

압전 배열 트랜스듀서의 진동 요소간 kerf 충전 매질에 따른 특성변화의 실험적 고찰

Experimental Investigation of Characteristics Change by Kerf-Fill Material between Arrayed Elements of a Piezoelectric Transducer

김 정 순*, 김 무 준**, 하 강 렬**
(Jungsoon Kim*, Moojoon Kim**, Kanglyeol Ha**)

*동명대학교 멀티미디어공학과, **부경대학교 물리학과

(접수일자: 2008년 5월 8일; 수정일자: 2008년 6월 16일; 채택일자: 2008년 7월 21일)

의료용 초음파 프로브나 압전복합재료 트랜스듀서 등에 있어서는 배열된 압전세라믹 요소간의 공간, 즉 kerf에 주로 폴리머 계열의 물질을 충전하고 있다. 이 경우 압전 요소의 횡방향 진동모드의 경계조건이 바뀌어 실제 사용되는 종방향 진동모드의 공진 주파수에도 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 kerf충전 매질에 따른 공진주파수의 변화를 실험적으로 고찰하기 위하여 크기가 $14\text{ mm} \times 0.22\text{ mm} \times 0.44\text{ mm}$ 인 PZT 압전요소 선형배열에 의한 초음파 트랜스듀서를 제작하고, kerf충전 매질이 없는 경우와 특성이 다른 두 종류의 에폭시로 충전한 경우 각각에 대한 측정을 행하였다. 그 결과 kerf충전 매질에 따른 종방향 공진주파수의 천이 경향이 이론해석 결과와 유사함을 확인하였다.

핵심용어: 초음파 트랜스듀서, 압전세라믹, 선형배열, 배열요소, kerf충전 매질

투고분야: 초음파 및 탄성파분야 (4.3)

The kerfs between arrayed piezoelectric elements in a medical ultrasonic transducer or a piezoelectric composite transducer are generally filled by polymeric materials. The boundary condition of the elements for lateral mode vibration is changed according to the kerf-filling materials, so that the resonance frequency for longitudinal mode of the transducer is also varied. In this study, to investigate the resonance frequency variation for an arrayed transducer experimentally, the piezoelectric vibration elements of $14\text{ mm} \times 0.22\text{ mm} \times 0.44\text{ mm}$ were fabricated and those were linearly arrayed. And, the resonance frequencies were measured for three cases of kerf-filling condition, non-filling and two different kinds of epoxy filling. Conclusively, it is confirmed that the resonant frequency variation shows the similar tendency with the theoretical one for the longitudinal mode.

Keywords: Ultrasonic transducer, Piezoelectric ceramic, Linear array, Arrayed elements, Kerf-fill material

ASK subject classification: Ultrasonic and Elastic Waves (4.3)

I. 서론

많은 압전요소의 배열에 의해 만들어지는 의료용 초음파 프로브나 압전복합재료 트랜스듀서에 있어서는 배열된 압전세라믹 요소간의 공간에 폴리머 계열의 물질을 충전하여 사용하고 있다 [1]. 의료용 초음파 프로브에 있어서 압전요소는 주로 미세하게 가공된 PZT이며, 그 압

전요소간의 공간은 일반적으로 'kerf'라고 불린다. 초음파 프로브의 kerf에 폴리머 계열의 물질을 충전하는 것은 기본적으로 배열된 압전 PZT 요소들의 지지 및 방수를 위한 것이다 [2].

한편, 압전복합재료의 경우 pillar인 PZT 요소와 matrix에 해당하는 폴리머 매질은 다양한 형태의 결합구조를 가지며, 그 결합의 형태 및 크기, 폴리머 매질의 종류에 따라 진동자로서의 전기/기계적 변환 특성은 크게 달라진다 [3]. 이와 같이 압전요소의 주위를 다른 매질로 채우는 것은 그 압전요소의 경계조건을 변화시키는 것이므로

책임저자: 김 무 준 (kimmj@pknu.ac.kr)
608-737 부산시 남구 대연3동 599-1
부경대학교 자연과학대학 물리학과
(전화: 051-629-5572; 팩스: 051-629-5549)

그 요소에 전체가 가해졌을 때 진동특성은 kerf충진 매질의 물성에 따라 다르게 된다. 따라서 초음파 프로브의 음향특성을 파악하는데 있어서는 kerf 충진을 포함한 배열전체의 구조는 물론, 압전요소와 kerf충진 매질과의 상호관계에 의한 진동특성을 보다 명확히 고찰할 필요가 있다. 그러나 기존의 배열형 초음파 트랜스듀서 설계에 있어서는 압전요소 전체와 kerf충진 매질 전체와의 단순한 체적비를 파라미터로 하여 전기/기계적 변환특성의 해석을 행하고 있다 [4]. 그러한 해석은 선형배열 혹은 1-3 복합재료 등과 같이 일정 방향으로 나열된 배열의 경우 적용하기 곤란하다.

본 연구에서는 초음파 진단용 프로브의 배열소자를 대상으로 배열소자간의 간격 및 측면 kerf충진 매질의 물성에 따른 종방향 공진주파수의 변화를 해석하였다. 이론적 해석에는 압전진동자의 결합진동 이론을 도입하였다. 또한, 이론적 해석을 실험적으로 확인하기 위하여 크기가 14 mm×0.22 mm×0.44 mm인 PZT 압전요소에 의한 선형배열 초음파 트랜스듀서를 제작하고, 그 배열요소간의 kerf를 공기 (kerf충진 매질이 없음) 및 특성이 다른 두 종류의 에폭시로 kerf충진한 각 경우에 대해 종모드 공진주파수의 변화특성을 측정함바, 그 결과에 대해 보고한다.

II. 이론

그림 1에 나타낸 바와 같이 x 방향으로 충분히 긴 육면체의 압전진동자가 y 방향으로 선형배열 되어 있는 경우를 생각한다. 이 때 압전 진동자의 y 방향 폭을 y_p , 압전 소자간의 공간의 길이를 y_k 라 두며 압전 소자의 분극 방향인 z 방향의 두께를 z_p 라 둔다. 따라서 압전진동자의 종횡비는 $G = z_p/y_p$ 이다.

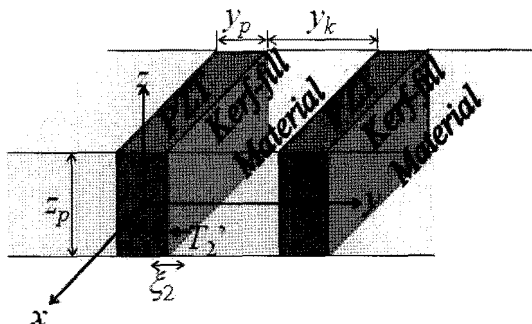


그림 1. 배열 초음파 트랜스듀서의 구조
Fig. 1. Structure of an ultrasonic transducer array.

여기서 전기적 경계조건은 $D_x = D_y = E_x = E_y = 0$ 이며 기계적 경계조건은 $S_1 = 0$ 이다. 압전진동자의 특성이 동일하고 그 배열이 균등하다면 압전체의 표면 ($y = y_p/2$)에서 y 방향의 변위 ξ_2 와 응력 T_2 와의 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\xi_2\left(z, E_z, \frac{y_p}{2}\right) = -\frac{y_k}{2c_{k11}^E} T_2\left(z, E_z, \frac{y_p}{2}\right). \quad (1)$$

여기서 c_{k11}^E 및 y_k 는 각각 kerf충진 매질의 탄성계수 및 y 방향의 길이이며 E_z 는 z 방향의 전계를 나타낸다. 압전체의 분극방향과 z 축 방향의 변형을 고려하면 압전체내에서 y 축 방향의 응력은 다음과 같이 쓸 수 있다 [2].

$$T_2(z, E_z) = -c_{k11}^E \frac{2}{y_k} \xi_2\left(\frac{y_p}{2}\right) + c_{23}^E \frac{\partial \xi_3}{\partial z} \Big|_{y=\frac{y_p}{2}} - e_{z1} E_z. \quad (2)$$

여기서, ξ_3 는 z 방향의 변위이며 c_{23}^E 및 e_{z1} 은 각각 압전체의 탄성계수 및 압전상수이다. x 방향으로 충분히 길다고 가정하였으므로 압전체의 구조방정식으로부터 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$T_2(z, E_z) = c_{11}^E \frac{\partial \xi_2}{\partial y} \Big|_{y=\frac{y_p}{2}} + c_{23}^E \frac{\partial \xi_3}{\partial y} \Big|_{y=\frac{y_p}{2}} - e_{z1} E_z. \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)으로부터

$$c_{k11}^E \frac{2}{y_k} \xi_2\left(\frac{y_p}{2}\right) = -c_{11}^E \frac{\partial \xi_2}{\partial y} \Big|_{y=\frac{y_p}{2}}. \quad (4)$$

압전체의 중앙 ($y = 0, z = 0$)에서 각 방향의 변위는 각각 0이 되어야 하므로 시험해를 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$\xi_2 = A_2 \sin k_2 y \cos k_3 z, \quad (5a)$$

$$\xi_3 = A_3 \cos k_2 y \sin k_3 z. \quad (5b)$$

여기서 k_2 및 k_3 는 각각 y 및 z 방향의 파수이며 A_2 및 A_3 는 적분상수이다. 식 (5a)를 식 (4)에 대입하여 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$\tan \frac{k_2 y_p}{2} = -\frac{c_{11}^E}{c_{k11}^E} \frac{k_2 y_k}{2}. \quad (6)$$

식 (6)으로부터 파수 k_2 는 다음과 같은 transcendental equation의 근으로부터 구할 수 있다 [5].

$$1 + \kappa^2 \frac{\tan Z}{Z} = 0, \quad (7)$$

여기서, $\kappa^2 = c_{41}^E y_p / c_{11}^E y_k$, $Z = k_2 y_p / 2$ 이다. 따라서 식 (7)의 근을 Z_k 라 두면 파수 k_2 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_2 = \frac{2Z_k}{y_p}. \quad (8)$$

또한 결합진동이 없는 경우 z 축 방향의 진동모드에 대한 파수 k_3 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k_3 = \frac{2X_t}{z_p}. \quad (9)$$

여기서 X_t 는 다음의 transcendental equation의 첫 번째 근이다 [5].

$$1 - k_t^2 \frac{\tan X}{X} = 0. \quad (10)$$

단, k_t 는 두께 진동모드에 대한 결합계수를 나타낸다.

한편, 압전진동자의 결합진동 이론으로부터 다음의 공진주파수에 대한 방정식을 얻을 수 있다 [6,7].

$$\left((\omega z_p)^2 - \frac{z_p^2 c_{11}^E k_2^2}{\rho} \right) \left((\omega z_p)^2 - \frac{z_p^2 c_{33}^D k_3^2}{\rho} \right) - \left(\frac{z_p^2 c_{13}^E k_2^2}{\rho} \right) \left(\frac{z_p^2 c_{13}^D k_3^2}{\rho} \right) = 0. \quad (11)$$

식 (11)을 풀면 아래와 같은 해를 얻을 수 있다.

$$f_{\omega z_p} = \left[\frac{c_{11}^E z_k^2 G^2 + 4c_{33}^D X_t^2 - \left\{ (c_{11}^E z_k^2 G^2 + c_{33}^D X_t^2) - 4c_{11}^E c_{33}^D z_k^2 X_t^2 G^2 (1 - I') \right\}^{1/2}}{2\pi^2 \rho} \right]^{1/2}, \quad (12)$$

$$f_{\omega z_p} = \left[\frac{c_{11}^E z_k^2 G^2 + 4c_{33}^D X_t^2 + \left\{ (c_{11}^E z_k^2 G^2 + c_{33}^D X_t^2) - 4c_{11}^E c_{33}^D z_k^2 X_t^2 G^2 (1 - I') \right\}^{1/2}}{2\pi^2 \rho} \right]^{1/2}. \quad (13)$$

여기서 $I' = \sqrt{\frac{c_{13}^E c_{13}^D}{c_{11}^E c_{33}^D}}$ 이다.

식 (12) 및 (13)에서 구한 두 공진 주파수는 종횡비 G 의

영역에 따라 다음과 같이 정의된다 [6].

$G < 1$ 경우 f_a : 횡모드 공진 주파수,

f_b : 종모드 공진 주파수

$G > 1$ 경우 f_a : 종모드 공진 주파수,

f_b : 횡모드 공진 주파수

III. 실험방법

식 (12) 및 식 (13)에 나타난 kerf 충전 매질에 따른 종진동 공진주파수의 변화를 확인하기 위하여 그림 2와 같은 구조의 선형배열 압전 초음파 트랜스듀서를 제작하였다. 실험에 사용된 압전소자는 PZT5H이고, 알루미늄과 에폭시를 혼합하여 만든 배면에 두께 0.44 mm의 압전세라믹을 접착시키고 정밀절단 톱 (dicing saw)를 사용하여 0.2 mm의 kerf를 만들었다. 이때 각 진동요소에 해당되는 세라믹의 폭은 0.22 mm가 되도록 하였다. 또한 상술한 이론에서 가정하였듯이 x 방향으로 충분히 길게 하기 위하여 압전 진동요소의 y 방향 폭의 50배 이상이 되도록 14 mm로 제작하였다. 그림 2(b)에 제작한 선형배열 트랜스듀서의 사진을 나타내었다. 실험방법으로는 그림 2(a)

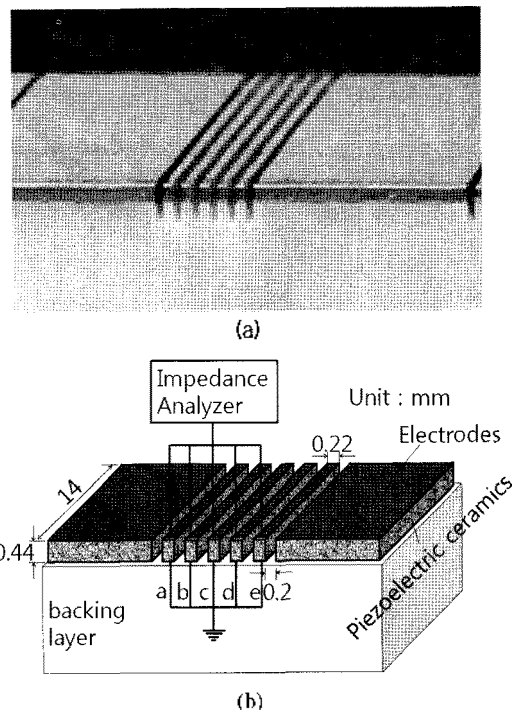


그림 2. (a) 압전세라믹으로 제작한 배열 초음파 트랜스듀서, (b) 트랜스듀서의 사진

Fig. 2. (a) Ultrasonic transducer array made of piezoelectric ceramics, (b) Photograph of the transducer.

에 나타내었듯이 중앙의 5개의 진동소자에 대하여 각각의 어드미턴스 특성을 측정하여 각 소자의 공진특성이 유사함을 확인 한 후, a, b, c, d, e의 모든 진동소자를 병렬 연결하고 임피던스 분석기 (hp4194A)로 입력 어드미턴스 특성을 측정하여 그 공진 특성을 파악하였다. 이때 kerf에 공기 (kerf충진 매질이 없음) 및 두 종류의 에폭시를 kerf충진 매질로 사용하여 각 경우의 공진주파수의 변화를 관찰하였다.

IV. 결과

그림 2에 나타난 선형배열 압전 트랜스듀서에 사용된 압전세라믹의 물질상수는 본 연구에서 직접 측정한 값으로 표 1에 나타내었다. 우선 이 압전세라믹의 두께진동모드를 관찰하기 위하여 14 mm×5 mm의 면적을 가진 두께에 비하여 넓이가 충분히 넓은 평판 압전세라믹에 대하여 입력어드미턴스를 측정하여 결과를 그림 3에 나타내었다. 여기서 실선은 컨덕턴스를 나타내며 파선은 서셉턴스를 나타내고 있다. 이 결과를 보면 두께진동 모드의 공진주파수가 4560 kHz부근에 나타남을 알 수 있다.

표 2에 kerf충진 매질로 사용한 에폭시에 대한 물질상수를 측정하여 나타내었다. 에폭시는 시판되는 2액성 에폭시 (현대에폭시개발(주))를 사용하였으며 경화시 주체와 경화제의 비율을 조절하여 탄성상수의 차이를 구현하였고, 이와 함께, 식 (4)의 κ 및 Z_k 의 값을 구하여 나타내었다. 공기 및 종류가 다른 두 가지의 에폭시를 kerf충

진 매질로 사용한 경우의 입력 어드미턴스 특성의 측정결과를 그림 4에 나타내었다. 공기를 kerf충진 매질로 사용한 경우 진동요소의 종진동모드 공진주파수는 그림 4(a)에 나타난 입력 어드미턴스 특성에서 볼 수 있듯이 3090 kHz부근에서 관찰되어, 그림 3에 나타난 압전판의 두께진동모드의 공진주파수에 비해 적지 않은 주파수 차이가 나타났으며, 이 결과는 압전 진동자의 종횡비의 변화에 의한 주파수 천이로 해석된다 [6]. 탄성계수의 값이 압전 세라믹에 비해 약 0.06배인 Epoxy 1을 kerf충진 매질로 사용한 경우 그림 4(b)에 나타내었듯이 종진동모드의 공진주파수는 다시 천이하여 약 3240 kHz 부근에서 나타나며, 탄성계수의 값이 압전세라믹에 비해 약 0.08배인 Epoxy 2를 kerf충진 매질로 사용한 경우는 종진동모드의 공진주파수는 약 3290 kHz 부근에서 나타나는 것을 그림 4(c)에서 확인할 수 있다. 이들의 변화를 두께진동모드의

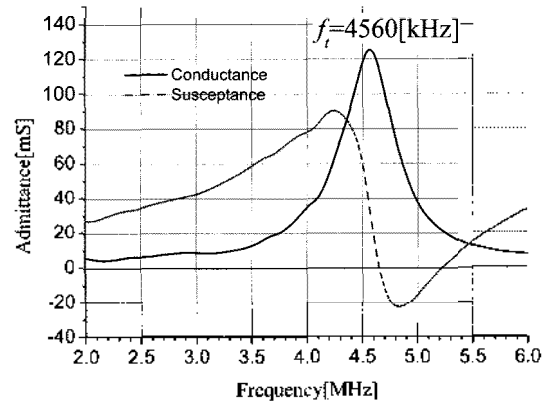


그림 3. 압전 세라믹 진동판의 두께진동모드
Fig. 3. Thickness mode of piezoelectric plate.

표 1. 압전세라믹의 물질상수
Table 1. Material constants of piezoelectric ceramic.

Elastic properties ($\times 10^9 \text{N/m}^2$)	Piezoelectric constant (C/m^2)	Dielectric constant ($\times \epsilon_0$)	Density (kg/m^3)	Coupling coefficient
$c_{11}^E = 141.3$	$e_{31} = -3.69$	$\epsilon_{33}^S = 1461.93$	7813.7	$k_T = 0.36$
$c_{13}^E = 105.0$	$e_{33} = 26.84$	$\epsilon_{33}^T = 3876.33$		
$c_{13}^D = 137.4$				
$c_{33}^D = 177.7$				

표 2. 각 kerf충진 매질의 물질상수 및 특성 계수
Table 2. Material and characteristics constants of kerf-fill materials.

	Elastic constant c_{11}^E ($\times 10^9 \text{N/m}^2$)	Phase velocity v (m/s)	Density ρ (kg/m^3)	κ	Z_k
Air	0	343	1.293	0	0
Epoxy 1	8.61	2690	1190	0.259	1.612
Epoxy 2	11.51	2672	1612	0.299	1.625

공진주파수에 대한 종진동 모드의 공진주파수의 비로 변환하여 식(1)을 사용한 계산결과와 함께 그림 5에 나타내었다. 이 결과를 보면 식 (4)에서 정의한 특성계수가 0, 0.259 및 0.299인 세 가지 kerf충진 매질에 대하여 두께 모드 공진주파수 (f_0)에 대한 종진동모드 공진주파수 (f_r)의 비는 각각 0.68, 0.71 및 0.72로 나타나 실신으로 나타낸 이론계산 결과인 0.696, 0.706 및 0.710와 비교할 때 절대치의 차이는 있으나 주파수 천이의 변화 패턴은 유사함을 알 수 있다. 절대차 등의 오차의 원인으로는 트랜스듀서 제작시 압전세라믹의 정밀절단 (dicing)에 의한 분극의 손실 및 물질상수의 부정확한 예측 등에서 오는 것으로 생각된다.

V. 결론

배열형 초음파 트랜스듀서의 진동 요소에 있어서 kerf 충전 매질의 변화에 따른 공진주파수의 변화를 고찰하기 위하여 14 mm×0.22 mm×0.41 mm의 압전세라믹 진동 요소 5개를 선형배열하고 각 진동요소간의 공간에는 0.2 mm의 kerf를 만들었다. 그리고 공기 및 에폭시 등을 kerf 충전 매질하였을 경우의 공진주파수의 변화를 실험적으로 관찰한 결과 kerf충전 매질의 영향에 따른 공진주파수의 천이가 확인되었으며, 그 천이의 경향은 이론 해석의 결과와 유사함을 확인하였다.

각 kerf충전 매질에 대해 압전 진동요소의 종진동모드 공진주파수의 변화를 압전판의 두께진동모드 공진주파수에 대한 비로 환산하여 비교한 결과 이론계산결과와 약 1%내외의 오차를 보이고 있으나 이는 압전요소의 가공시 정밀절단 (dicing)에 의한 분극의 손실과 압전체 및 kerf충전 매질에 대한 물질상수의 부정확성에 기인한 것으로 추정된다.

금후 압전체의 가공 시 절단응력에 의한 변형이 물질상수의 변화에 미치는 영향을 고려하여 이론해석 결과를 보완하면 보다 정확한 배열형 초음파 트랜스듀서의 설계가 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 정부 (교육인적자원부)의 재원으로 한국진흥재단의 지원 (RRP-2005-041-D00286)을 받아 수행된 연구임.

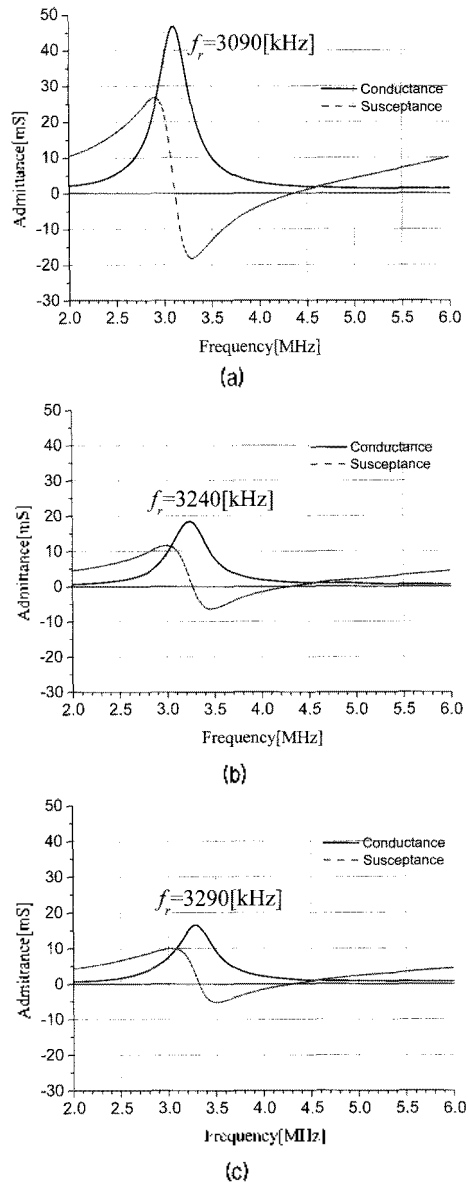


그림 4. 각 kerf충전 매질에 대한 입력 어드미턴스의 측정결과 (a) 공기 (b) 에폭시 1 (c) 에폭시 2

Fig. 4. Input admittance characteristics for each kerf-fill material (a) air (b) epoxy 1 (c) epoxy 2.

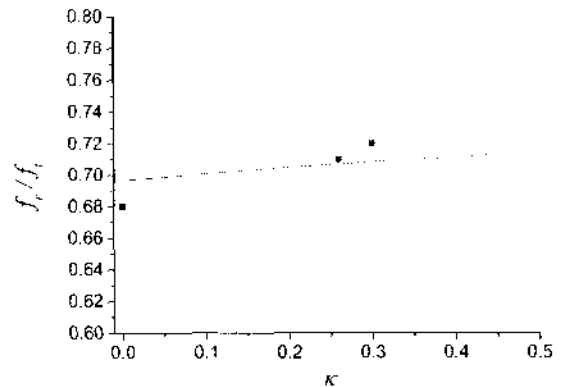


그림 5. kerf충전매질에 따른 공진주파수의 천이
Fig. 5. Resonant frequency variation according to kerf-fill materials.

참고 문헌

1. M. G. Grewe and T. R. Gururaja, "Acoustic properties of particle/polymer composites for transducer backing applications," Proc. IEEE Ultrason. Symp., 2, Nov. 713-716, 1989.
2. M. Greenstein, P. Lum, H. Yoshida, and M. Seyed-Bolortorosh, "A 2.5 MHz 2D Array with 25-Axis Conductive Backing", IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERRO-ELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL, 44(5), 970-977, 1997.
3. R. Liu, K. A. Harasiewicz, D. Knapik, N. A. Freeman and F. S. Foster, "2-2 piezoelectric composites with high density and fine scale fabricated by interdigital pair bonding," Applied Physics Letters, 75, 3390-3392, 1999.
4. 坂野 久夫, 圧電セラミックの応用 (ニューケラス 6, 뉴어케라스 시리즈 編集委員会, 1989), Chap. 7, pp. 199-236.
5. T. Ikeda, *Fundamentals of piezoelectricity* (Oxford University Press, Oxford 1996), Chap. 5, pp. 116-118.
6. M. J. Kim, J. S. Kim and W. Cao, "Electromechanical coupling coefficient of an ultrasonic array element," JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 99, 074102, 2006.
7. J. Kim, M. Kim, K. Ha, and W. Cao, "Aspect ratio dependence of electromechanical coupling coefficient k_{31} of lateral-excitation piezoelectric vibrator," Jpn. J. Appl. Phys. 46, 4459-4461, 2007.

저자 약력

• 김 정 순 (Jungsoon Kim)

한국음향학회지 제25권 제3E호 참조

• 김 무 준 (Moojoon Kim)

한국음향학회지 제25권 제3E호 참조

• 하 강 렬 (Kanglyeol Ha)

한국음향학회지 제25권 제3E호 참조