

유한요소법을 이용한 복합압전체의 압전계수예측

신병철·윤만순·임종인·강영훈·장현명·박병학·백성기

산업과학기술연구소

(1989년 9월 11일 접수)

Prediction of Piezoelectric Coefficients of PZT-Polymer Composites by Finite Element Method

B.C. Shin, M.S. Yoon, J.I. Im, Y.H. Kang, H.M. Jang, B.H. Park and S.K. Baik

Research Institute of Industrial Science and Technology

(Received September 11, 1989)

요 약

압전세라믹-폴리머 복합체(1-3, 3-1)의 정수압 압전전압계수를 정확히 구하기 위하여 유한요소법(FEM)을 이용하였으며, 본 연구에서 사용된 모델의 경우 정수압 압전전압계수가 최대로 되는 압전세라믹상의 부피분율은 20% 정도임을 예측하였다.

ABSTRACT

A model is developed based on the Finite Element Method (FEM) which provides a more accurate prediction of the hydrostatic piezoelectric coefficient of 1-3 or 3-1 PZT-Polymer composites than does the series/parallel model.

1. 서 론

압전 복합재료는 단일상의 압전세라믹스, 예를 들면 lead zirconate titanate(PZT)보다 정수압 압전전압계수(hydrostatic piezoelectric voltage coefficient, g_h)가 높고, 주요 매질인 물과의 임피던스 정합(matching)이 양호하여, 수중음향 탐지기나 초음파 센서 등에 더욱 유리하다. 그중 PZT와 폴리머로 구성된 복합재료가 개발되었으며, 여러가지 모양으로 제조되고 있다^{1,2}. 이에 따라 복합체 각 상의 특성과 복합된 모양으로 부터 최종 복합체의 유전, 압전특성을 유추하려는 연구가 진행되어 왔으며, 그 중 일부 특성, 예를 들면 유전상수는 실험치에 상당히 접근하였다³. 그러나 실제 수중 음향소자(hydrophone)등

에서 가장 중요한 정수압 압전전압계수(g_h)에 대한 예측은 점증적으로 시도되어 왔으나 부정확하고, 일반성이 결여되어 있다⁴. 따라서 3-1형의 압전세라믹-폴리머 복합체의 정수압 압전전압계수(g_h)를 예측하기 위하여 유한요소법(finite element method, FEM)프로그램인 SAP-IV가 이용되기도 하였다⁵. 그러나 제시된 모델이 복잡하고 실제로 응용되지 않는 형이었으며, SAP-IV의 용량 및 기능적하로 인하여, 요소(elements)와 꼭지점(nodes)의 번호를 사람이 하나하나 매겨야하는 등, 복잡하고 까다로운 경로를 거쳐야했다. 이에 본 연구에서는 실제 음향소자에 적합한 1-3형의 압전복합체 모델을 세우고, 요소 및 꼭지점의 번호매김이 용이한 FEM 프로그램 ANSYS를 이용하였다

2. 정수압 압전전압계수의 계산

유한요소법을 이용하여 임의의 정수압(hydrostatic pressure)이 Fig.1과 같이 구성된 PZT/Polymer 복합체에 가해질 경우에 대하여 각 요소(element)의 중심에 걸리는 여섯 종류의 응력성분을 구한다. 이렇게 구한 응력 데이터와 PZT의 압전계수로 부터 X, Y, Z 축으로 각각 1, m, n 번째 요소의 분극방향으로 발생하는 stress-induced polarization(1mnP₃)이 식 (1)과 같이 계산된다.

$$1mnP_3 = d_{3jk} \cdot 1mn\sigma_{jk} \dots\dots\dots (1)$$

1mnP₃ ; 분극방향(3, 또는 Z 방향)으로 발생하는 stress-induced polarization

d_{3jk} , PZT의 압전전하계수(piezoelectric charge coefficient)

1mnσ_{jk} ; 유한요소법에 의해 계산된 응력텐서

1mn 번째 요소의 경우, 응력에 의해 발생하는 전하량(1mnQ)은

$$1mnQ = a \cdot 1mnP_3$$

가 된다. 여기서 a는 한 요소의 분극방향쪽 면적이다. 이때 전위차(1mnV)는

$$1mnV = \frac{1mnQ}{1mnC} = \frac{t \cdot d_{3jk} \cdot 1mn\sigma_{jk}}{\epsilon_0 \cdot K}$$

이 된다. 여기서 t는 한 요소의 z 축 방향으로의 두께이다. 위 식으로부터 1m 번째 열의 전위차(1mV)는

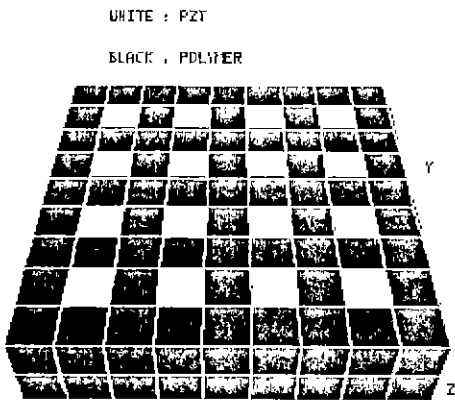


Fig.1 Schematic diagram of 1-3 PZT/polymer composites.

$$\begin{aligned} 1mV &= \sum_{n=1}^N 1mnV \\ &= \sum_{n=1}^N \frac{d_{3jk} \cdot 1mn\sigma_{jk} \cdot t}{\epsilon_0 \cdot K} \end{aligned}$$

과 같이 계산된다. 따라서 1m 번째 열에서 발생하는 전하량(1mQ)은

$$\begin{aligned} 1mQ &= 1mC \cdot 1mV \\ &= \frac{a}{N} \cdot \sum_{n=1}^N d_{3jk} \cdot 1mn\sigma_{jk} \end{aligned}$$

이 되고, 분극방향(Z)으로 발생하는 총 전하량(Q)은 식 (2)와 같게 된다.

$$\begin{aligned} Q &= \sum_{1m} 1mQ \\ &= \frac{a}{N} \sum_{1m} \sum_{n=1}^N d_{3jk} \cdot 1mn\sigma_{jk} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

그러므로 압전복합체의 전극 면적이 A 이고 가해지는 정수압이 Pa 인 경우, 정수압 압전전하계수 (hydrostatic piezoelectric charge coefficient ; d_h)는 다음 식(3)과 같이 계산되고, 정수압 압전전압계수 (hydrostatic piezoelectric voltage coefficient ; g_h)는 식(3)을 압전복합체의 절연 유전상수(K_e)로 나누면 구할 수 있다(식 4). 아래식에서 L, M, N 은 Fig. 1에서 보듯이 각각 X, Y, Z 축으로 존재하는 요소의 수이며 T는 요소의 총 수이다.

$$\begin{aligned} d_h &= \frac{P_3}{P_a} \\ &= \frac{Q}{A \cdot P_a} \\ &= \frac{\sum_{1m} \sum_{n=1}^N d_{3jk} \cdot 1mn\sigma_{jk}}{T \cdot P_a} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g_h &= \frac{d_h}{\epsilon_0 \cdot K_e} \\ &= \frac{\sum_{1m} \sum_{n=1}^N d_{3jk} \cdot 1mn\sigma_{jk}}{\epsilon_0 \cdot K_e \cdot T \cdot P_a} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

3. 실험방법

식 (3) 및 (4)의 계산에 필요한 데이터는 PZT의 압전전하계수, 유전상수, 탄성계수행렬, 그리고 폴리머의 유전상수, 탄성계수, 프와송비(Poisson's ratio) 등이며 Table 1에 정리하였다²⁾. 여기서 탄성계수행렬은 Table 1

Table 1. Piezoelectric, Elastic and Dielectric Constant of PZT and Polymer Used for the FEM Calculation.

d_{ij} of PZT (pC/N)	0.	0	0	0	584.	0
	0.	0.	0.	584	0.	0
	-171.	-171.	374.	0.	0.	0.
s_{ij} of PZT (E-6mm/N)	16.40	-5.74	-7.22	0	0.	0.
	-5.74	16.40	-7.22	0.	0.	0.
	-7.22	-7.22	18.80	0.	0	0.
	0.	0	0	47.50	0	0.
	0.	0.	0.	0.	0.	44.3
E(elastic modulus)	of Polymer 700 (N/mm ²)					
Poisson's Ratio	of Polymer : 0.3					
K(dielectric constant)	of PZT : 1700. Polymer 3					

에 정리한 탄성 compliance 행렬로부터 구하였다. 본 연구에서는 각 요소별 응력텐서를 구하기 위하여 162개의 육면체요소(hexa element)를 사용하여 총 자유도 수 600으로 유한요소 모델링(finite element modeling)하였으며 구조해석 범용 프로그램인 ANSYS를 이용하였다. 복합체의 모델은 Fig. 1과 같은 직육면체 모양이며, 전체 크기를 가로(X), 세로(Y) 각각 12.6mm씩, 높이(Z) 2.8mm로 하였고, 가로, 세로 각각 1.4mm, 높이 2.8mm인 PZT 막대를 가능한 한 서로 닿지 않고 멀리 떨어뜨려 이웃한 PZT 막대의 영향을 줄이고자 하였으며, PZT의 부피분율을 1.2%에서 100%까지 변화시켜보았다. 이때의

경계조건으로, PZT-폴리머 복합체의 밑면(X-Y)을 바닥에 고정시키고, 나머지 5면은 유체로 부터 똑같은 압력(0.7Mpa)을 작용면에 수직으로 받도록 하였다. 모델을 구성한 후 정수압(0.7Mpa)이 가해진 복합체 내의 각 요소별 응력 텐서를 유한요소법으로 계산한 다음, 그 결과를 식(3)과 (4)의 응력 텐서값에 대입하여 1-3 또는 3-1압전 복합재료의 PZT 부피분율에 따른 정수압 압전전하계수(d_h)와 정수압 압전전압계수(g_h)를 구하였다.

4. 결과 및 고찰

계산된 정수압 압전전하계수(d_h)는 Fig. 2에, 정수압 압전전압계수(g_h)는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2에서 보듯이 순수한 PZT의 경우 정수압 압전전하계수가 87.52 pC/N으로 계산되었으며, PZT의 부피분율이 감소할수록 서서히 증가하여 30-40%에서 최고에 도달했다가 급격히 감소하였다. 또한 Fig. 3에서 알 수 있듯이 순수한 PZT의 경우 정수압 압전전압계수가 $5.82E-3$ Vm/N으로 계산되었으며, PZT 부피분율이 줄어들수록 서서히 증가하다가 PZT 막대끼리 서로 닿지 않는 1-3형이 되면서 급격히 증가하여 약 20% 정도에서 최고치에 도달한 후 거의 변화를 감지할 수 없을 정도로 약간씩 감소하였다. 위 결과는 PZT의 부피분율이 감소하여 0%가 될 때까지 정수압 압전전하계수(d_h)와 정수압 압전전압계수(g_h)가 증가할것으로 예측된 Skinner의 결과⁴⁾와 다소 차이를 보이고 있다. 이는 Skinner 등이

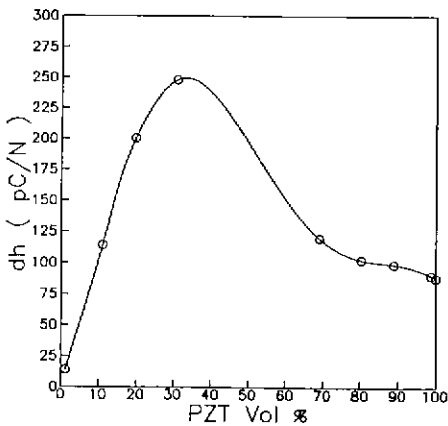


Fig. 2. Calculated hydrostatic piezoelectric charge coefficients of 1-3 or 3-1 PZT-polymer composites.

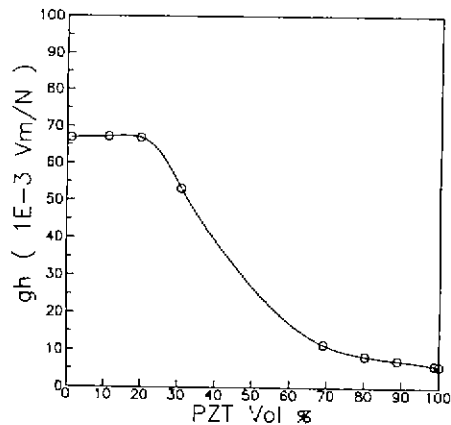


Fig. 3 Calculated hydrostatic piezoelectric voltage coefficients of 1-3 or 3-1 PZT-polymer composites.

$$d_h = d_{32} + 2Vd_{31}$$

의 관계식을 이용하여, 압전복합체의 d_{32} 실험치와 PZT 단일상의 d_{31} 값을 부피분율(V)에 따라 산술적으로 계산한 데략치였다. 따라서 압전복합체 내부의 각 부위에 걸리는 응력을 종합적으로 고려하여 계산한 본 연구의 결과가 더욱 정확하다고 볼 수 있다. 또한 같은 부피분율이라도 복합체 구성방법이 다르면 응력분포가 달라지게 되는데, 본 연구결과는 이에 따른 압전계수의 변화도 계산할 수 있다. 위와 같은 계산결과를 참고로하여, 전하증폭기를 사용할 경우, 정수압 압전전하계수가 최대로되는 압전 복합체료가 유리하며 이 때 PZT 부피분율은 30~40%가 적당함을 알 수 있다. 그리고 실제 수중 음향소자 등에는 높은 정수압 압전전하계수를 갖는 PZT 분율 20% 정도의 1-3형 압전 복합체료가 유리할 것으로 판단된다.

5. 결 론

1-3 또는 3-1형 압전복합체의 정수압 압전전하계수(d_h), 정수압 압전전압계수(g_h)를 정확히 계산하기 위하여 유한요소법을 이용하여 일정한 정수압 하에서의 압전복합체내의 응력분포를 구하고, 그 결과로 부터 전하발생량 등을 계산하여 보았다. 그 결과, PZT의 부피분율이 감소함에 따라 정수압 압전전하계수(d_h)와 압전전압계수(g_h)가 증가하다가 20-30% 정도이하의 범위에서는 감소하거나 일정하게 유지되었다.

따라서 수중 음향소자 등에는 PZT 부피분율이 20% 정도되는 1-3형 압전 복합체료가 유리하다는 결론을 얻을 수 있었다

[후 기]

본 연구는 포항종합제철주식회사의 연구비 지원에 의해 수행중인 것으로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. A. Safari, R.E. Newnham, L.E. Cross and W. A. Schulze, "Perforated PZT-Polymer Composites for Piezoelectric Transducer Applications", *Ferroelectrics*, **41**, 197-205, (1982).
2. R.E. Newnham, A. Safari, J. Giniewicz and B. H. Fox, "Composite Piezoelectric Sensors", *Ferroelectrics*, **60**, 15-21, (1984).
3. H.G. Lee and H.G. Kim, "Influence of Microstructure on the Dielectric and Piezoelectric Properties of Piezoelectric Ceramic-Polymer Composites", *J. Am. Ceram. Soc.*, **72**, (1989).
4. R.E. Newnham, D.P. Skinner and L.E. Cross, "Connectivity and Piezoelectric-Pyroelectric Composites", *Mat. Res. Bull.*, **13**, 525-536, (1978).
5. S.P. DaVanzo, "Finite Element Modeling of PZT Composites for Hydrophone Application", Ph. D. Thesis, The Penn. State. Univ., (1986).
6. K.H. Huebner and E.A. Thornton, in "The Finite Element Method for Engineers", (John Wiley & Sons, Inc), (1982).
7. B. Jaffe, W.R. Cook and H. Jaffe, in "Piezoelectric Ceramics", (Academic Press, NY) p.146, (1971).