

## Inter-Pillar 진동 모드를 고려한 1-3형 압전복합체의 구조 최적화

표성훈<sup>1</sup>, 김진욱<sup>1</sup>, 노용래<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 경북대학교 기계공학과

### Optimization of 1-3 Type Piezocomposite Structures Considering Inter-Pillar Vibration Modes

Seonghun Pyo<sup>1</sup>, Jinwook Kim<sup>1</sup>, and Yongrae Roh<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-010, Korea

(Received May 21, 2013; Revised May 24, 2013; Accepted May 24, 2013)

**Abstract:** With polymer properties and ceramic volume fraction as design variables, the optimal structure of 1-3 piezocomposites has been determined to maximize the thickness mode electromechanical coupling factor. When the piezocomposite vibrates in a thickness mode, inter-pillar resonant modes are likely to occur between lattice-structured piezoceramic pillars and polymer matrix, which significantly deteriorates the performance of the piezocomposite. In this work, a new method to design the structure of the 1-3 type piezocomposite is proposed to maximize the thickness mode electromechanical coupling factor while preventing the occurrence of the inter-pillar modes. Genetic algorithm was used for the optimal design, and the finite element analysis method was used for the analysis of the inter-pillar mode.

**Keywords:** 1-3 piezocomposite, Inter-pillar mode, Optimization

#### 1. 서론

1-3형 압전복합체는 그림 1과 같이 압전세라믹과 폴리머가 각각 1차원, 3차원적으로 연결된 격자 구조로 이루어져 있다. 압전복합체는 단일 압전세라믹에 비해 음향 임피던스가 낮을 뿐만 아니라 밀도와 영률이 낮아 외부 매질과 음향정합을 이루기에 유리하다 [1,2]. 또한, 압전복합체는 세라믹과 폴리머 모재간의 상호작용으로 인하여 높은 전기-기계 결합 계수를 가지며, 유전율이 낮아 정수압하의 성능 계수가 높은

특징이 있다 [3,4]. 압전세라믹과 폴리머 간의 여러 종류의 연결 구조 중 특히 1-3형 압전복합체는 우수한 압전 특성으로 인해 다양한 분야의 트랜스듀서에 널리 사용되어져 왔으며 [5-7], Newnham, Cross, Smith, Auld, Gururaja 등에 의해 특성 해석과 설계 방안에 대해 많은 연구가 수행되어져 왔다 [1-4, 8-12].

대표적인 사례로 Gururaja는 트랜스듀서에 사용되는 압전복합체 내의 세라믹 부피비와 두께에 따른 공진 모드의 변화에 대한 연구를 하였다 [1]. 또한 Newnham은 압전복합체의 두께 모드나 횡 모드 진동 특성에 대한 연구를 수행하였으며 [2], Cross는 압전 세라믹과 폴리머 모재 간의 연결 형태에 대한 개념을

a. Corresponding author; yryong@knu.ac.kr

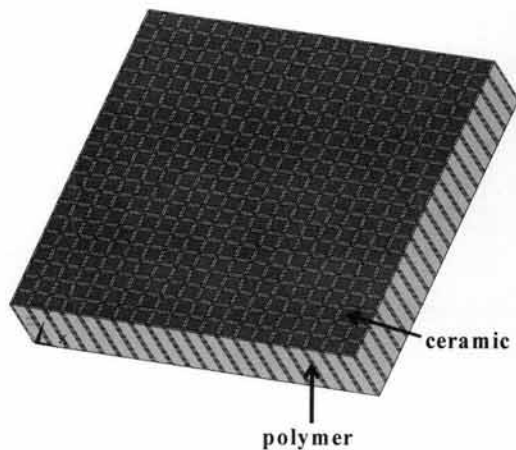


Fig. 1. Schematic structure of 1-3 piezocomposites.

도입하여 그에 따른 압전복합체의 특성을 연구하였다 [4]. Smith는 압전복합체의 등가 물성을 도출하여 압전 특성을 계산하였다 [10,11]. Giviansky는 하이드로폰 특성을 최대화하기 위하여 압전복합체 내의 세라믹 단면의 모양, 세라믹의 부피비, 배열 방법, 폴리머 모재의 물성 등을 고려하여 구조 최적화를 수행하였다 [9]. 그러나 이들 연구에서는 설계 변수의 범위를 제대로 설정하지 않거나 이론적인 가정들로 인해 비현실적인 재료의 물성이 도출되는 한계가 있었다. 또한 이들은 압전복합체의 진동 모드, 물성, 연결 형태 등에 대한 연구를 수행하였으나 inter-pillar 공진 모드는 고려하지 않았다는 한계가 있었다. Inter-pillar 모드는 1-3형 압전복합체가 두께 모드로 진동 시, 격자형으로 배열된 압전 삽입재 (pillar)들과 폴리머 모재간의 매질차로 인해 반사되는 횡파 성분에 의해 발생하며 Auld, Pappalardo 등에 의해 연구되어 졌다 [12-15]. Inter-pillar 모드와 두께 모드가 결합하게 되면 압전세라믹과 폴리머 모재의 두께 방향 변위에 위상차를 발생시키게 되고, 따라서 두께 모드 전기-기계 결합 계수가 감소하게 되어 트랜스듀서의 성능이 급격히 저하되므로 이 두 가지 모드의 결합을 피하는 것이 중요하다 [16-18]. 하지만 기존에 압전복합체 연구사례에서는 압전복합체의 압전 특성 개선, 구조 최적화, inter-pillar 모드에 대한 연구가 각각 개별적으로 수행되었고, 이들 전체를 고려한 구조 설계에 관한 사례는 미미했다. 따라서 본 연구에서는 기존의 1-3형 압전복합체의 구조 최적화에서는 고려되지 않았던 inter-pillar 모드의 영향을 고려하여 전기-기계

결합 계수가 최대가 되는 우수한 복합체 구조를 설계하고자 하였다.

설계 변수로는 압전복합체의 특성에 가장 큰 영향을 미치는 세라믹의 부피비와 폴리머 모재의 영률을 선정하였다. 각각의 설계 변수가 복합체의 압전 특성과 inter-pillar 모드에 미치는 영향을 분석한 후, 유전자 알고리즘을 사용하여 복합체 구조를 최적화하였다. 나아가 최적화를 통해 도출된 구조에 대해서 유한요소 해석을 통해 inter-pillar 모드의 발생유무를 확인함으로써 순수하게 두께 모드로만 작동하는 복합체 구조를 최종 구조로 설정하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 유한요소 모델 구축 및 검증

1-3형 압전복합체 구조를 설계하기 위해 유한요소 모델을 그림 1과 같이 제작하였다. 모델은 상용 해석 도구인 ANSYS를 이용하여 제작하였으며, 총 64,000여개의 요소와 72,000개의 절점을 사용하여 격자구조를 상세히 묘사할 수 있도록 하였다. 복합체를 구성하는 압전 세라믹으로는 PZT-5H를 사용하였으며, 폴리머 모재로는 Dow Corning(Midland, MI)사의 Low Viscous Epoxy를 사용하였다. 폴리머의 밀도는  $1120 \text{ kg/m}^3$ , 포아송 비는 0.4, 그리고 영률은 4.3 GPa이다. 복합체의 두께는 0.56 mm, 세라믹의 부피비는 25%, 복합체의 중형비는 0.74이며, 세라믹 삽입재의 pitch는 0.44 mm, 삽입재의 폭은 0.22 mm이다. 향후 이 모델을 이용해 inter-pillar 공진모드 같은 복합체의 특성을 분석할 텐데, 분석에 앞서 이 유한요소 모델이 실제 1-3 압전복합체의 특성을 얼마나 정확히 묘사할 수 있는지 그 정확성을 확인하였다. 즉, 유한요소 모델과 동일한 구조를 가지는 압전복합체 시편을 제작하고, 제작된 시편의 임피던스 스펙트럼을 측정 한 다음 유한요소 모델로 해석한 임피던스 스펙트럼과 비교함으로써, 모델의 신뢰성을 확인하였다.

1-3형 압전복합체의 제작은 Dice & Fill법을 이용하였다 [19]. Dice & Fill 법은 dicing 공정을 통해 압전세라믹에 일정한 간격으로 일정한 폭만큼의 홈을 낸 다음에, 액체상태의 폴리머 모재를 절단된 홈에 충전시켜 경화시키는 방법이다. 경화된 복합체는 절단과 연마 과정을 거쳐 원하는 크기로 가공한 다음, 열 증착 방식을 이용하여 시편의 상하 양면에 전극을

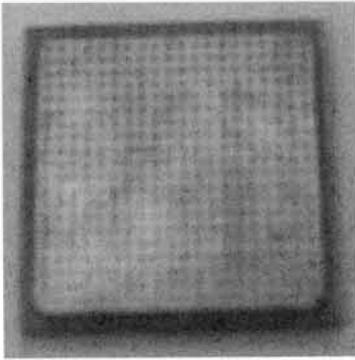


Fig. 2. 1-3 piezocomposite specimen.

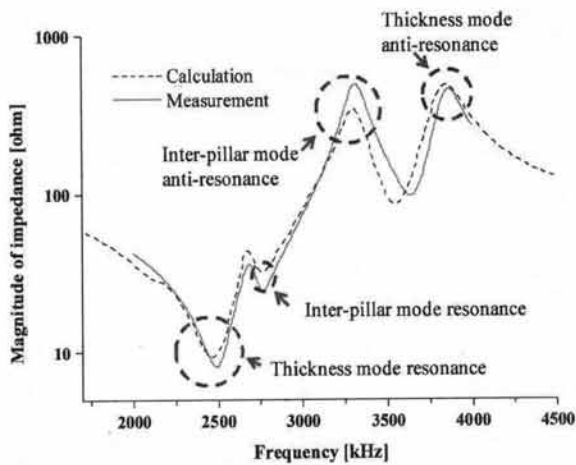


Fig. 3. Comparison of the electromechanical impedance spectra from the measurement and calculation with the finite element model.

도포하였다. 복합체 시편은 유한요소 모델과 완전히 동일한 재료 및 크기를 가지도록 제작되었으며, 그림 2에 보인 시편의 전체 폭은 9.7 mm이다. 제작된 시편의 전기-기계 임피던스 스펙트럼을 HP 4294A Impedance Analyzer (Agilent Technologies, Santa Clara, CA)를 이용해 측정하여, 유한요소 모델로 해석한 스펙트럼과 그림 3과 같이 비교하였다.

측정된 결과와 해석 결과가 거의 일치하며, 복합체 판의 두께 모드와 더불어 inter-pillar 모드도 발생함을 알 수 있다. 본 시편에서는 inter-pillar 모드를 인위적으로 발생시키기 위해 복합체의 종횡비를 통상적인 값인 0.5 보다 더 크게 0.74로 설정하였고, 그에 따라 측정 결과와 해석 결과 모두에서 inter-pillar 모드가 발생한 것이 확인되었다. 측정치와 해석치 간의 약간의 정량적인 차이는 시편의 제작 공차와 해석 모

델에 대입한 재료의 감쇠도의 부정확성에 기인하는 것으로 판단된다. 결과적으로 그림 1의 유한요소 모델은 실제 제작된 1-3 압전복합체 시편의 특성을 잘 묘사할 수 있으며, 관심대상인 inter-pillar 모드도 정확히 해석해낼 수 있음을 확인하였다. 이후 복합체 구조의 설계에는 이렇게 검증된 유한요소 모델을 사용하였다.

## 2.2 구조 변수의 영향 분석

일반적으로 inter-pillar 모드는 세라믹의 부피비와 폴리머 모재의 영률이 낮거나 압전복합체의 종횡비가 높은 경우에 발생한다. 따라서 본 연구에서는 복합체의 구조 변수로 세라믹의 부피비, 폴리머 모재의 영률을 선정하여 1-3형 압전복합체의 임피던스 스펙트럼의 변화를 확인한 후, 이러한 구조 변수들에 따른 복합체의 두께 모드 공진 주파수와 inter-pillar 모드 공진 주파수의 변화를 분석하였다.

그림 4는 폴리머 모재의 포아송 비가 0.4, 밀도가  $1120 \text{ kg/m}^3$  이고, PZT-5H의 부피비가 20%, 종횡비가 0.3인 경우, 폴리머 모재의 영률( $E$ )을 0.9 GPa에서 1.7 GPa까지 0.4 GPa 간격으로 변화시켜 해석한 1-3형 압전복합체의 전기-기계 임피던스 스펙트럼이다. 폴리머의 영률에 따라서 두께 모드 공진 주파수 값들이 변화하는 것을 알 수 있으며, 폴리머 모재의 영률이 0.9 GPa인 경우에 두께 모드와 인접해서 inter-pillar 모드가 발생한 것을 확인할 수 있다. 하지만 영률이 증가함에 따라 inter-pillar 모드의 발생 주파수가 두께 모드로 부터 점점 멀어지며, 영률이 1.7 GPa인 경우에는 두께 모드 주파수의 2배 이상으로 벌어져서 그 영향이 거의 없는 것으로 확인되었다. 즉, 폴리머 모재의 영률이 증가함에 따라 세라믹과 폴리머 모재 간에 반사되는 횡파 성분이 감소되어 inter-pillar 모드와 두께 모드간의 결합 현상이 줄어들게 되는 것이다. 다음으로 세라믹의 부피비가 임피던스 스펙트럼에 미치는 영향을 알아보았다.

그림 5는 세라믹의 부피비의 변화에 따른 임피던스 해석 결과이다. PZT-5H 세라믹의 부피비( $VF$ )를 30%에서 60%까지 변화시켰을 때, 부피비가 30%, 40%처럼 작은 경우에는 두께 모드에 인접해서 inter-pillar 모드가 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 세라믹의 부피비를 점차 늘리면 inter-pillar 모드 공진 주파수와 두께 모드 공진 주파수 간의 차이가 커지다가, 부피비가 50% 이상이 되면 두께 모드 주위에

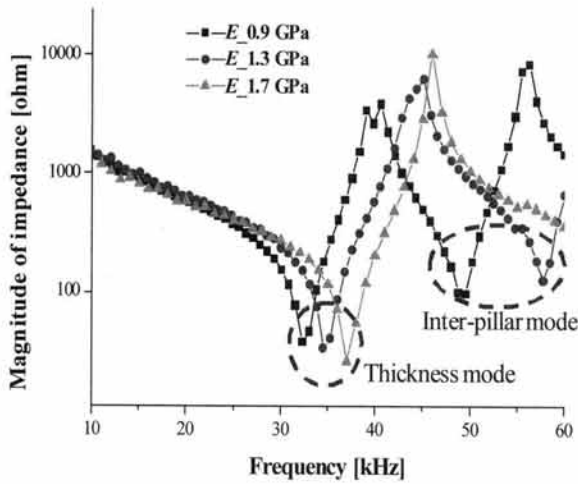


Fig. 4. Impedance spectrum in relation to the Young's modulus of polymer.

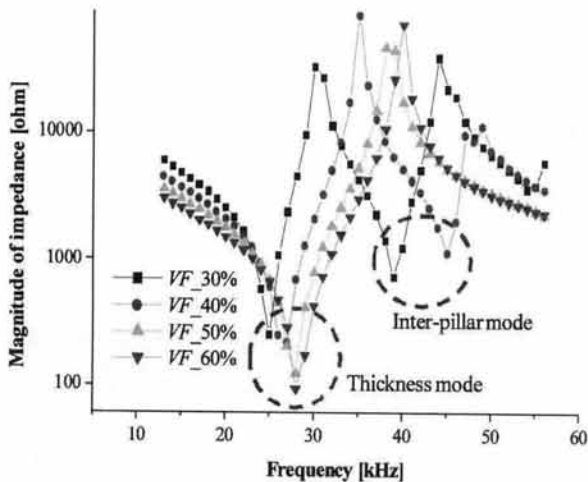


Fig. 5. Impedance spectrum in relation to the volume fraction of ceramic.

서 inter-pillar 모드가 관찰되지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 부피비가 증가함에 따라 복합체 내의 세라믹과 세라믹 간의 간격이 좁아지기 때문이다 [15]. 이상과 같은 폴리머 모재의 영률과 세라믹의 부피비가 1-3형 압전복합체의 특성에 미치는 영향으로부터, 세라믹의 부피비가 높거나 폴리머 모재의 영률이 높으면 inter-pillar 모드와 두께 모드 간의 결합이 발생할 가능성이 낮은 것을 알 수 있다.

### 2.3 1-3형 압전복합체의 구조 최적화

1-3형 압전복합체의 구조 최적화는 선정된 목적함

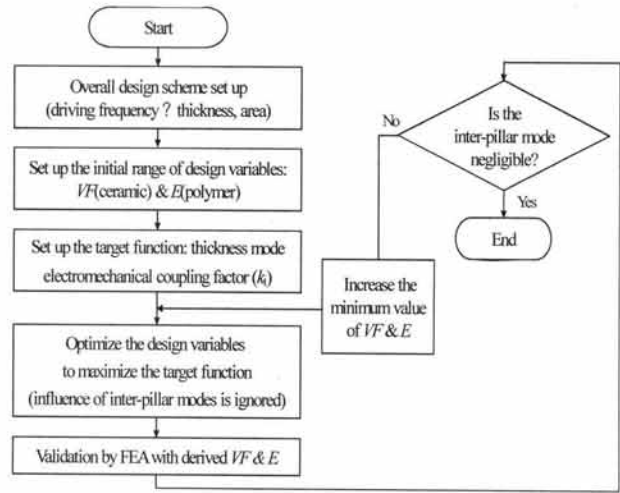


Fig. 6. Piezocomposite structure optimization algorithm.

수가 최대가 되도록 하는 설계 변수들의 최적 조합을 찾는 것이다. 최적화 과정은 그림 6에 나타난 것과 같다. 우선 주어진 구동 주파수로부터 압전복합체의 두께와 면적을 결정할 수 있다. 압전복합체가 깨끗한 두께 모드를 가지기 위해 압전복합체의 전체 너비와 두께의 비가 10대 1 이상이 되도록 설정하였다. 다음으로 2.2절에서 분석한 바와 같이 압전복합체의 특성에 큰 영향을 미치는 설계 변수들인 세라믹의 부피비  $VF$ 와 폴리머 모재의 영률  $E$ 의 초기 변화 범위를 설정하였다. 이때 세라믹은 PZT-5H, 폴리머 모재의 밀도는  $1,220 \text{ kg/m}^3$ , 포아송 비는 0.4로 일정한 값을 사용하였다. 설계 변수인 폴리머 모재 영률의 변화 범위는  $0.7 \sim 6.0 \text{ GPa}$ 로 선정하였는데, 이는 일반적으로 압전복합체에 사용되는 폴리머의 영률 범위이다. 또 다른 설계 변수인 세라믹 부피비의 변화 범위는 20%에서 80%까지로 설정하였다.

본 연구에서의 최적화 목적은 inter-pillar 모드가 발생하지 않으면서 목적 함수가 최댓값을 가지는 설계 변수  $VF$ 와  $E$ 의 조합을 찾는 것이다. 목적함수는 다양한 음향 특성과 압전 특성을 선정할 수 있으나, 본 연구에서는 1-3형 압전복합체의 두께 모드 전기-기계 결합 계수인  $k_t$ 를 목적 함수로 선정하였다.

설계 변수와 목적 함수가 정해졌으므로 다음 과정으로 각각의 설계 변수가 목적 함수에 미치는 영향을 분석하여 수식화하였다. 설계 변수인  $VF$ 와  $E$ 가  $k_t$ 에 미치는 영향은 식 (1)~(11)로 나타낼 수 있는데, 이 식들은 1-3형 압전복합체가 두께 모드로만 진동한다는 가정 하에 유도된 것이다 [10,11]. 우선, 폴리머의

영률  $E$ 를 사용해 식 (2)~(5)로부터 폴리머 모재의 컴플라이언스 행렬  $[s^P]$ 를 계산하는데, 폴리머 모재는 등방성 재료이므로  $s_{11}^P$ ,  $s_{12}^P$ ,  $s_{44}^P$  값을 계산하여  $[s^P]$ 를 구할 수 있다 [20]. 다음으로 식 (6)으로부터 폴리머의 강성 행렬  $[c^P]$ 를 계산할 수 있다 [20]. 이렇게 구한 폴리머의 탄성계수들은 압전 세라믹의 물성값들과 결합해서, 1-3형 압전복합체 전체의 두께 방향 등가 탄성, 유전, 압전 계수를 각각 식 (7)과 (10), (8), (9)와 같이 나타낼 수 있다. 이렇게 구한 등가 물성값들로부터  $k_t$ 는 식 (11)에 의해 구할 수 있다 [10]. 식 (1)~(11)에서 윗줄  $\bar{\rho}$ 은 1-3형 압전복합체의 등가 물성을 나타낸다. 위 첨자  $C$ 와  $P$ 는 각각 세라믹과 폴리머 모재의 물성을 나타내고, 위 첨자  $D$ ,  $S$ ,  $B$ 는 각각 전기적 변위와 기계적 변형률, 전계가 일정할 때의 PZT-5H 물성을 나타낸다. 위 첨자 중  $P$ 외의 문자는 모두 압전 세라믹의 물성을 의미한다. 식 (1)의  $\rho$ 는 밀도, 식 (3)의  $G$ 는 폴리머의 전단 계수,  $\nu$ 는 포아송 비이며, 식 (7)의  $c$ 는 강성 계수, 식 (8)의  $e$ 는 압전 상수, 식 (9)의  $\varepsilon$ 은 유전율을 나타낸다. 목적함수에 해당하는 식 (11)의  $k_t$ 는 결국  $VF$ 와  $E$ 의 함수로 나타나며, 최적화 과정에서는 이  $k_t$ 를 최대로 만드는  $VF$ 와  $E$ 의 조합을 찾았다. 최적화에는 유전자 알고리즘을 사용하였다.

$$\bar{\rho} = VF\rho^C + (1 - VF)\rho^P \quad (1)$$

$$s_{11}^P = \frac{1}{E} \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3)$$

$$s_{12}^P = s_{11}^P - \frac{1}{2G} \quad (4)$$

$$s_{44}^P = 2(s_{11}^P - s_{12}^P) \quad (5)$$

$$[c^P] = [s^P]^{-1} \quad (6)$$

$$\bar{c}_{33}^B = VF \left[ c_{33}^B - \frac{2(1 - VF)(c_{33}^B + c_{12}^B)^2}{VF(c_{11}^B + c_{12}^B) + (1 - VF)(c_{11}^B + c_{12}^B)} \right] + (1 - VF)c_{11}^B \quad (7)$$

$$\bar{e}_{33} = VF \left[ e_{33} - \frac{2(1 - VF)e_{31}(c_{13}^B - c_{12}^B)}{VF(c_{11}^B + c_{12}^B) + (1 - VF)(c_{11}^B + c_{12}^B)} \right] \quad (8)$$

$$\bar{\varepsilon}_{33}^S = VF \left[ \varepsilon_{33}^S - \frac{2(1 - VF)e_{31}^2}{VF(c_{11}^B + c_{12}^B) + (1 - VF)(c_{11}^B + c_{12}^B)} \right] + (1 - VF)\varepsilon_{11}^P \quad (9)$$

$$\bar{c}_{33}^D = \bar{c}_{33}^B + (\bar{e}_{33})^2 / \bar{\varepsilon}_{33}^S \quad (10)$$

$$k_t = \bar{c}_{33}^D / (\bar{c}_{33}^D \bar{\varepsilon}_{33}^S)^{1/2} \quad (11)$$

그러나 최적화에 사용된 식들은 압전복합체가 두께 모드뿐만 아니라 진동한다는 가정 하에 유도되었기 때문에, inter-pillar 모드의 영향이 고려되지 않았다. 따라서 목적함수인  $k_t$ 가 최대인 구조를 도출하여도 inter-pillar 모드와 두께 모드 간의 결합 유무는 알 수 없다. 그러므로  $k_t$ 가 최대인 경우의  $VF$ 와  $E$ 에 대해 추가적으로 inter-pillar 모드가 두께 모드 주위에 발생하는지를 확인할 필요가 있고, 본 연구에서는 그 확인을 유한요소 해석을 통해 수행하였다. 해석 모델로는 2.1절에서 신뢰성을 검증한 모델을 사용하였다. 일반적으로 압전복합체의 종횡비가 낮을수록 inter-pillar 모드와 두께 모드 간의 결합을 줄일 수 있다 [16]. 그러나 종횡비가 너무 낮으면 복합체 제작에 어려움이 있으므로, 본 해석에서는 복합체의 초기 종횡비를 0.5로 선정하여 임피던스 스펙트럼을 구하였다. 우선 위에서 도출한 복합체의 등가물성과 식 (12)를 이용하여 두께 모드 반공진 주파수  $f_a$ 를 계산하였다 [10]. 여기서,  $t$ 는 압전복합체의 두께이다. 나아가 식 (12)에서 계산한 두께 모드 반공진 주파수와 식 (11)에서 계산한  $k_t$ 를 식 (13)에 대입하여 두께 모드 공진 주파수  $f_r$ 를 계산하였다 [10].

$$f_a = (\bar{c}_{33}^D / \bar{\rho})^{1/2} / 2t \quad (12)$$

$$k_t = \frac{\pi f_r}{2 f_a} \tan\left(\frac{\pi f_a - f_r}{f_a}\right) \quad (13)$$

식 (12)와 (13)으로 계산된 두께 모드 공진 주파수  $f_r$ 와 반공진 주파수  $f_a$ 를 이용하여, inter-pillar 모드가 두께 모드 주위에 발생하는지를 확인하였다. Inter-pillar 모드의 발생 유무를 판단하는 주파수의 범위는  $f_r$ 의

0.8배로부터  $f_a$ 의 1.2배까지로 설정하였는데, 이는 이 주파수 범위 바깥에서는 inter-pillar 모드가 발생하더라도 두께 모드의 진동형태 (mode shape)에 별 영향을 주지 않는 것으로 나타났기 때문이다. 그러나 inter-pillar 모드가 이 주파수 범위 내에서 발생하면 시편의 두께 모드 진동에 영향을 주므로, 초기에 설정했던 설계 변수의 변화 범위를 재설정하여 최적화 과정을 다시 수행해야 한다. 목적함수로 선정된  $k_t$ 는  $VF$ 의 변화에 따라 50~60% 사이에서 최댓값을 가지는 2차 함수의 형태이며  $E$ 의 값이 낮아질수록 증가한다. 그러나 앞서 언급하였듯이 inter-pillar 모드는  $VF$ 와  $E$ 가 낮을수록 두께 모드와 결합할 가능성이 높다. 따라서 최적화된 값으로 선정된  $VF$ 와  $E$ 가 inter-pillar 모드를 발생시키는 것으로 확인된 경우에는,  $VF$ 와  $E$ 의 변화 범위의 최솟값을 표 1과 같이 순차적으로 증가시켰다. 즉, 맨 처음 (order= 1) 최적화에서는  $VF$ 는 20%에서 80%까지,  $E$ 는 0.7 GPa에서 6 GPa까지 변할 수 있도록 범위를 설정해서 최적화를 수행하는데, 만약 inter-pillar 모드가 발생하는 것으로 확인되면  $E$ 의 범위는 그대로 둔 채  $VF$ 의 최솟값을 30%로 증가시켜서 즉 범위를 30%에서 80%까지로 정해 두 번째 (order= 2) 최적화를 수행하였다. 이런 식으로  $VF$ 의 변화 범위를 순차적으로 축소시켜가며 inter-pillar 모드가 발생하지 않는  $k_t$ 의 최댓값을 추적하였다. 하지만 만약  $VF$ 의 변화 범위가 70~80%가 되어도 여전히 inter-pillar 모드가 발생한다면,  $E$ 의 범위를 0.9~6 GPa로 축소한 후  $VF$ 의 범위를 다시 20~80%부터 시작해서 위와 같이 순차적으로 변경해가며 inter-pillar 모드가 발생하지 않으면서 목적함수  $k_t$ 가 최대가 되는 설계 변수를 도출하였다.

### 3. 결과 및 고찰

1-3형 압전복합체의 구조 최적화를 앞선 2.3절의 방법으로 수행하였다. 표 1의 order가 1에 해당하는 초기 설정 범위로 최적화를 수행하였을 때 구해진 설계 변수의 값은  $VF$ 가 56%,  $E$ 는 0.7 GPa이다. 그러나 이 구조에 대해 유한요소 해석을 통해 임피던스 스펙트럼을 계산하면 그림 7(a)와 같이 두께 모드 부근에 inter-pillar 모드가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 목적함수로 사용된 식 (11)에는 inter-pillar 모드와 두께 모드 간의 결합이 고려되지 않았기 때문에 초기 범위에서 도출된  $E$ 가 지나치게 유연하고  $VF$ 도 낮기 때문이다.

Table 1. Change of minimum value of design variable by iteration.

Order of optimizations	Minimum $VF$ (%)	Minimum $E$ (GPa)
1	20	0.7
2	30	0.7
3	40	0.7
4	50	0.7
5	60	0.7
6	70	0.7
7	20	0.9
8	30	0.9
⋮	⋮	⋮

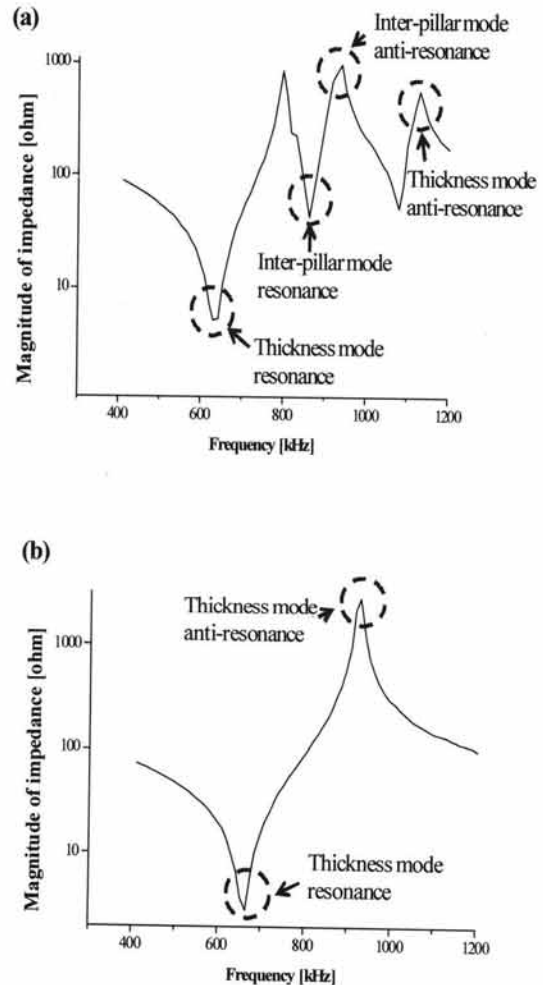


Fig. 7. Impedance spectra of the optimized piezocomposite structure. (a) impedance spectrum showing the coupling between inter-pillar mode and the thickness mode, (b) impedance spectrum showing a pure thickness mode.

따라서 표 1과 같이  $VF$ 의 변화 범위를 20~80%, 30~80% 순으로 변경하여 최적화를 반복 수행하면,  $VF$ 의 범위가 70~80%,  $E$ 의 범위가 0.7~6 GPa인 경우에  $VF$ 는 70%,  $E$ 는 0.7 GPa라는 결과가 도출된다. 도출된 구조에 대해 임피던스 스펙트럼을 구해보면 그림 7(b)와 같이 나타난다. 그림 7(a)와는 달리 inter-pillar 모드가 두께 모드 주위에서 발생하지 않으며 깨끗한 두께 모드를 가진다. 따라서 이 최적화 방법을 사용하면 inter-pillar 모드가 발생하지 않으면서 목적함수  $k_t$ 가 최댓값을 가지는 설계 변수  $VF$ 와  $E$ 의 값을 도출할 수 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 1-3형 압전복합체의 두께 모드 전기-기계 결합계수를 최대화할 수 있는 1-3형 압전복합체의 최적 구조를 결정하였다. 1-3형 압전복합체가 두께 모드로 진동 시, 1-3형 결합구조에 의해 격자형으로 배열된 압전 세라믹 삽입체들과 폴리머 모재 간에는 inter-pillar 공진 모드가 발생하기 쉬운데, 이는 압전복합체의 특성을 크게 저하시키는 것이다. 1-3형 압전복합체에 관한 기존의 선행 연구에서는 복합체의 진동 모드, 구조 최적화, inter-pillar 모드 등에 대해 개별적으로 수행되었으나, inter-pillar 모드는 고려하지 않았다. 따라서 본 논문에서는 1-3형 압전복합체에서 inter-pillar 공진 모드가 발생하지 않으면서 두께 모드 결합계수를 최대가 되도록 하는 새로운 구조 설계 방법을 제안하였다. 이론식을 이용하여 설계 변수를 도출하였으며 도출된 설계 변수로 유한요소 해석을 수행하여 최종적으로 inter-pillar 모드가 발생하지 않는 복합체의 최적 구조 변수를 도출하였다. 최적 설계에는 유전자 알고리즘을 사용하였고, inter-pillar 모드의 분석에는 유한요소 해석법을 사용하였다. 본 연구에서 제안한 최적화 방법은 압전복합체의 구성하는 세라믹의 재료와 압전복합체의 연결 형태가 바뀌어도 적용할 수 있다. 또한 본 연구에서 목적함수로 사용한 두께 모드 전기-기계 결합 계수 외의 다른 다양한 압전 특성, 음향 특성에 대해서도 최적 설계 변수를 도출하는데도 유용하게 사용될 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다 (계약번호 UD110027DD).

#### REFERENCES

- [1] T. R. Gururaja, W. A. Schulze, L. E. Cross, R. E. Newnham, B. A. Auld, and Y. J. Wang, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 32, 481 (1985).
- [2] R. E. Newnham, *Ferroelectr.*, 68, 1 (1986).
- [3] E. K. Akdogan, M. Allahverdi, and A. Safari, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 32, 1 (1986).
- [4] R. E. Newnham, D. P. Skinner, and L. E. Cross, *Mater. Res. Bull.*, 13, 525 (1978).
- [5] M. Avellaneda and P. J. Swart, *J. Acoust. Soc. Am.*, 103, 1449 (1998).
- [6] K. C. Benjamin, *J. Electroceram.*, 8, 145 (2002).
- [7] C. Xina, X. Dongyub, L. Lingchao, H. Shifeng, and J. Minhuab, *Mater. Chem. Phys.*, 121, 63 (2010).
- [8] O. Sigmund, S. Torquato, and I. A. Aksay, *J. Mater. Res.*, 13, 1038 (1998).
- [9] L. V. Giviansky and S. Torquato, *Struct. Optim.*, 13, 23 (1997).
- [10] W. A. Smith and B. A. Auld, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 38, 40 (1991).
- [11] W. A. Smith, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 40, 41 (1993).
- [12] B. A. Auld and Y. Wang, *IEEE Trans. Ultrason. Symp.*, 528 (1984).
- [13] D. Certon, F. Patat, F. Levassort, G. Feuillard, and B. Karlsson, *J. Acoust. Soc. Am.*, 101, 2043 (1997).
- [14] P. Reynolds, J. Hyslop, and G. Hayward, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2, 1650 (2003).
- [15] F. Craciun, L. Sorba, E. Molinari, and M. Pappalardo, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 36, 50 (1989).
- [16] Y. Wang, *Waves and Vibration in Elastic Superlattice Composite* (Ph.D. Dissertation, Stanford Univ., 1986).
- [17] D. Robertson, G. Hayward, A. Gachagan, and V. Murray, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 53, 1503 (2006).
- [18] C. N. Della and D. Shu, *Sens. Actuat. A Phys.*, 40, 206 (2007).
- [19] H. L. W. Chan and J. Unsworth, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, 36, 434 (1989).
- [20] J. F. Nye, *Physical Properties of Crystals* (Oxford Univ. Press, New York, 1985).