L_1-B_4 진동모드를 이용하는 압전 세라믹스의 유한요소 해석

FEM Analysis on the Characteristics of Piezoelectric Ceramics Using L_1-B_4 Vibration mode

김범진, 정동석, 김태열, 박태곤, 김명호*
(Beom-Jin Kim, Dong-Suk Jung, Tae-Yoal Kim, Tae-Gone Park, Myong-Ho Kim*)

Abstract

A linear ultrasonic motor was designed by a combination of the first longitudinal and fourth bending mode, the motor consisted of a straight aluminum alloys bar bonded with a piezoelectric ceramics element as a driving element. That is, L_1-B_4 linear ultrasonic motor can be constructed using a multi-mode vibrator of longitudinal and bending modes. The simulation with variation of material characteristics of piezoceramic were performed as use of finite element analysis ANSYS 5.5, such as elastic compliance, piezoelectric constant, electro-mechanical coupling coefficient, poisson's ratio and density. The results of simulation, elastic compliance constant s_{11} and piezoelectric constant d_{31} had the most of influence on the elliptic-motion. This results consist with using transverse effect of material. The used motor were piezoceramics of 4 layers, and the dimensions were 65x5x3.5㎜(LxWxt).

Key Words : L_1-B_4 linear ultrasonic motor, piezoelectric ceramics, Finite Element Analysis ANSYS 5.5

1. 서 론

압전재료로 사용하려면 낮은 인가전압에서 큰 변위를 발생하는 것이 좋다. 또 토크를 높이기 위하여 영률(Young's modulus)이 큰 재료를 사용해야 한다. PZT로 대표되는 페로브스카이트(Perovskite) 구조를 갖는 강유전성 세라믹은 이 요망에 부합되는 재료이다. PZT계 세라믹 재료는 재료 성질에 따라 경질(hard) 재료와 연질(soft) 재료로 구별한다. 경질 재료의 발생 왜형(strain)은 그다지 크지 않지만, 영률과 항전계가 커서(10[kV/㎝]이상) 큰 힘을 요구하는 용도와 분극과는 역방향으로 전계를 인가하여 사용하는 용도에 적합하다. 한편 연질 재료는 경질 재료와 비교하면 영률과 항전계의 면에서는 좋지 않으나 큰 왜형이 발생하므로 변위량을 우선하는 용도에 적합하다. 일반적으로 PZT에 도너(donor) 물질을 첨가하면 연질 재료가 되며, 억셉터(acceptor) 물질을 첨가하면 경질 재료가 된다. 경질 재료인 압전 재료는 유전율이 작으므로 고속 응답이 가능하다. 모든 강유전성 물질은 전기적·기계적 자극을 주면 유전 및 기계적 특성이 변하는 경시 변화가 일어나지만, 연화제(softner)가 첨가되면 경시 변화가 크게 감소한다. 초음파 변환기는 온도 특성, 경시 변화 및 기계적 피로가 적은 것이 실용적으로 중요하다. 특히 큰 진폭으로 동작해서 장기간 동작 사용할 때 특성의 열화가 작은 경질 재료가 적당하다[1-13].

본 논문에서 유한요소 프로그램인 ANSYS 5.5를 사용하여 압전 세라믹스의 재료성질에 따른 시뮬레이션을 하여, 그 특성의 변화를 분석하였다.

창원대학교 전기공학과
(경남 창원시 사림동 창원대학교,
Fax: 055-263-9956
E-mail : kbj220@netian.com)
* 창원대학교 세라믹공학과

2. 실험 방법

2.1 세라믹스의 압전성

물질의 결정체가 장력, 압력, 또는 응력(stress)을 받아 왜형이 생기면 결정체 내에 유기분극을 발생하

거나 아니면 압력을 발생한다. 이를 정효과라 한다. 역으로 결정체에 전계를 가해 분극을 일으키면 결정체는 왜형이 발생되거나 응력을 일으킨다. 이를 역효과라 한다. 이를 총칭하여 압전효과라 한다. 압전체의 성능은 압전상수로 나타내고, 이 압전상수는 입력과 출력을 무엇으로 취하느냐에 따라 다르다. 많이 사용되는 것은 입력을 전압, 출력을 왜형으로 나타내는데 치수는 10^{-12}[m/V]를 취하는 것이 보통이고, 입력을 응력으로 하고 출력을 전압으로 나타내는 경우 치수는 10^{-3}[Vm/N]이 된다. 물론 입력이 응력, 출력을 분극의 형으로 나타내거나 역으로 분극을 입력으로 출력을 응력으로 나타내는 경우도 있다. 기계에너지로서의 응력, 또는 왜형과 전기에너지로서의 분극 또는 전위차로 변환되는 것이 압전체의 특징이다. 유한요소 해석에 사용되는 압전방정식은 식 (1)과 같은 e형식이 사용된다.

$$T = c^E S - eE, \quad D = eS + \varepsilon^S E \qquad (1)$$

단, T(응력), S(왜형), D(전속밀도), E(전계), e(전압응력계수), c^E(E=0시 탄성 stiffness), ε^S (S=0시 유전율)

압전체의 물성과 특성을 나타내는 수치에는 이외에 다음과 같은 것이 있다. 입력을 응력으로 하고 출력을 왜형으로 할 때 탄성 컴플라이언스(compliance) 상수가 되며 단위는 10^{-12}[㎡/N]이라 하고, 입력을 왜형으로 하고 출력을 응력으로 할 때 탄성 스티프니스(stiffness) 상수라 하고 단위는 10^9[N/㎡]를 사용한다. 분극율과 전계를 결부시키는 것은 유전율이다. 압전 방정식에서 탄성 컴플라이언스 상수는 s로(s∝S/T) 탄성 스티프니스 상수는 c로 (c∝T/S) 나타내며, 이들 관계는 역수(c=1/s)의 관계에 있다.

2.2 해석 모델 및 경계조건

L_1-B_4 초음파 선형 모터를 설계하기 전에 중요한 과정으로 유한요소해석을 하는데, 고정진동자의 진동해석은 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS 5.5를 사용하였다. 압전체에는 압전체의 압전특성을 반영할 수 있는 3-D coupled-field solid를 사용하였고, 탄성체인 알루미늄 합금등은 solid 45를 사용하여 3차원적으로 설계하였으며, 요소분할은 mapped meshing을 하였다.

진동자의 해석은 경계조건으로 전극부분에 전압을 0[V]로 하고, 양끝 단를 free-free로 하여 해석하였다. 이때 공진주파수 해석에서는 1차 모드에서 6차 모드까지는 강체모드(rigid body)로 변형을 하고, 7차 모드부터 실제 변형이 나온다. 따라서, 진동자의 해석은 진동자의 형상에 따른 공진주파수(modal analysis)를 해석하고, 이 공진주파수를 가진 교류전압을 인가하여 진동자의 정상상태해석(harmonic analysis)을 하여 변위량을 구할 수 있다.

2.3 적용된 모터 및 해석범위

알루미늄합금을 탄성체로 하고 세라믹스의 재료는 표 1에 나타낸 강유전체 하드계 재료를 사용하였으며, 적용 모터의 설계는 변위가 큰 적층형인 그림 1과 같이 하였다. 그림에서 탄성체 위에 상하 4층의 적층 압전세라믹스를 취부하였으며, 변위가 큰 양쪽 부분에 변위확대기구 2개를 부착하였다. 모터 탄성체의 사이즈는 65x5x3.5[㎜](길이x폭x두께)로 설계하였으며, 압전세라믹스는 전체 적층 두께를 1[㎜]로 하여 ANSYS에 의해 변위량이 해석되었다. 해석하고자 하는 요소 값의 범위는 임의로 정하고, 그 외의 모든 값은 표 1을 적용하였다.

표 1 압전세라믹의 물질 특성
Fig. 1 Characteristics of materials of piezoceramic

특성	크기	단위	특성	크기	단위
밀도	7770	kg/m³	$\varepsilon_{11}/\varepsilon_0$	1350	-
포아송비	0.32	-	$\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$	1400	-
s_{11}	1.27×10^{-11}	m²/N	k_{31}	0.34	-
s_{33}	1.54×10^{-11}	〃	k_{15}	0.71	-
d_{31}	-1.33×10^{-10}	m/V	k_t	0.55	-
d_{33}	3.02×10^{-10}	〃	N_t	1960	Hz-m
d_{15}	4.19×10^{-10}	〃	N_s	970	〃

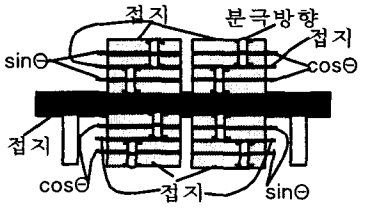

그림 1 분극방향 및 인가전압에 따른 선형 초음파모터의 구조
Fig. 1 Configuration of linear ultrasonic motors with polarization and input voltage

본 논문에서는 변위에 직접적으로 영향을 주는

d_{31}, d_{33}, d_{15} 및 s_{11}, s_{33}에 대하여 해석하였다. 그리고, 변위에 간접적으로 영향을 주는 것으로써, c_{33}^E에 영향을 주는 k_t와 c_{44}^E에 영향을 주는 k_{15}에 대하여 해석하고, 또 c_{33}^D와 c_{44}^D에 영향을 주는 밀도와 s_{12}^E에 영향을 주는 포아송비에 대하여 해석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 탄성 정수의 변화에 의한 변위량 해석

탄성 정수 중에서 c정수가 ANSYS 유한요소 해석에서 필요하기 때문에 실제로 재료 특성을 측정한 값인 s_{11}^E와 s_{33}^E의 변화에 따라서 c정수가 변화되므로, s_{11}^E를 5, 10, 15 및 20[x10^{-12} m²/N]으로 변화시키면서 변위 해석을 하였으며, s_{33}^E는 15, 20, 25 및 30[x10^{-12} m²/N]으로 변화시키면서 변위 해석을 하였다. s_{11}^E 인 경우의 구동 주파수는 순서대로 46.817, 41.366, 38.493 및 36.718[㎑]로 반비례 관계를 나타내었다. 해석 결과, s-정수는 식(4)와 같이 응력과 변위량의 비인 c-정수에 비례하여 영향을 미치는 결과, 전체적으로 반비례의 관계에 있기 때문에, 그림 2와 같이 s_{11}^E의 값에 반비례하면서 큰 변위차를 보였다. 횡방향 진동을 이용하는 관계로 그림 3과 같이 s_{33}^E의 값에 따라서는 큰 변화가 없었다.

$$s_{12}^E = -\sigma^E \cdot s_{11}^E \tag{2}$$

$$s_{13}^E = \sqrt{\frac{1}{2}(s_{11}^E + s_{12}^E)(s_{33}^E - \frac{1}{c_{33}^E})} \tag{3}$$

$$c_{11}^E = \frac{s_{11}^E s_{33}^E - (s_{13}^E)^2}{(s_{11}^E - s_{12}^E)\{s_{33}^E(s_{11}^E + s_{12}^E) - 2(s_{13}^E)^2\}} \tag{4}$$

$$e_{31} = d_{31}(c_{11}^E + c_{12}^E) + d_{33}c_{13}^E \tag{5}$$

여기서, σ^E 는 포아송비이다.

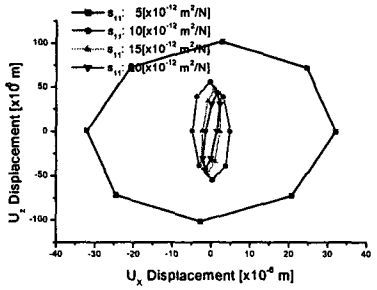

그림 2 탄성정수 s_{11} 변화에 의한 변위량
Fig. 2 Changes of displacement by varying elastic constant s_{11}

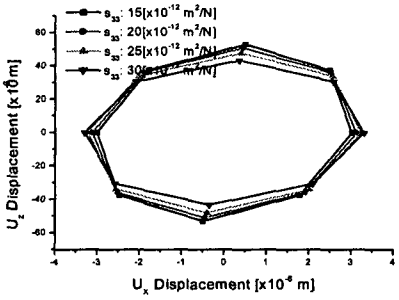

그림 3 탄성정수 s_{33} 변화에 의한 변위량
Fig. 3 Changes of displacement by varying elastic constant s_{33}

3.2 압전 정수의 변화에 의한 변위량 해석

압전정수는 대표적으로 d_{31}, d_{33}, d_{15}가 있으며, d_{31}은 압전체의 길이방향을 이용할 경우에 유리하게 작용되며, d_{33}은 압전 변압기와 같은 두께 방향을 이용하는 경우에 유리하게 작용한다. 일반적으로 하드계 및 소프트계 압전세라믹스의 범위에 해당되는 값들을 선정하여 해석하였다. 그 값은 d_{31}(-100, -150, -200 및 -250), d_{33}(200, 300, 400 및 500), d15(300, 400, 500 및 600)이며, 단위는 ($\times 10^{-12} m/V$) 이다. 이때 주파수는 모두 39.637[㎑]로 동일했다.

그림 4와 같이 d_{31}의 변화에 따라서 e_{31}, e_{33} 및 ε_{33}^S가 변화되어 변위량은 비례하여 증가하였다. 또한, 이것은 압전 역효과(S=dE)인 변형은 압전정수와 전계의 곱에 의해 비례하여 크지는 것으로 설명할 수 있다. 그림 5와 6과 같이 d_{33} 및 d_{15}의 변화에 있어서는 조금 변화가 있었지만, 변화의 값이 압전 세라믹스 재료 범위 내이기 때문에 횡진동에는 크게 영향을 주지 않았다.

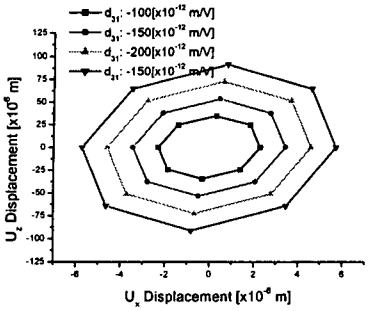

그림 4 압전정수(d_{31}) 변화에 의한 변위량
Fig. 4 Changes of displacement by varying piezoelectric constant(d_{31})

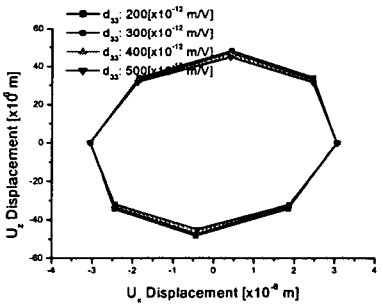

그림 5 압전정수(d_{33}) 변화에 의한 변위량
Fig. 5 Changes of displacement by varying piezoelectric constant(d_{33})

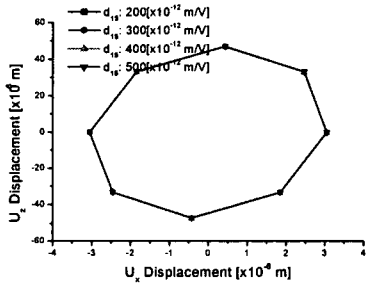

그림 6 압전정수(d_{15}) 변화에 의한 변위량
Fig. 6 Changes of displacement by varying piezoelectric constant(d_{15})

3.3 전기기계 결합계수에 의한 변위량 해석

전기기계 결합계수는 c_{33}^{E} 에 영향을 주는 k_t와 c_{44}^{E} 에 영향을 주는 k_{15}에 대해 해석하였다. 두께방향 k_t와 Shear방향 k_{15}를 각각 0.5, 0.55, 0.6, 0.65 및 0.65, 0.7, 0.75, 0.8로 변화시키면서 해석하였다. 이때의 주파수는 각각 순서대로 k_t는 39.685, 39.637, 39.620 및 39.575[㎒] 이며, k_{15}는 39.671, 39.636, 39.582 및 39.480[㎒]으로 나타났다. 즉, 결합계수가 커짐에 따라 반대로 주파수는 조금씩 감소하였다.

k_t의 변화에 따라서 c_{33}^{E} 에 영향을 주지만, k_t의 값이 압전 세라믹스의 일반적인 재료 범위인 0.5에서 0.65 사이인 경우, 그림 7과 같이 변위에 큰 영향을 주지 않았다. 그러나, c_{44}^{E} 에 영향을 주는 k_{15}의 변화에 대해서는 반비례하여, 그림 8과 같이 그 값이 적을수록 타원 변위가 크게 형성되었다.

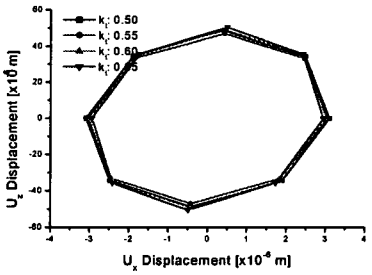

그림 7 전기기계 결합계수(k_t) 변화에 의한 변위량
Fig. 7 Displacements with the changes of electro-mechanical coupling constant(k_t)

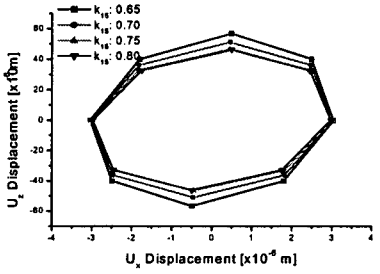

그림 8 전기기계 결합계수(k_{15}) 변화에 의한 변위량
Fig. 8 Displacements with the changes of electro-mechanical coupling constant(k_{15})

3.4 포아송비의 변화에 의한 변위량 해석

압전세라믹스의 포아송비에 의한 변화는 그 값을 0.1, 0.2, 0.3 및 0.4의 4가지로 변화시키면서 해석하였다. 이때 주파수는 순서대로 39.657, 39.648, 39.596

및 39.599[㎑]로 거의 비슷하였으며, 그림 9와 같이 변위량은 큰 차이는 없었지만 포아송비가 적은 것이 횡방향으로 타원궤적이 조금 크게 나타났다. 이것은 일정한 인가 전압에서 종방향에 압력을 가할 때의 수축 변위와 횡방향의 신장 변위의 관계이론에 일치하는 결과이다.

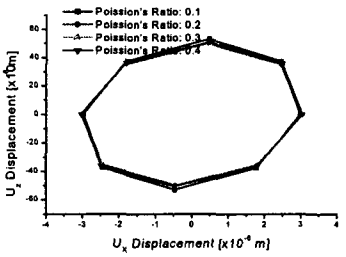

그림 9 포아송비 변화에 의한 변위량
Fig. 9 Changes of displacement by varying poisson's ratio

3.5 압전세라믹스의 밀도에 의한 변위량 해석

압전세라믹스의 밀도에 의한 변위량 해석을 위하여 그 값을 6500, 7500, 8500 및 9500 [㎏/㎥]의 4가지로 하였다. 이때 주파수는 순서대로 40.645, 39.783, 39.090 및 38.373[㎑]로 반비례하여 이론식과 일치하였다. ANSYS 유한요소 해석에 사용되는 매트릭스 계산식에서 밀도가 높아지면, 유전율 ε_{11}은 작아지고, 탄성 스티프니스 c_{11}은 커지며, 압전응력정수 e_{31}은 작아지므로 변위량은 서로 상반관계에 있으므로 시뮬레이션에 적용된 값의 범위에서는 그림 10과 같이 비슷하게 나타났다.

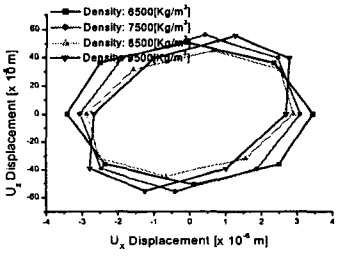

그림 10 밀도 변화에 의한 변위량
Fig. 10 Changes of displacement by varying density

5. 결 론

ANSYS 유한요소 해석에 사용되는 탄성 정수에서 c정수는 s_{11}를 변화시키면 타원 궤적이 크게 변하는데, 이 탄성 컴플라이언스(s정수)는 탄성 스티프니스(c 정수)와 반비례의 관계가 있으므로 변위에도 반비례의 효과로 나타났다. 또한, 압전 정수에서 압전응력정수(e-정수)를 변화시키는 것이 d-정수이다. d_{31}의 변화에 따라서 e_{31}, e_{33} 및 ε_{33}^{S}가 변화되어 변위량은 비례하여 증가하였다.

압전세라믹스의 재료성질에 따른 시뮬레이션에서, 타원변위는 탄성정수 s_{11} 및 압전정수 d_{31}에 큰 영향을 받았다. 이것은 재료의 횡방향 이용시 나타나는 특성과 일치하였다.

참고 문헌

[1] K. Uchino, "Ferroelectric Devices", Marcel Dekker, Inc., pp.1-104, pp.183-220, 2000.

[2] J. Zelenka, "Piezoelectric Resnators and their Applications", ELSEVIER APPLIED SCIENCE, pp. 1-94, pp. 238-241, 1986.

[3] G. C. Phillips, "A Concise Introduction to Ceramics", VAN NOSTRAND REINHOLD, pp. 115-121, 1991.

[4] B. C. H. Steele, "Electronic Ceramics", ELSEVIER APPLIED SCIENCE, pp. 185-201, 1991.

[5] Y. M. Chiang, D. P. BirnieIII and W. David Kingery, "Physical Ceramics", JOHN WILEY & SONS, INC., pp. 19-72, 1997.

[6] L. E. Kinsler and A. R. Frey, "Fundamentals of Acoustics-Second Edition", JOHN WILEY & SONS, INC., pp. 55-107, pp. 186-216, pp. 333-374, 1962.

[7] W. T. Thomson, "Theory of Vibration with Applications", Prentice Hall, pp. 1-47, pp. 233-259, 1996.

[8] 池田拓郎, "壓電材料學의 基礎", オーム社, pp. 1-126, 1990.

[9] 當川義朗, "超音波エレクトロニクス振動論", 朝倉書店, pp.28-49, pp.77-104, pp.164-194, pp.211-249, 1997.

[10] 黑田晴雄譯, "電子セラミクス", 東京化學同人, pp. 99-126, 1997.

[11] 岡崎 淸, "セラミクス誘電體工學", 學獻社, pp. 319-368, 1978.

[12] 김호기, "전자세라믹재료", 반도출판사, 1991.

[13] 박창엽, "전기전자용 압전세라믹스", 반도출판사, pp. 28-37, 1995.