# 환상형 압전진동자의 비축대칭 모드에 관한 해석

## Analysis for the Non-axisymmetric mode of Annular type Piezoelectric Actuator

박 순 종*, 김 천 덕**
(Soon Jong Park*, Chun Duck Kim**)
* 부산수산대학교 대학원 전자공학과, **부산수산대학교 공과대학 전기공학과

ABSTRACT

This paper introduces an analysis of the non-axisymmetric mode due to in-plane vibration of an annular type piezoelectric actuator using FEM(Finite Element Method). The actuator is used as stator of ultrasonic motor. The frequency characteristics and non-axisymmetric modes of the annular piezoelectric actuator are considered at a steady-state condition. The non-axisymmetric mode is occured by two sinusodial voltage sources with $\pi/2$ phase difference on the time domain. The resonant frequency of non-axisymmetric mode is 60.358 kHz and 59.880 kHz for calculation and measurement, respectively. The error was 0.8% between calculation and measurement. The revolution of the non-axisymmetric mode for actuator is analized at a period of exciting voltage sources using animation. It is confirmed that the actuator has an usefulness as the stator of ultrasonic motor and the proposed method has a properity.

## Ⅰ. 서 론

압전진동자의 초음파 진동을 이용한 초음파 응용 디바이스들로는 수중 초음파 변환기, 소나, 탄성표면파 기기, 초음파 진단기, 초음파 모터등이 있다[1]. 이러한 초음파 응용 디바이스들은 오랜 역사를 가지고 군사적 및 산업적 응용에로 연구가 되어 왔고 현재에도 많은 연구·개발이 진행되고 있는 실정이다. 특히, 초음파 모터의 경우는 압전진동자의 진동을 회전 또는 직선 운동으로 변환시키는 디바이스이다. 일반적인 자기 모터에 비해 제어의 정밀성, 동작의 정숙성 및 비자계성과 구조의 간략화등의 장점들을 가지고 있다[2]~[4]. 그러므로, 자동초점조절장치 또는 광 픽업 디바이스의 구동과 같은 정밀한 위치 제어 및 자동차의 전장장치 등의 제품화가 진행되고 있다. 초음파 모터는 판 혹은 환상형의 압전진동자와 전극으로 구성된 고정자 및 직선형 또는 환상형의 회전자로 구성되어 있고, 또한 그 응용 분야에 따라 다양한 형태와 구조로 연구·개발되어 지고 있다. 동작의 기본원리는 압전체인 고정자에 의해 발생되는 진행파를 구동력으로 하여 회전자가 고정자와의 마찰로 운동을 한다. 압전진동자의 면외진동 모드를 이용하는 진행파형 초음파 모터의 수치해석[5]~[7]은 보고되어 왔지만, 면내진동 모드를 이용한 공전 모드형 초음파 모터[8],[9]에 대한 제 특성이나 동작 해석에 관한 연구는 행해지고 있지 않은 실정이다. 또한, 제품화 및 다방면의 응용을 기대하려면 먼저 고정자에서 발생되는 모드에 관한 해석 및 검토가 선결되어야 할 것이다. 그러므로 본 연구에서는 공전 모드형 초음파 모터의 고정자로서의 이용가치를 고려하여 환상형 압전진동자에서 발생되는 비축대칭 모드에 대하여 압전효과를 포함한 면내진동 모드의 해석이 가능한 2차원 유한요소 모델[10]을 이용하여 수치해석적인 검토를 시도하였다.

## Ⅱ. 비축대칭 모드와 진행파의 발생

공전 모드형 초음파 모터로의 응용을 고려한 고정자의 구조와 전극패턴 및 구동전원의 인가 방법등을 그림 1에 나타내었다. 고정자는 두께방향으로 분극된 얇은 환상형 압전진동자

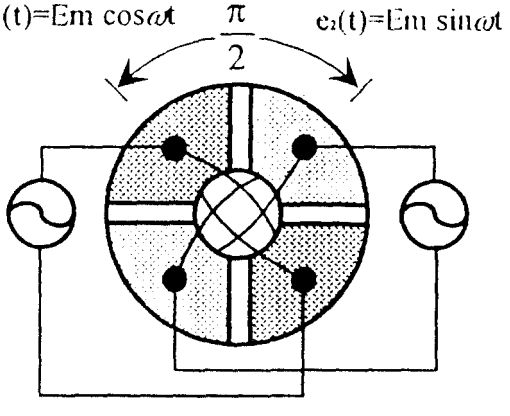



Fig. 1. Structure of an annular type piezoelectric actuator.

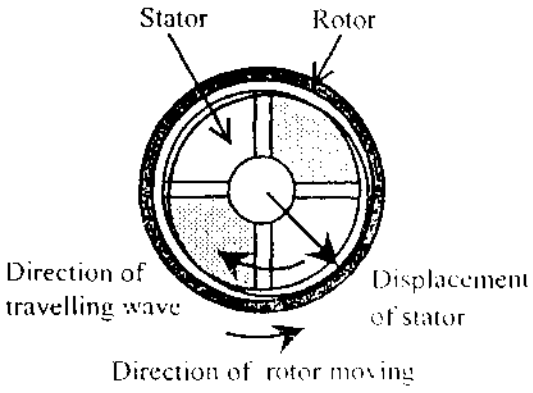



Fig. 2. Non-axisymmetric mode of an annular type piezoelectric actuator.

이며 전극은 압전체 원판의 양면에 공간적으로 $\pi/2$ 떨어진 4쌍으로 이루어져 있다. 구동원은 시간적으로 $\pi/2$의 위상차를 가지는 두 정현파 전압원을 이용한다. 각 정현파 전압원에 대하여 원주면상에 있어서의 변위 분포는 정재파 형태로 각각 식 (1)과 (2)로 나타난다.

$$u_A = u_0 \cos n\theta \cos \omega_n t \tag{1}$$

$$u_B = u_0 \cos(n\theta - \pi/2)\cos(\omega_n t - \pi/2) \tag{2}$$

한편, 두 전원을 동시에 인가하면 환상형 압전진동자에서는 정재파의 중첩에 의해 진행파가 발생되고, 그것은 식 (1)과 (2)로 부터 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = u_0 \cos(\omega_n t - n\theta) \tag{3}$$

환상형 압전진동자에 형성된 진행파는 모드의 중심이 고정자의 무게중심으로 부터 어긋난 형태로 그림 2와 같은 비축대칭 모드를 나타낸다. 또한 압전진동자에 형성된 진행파에 의해 원주면상의 임의의 한점은 시간적으로 타원운동을 하게 되며, 압전진동자의 외주면에 회전자를 가벼운 압력으로 접촉시키면 고정자와 회전자 사이의 마찰에 의하여 회전자는 진행파의 진행방향과 반대방향으로 회전을 한다. 따라서 타원운동의 궤적은 모터 구동 및 그 동작특성을 해석하는데 중요한 파라메타가 된다.

## Ⅲ. 유한요소식과 해석모델

비축대칭 모드를 형성하는 환상형 고정자는 압전적 성질과 탄성적 성질을 가지는 압전진동자이다. 따라서 유한요소법을 이용하여 고정자의 진동 모드를 해석함에 있어서, 전술한 두 특성을 포함한 지배방정식이 요구된다.

환상형 압전진동자는 표면적에 비하여 두께가 얇기 때문에 두께 방향 응력은 영이고 그 방향의 전계는 일정하며, x-y 방향에로의 전계는 영이되므로 2차원 평면 응력 문제로 해석할 수 있다. 본 연구에서는 2차원 평면 응력 문제의 면내진동으로 압전진동자를 해석한다. 위의 조건을 만족하기 위한 지배방정식은 식 (4)와 같은 d-형식의 압전 기본 방정식이 이용된다.

$$\begin{aligned} S &= s^E T - dE_3 \\ D_3 &= dT + \varepsilon_{33}^T E_3 \end{aligned} \tag{4}$$

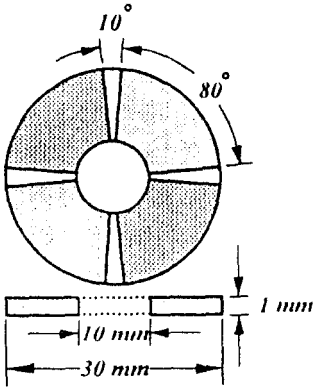
여기에서 S는 변형을 나타내고 $S^E$는 E=0일때의 탄성정수 텐서이다. $T$와 $d$는 응력과 압전정수벡터이다. $E_3$, $D_3$ 및 $\varepsilon_{33}^T$는 전계와 전속밀도, 그리고 $T=0$일 때 두께방향으로의 유전율이다.

식 (4)를 이산화된 유한요소식으로 표현하면 식 (5)에 나타내는 바와 같은 연립방정식의 형태로 도출된다.

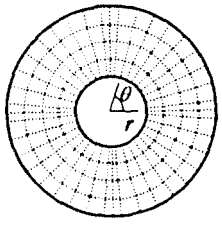
$$\left( \begin{bmatrix} [K] & [\Gamma] \\ [\Gamma] & [G] \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\varphi\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} \tag{5}$$

여기서 $[K]$, $[\Gamma]$, $[G]$ 및 $[M]$는 각각 강성행렬, 전기-기계결합행렬, 정전행렬 및 질량행렬이다. $\{u\}$, $\{\varphi\}$, $\{F\}$ 및 $\{Q\}$는 절점 변위벡터, 절점 전위벡터, 절점 힘벡터 그리고 절점 전하벡터이다. 절점 전하벡터는 압전체 양면의 전극에 인가된 전압에 의해 얻어지는 것이다. 또한 절점 변위벡터와 절점 전위벡터는 식 (5)에 절점 전하벡터를 대입한 후 연립방정식을 계산함으로써 구해진다.

유한요소법으로 해석함에 있어서 환상형 압전진동자의 모델과 그 요소분할은 그림 3 (a)와 (b)에 나타낸 바와 같이 행하였다. 고정자는 두께 1 ㎜, 외경 30 ㎜, 내경 10 ㎜로 구성되어져 있다. 압전체의 재료로는 Fuji-C201을 대상으로 하였으며, 전극들은 그림 3(a)에 나타낸 바와 같이 80°의 각도로 구성되어져 있다. 요소 분할은 그림 3(b)와 같이 r : θ = 4 : 40으로 분할한다.




(a) Dimension



(b) Element division

Fig. 3. Electrode arrangement and element division of the annular type piezoelectric actuator.

## Ⅳ. 정상상태 응답

전절의 그림 3에서 나타낸 바와 같은 모델의 고정자에 대하여 정상상태 응답을 유한요소법에 의해 계산하였다. 그림 4에 압전진동자의 입력 어드미턴스를 측정하기 위한 구성도를 나타낸다. 입력 어드미턴스의 측정은 임피던스 해석기(HP-4192A)를 이용하였다.

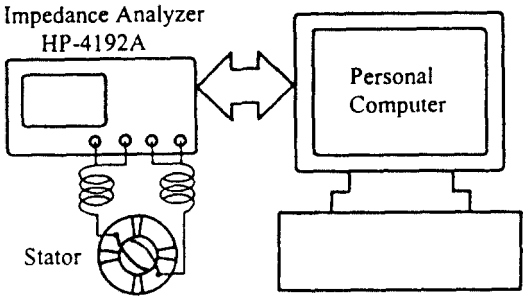



Fig. 4. Configuration of measuring system.

위상이 서로 다른 두쌍의 전극간의 입력 어드미턴스의 실측치와 수치해석 결과를 그림 5에 나타내었다. 공전 모드형 초음파 모터의 공진 모드는 모드의 중심이 압전진동자의 무게 중심과 일치하지 않는 비축대칭 모드를 나타내며, 수치 해석 결과에 따른 공진주파수는 60.358kHz이다. 또한 실측에 의한 비축대칭 모드의 공진주파수는 59.880kHz이고, 수치해석 결과는 실측치에 비해 약 0.8%의 오차를 나타내고 있다.

그림 6은 환상형 압전진동자에 형성되는 진행파에 의한 비축대칭 모드의 공전 상태를 정현파 구동전원의 한 주기에 대해 나타낸 것이다. 비축대칭 모드는 위상차가 90°인 정현파 전압원을 인가했을 때, 그 변위를 유한요소법에 의해 각각 구한 후 그 결과들을 중첩해서 나타낸 것이다. 모드 회전은 애니메이션을 이용하여 정현파 구동원의 주기에 따라

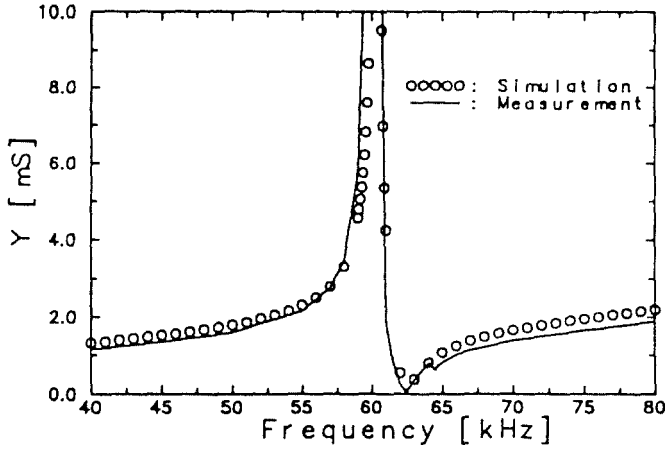
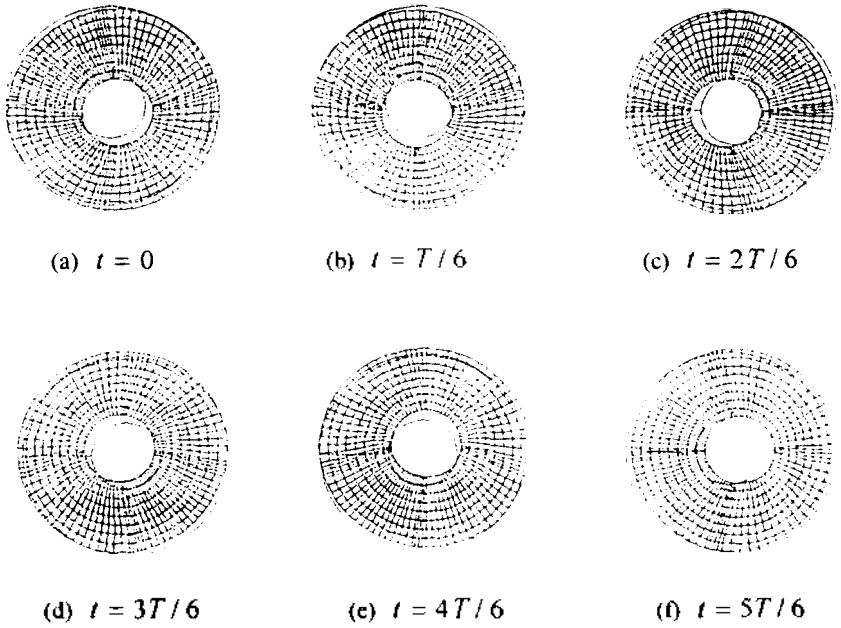



Fig. 5. Frequency characteristics of input admittance.



(a) $t = 0$ (b) $t = T/6$ (c) $t = 2T/6$

(d) $t = 3T/6$ (e) $t = 4T/6$ (f) $t = 5T/6$

Fig. 6. The non-axisymmetric revolving mode of the annular type piezoelectric actuator.

구한 것으로 시계방향으로 회전한다.

## V. 결 론

본 연구는 면내진동에 의한 비축대칭 모드를 사용하는 초음파 모터의 환상형 압전진동자에 대해 유한요소법을 응용하여 수치 해석을 행하였다.

정상상태 해석에서 입력 어드미턴스의 주파수 특성은 실측치 59.880kHz와 계산치 60.358kHz로 나타났고 그 오차는 약 0.8%였으므로 유한요소 해석의 타당성을 확인하였다. 그리고, 비축대칭 모드에 대한 인가 전원의 주기 변화에 따른 고정자의 공진을 해석하였다.

추후 과제로는 위의 결과들을 토대로 회전자를 포함한 공전 모드형 모터의 등가회로 구성 및 전반적인 동작특성 해석과 최적화 설계 · 제작에 그 연구의 중점을 두고자 한다.

## REFERENCES


[1] 초음파연구회편,쉬운 초음파의 응용, 기전연구사, (1992).

[2] Hirata, H. and Ueha, S., "Design of a travelling wave type ultrasonic motor", IEEE. Trans. on Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont., 44(2), 225-231, (1995).

[3] Kenzo, T. and Sasita, T., A guide to ultrasonic motors, Sogodensi Press, Tokyo, (1993).

[4] Uchino, K., Piezoelectric and electrostrictive actuator, Kinbuku Press, Tokyo, (1986).

[5] Kagawa, Y., Tsuchiya, T., Kataoka, T., Yamabuchi, T. and Furukawa, T., "Finite element simulation of dynamic responses of piezoelectric actuator", J. Sound and Vibration Soc., accepted for publication, (1996).

[6] Yamabuchi, T. and Kagawa, Y., "Numerical simulation of a piezoelectric ultrasonic motor and its characteristics", J. Simulation Soc., 8(3), 69-76, (1989).

[7] Soonjong, Park, et al, "Analysis on reasonance mode for the stator of ring type ultrasonic motor", J. Acoust., Soc, Korea, 13-1(s), 13-16, (1994).

[8] Kumada, A., Piezoelectric revolving mode motor, A hand book of new actuators for precision control, Fuji Techo System, Tokyo, 849-860, (1994).

[9] Ichinose, N., New technology of piezoelectric seramics, Ohms, Tokyo, (1991).

[10] Kawasima, A., Finite element analysis of piezoelectric vibrator gyroscopes using in plane motion, Master's thesis, EEE Dept., Okayama Univ., (1995).