

수중청음기를 위한 Piezoceramic/Polymer 0-3 Composite의 동가회로 해석

최현일^o 박정학 사공건
(동아대 전기공학과)

Equivalent Circuit Analysis of Flexible Piezoceramic/Polymer
0-3 Composites for Hydrophone Applications

H.I.Choi^o J.H.Park G.Sa-gong
(Dept. of Electrical Engr., Dong-A Univ.)

Abstract; A Modified equivalent circuit by combining a series and parallel of polymer matrix for estimating the dielectric constant \bar{K}_{33} values changing the volume percent of $PbTiO_3$, the dependences of frequency for the \bar{K}_{33} and dissipation factor for 0-3 composites was derived. The difference of the dielectric constant and dissipation factor between the calculated and measured values became smaller at higher volume percent of $PbTiO_3$.

There was good agreement between the calculated and observed results for 70 volume percent of $PbTiO_3$ and 30 volume percent of Eccogel composite at 1(KHz), 25(°C). The optimized variable x was 0.94 in $PbTiO_3$ ceramics.

$PbTiO_3$ powder and Eccogel polymer were used as piezoelectric fillers and matrix, respectively.

I. 서론

수중청음기(Hydrophone)는 수중의 음파를 탐지하는 Transducer로서 수중압전정수(\bar{d}_h, \bar{g}_h) 및 성능지표(Figure of Merit; $\bar{d}_h \bar{g}_h$)가 큰 것이 요구된다. 그러나 지금까지 널리 사용되고 있는 PZT나 $PbTiO_3$ 와 같은 압전 세라믹이 수중청음기에 응용될 경우 압전세라믹 단일상으로는 고유전율, 고밀도로 인하여 음향임피던스정합이 어려워 감도를 나타내는 성능지표가 낮다. 이를 개선하기 위해 3-1 및 3-2 composite가 A.Safari¹⁾, T.Shroul²⁾에 의해, 0-3 composite가 H.Banno³⁾에 의해 개발되고 있으며, R.E.Newnham⁴⁾ 등은 Connectivity개념을 이용하여 각종 Composite의 Model을 구체화하였다.

한편 Composite의 이론적 해석을 위해 Furukawa⁵⁾, Yamada⁶⁾, 그리고 Newnham⁷⁾ 등에 의해 여러가지 모델이 제안된 바 있다. 그런데 그들 대부분의 해석은 polymer matrix와 Filler Particle의 특성 및 혼합비율의 차가 적은

경우에 이루어 졌으므로 본 연구에서는 Polymer Matrix에 압전세라믹이 비교적 많이 분산, 혼합된 0-3 Composite에 대해 종래의 Ceramic에 적용되어 오던 동가회로를 일부 수정한 것에서 계산한 이론치와 0-3 Composite의 실험결과치를 비교하였다.

0-3 Composite 제작을 위해 Filler Particle로서는 $PbTiO_3$ 를, Polymer Matrix로서는 Eccogel(1365-0)를 사용하였다.

II. 본론

1. 이론적 고찰

0-3형 Composite는 Polymer Matrix에 압전세라믹 filler가 분산, 혼합되어 있는 형태를 하고 있으며, 0-3 Connectivity를 갖는 $PbTiO_3$ (phase1)와 Polymer(phase2)를 도식화하면 그림1과 같다.

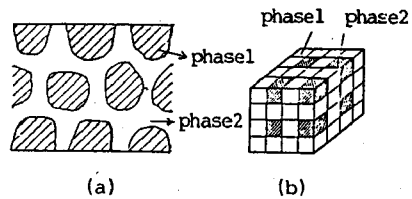


그림 1. (a) 0-3 composite의 미세구조
(b) 0-3 composite model

0-3 Connectivity를 갖는 Composite는 직렬모델과 병렬모델로 나누어 해석할 수 있다.⁸⁻⁹⁾(그림2)

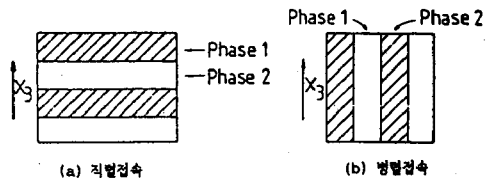


그림 2. 2상 composite의 직 병렬접속

그림2의 각 모델에서 비유전율 \bar{K}_{33} 는 다음과 같은 식으로 주어진다.

(1) 직렬접속

$$\bar{K}_{33} = \frac{1V}{1K_{33}} + \frac{2V}{2K_{33}} \quad \text{-----(1)}$$

(2) 병렬접속

$$\bar{K}_{33} = 1V \cdot 1K_{33} + 2V \cdot 2K_{33} \quad \text{-----(2)}$$

식 (1), (2)에서 $1V, 1K_{33}$ 와 $2V, 2K_{33}$ 는 각각 압전 세라믹상과 Polymer상의 Volume fraction 및 유전율을 나타낸다.

그림3은 0-3Composite의 이론적 해석을 위해 설정한 입방모델의 단위입방포를 나타낸 것이며, 그림4는 Polymer (Y_1, Y_3)가 일부는 직렬로, 또 다른 일부는 병렬로 연결되어진 0-3Composite의 등가회로이다.

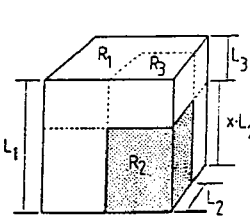


그림 3. 0-3 Composite의 단위 입방포

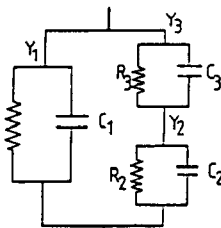


그림 4. 0-3 Composite의 등가회로

그림3에서 parameter x는 단위입방포내에서 제1상인 PbTiO₃가 변화할 수 있는 값으로, 그 값이 최소일때 병렬접속이 되며, 그 값이 최대일때 직렬접속이 됨을 알 수 있다.

한편 변수 x가 최소값을 가질때 Volume fraction n은

$$n = x \quad \text{-----(3)}$$

가 되고, 변수 x가 최대값을 가질때 Volume fraction n은

$$n = (x \cdot L_2) L_2^2 = 1 \cdot L_2^2$$

이므로

$$x = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad \text{-----(4)}$$

이 된다.

식 (3), (4)에 따라 변수 x의 범위는

$$n < x < n^{-\frac{1}{2}}$$

로 주어진다.

2. 실험

2-1. 시편 제작

PbTiO₃ powder(Ferro Corporation)와 Eccogel Polymer(Eccogel Series #1365-0, Emerson and Cumming Co.)를 70:30의 Volume%로 혼합한 다음

10,000(psi)압력으로 1cmx1cmx0.1cm의 크기로 시편은 만들고, 70(°C)에서 8시간 경화(Curing)시켰다. 시편의 양면에 Silver Paste전극을 부착시켜 Silicon Oil속에서 120(°C), 40(KV/cm)의 조건으로 5분간 Poling시켰으며, 10-12) 각종 특성은 24시간 경과후 측정하였다.

2-2. 특성치의 측정

Capatance와 tanδ(유전손율)는 Multi-Frequency LCR Meter(HP 4270A)를 사용하여 각 주파수에서 측정하였으며, 압전정수 \bar{d}_{33} 는 Berlincourt Piezo \bar{d}_{33} -Meter로 측정하였다.

그리고 수중압전정수 \bar{g}_h 는 Pseudo- g_h dynamic Method에 의해 측정하였으며, 수중압전정수 \bar{d}_h 는 $\bar{g}_h = \bar{d}_h / \epsilon \cdot K$ 식에서 구하였으며, ϵ 는 공기중의 유전율을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

Table 1. Dielectric and Piezoelectric Properties of PbTiO₃-Polymer Composite

Composite	tanδ	\bar{K}_{33}	\bar{d}_{33}	\bar{g}_h	\bar{d}_h	$\bar{g}_h \bar{d}_h$
PbTiO ₃ (70) ^{**} -Polymer(30)	0.06	38	22	21	10	210

* Polymer: Eccogel(1365-0)

** (): Volume% of ceramic, polymer or conductive phase
units: \bar{d}_{33}, \bar{d}_h ; pC/N, $\bar{g}_h; 10^{-3}$ Vm/N, $\bar{g}_h \bar{d}_h; 10^{-15}$ m²/m

표1은 PbTiO₃-Eccogel의 Vol.%가 70:30인 0-3 Composite의 유전적, 압전적 결과를 요약한 것이다.

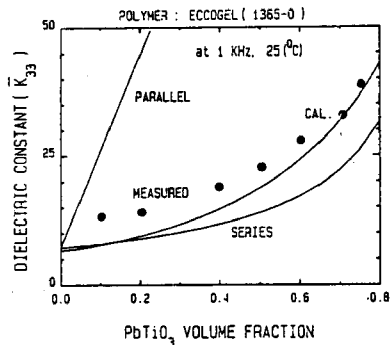


그림 5. 0-3 Composite에 대한 PbTiO₃의 Vol.%와 비유전율과의 관계

그림5에는 PbTiO₃와 Eccogel(1365-0)의 직·병렬 접속시 1KHZ, 25(°C)에서 비유전율 \bar{K}_{33} 의 이론치와 실측치를 PbTiO₃ Volume%의 함수로서 나타내고 있는데 PbTiO₃의 체적비가 비교적 큰범위에서는 이론치와 실측치가 잘 일치하였다.

그림 6,7에서 $PbTiO_3$ 70Volume% 및 Eccogel 30Volume%로 만든 0-3Composite의 주파수에 따른 \bar{K}_{33} 및 $\tan\delta$ 를 보여주고 있는데 $T=25(^{\circ}C)$, $x=0.96$, 1KHz에서 이론치 및 실험측정치가 잘 일치하였다. 그러나 100Hz에서 $\tan\delta$ 의 값은 상당한 차를 보이고 있는데 이는 측정계기의 오차가 포함되어 있는 것으로 믿어진다.

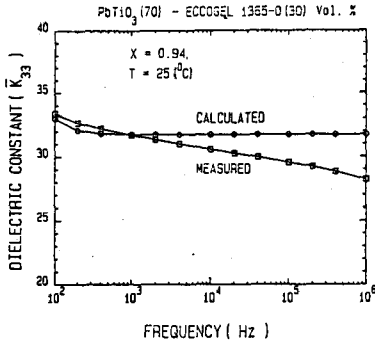


그림 6. $PbTiO_3$ -Eccogel Composite의 주파수에 따른 비유전율

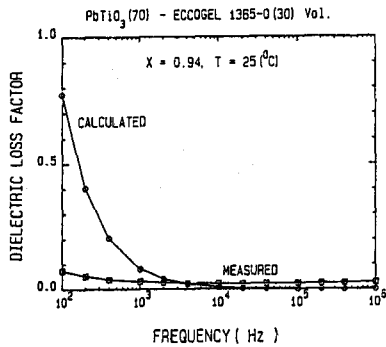


그림 7. $PbTiO_3$ -Eccogel Composite의 주파수에 따른 유전손율

그림 8,9는 $PbTiO_3$ 와 Eccogel의 비가 70:30 (Volume%)일때 유전상수와 유전손율을 온도와 주파수의 함수로서 나타낸 것으로 이론치와 비교를 위해 측정된 결과이다.

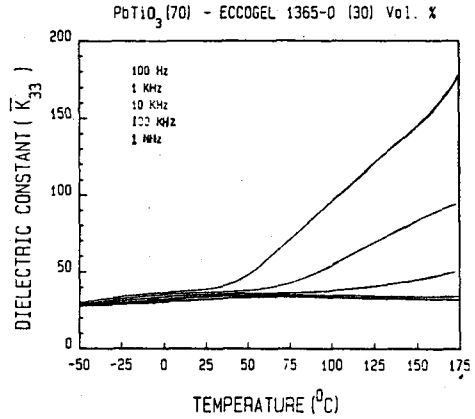


그림 8. $PbTiO_3$ -Eccogel Composite에 대한 온도와 주파수에 따른 비유전율의 변화

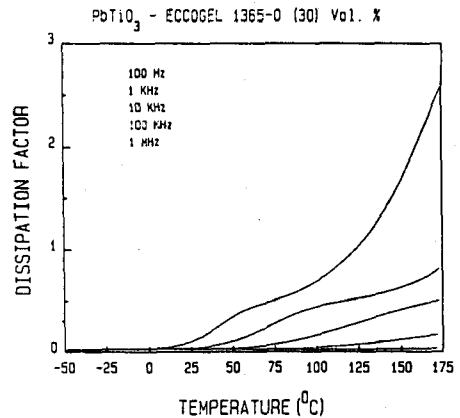


그림 9. $PbTiO_3$ -Eccogel Composite에 대한 온도와 주파수에 따른 유전손율의 변화

IV. 결 론

0-3 Connectivity를 갖는 $PbTiO_3$ -Eccogel 0-3 Composite를 제작하고, 수정한 등가회로에서 얻은 \bar{K}_{33} 및 $\tan\delta$ 의 이론적 계산치와 실험에서 얻은 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 수정한 등가회로 및 모델에서 구한 1KHz, 25($^{\circ}C$)일때 parameter x의 값은 0.94로 거의 입방체에 가까우며, 이때 얻어진 \bar{K}_{33} 및 $\tan\delta$ 의 값은 실험치와 비교적 잘 일치하였다.

(2) 세라믹과 Polymer의 Volume비는 70:30일때가 최적의 조건이었으나 각종 압전특성은 양호하지 않았다.
그리고 200(°C) 부근에서 시편의 전극이 분리되어 K_{33} 의 peak값을 발견할 수 없어, 고온에서 K_{33} 의 온도의존성을 충분히 살펴볼 수 없었다.

참 고 문 헌

1. A.Safari, A.Halliyal, R.E.Newnham & I.M. Lachman; Transverse Honeycomb Composite Transducers, Mat.Res.Bull., Vol.17, pp. 301(1982)
2. T.R.ShROUT, W.A.Schulze & J.V.Biggers; Simplified Fabrication of PZT/Polymer Composite, Mat.Res.Bull., Vol.14, pp.1553-1559(1979)
3. H.Banno; Recent Development of Piezoelectric Ceramic Products and Composites of Synthetic Rubber and Piezoelectric Ceramic Particles, Ferroelectrics, Vol. 50, pp.3(1983)
4. R.E.Newnham, L.J.Bowen, K.A.Klicker & L.E.Cross; Composite Piezoelectric Transducer, Mat.Engr., Vol.2, pp.93(1980)
5. T.Furukawa, K.Ishida & E.Fukada; Piezoelectric Properties in the Composite System of Polymers and PZT Ceramics, J.Appl.Phys., 50(7), pp.4904(1982)
6. T.Yamada, T.Ueda & T.Kitatama; Piezoelectricity of a High-Content Lead Zirconate Titanate/Polymer Composite, J.Appl. Phys., 55(6), pp.4328(1982)
7. R.E.Newnham, D.P.Skinner & L.E.Cross; Connectivity and Piezoelectric-Pyroelectric Composite, Mat.res.Bull., Vol.13, pp.525(1978)
8. B.Buchaman; Ceramic Materials for Electronics, Marcel Dekker Inc., pp.86(1986)
9. W.D.Kingery, H.K.Bowen & D.R.Uhlmann; Introduction to Ceramics, John Wiley & Sons, N.Y., pp.947(1976)
10. R.E.Newnham, A.Safari, G.Sa-gong & J.Giniewicz; Flexible Composite Piezoelectric Sensors, IEEE.Proc., Int'l Ultrasonic Sympo., pp.501(1984)
11. G.Sa-gong, A.Safari, S.J.Jang & R.E.Newnham; Poling Flexible Piezoelectric Composites, Ferroel., 5(5), pp.131(Jan., 1986)
12. G.Sa-gong & Jin-ho Bae; A Poling Study of 0-0-3 Composites for Hydrophone Application, KIEE.Proc., Korea-Japan Joint Sympo., Elec.Mat. and Disch., pp.205(July, 1986)