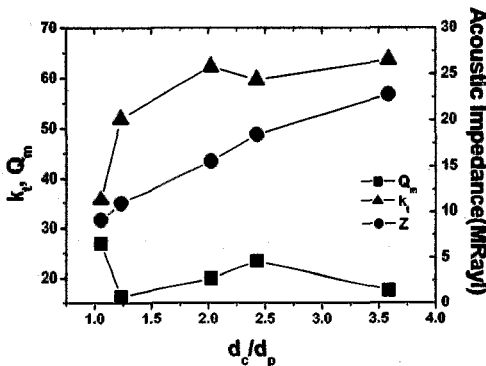


Fig. 7 Variation of electromechanical coefficient, mechanical quality factor, and acoustic impedance with ratio of d_c and d_p

기계적품질계수 Q_m 은 bulk에 비하여 최대 82%에서 최소 64% 까지 줄어들어 bulk에 비하여 주파수 대역이 넓은 초음파 변환자를 제조할 수 있을 것으로 여겨진다. 전기기계결합계수 k_t 는 bulk에 비해 최대 22.7% 정도 증가하였고, d_c / d_p 가 1.05에서 2.02로 증가함에 따라 급격히 증가하다가 그 이상에서는 거의 일정하게 유지되는 경향을 보여주고 있다. 이는 d_c / d_p 가 낮은 영역 즉, 체적비가 낮은 영역에서는 세라믹 상 주위의 에폭시 상이 크기가 작은 세라믹을 경직(stiffen) 시킴으로 인해 전기기계결합계수가 급격히 낮아지게 되고, d_c / d_p 가 에폭시에 의한 stiffen 효과와 clamping 효과가 동시에 작용하는 영역에서는 종방향모드의 전기기계결합계수(k_{33}) 보다 약간 작은 값을 일정하게 유지하다가 에폭시에 의한 clamping 효과가 stiffen 효과보다 더 커지는 영역에서는 bulk 세라믹의 두께방향 전기기계결합계수로 줄어드는 것으로 해석된다. 음향 임피던스는 9.8MRayl~22.7MRayl 사이의

값을 가졌고, d_c/d_p 가 줄어들어 따라 선형적으로 증가하는 경향을 가짐을 알 수 있다.

횡방향 단위 크기인 주기 d와 압전체에서 발생하는 판파에 의한 횡방향모드 공진 발생기구를 Fig. 8에 나타내었고, Bragg의 반사법칙에 따라 가로방향과 대각선 방향의 두 가지 횡방향 모드 공진이 발생[7]한다. 이 두가지 횡방향 모드와 두께방향 진동모드의 간섭을 조사하기 위하여

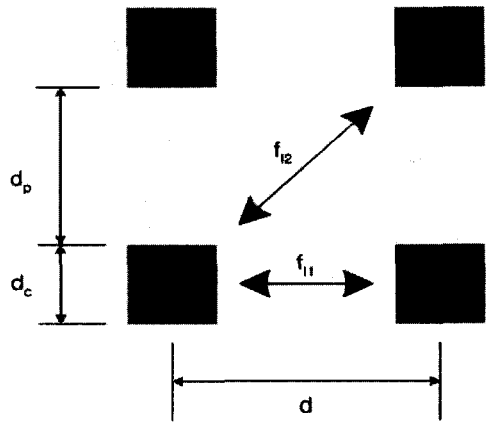


Fig. 8 Lateral mode resonance in 1-3 type piezocomposites

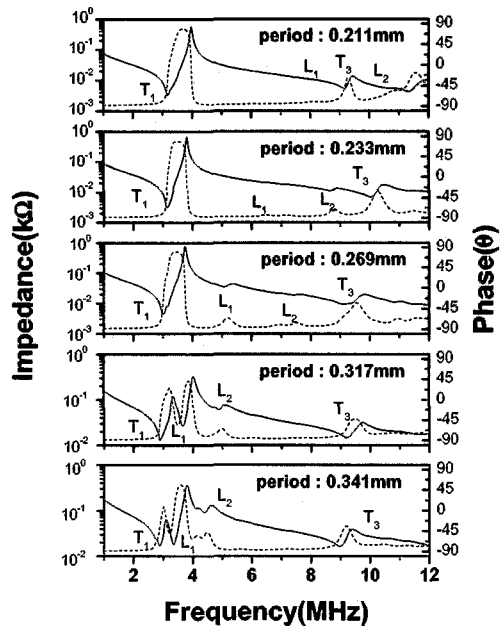


Fig. 9 Frequency dependency of impedance curve of 1-3 type piezocomposites

횡방향 주기 d 를 달리한 시편에 대하여 주파수 의존성 임피던스 곡선을 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 T_1 , T_2 는 두께방향 모드의 공진주파수를, L_1 , L_2 는 횡방향 모드의 공진주파수를 나타낸다.

주기 d 가 적어짐에 따라 즉, 에폭시 폭이 줄어들어 따라 횡방향 모드가 고주파 쪽으로 이동하는 경향을 알 수 있으며, d_c / d_b 가 2 이하에서는 두께방향모드와 횡방향 모드가 간섭을 일으키는 것을 확인하였고, d_c / d_b 가 2 이상에서는 횡방향 모드의 공진주파수가 두께방향 공진주파수의 약 2배 이상이 되어 두께방향 모드 공진주파수의 분할 현상이 없어진 것을 알 수 있다.

4. 결 론

"Dice와 Fill" 방법을 이용하여 세라믹 상의 폭은 고정하고, 에폭시 상의 폭을 변화시키면서 제조한 1-3 형 PZT-에폭시 압전복합재의 기본물성과 압전특성을 측정 한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 비 유전상수는 세라믹 체적비가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다.
- (2) 에폭시 상의 폭이 증가함에 따라 압전전하상수는 증가하고, 압전전압상수는 감소하였으며, d_c / d_b 가 2 일때 이점상수(figure of merit) 값이 18,931로 가장 큰 값을 가졌다.
- (3) 두께방향모드의 전기기계결합계수는 0.36~0.64, 기계적 품질계수는 16~23, 그리고 음향임피던스는 9.8MRayl~22.7MRayl을 가졌다. 전기기계결합계수는 d_c / d_b 가 2일 때 0.64로 최대값을, 음향임피던스는 d_c / d_b 가 줄어들어 따라 선형적으로 증가하였다.
- (4) 1-3 형 PZT-에폭시 압전복합재의 횡방향 단위 크기인 주기 d 와 대각선 방향인 $\sqrt{2}d$ 에 의한 두 개의 Bragg 반사조건을 만족하는 횡방향모드 공진주파수를 갖는다. 이때 횡방향 공진주파수는 d_c / d_b 가 감소함에 따라 고주파수로 이동하였고, d_c / d_b 가 2 이상일 때 두께방향모드 공진주파수의 약 2배 이상이 되었다.

참고문헌

- [1] H. L. W. Chan, and J. Unsworth, "Simple Model for Piezoelectric Ceramic/Polymer 1-3 Composites Used in Ultrasonic Transducer Applications," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 36, No. 4, pp. 434-441, (1989)
- [2] J. H. Goll, "Design of Broad-Band Fluid-Loaded Ultrasonic Transducers," *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol. SU-26, No. 6, pp. 385-393, (1979)
- [3] T. R. Gururaja, et al., "Piezoelectric Composite Materials for Ultrasonic Transducer Applications. Part I : Resonant Modes of Vibration of PZT Rod-polymer Composites," *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol. SU-32, No. 4, pp. 481-498, (1985)
- [4] W. A. Smith, "The Role of Piezocomposites in Ultrasonic Transducers," *Ultrasonics Symposium*, pp. 755-766, (1989)
- [5] H. Jaffe, D. Berlincourt, T. Kinsley, T.M. Lambert, and D. Schwartz, "IRE Standards on Piezoelectric Crystals: Measurements of Piezoelectric Ceramics," *Proceedings of the IRE*, 61 IRE 14.S1, pp. 1161-1169, (1961)
- [6] W. A. Smith, "Modeling 1-3 Composites Piezoelectrics: Hydrostatic Response", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 40, No. 1, pp. 41-49, (1993)
- [7] D. C. Certon, N. Felix, E. Lacaze, F. Teston, and F. Padat, "Investigation of Cross-Coupling in 1-3 Piezocomposite Arrays," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 48, No. 1, pp. 85-92, (2001)