

Numerical analysis for electro-mechanical coupling performance of 1-3 type Piezo-composite

H.Y. Shin, J.H. Kim, S.J. Lim and J.I. Im[†]

Simulation Center, Business Support Div., KICET, Seoul 153-801, Korea

(Received October 10, 2011)

(Revised October 28, 2011)

(Accepted December 2, 2011)

Abstract Electro-mechanical coupling performance (k_t) of a 1-3 type Piezo-composite was analyzed numerically using FEM. The calculated physical properties of the PZT ceramics were compared with the experimental data and the accuracy of the numerical method was verified. Also the k_t of the composite was analyzed with the vol% and the material properties of the constitutional parts, and the aspect ratio of the PZT rod. As the simulated results, the k_t increased rapidly when the vol% of the PZT ceramics increased up to 30 vol% and saturated the constant value in the above region. And the composite using the soft matrix polymer than the hard one have the superior k_t characteristics. The k_t was greatly influenced by the aspect ratio of the PZT rod up to 30 vol% of PZT ceramics. To improve the k_t characteristics, it is useful that the composite consist of the relatively flexible polymers and the PZT material having the excellent piezoelectric characteristics.

Key words 1-3 Type piezo-composite, Electro-Mechanical Coupling factor, FEM, Aspect ratio, Volume fraction

1-3형 압전복합체의 전기-기계 결합성능에 대한 수치해석

신호용, 김종호, 임수진, 임종인[†]

한국세라믹기술원 기업지원본부 시뮬레이션센터, 서울, 153-801

(2011년 10월 10일 접수)

(2011년 10월 28일 심사완료)

(2011년 12월 2일 게재확정)

요약 본 연구에서는 1-3형 압전복합체(1-3 type piezo-composite)의 전기-기계적 성능을 수치적으로 분석하였다. PZT 세라믹스의 압전물성 계산치를 실험치와 비교하여 수치 해석방법의 정확성을 검증하였다. 그리고 구성재료의 부피 비 및 물성, PZT 기둥의 종횡비(aspect ratio) 등이 복합체의 k_t 특성에 미치는 영향을 해석하였다. 그 결과, PZT 부피 비가 30 vol%까지 증가함에 복합체의 k_t 특성은 급격하게 증가하다가 그 이상의 영역에서는 일정한 값에 수렴한다. 그리고 상대적으로 유연한 폴리머를 사용한 복합체가 전반적으로 우수한 k_t 특성을 갖는다. 또한 PZT 부피비가 30% 이하인 경우, 복합체의 k_t 특성은 PZT 기둥의 종횡 비에 많은 영향을 받는다. 그러므로 k_t 특성 향상을 위해서는 상대적으로 유연한 폴리머 및 우수한 압전특성의 PZT를 사용하여 복합체를 구성하는 것이 유리하다.

1. 서론

PZT로 대표되는 압전세라믹스는 우수한 압전특성을 보유하고 있으나 상대적으로 낮은 정수압 응답특성을 보유하고 있어 수중용 초음파 트랜스듀서로는 그 용도가 제한적으로 사용되고 있다. 그러나 압전복합체는 PZT에 비해 낮은 음향임피던스를 가지고 있어 인체 혹은 물

과 음향 정합성이 우수하고, 광대역화가 가능하여 초음파를 송신 및 수신하는 초음파센서의 핵심 재료로 많이 사용되고 있다.

압전복합체는 압전소자와 폴리머의 연결방식에 따라 0-3형, 1-3형, 2-2형, 2-3형, 3-3형 등 다양한 형상으로 분류되고, 이들 다양한 압전복합체에 대한 설계 및 제조, 압전특성에 대한 연구가 많이 보고되어 왔다[1-5]. 특히 1-3형 압전복합체는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 폴리머 매트릭스에 PZT 기둥을 선형 배열하여 구성되고, 높은 전기-기계 결합계수($k_t = 0.6 \sim 0.7$) 및 낮은 음향임피던스($Z < 7.5 \text{ Mrayl}$) 특성을 지닌 복합체도 제조 가능하다.

[†]Corresponding author

Tel: +82-2-3282-2491

Fax: +82-2-3282-7801

E-mail: jongin@kicet.re.kr

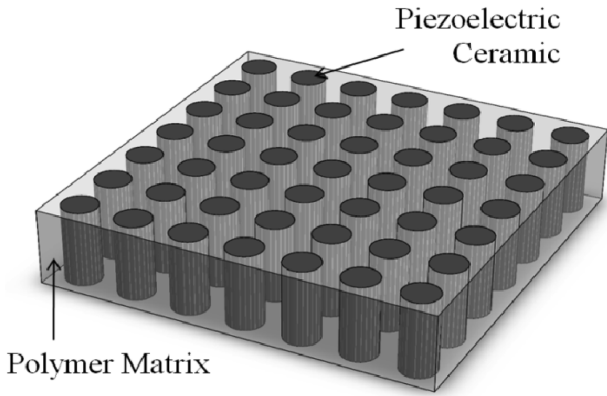


Fig. 1. Structure of the 1-3 type piezo-composite.

또한 이 복합체는 광범위의 유전상수 ($\epsilon/\epsilon_0 = 10 \sim 1,000$)와 낮은 유전적 및 기계적 손실특성을 보유하고 있어 pulse-echo형 초음파 트랜스듀서에 적용하기 적합한 재료이다.

1-3형 압전복합체의 압전특성 및 전기-기계 결합성능은 압전소자의 부피 비, 압전소자의 형상 및 배열, 폴리머 매트릭스 물성 등에 의해 많은 영향을 받는다. Chan 등[6, 7]은 Smith[5]가 등가회로법으로 개발한 단순한 수학적 모델을 이용하여 압전소자의 부피 비에 따른 1-3형 압전복합체의 물성을 이론적으로 계산하였다. 이들의 이론적 등가회로 모델로 압전복합체의 물성을 간단하게 예측할 수 있는 장점은 있지만 그 정확성이 다소 부족하다. 그리고 이 방법으로는 복합체 구성재료의 형상 및 배열, PZT 기둥의 종횡비 변화에 따른 복합체의 다양한 압전특성에 대한 분석이 매우 힘들다. 그러나 압전복합체를 3차원 모델링하고, 다양한 공진모드에 따른 전기-기계적 성능을 유한요소법(FEM)으로 수치해석 하는 방법을 개발할 경우, 구성재료의 물성 및 형상, 배열 등을 고려하여 복합체의 다양한 압전특성에 대한 분석 및 예측이 가능하다.

본 연구에서는 1-3형 압전복합체의 전기-기계적 성능을 FEM을 사용하여 수치적으로 분석하고자 하였다. 이를 위하여 PZT 압전세라믹스의 물성을 수치 해석하여 분석의 정확성을 검증하였다. 또한 1-3형 복합체의 전기-기계적 성능특성에 PZT 부피 비 및 종횡비(aspect ratio), 폴리머의 물성 등이 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

2. 압전복합체의 물성

압전재료는 인가된 기계적 에너지를 전기적 에너지 혹은 그 반대로 변환시킬 수 있는 특성을 가진 재료이고, 압전특성은 인가된 응력(T), 변형(S), 전계(E) 및 전기변위(D)의 상호 관계로 표현되는 압전상수(d, e, g, h)로

정의된다. 압전재료의 지배방정식은 이들 압전상수를 이용해 다음의 식과 같이 나타내어 진다[8, 9].

$$\begin{aligned} S &= s^E T + dE & D &= dT + \epsilon^T E \\ T &= c^E S - eE & D &= eS + \epsilon^S E \\ S &= s^D T - gD & E &= -gT + \beta^T D \\ T &= c^D S - hD & E &= -hS + \beta^S D \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 s 는 탄성 유연계수(elastic compliance), c 는 탄성 강성계수(elastic stiffness), ϵ 은 유전율(permittivity), β 는 역 유전율이다. 윗 첨자로 쓰여진 E, T, S, D는 각각 전계, 응력, 변형, 전기적 변위가 일정할 때의 값을 의미한다. 그리고 압전성능은 전기-기계 결합계수(k)로 정의되는 전기적 에너지와 기계적 에너지의 결합 효율로 평가된다. 전기-기계 결합계수(k)는 인가된 전기에너지가 기계적인 에너지로 변환되는 효율 또는 역으로 가해진 기계적인 에너지가 전기적인 에너지로 변환되는 효율을 나타내는 것이다.

$$k^2 \equiv \frac{\text{Electrical energy converted to mechanical energy}}{\text{Input electrical energy}} \quad (2)$$

1-3형 압전복합체는 PZT 기둥을 폴리머 매트릭스에 선형 배열한 구조이고(Fig. 1), 대표적인 복합체의 유전 및 압전특성은 이론적 모델을 이용하여 다음 식 (3)부터 (10)까지와 같이 나타낼 수 있다[5-7].

$$s(V) = Vs_{11}^m + (1 - V)s_{33}^{p,E} \quad (3)$$

$$\epsilon_{33}^T = V\epsilon_{33}^{p,T} - \frac{V(1 - V)d_{33}^p}{s(V)} + (1 - V)\epsilon_{11}^m \quad (4)$$

$$d_{33} = Vs_{33}^m d_{33}^p \frac{1}{s(V)} \quad (5)$$

$$d_{31} = Vd_{31}^p - V(1 - V)d_{33}^p \frac{(d_{13}^{p,E} - s_{12}^m)}{s(V)} \quad (6)$$

$$k_t = \sqrt{1 - \frac{c_{33}^E}{c_{33}^D}} \quad (7)$$

$$\rho = V\rho^p + (1 - V)\rho^m \quad (8)$$

$$v_3^D = \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\rho}} \quad (9)$$

$$Z = \rho v_3^D \quad (10)$$

여기서 ρ 는 밀도를, V 는 PZT의 부피 비를, v 는 음속을, Z 는 음향 임피던스를 의미한다. 그리고 윗 첨자 p 와 m 은 각각 PZT 및 매트릭스 폴리머를 나타낸 것이다.

압전재료 및 압전복합체의 물성을 측정하고자 할 경우, 위에서 언급한 수학적인 이론적 식보다는 Fig. 2에 언급한 다양한 공진모드 시편을 제작하고, 공진 및 반공진

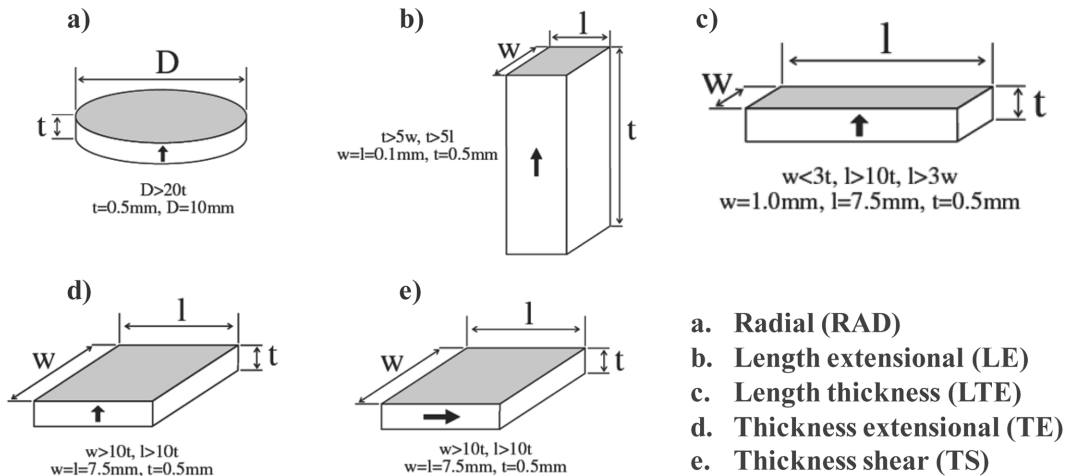


Fig. 2. Various resonator shapes of the piezoelectric materials.

주파수를 측정하여 여러 압전특성을 측정하는 것이 일반적이다[8, 9]. Fig. 2에 나타난 화살표는 압전재료의 poling 방향을 나타낸 것이고, RAD는 반경방향 진동모드를, LE는 길이방향 진동모드를, LTE는 길이 두께방향 진동모드를, TE는 두께방향 진동모드를, TS는 두께 전단방향 진동모드를 의미한다. 이와 같은 공진-반공진 방법을 이용할 경우, 두께모드에 대한 전기-기계 결합계수(k_t)는 다음과 같이 나타내어 진다[8, 9].

$$k_t^2 = \frac{\pi f_s}{2f_p} \cot\left(\frac{\pi f_s}{2f_p}\right) \quad (11)$$

여기서 f_p 및 f_s 는 각각 두께방향 진동모드에 대한 병렬 및 직렬 주파수를 의미한다.

3. 실험방법

PZT 압전재료 및 1-3형 압전복합체의 물성은 Fig. 2에 나타난 다양한 공진자의 임피던스 특성으로부터 공진-반공진 방법으로 계산할 수 있다. 압전재료의 임피던스 특성 해석은 상용 유한요소프로그램인 PZflex(Weidlinger Associates Inc.)를 사용하여 분석하였다. 먼저 PZT-5A의 다양한 공진자를 모델링하여 전기적 임피던스 특성을 해석하고, 모든 압전특성을 계산하여 알려진 측정 결과와 비교하여 유한요소법의 분석 결과에 대한 정확성을

Table 1
Material properties of the polymer for the 1-3 type piezo-composite

Polymer	Elastic constant (GPa)	Poisson's ratio	Acoustic impedance (Mrayl)
HP	4.35	0.36	2.9
MP	3.83	0.37	2.8
SP	1.91	0.41	2.3

검증하였다.

1-3형 압전복합체의 경우, PZT-5A 재료와 Table 1에 표기한 세 종류의 폴리머를 이용하여 Fig. 1 형태의 복합체를 구성하고, Fig. 2의 다양한 공진자의 유한요소 모델을 구성하여 공진 모드별로 주파수에 따른 임피던스 특성을 해석하였다. 그리고 압전재료의 부피 비는 20 부터 80 vol%까지 변화시키며 복합체의 임피던스 특성을 해석하였다. 또한 PZT 기둥의 높이(H) 대 폭(W)의 비율을 의미하는 종횡비(aspect ratio = H/W) 및 PZT 압전재료의 물성을 변화시키고, 이들이 복합체의 압전특성에 미치는 영향을 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. PZT-5A의 압전특성 분석

본 연구의 압전특성 분석에 대한 유한요소분석법의 정확성을 검증하기 위하여 PZT-5A 압전재료를 이용하여 Fig. 2의 다양한 공진자에 대한 임피던스 특성 및 압전 특성을 분석하였다. PZT-5A의 전기적 임피던스 특성 및 공진 주파수 특성을 분석한 결과를 각각 Fig. 3 및 Table 2에 정리하여 나타내었다. 이를 이용하여 공진-반공진법으로 PZT-5A의 압전특성을 분석하고, 그 결과를 측정치와 비교하여 Table 3에 나타내었다.

Table 3에서 알 수 있듯이, PZT-5A의 탄성 유연계수에 분석 결과는 결정의 방향성에 따라 다소 차이는 나지만 약 0.43%에서 1.58% 정도의 오차를 갖는 것으로 분석되었다. 그리고 PZT-5A의 다양한 d 압전상수 분석 결과에서 알 수 있듯이, d_{33} 및 d_{15} 는 약 0.64와 문헌상의 값과 거의 동일한 0.1% 정도의 분석 정확도를 보이고, d_{31} 의 경우는 약 1.34% 정도의 오차를 갖는 것으로

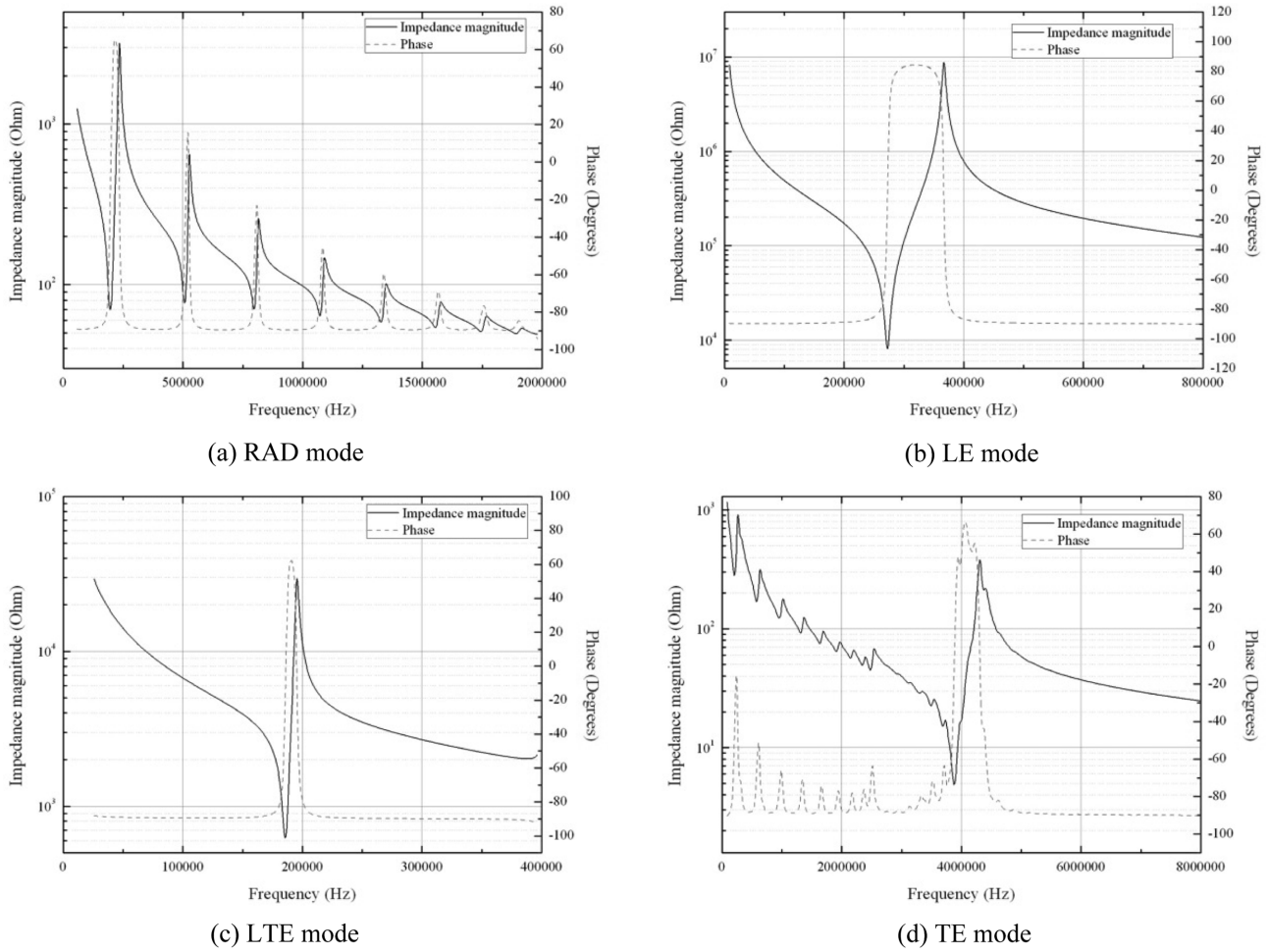


Fig. 3. Simulated electrical impedance characteristics of the PZT-5A ceramics.

Table 2
Simulated resonance and anti-resonance frequencies of the PZT-5A resonators

Modes	LE	LTE	RAD	TE	TS
fr (kHz)	273	186	196	3,879	1,736
fa (kHz)	367	196	235	4,310	2,282
Zr (Ohm)	8,123	624	70	4.9	4.4
Za (Ohm)	8,764k	29,439	3,194	379	757

나타났다. 또한 전기-기계 결합계수 중 k_{31} 및 k_t 가 각각 약 1.15% 및 2.71% 정도의 분석 오차를 갖는 것으로 분석되었다. 여기서 가장 큰 오차를 보인 d_{31} 및 k_{31} 은 다양한 진동자 중 LTE 진동모드에 해당하고, k_t 는 TE 진동모드에 해당한다.

본 연구와 같이 유한요소법으로 압전물성을 분석할 경우, 이상의 결과로부터 LTE 모드 및 TE 모드에 해당하는 압전물성은 각각 약 1.3% 및 2.7% 정도의 오차를 가질 수 있다고 판단되지만 수용 가능한 결과이고, 다양한 압전재료의 물성 예측에는 아주 유용하게 사용할 수 있다고 판단된다.

Table 3
Calculated material properties of the PZT-5A ceramic

Material properties	Simulated	Measured [10]	Error (%)	
Elastic compliances ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$)	s_{11}^E	16.48	16.40	0.48%
	s_{12}^E	-5.77	-5.74	0.48%
	s_{13}^E	-7.34	-7.22	1.58%
	s_{33}^E	18.92	18.80	0.66%
	s_{44}^E	46.50	47.50	2.16%
	s_{66}^E	44.49	44.30	0.43%
Piezoelectric constants (pC/N)	d_{31}	-173.32	-171	1.34%
	d_{33}	376.40	374	0.64%
	d_{15}	584.61	584	0.10%
Electro-mechanical coupling factors	k_t	0.473	0.49	2.71%
	k_{31}	0.348	0.34	1.15%
	k_{33}	0.705	0.71	0.03%
	k_{15}	0.687	0.69	0.26%

4.2. 1-3형 압전복합체의 압전특성 분석

본 연구에서 유한요소법으로 1-3형 압전복합체의 압전 특성을 분석한 결과를 Fig. 4부터 Fig. 8까지 나타내었

Table 4
Calculated material properties of the 1-3 type piezo-composite

Vol% of the PZT-5A		25	40	60
Dielectric constants	$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	436	694	1,040
	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	385	643	994
Piezoelectric constants	d_{31} (pC/N)	-116	-133	-149
	d_{33} (pC/N)	297	330	353
	e_{31} (C/m)	-0.11	-0.22	-0.47
	e_{33} (C/m)	3.99	6.38	9.66
	g_{31} (* 10^{-3} Vm/N)	-33.96	-23.4	-16.9
	g_{33} (* 10^{-3} Vm/N)	87.1	58	40.2
Density (kg/m ³)		2,800	3,790	5,110
Acoustic Impedance (Mrayl)		9.2	12.9	18

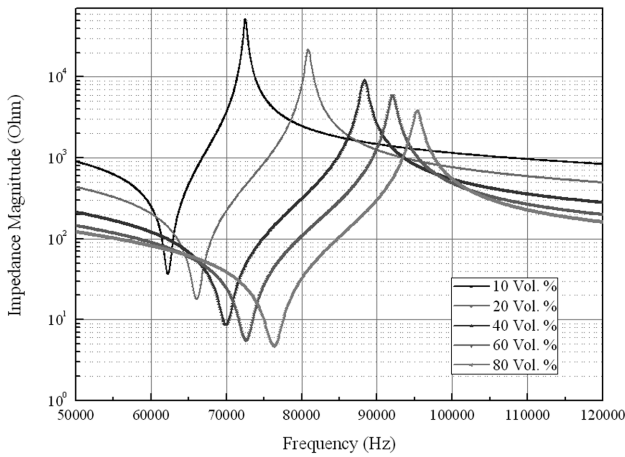


Fig. 4. Simulated electrical impedance characteristics of the composite using the SP with the vol% of the PZT ceramics.

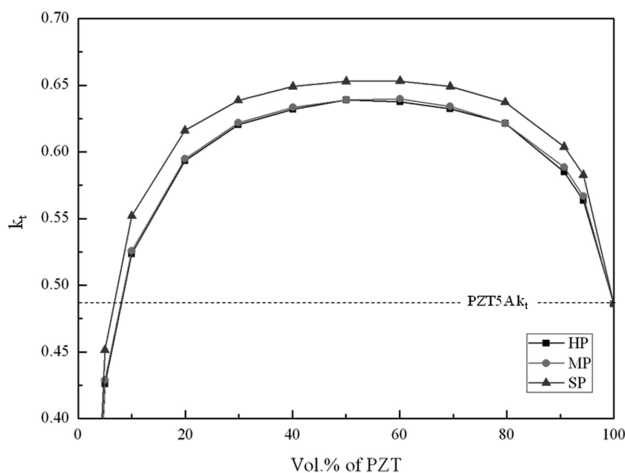


Fig. 5. Influence of the vol% of the PZT-5A on the k_t of the composite.

다. Fig. 4는 PZT-5A 부피 비의 증가에 따른 TE 진동 모드에 대한 압전복합체의 임피던스 특성을 분석한 것이다. 결과에 나타난 것처럼 MP와 SP를 적용한 해석결과

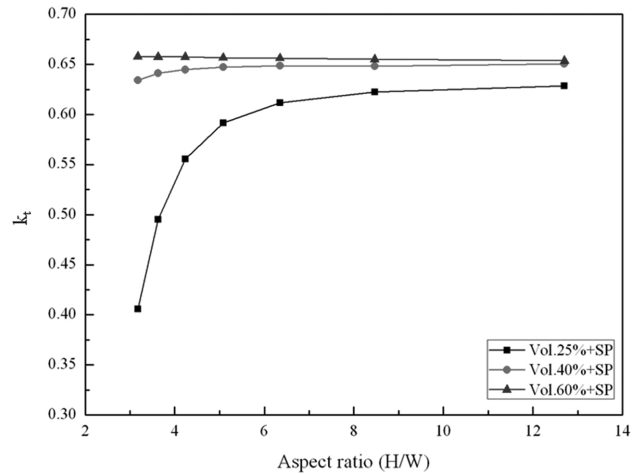


Fig. 6. Influence of the aspect ratio of the PZT rod on the k_t of the composite using the SP.

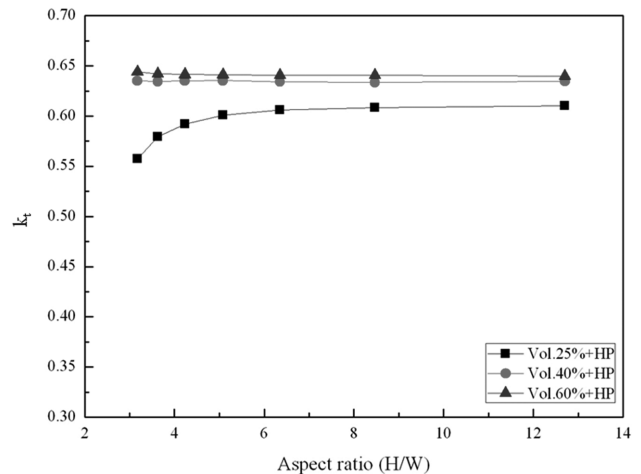


Fig. 7. Influence of the aspect ratio of the PZT rod on the k_t of the composite using the HP.

는 유사하게 PZT 부피 비가 증가할수록 공진 주파수가 뒤로 이동하며 SP를 적용한 결과가 MP를 적용한 압전 복합체 보다 낮은 공진주파수가 나타날 것으로 예측된다. 그리고 Fig. 5부터 Fig. 8까지는 복합체의 두께방향 전기기계 결합계수(k_t)에 대한 분석 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 5의 결과에서 알 수 있듯이, 증가함에 따라 복합체의 k_t 는 초기에 급격하게 증가하다가 35 vol% 이상의 영역에서는 완만하게 증가하며 일정한 값으로 수렴한다. 그리고 PZT의 부피 비가 60 vol% 이상이 되면, k_t 는 다시 감소하는 경향성을 보이고 있다. 그리고 MP 및 HP 폴리머보다 상대적으로 유연한 SP 폴리머를 사용할 경우, 복합체는 전체적으로 우수한 k_t 특성을 지니고 있는 것으로 분석되었다. 이상의 결과는 Chan 등[6]이 분석한 결과와도 유사한 경향성을 보이는 결과이다.

1-3형 복합체의 압전특성은 PZT의 부피 비 및 폴리머

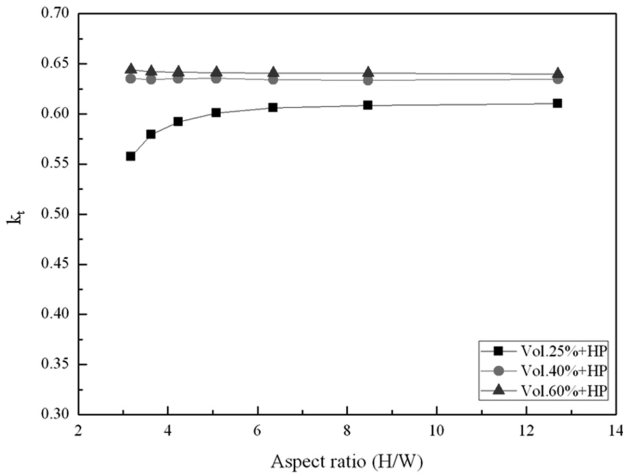


Fig. 8. Influence of the PZT materials and the aspect ratio on the k_t of the composite using the SP.

물성 외에서 PZT 기둥의 종횡비(aspect ratio)에 의해서도 많은 영향을 받는다. SP 및 HP 폴리머를 사용한 복합체의 k_t 특성을 PZT 기둥의 종횡비 변화에 따라 분석하고, 그 결과를 각각 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다. SP 폴리머를 사용한 Fig. 6의 결과에서 알 수 있듯이, PZT 부피 비가 25 %인 경우, 복합체의 k_t 특성은 PZT 기둥의 종횡비(aspect ratio)가 증가함에 따라 급격하게 증가하다가 6 이상의 영역에서는 일정한 값으로 수렴하는 특성을 보인다. 그러나 PZT 부피 비가 40 % 이상인 경우, 복합체의 k_t 특성은 PZT 기둥의 종횡비(aspect ratio)에 거의 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다. 또한 상대적으로 딱딱한 HP 폴리머를 사용한 경우, 복합체의 k_t 특성은 PZT 기둥의 종횡비(aspect ratio)의 영향을 덜 받는 것으로 분석되었다.

PZT 부피 비가 25 %인 경우, PZT 물성 및 종횡비가 복합체의 k_t 특성에 미치는 영향을 분석하고, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 일반적으로 압전특성은 PZT-8, PZT-4, PZT-5A, PZT-5H 순으로 우수하다고 알려져 있다. 이 결과에서 알 수 있듯이, PZT 종횡비가 6 이하의 영역에서 복합체의 k_t 특성은 PZT 종횡비의 증가에 따라 급격하게 증가한 경향성을 보이고 있다. 그리고 상대적으로 우수한 압전특성을 보유한 PZT-5H를 사용한 복합체가 가장 우수한 k_t 특성을 가지고 있는 것으로 분석되었다.

이상의 결과를 요약하면, 우수한 k_t 특성을 보유한 1-3형 압전복합체를 제작하기 위해서는 PZT 부피 비가 약 35~65 % 정도이고, 상대적으로 유연한 SP 폴리머를 사용하여야 한다. 또한 PZT 부피 비가 약 30 % 이하인 복합체를 설계할 경우, PZT 종횡비가 6 이상이고, 상대적으로 우수한 압전특성을 보유한 재료를 사용하여 제작하는 것이 바람직하다고 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 1-3형 압전복합체(1-3 type piezo-composite)의 전기-기계적 성능을 수치적으로 분석하였다. PZT 세라믹스의 압전물성 계산치를 실험치와 비교하여 수치 해석방법의 정확성을 검증하였다. 그리고 구성재료의 부피 비 및 물성, PZT 기둥의 종횡비(aspect ratio) 등이 복합체의 k_t 특성에 미치는 영향을 해석하였다. 그 결과, PZT 부피 비가 30 vol%까지 증가함에 따라 복합체의 k_t 특성은 급격하게 증가하다가 그 이상의 영역에서는 일정한 값에 수렴한다. 그리고 상대적으로 유연한 폴리머를 사용한 복합체가 전반적으로 우수한 k_t 특성을 갖는다. 또한 PZT 부피비가 30 % 이하인 경우, 복합체의 k_t 특성은 PZT 기둥의 종횡 비에 많은 영향을 받는다. 그러므로 k_t 특성 향상을 위해서는 상대적으로 유연한 폴리머 및 우수한 압전특성의 PZT를 사용하여 복합체를 구성하는 것이 유리하다.

참 고 문 헌

- [1] R.E. Newnham, D.P. Skinner and L.E. Cross, "Connectivity and piezoelectric-pyro-electric composites", *Mat. Res. Bull.* 13 (1978) 525.
- [2] W. Huebner, M.R. Reidmeyer, J.W. Stevenson and L. Busse, "Fabrication of connectivity PZT /thermoplastic composite for high frequency linear arrays", *Proc. IEEE Application of ferroelectrics Symp.* (1994) 206.
- [3] W.A. Smith, "The role of piezocomposites in ultrasound transducers", *Proc. Ultrasonics Symp.* (1989) 755.
- [4] Fiore, D. Gentilman, R. Pham, H. Serwatka, W. McGuire and P. Bowen, "Recent developments in 1-3 piezocomposite transducer fabrication", *Proc. IEEE Applications of Ferroelectrics Symp.* (1996) 531.
- [5] W.A. Smith, A. Shaulov and B.A. Auld, "Tailoring the properties of composite piezoelectric materials", *Proc. IEEE Ultrason. Symp.* (1985) 642.
- [6] H.L.W. Chan and J. Unsworth, "Simple model for piezoelectric ceramic/polymer 1-3 composites used in ultrasonic transducer applications", *IEEE Trans. Ultra. Ferro. Freq. Cntr.* 36(4) (1989) 434.
- [7] H. Taunamang, I.L. Guy and H.L.W. Chan, "Electromechanical properties of 1-3 piezoelectric ceramic/piezoelectric polymer composites", *J. Appl. Phys.* 76(1) (1994) 484.
- [8] B. Jaffe, W.R. Cook and H. Jaffe, "Piezoelectric ceramics" (Academic Press, New York, 1971) p. 289.
- [9] J.F. Nye, "Physical properties of crystal", 1985 ed., (Oxford Univ. Press, Oxford, 1986) p. 110.
- [10] D. Berlincort and H.H.A. Krueger, "Properties of Piezoelectricity ceramics", Technical report TP-226 (Morgan Electro Ceramics Inc.) p. 1.