압전 모터 스테이터의 진동 해석

최종운* · 송오섭**

A Study on the Vibration of an Annular Piezoelectric Motor Stator

Jong Woon Choi and Ohseop Song

Key Words : Annular Piezoelectric Motor(중공 원판형 압전모터), Stator(고정자)
Traveling-wave Motor(진행파 모터), Composite Plate Vibration(복합판의 진동)

Abstract

This study investigates the free and forced vibration characteristics of an annular piezoelectric motor stator constructed of two piezoelectric material layers and one stainless steel layer. The annular piezoelectric motor stator is subjected to a travelling load produced by piezo drive electrical voltage input to the two piezoelectric layers. The stator is modeled as an annular laminated plate based on the classical plate theory and the governing equations are derived via Hamilton's variational principle. Variation of the free vibration characteristics as a function of several design parameters has been studied and ,based on this result, the forced vibration responses to the input electricity of various frequencies and magnitudes are investigated. The obtained results will provide an important criterion, a priori, in the design of piezoelectric motors.

1. 서론

최근 자동화기기 및 정밀기기의 소형화, 고출력 추세에 따라서 기존의 전자기 모터를 대신할 수 있는 소형 압전모터에 대한 관심이 증대되고 있다. 압전모터는 기존의 전자기모터보다 높은 토크 밀도를 가지고 있으며 잡음이 거의 없고, 중공 구조이므로 카메라나 VTR의 자동 초점조절 장치로의 응용에 적합하며, 정지 토크가 크고 응답 속도가 빠르며, 기어가 필요치 않아 각종 정밀기기의 위치 제어에 응용될 수 있다. 또한, 기존의 전자기 모터와 달리 자기장의 영향을 받지 않으므로 자기 부상 열차 등과 같이 강한 자기장을 받는 차량에서 적합하다. 1972년 Barth에 의해 고안된 압전모터는 T. Sashida[1], S. Ueha[2]등과 같은 많은 일본인 연구가들에 의해서 실행 가능한 시스템으로 개발 된 이래로 성공적으로 개발이 진행되어 왔으나, 그 물리적 거동을 모델링한 연구자들은 거의 없었다. 그러던 중 1990년대에 비로소 Hagedon[3],[4], Maeno, Y. Kagawa[5]등에 의하여 압전모터의 물리적 거동이 연구되기 시작하였다. 그러나, 위의 연구들은 비대칭 적층 구조물을 모델링하는데 한계가 있고 대부분의 경우 유한요소법을 사용하였다. 유한요소법은 설계가 변경될 때마다 새로운 유한요소 메쉬를 만들고 새로운 수치적인 해를 얻어야 하므로 비경제적이며 설계변수의 변화에 따른 경향을 도출하기가 매우 어렵다.

1995년 N. W. Hagood와 A. J. McFarland[6]는 압전모터를 모델링하고 Rayleigh-Ritz Method를 사용하여 해석하였다. 또한, J. R. Friend와 D. S. Stutts[7]도 비대칭 압전 모터의 동적 특성을 연구

* 충남대학교 대학원 기계공학과
** 충남대학교 공과대학 기계공학과

하고 모델링하였다. 국내에서의 압전모터에 대한 연구는 미진한 실정이다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 2개의 압전판(PZT-4)과 1개의 스테인레스 강판을 대칭적으로 적층한 중공 원판형의 스테이터 모델에 대하여 헤밀턴 원리를 사용하여 운동방정식을 유도하였다. 그리고 스테이터의 내경 및 압전판과 스테인레스 강판의 두께 비의 변화에 따른 고유진동수 및 모우드 형상의 변화를 살펴보았다. 이 자유진동 해석의 결과를 이용하여 스테이터의 내경의 변화, 압전판과 스테인레스 강판의 두께 비의 변화, 그리고 압전판의 Poling 조각 수의 변화에 따른 동적응답에 대하여 고찰하였다. 이러한 결과를 토대로 최적의 압전모터 스테이터의 설계변수를 제공할 수 있는 자료를 제공하고자 한다.

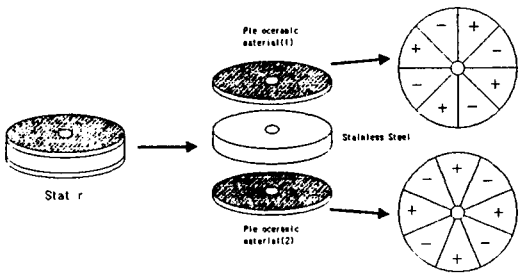

Fig. 1 Configuration of a piezoelectric motor stator

2. 지배방정식 유도

2.1 변형률-변위 관계식

Fig. 2에서 보인 바와 같은 압전모터 스테이터 요소의 $r-\theta-z$ 좌표계를 설정한다. 스테이터 내의 임의의 한 점에서의 변위는 다음과 같다.

$$\begin{cases} u_1 = u_1^0 + z\beta_1 \\ u_2 = u_2^0 + z\beta_2 \\ u_3 = u_3^0 \end{cases} \tag{1}$$

변형률-변위 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \varepsilon_{rr} = \varepsilon^0_{rr} + z\chi_{rr} \\ \varepsilon_{\theta\theta} = \varepsilon^0_{\theta\theta} + z\chi_{\theta\theta} \\ \varepsilon_{r\theta} = \varepsilon^0_{r\theta} + z\chi_{r\theta} \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon^0_{rr} &= \frac{\partial u^0_1}{\partial r} \\ \varepsilon^0_{\theta\theta} &= \frac{1}{r}\frac{\partial u^0_2}{\partial \theta} + \frac{u^0_1}{r} \\ \varepsilon^0_{r\theta} &= \frac{1}{r}\frac{\partial u^0_1}{\partial \theta} + \frac{\partial u^0_2}{\partial r} - \frac{u^0_2}{r} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \chi_{rr} &= -\frac{\partial^2 u_3}{\partial r^2} \\ \chi_{\theta\theta} &= -\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 u_3}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r}\frac{\partial u_3}{\partial r} \\ \chi_{r\theta} &= \frac{2}{r^2}\frac{\partial u_3}{\partial \theta} - \frac{2}{r}\frac{\partial^2 u_3}{\partial r \partial \theta} \end{aligned} \tag{4}$$

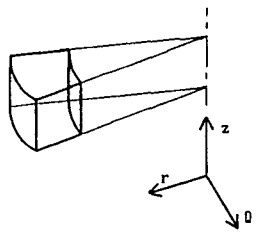

Fig. 2 Element of a stator plate

2.2 구성 방정식

압전재료의 직접효과 및 역전효과는 다음과 같이 표현된다.

$$\{D_{ij}\} = [e]\{\varepsilon_{ij}\} + [\varepsilon]\{E_j\} \tag{5}$$

$$\{\sigma_{ij}\} = [C]\{\varepsilon_{ij}\} - [e]^T\{E_j\} \tag{6}$$

여기에서 $[e]^{(k)} = [d][C]^{(k)}$,

$[\varepsilon] = -[d][C][d]^T$.

또한 $\{\sigma_{ij}\}$, $[C]$, $\{\varepsilon_{ij}\}$, $[e]$, $\{E_j\}$, $[\varepsilon]$, $[d]$는 각각 응력, 강성, 변형률, 압전상수, 전기장, 유전상수, 압전 변형률 상수를 나타낸다.

k 번째 판의 응력-변형률 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \tau_{r\theta} \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{bmatrix} \overline{\varepsilon_{rr}} \\ \overline{\varepsilon_{\theta\theta}} \\ \overline{\gamma_{r\theta}} \end{bmatrix}^{(k)} \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} \overline{\varepsilon_{rr}} \\ \overline{\varepsilon_{\theta\theta}} \\ \overline{\gamma_{r\theta}} \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{rr} - d_{31}E_3 \\ \varepsilon_{\theta\theta} - d_{31}E_3 \\ \gamma_{r\theta} \end{bmatrix}^{(k)} \tag{8}$$

식(8)에서 스테인레스 강판의 경우, $d_{31} = d_{32} = 0$ 이다. 그리고 적층판의 합응력과 합모멘트는 다음과 같다. (Fig. 3 참조).

$$\begin{bmatrix} N_{ij} \\ M_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N^p_{ij} \\ M^p_{ij} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[N_{ij}] = \sum_{k=1}^{3} \int_{z_k}^{z_{k+1}} [\sigma_{ij}]^{(k)} dz - [N^p_{ij}] \quad (10)$$

$$[M_{ij}] = \sum_{k=1}^{3} \int_{z_k}^{z_{k+1}} [\sigma_{ij}]^{(k)} z\, dz - [M^p_{ij}] \quad (11)$$

$$[N^p_{ij}] = \sum_{k=1}^{3} \int_{z_k}^{z_{k+1}} [[e]^T \{E_j\}^{(k)}] dz \quad (12)$$

$$[M^p_{ij}] = \sum_{k=1}^{3} \int_{z_k}^{z_{k+1}} [[e]^T \{E_j\}^{(k)}] z dz \quad (13)$$

$$(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) = \sum_{k=1}^{3} \int_{z_k}^{z_{k+1}} [Q_{ij}]^{(k)} (1, z, z^2) dz \quad (14)$$

$$(i, j = r, \theta)$$

($N^p_{rr} = N^p_{\theta\theta} \Rightarrow N^p$, $M^p_{rr} = M^p_{\theta\theta} \Rightarrow M^p$) 이다.

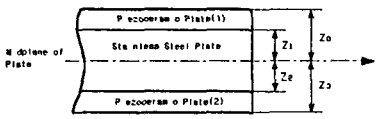

Fig. 3 Cross-section of a laminate

2.3 지배방정식

지배방정식을 유도하기 위하여 다음과 같은 해밀턴 변분원리를 이용한다.

$$\int_{t_0}^{t_1} (\delta U - \delta K) dt = 0 \quad (15)$$

$$t = t_0,\ t = t_1 \text{ 에서 } \delta u_0 = \delta v_0 = \delta w_0 = 0$$

고전 판이론에 의하면 $\overline{\varepsilon_{zz}} = \overline{\varepsilon_{\theta z}} = \overline{\varepsilon_{rz}} = 0$ 이므로 변형에너지는 다음과 같다.

$$U = \frac{1}{2} \int\int\int \{ \sigma^{(k)}_{rr} \overline{\varepsilon_{rr}} + \sigma^{(k)}_{\theta\theta} \overline{\varepsilon_{\theta\theta}} + \sigma^{(k)}_{r\theta} \overline{\varepsilon_{r\theta}} \} r dr d\theta dz \quad (16)$$

식(2),(7)(8)을 식(16)에 대입하고 대칭형 적층판에서 $B_{ij} = 0$ 임을 고려하여 변분 δU를 구한다.

운동에너지 K는 다음과 같다.

$$K = K_1 + K_2 + K_3 \quad (17)$$

여기에서 K_1, K_2, K_3 는 각 각 압전판과 스테인레스 강판의 운동에너지를 뜻한다.회전관성을 무시하고 K의 변분 δK를 구하면 다음과 같다.

$$\int_{t_0}^{t_1} \delta K dt = -I \int_{t_0}^{t_1} \int\int \{ \ddot{u}^0_1 \delta u^0_1 + \ddot{u}^0_2 \delta u^0_2 + \ddot{u}_3 \delta u_3 \} r dr d\theta dt \quad (18)$$

여기에서 $I = \rho_{(1)} h_{(1)} + \rho_{(2)} h_{(2)} + \rho_{(3)} h_{(3)}$

2.3.1 운동 방정식

$$(D\nabla^4 + I \frac{\partial^2}{\partial t^2}) u_3 = f(r, \theta, t) \quad (19)$$

$$\nabla^4 = (\nabla^2)^2 = [\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \theta^2}]^2 \quad (20)$$

$$f(r, \theta, t) = -\frac{\partial^2 M^p}{\partial r^2} - \frac{1}{r}\frac{\partial M^p}{\partial r} - \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 M^p}{\partial \theta^2} \quad (21)$$

2.3.2 경계 조건

$$\frac{\partial}{\partial r}(\delta u_3) \ ; \ M_r = -D[\frac{\partial^2 u_3}{\partial r^2} + \nu_D (\frac{1}{r}\frac{\partial u_3}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 u_3}{\partial \theta^2})] - M^p$$

$$\delta u_3 \ ; \ V_r = -D[\frac{\partial}{\partial r}\nabla^2 u_3 + \frac{1-\nu_D}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \theta^2}(\frac{\partial u_3}{\partial r} - \frac{u_3}{r})] - \frac{\partial M^p}{\partial r} \quad (22)$$

* free-free 경계조건

$$at \ r_{in},\ r_{out} : M_r = V_r = 0 \quad (23)$$

* clamped-free 경계조건

$$at \ r_{in} : \delta u_3 = 0, \quad \frac{\partial}{\partial r}(\delta u_3) = 0$$
$$at \ r_{out} : M_r = 0, \quad V_r = 0 \quad (24)$$

3. 판의 자유진동해석

판의 자유진동 해석을 위하여 식(19)의 우변을 0으로 놓고, $u_3(r, \theta, t)$를 공간과 시간의 함수의 곱으로 다음과 같이 표현한다.

$$u_3(r, \theta, t) = U_3(r, \theta) e^{j\omega t} \quad (25)$$

식(25)를 식(19)에 대입하여 정리한다.

$$(\nabla^2 + \lambda^2)(\nabla^2 - \lambda^2) U_3 = 0, \ (\lambda^4 = \frac{I\omega^2}{D}) \quad (26)$$

여기에서 $U_3 = R(r)F(\theta)$ 으로 변수 분리하고 식(26)에 대입하여 $R(r)$, $F(\theta)$를 구한 후, 그 결과를 식(25)에 대입하여 $u_{3mn}(r, \theta, t)$를 구하면 다음과 같다.

$$u_{3mn}(r,\theta,t) = [A_1 J_n(\lambda_{mn} r) + A_2 I_n(\lambda_{mn} r) + A_3 Y_n(\lambda_{mn} r) + A_4 K_n(\lambda_{mn} r)] \cos[n(\theta-\phi)] e^{j\omega t} \quad (27)$$

여기에서 첨자 m은 반경방향 모드를 의미하고 n은 원주방향 모드를 의미한다. 또한 J_n, Y_n은 각각 n계 제1, 2종 Bessel 함수이고, I_n, K_n은 각각 수정된 n계 제1, 2종 Bessel 함수이다.

자유진동의 경우 $M^p = \frac{\partial M^p}{\partial r} = 0$ 이며 판의 양 끝단이 자유상태인 경우의 경계조건식 (22),(23)으로부터 다음의 행렬식을 구한다.

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{Bmatrix} = 0 \quad (28)$$

식(28)에서 벡터 $\{A_1 A_2 A_3 A_4\}^T$이 무용근을 갖지 않기 위해서 determinant $[C_{ij}] = 0$이 되어야 하며 이 조건으로부터 고유진동수 ω_{mn}를 구한다. 또한 각 각의 고유진동수에 대한 모우드 형상 벡터 $\{A_1 A_2 A_3 A_4\}^T$를 구할 수 있다.

4. 조화하중에 의한 정상상태 응답

스테이터에 전기적인 에너지에 의한 조화하중이 가해지는 경우, $u_3(r,\theta,t)$는 Modal Expansion에 의하여 다음과 같이 표현 된다.

$$u_3(r,\theta,t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \eta_{mn}(t)\, U_{3mn}(r,\theta) \quad (29)$$

여기에서 $\eta_{mn}(t)$ = modal participation factor.

스테이터의 운동방정식 식(19)에 식(29)를 대입하고 구조적인 감쇠를 고려하며 자유진동의 관계식 $D\nabla^4 U_{3mn} - I\omega_{mn}^2 U_{3mn} = 0$을 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (I\omega_{mn}^2 \eta_{mn} U_{3mn} + C_v \dot{\eta}_{mn} U_{3mn} + \rho h \ddot{\eta}_{mn} U_{3mn}) = f \quad (30)$$

여기서 C_v는 스테이터의 구조감쇠계수이다.

그리고 조화하중은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M^p(r,\theta,t) = M^{p*}(r,\theta) e^{j\omega t} \quad (31)$$

$$f(r,\theta,t) = f^*(r,\theta) e^{j\omega t} \quad (32)$$

각 모드의 직교성을 이용하기 위해서 양변에 U_{3k}를 곱하고, 판의 표면좌표에 관하여 적분하면 다음 식이 유도된다.

$$\ddot{\eta}_k + 2\xi_k \omega_k \dot{\eta}_k + \omega_k^2 \eta_k = F_k^* e^{j\omega t} \quad (33)$$

$$F_k^* = \frac{1}{IN_k} \int_r \int_\theta f^* U_{3k}\, r\, d\theta\, dr$$

$$N_k = \int_r \int_\theta U_{3k}^2\, r\, d\theta\, dr \quad (34)$$

$$\xi_k = \frac{C_v}{2I\omega_k}$$

정상상태응답 또한 하모닉 형태가 되며 위상각 ϕ_k만큼의 지연이 발생하므로 위 미분방정식의 해는 다음과 같다.

$$\eta_k = \Lambda_k e^{j(\omega t - \phi_k)} \quad (35)$$

식(35)를 식(33)에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$\Lambda_k e^{-j\phi_k} = \frac{F_k^*}{(\omega_k^2 - \omega^2) + 2j\xi_k \omega_k \omega} \quad (36)$$

F_k^*는 r과 θ만의 함수이고 하중은 r-방향으로 일정하고 θ-방향으로 하모닉 형태이므로 압전재료판의 전기장은 다음과 같이 표현된다.

$$E_3^{(1)} = E_3^* \cos n(\theta - \phi) \quad (37\ a)$$

$$E_3^{(3)} = E_3^* \cos n(\theta - \phi - \phi_{PZT}) \quad (37\ b)$$

E_3^* = 압전판의 전기장의 최대값

ϕ_{PZT} = 두 압전판의 위상각

여기에서 두 압전판의 E_3^*와 두께는 동일하다고 가정한다.

5. 결과 및 고찰

5.1 참고문헌과의 비교

본 연구의 신뢰도를 확인하기 위하여 Ref.(6)과 동일한 물성치 (Table. 1)와 동일한 경계조건 (clamped-inner edge, free-outer edge)하에서의 고유진동수를 구하여 비교하였다. Ref.(6)에서 구한 ω_{04}=7946.7Hz 이었고 본 연구에서 구한 ω_{04}=7801.59Hz 이었다. Ref.(6)의 고유진동수를 기준으로 약 1.8%의 차이가 있었으며 이는 Ref.(6)에서는 Rayleigh-Ritz 방법을 사용하였고 본 연구에서는 엄밀해를 구하였으므로 에너지 법에 의한 Ref.(6)의 값이 약간 크게 나타났다.

Table. 1 Physical Parameters of Piezoelectric Motor Stator

Parameter	Description	Value	Units
r_{in}	Inner hole radius	2.5	mm
r_{out}	Outer plate radius	25.0	mm
h_p	PZT-4 thickness	0.25	mm
h_s	Stainless steel thickness	0.75	mm
E_p	PZT-4 transverse modulus	80.0	GPa
E_s	Stainless steel modulus	210.0	GPa
ρ_p	PZT-4 material density	7550	kg/m^3
ρ_s	S. steel material density	7860	kg/m^3
ν_p	Poisson's ratio of PZT-4	0.5803	
ν_s	Poisson's ratio of S. Steel	0.30	
V_3^*	Voltage applied to PZT-4	100	Volt
d_{31}	PZT-4 transverse d	1.2×10^{-10}	m/V
c_v	Equivalent viscous damping in stator	150.0	$N-s/m$

5.2 스테이터의 안 반지름 변화에 따른 결과

Table. 2 는 Free-Free 경계조건에서 스테이터의 안 반지름 변화에 따른 고유진동수의 변화를 나타낸다. r_{in}이 증가하면 Nodal Circle이 없는 경우의 고유진동수(ω_{02}, ω_{04}, ω_{08})는 점차 감소하나, Nodal Circle이 하나라도 있는 경우의 고유진동수(ω_{12}, ω_{14}, ω_{18}, ω_{22}, ω_{24}, ω_{28})는 감소하다가 어느 지점부터 증가한다.

Table. 2 Variation of Natural Frequencies with r_{in} (r_{out} =25㎜)

r_{in} (mm)		2.5	7.5	12.5	17.5	22.5
ω_{mn} (Hz)	ω_{02}	1852.82	1734.04	1529.09	1286.85	1058.25
	ω_{12}	13863	12881.6	11294.8	13207	32335.3
	ω_{22}	33186.1	30051.6	41462.7	102605	891204
	ω_{04}	7801.44	7788.85	7592.66	6806.94	5635.67
	ω_{14}	28794.1	28403.9	25197	26409.5	61110.6
	ω_{24}	56291.9	53457.2	55263.5	112223	898659
	ω_{08}	29845.3	29845.3	29823	28853.6	24205.7
	ω_{18}	70845.9	70840.1	68882.6	62245.2	122509
	ω_{28}	114900	114773	105043	147740	928217

그리고 ω_{12}, ω_{14}, ω_{18}의 경우, ω_{22}, ω_{24}, ω_{28}의 경우보다 r_{in}가 좀 더 큰 지점에서 증가되기 시작하였다. Fig.4는 r_{in}, r_{out}이 일정하고 Poling 조각수가 8인 경우, 고유진동수보다 1Hz 작은 진동수로 기진 시켰을 때 스테이터의 변위를 나타낸 그래프이다. ω_{04}에 가까운 진동수로 가진 시켰을 때의 변위가 ω_{14}나 ω_{24}에 가까운 진동수로 가진 시켰을 때의 변위보다 컸다. Poling 조각수가 4와 16인 경우에도 동일한 경향을 보였다.

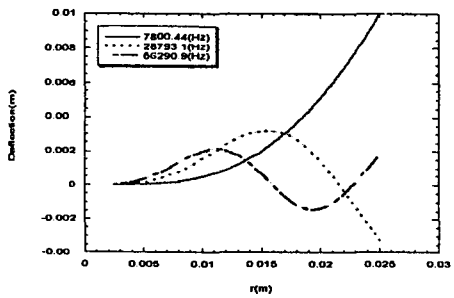

Fig. 4 Deflection responses of piezoelectric motor stator for three different excitation frequencies (8 poling pieces, r_{in}=2.5㎜, r_{out}=25㎜)

Fig.5 는 Poling 조각수가 4인 경우, r_{in}의 변화에 따른 변위의 변화를 나타낸다. 그래프에서 r_{in}의 증가에 따라 변위가 증가함을 알 수 있다. 다만 Poling 조각수가 8, 16으로 증가 될 수록 변위 차가 현격히 감소하였다.

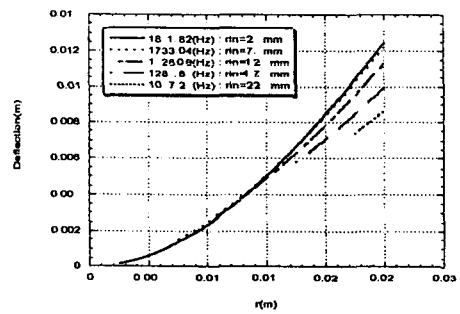

Fig. 5 Deflection responses of piezoelectric motor stator for different r_{in}'s and excitation frequencies (4 poling pieces, r_{out} = 25㎜)

Figs. 6,7은 r_{in}, r_{out}이 일정한 경우, Poling 조각수를 변화시켰을 때 변위의 변화를 나타낸다. Nodal Circle이 존재하지 않는 경우의 결과와 Nodal Circle이 존재하는 경우의 결과가 상반되게 나타났다. Nodal Circle이 존재하지 않는 경우에는 대체적으로 Poling 조각수가 적을수록 더 큰 변위가 발생되었으나, Nodal Circle이 존재하는 경우에는 Poling 조각수가 많을수록 더 큰 변위가 발생되었다. 변위가 크게 되면 스테이터의 한 점이 그리는 타원의 궤도도 크게 되어서 그 타원 궤도와 접하게 되는 로터에 더 큰 힘을 전달 할 수 있으리라 예상된다.

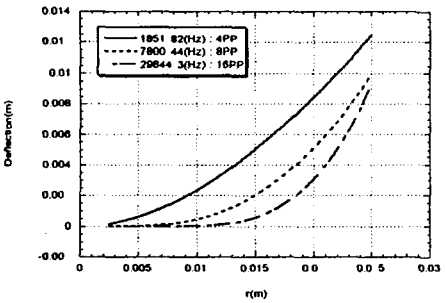

Fig. 6 Deflection responses of piezoelectric motor stator for different poling pieces and excitation frequencies
(r_{in}=2.5㎜, r_{out}=25㎜)

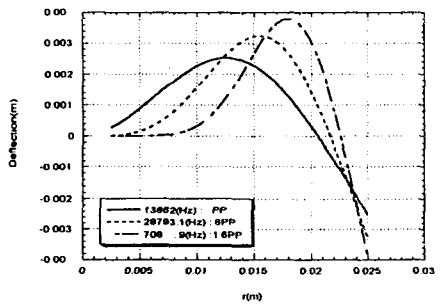

Fig. 7 Deflection responses of piezoelectric motor stator for different poling pieces and excitation frequencies
(r_{in}=2.5㎜, r_{out}=25㎜)

스테이터 판 위에 톱니형상의 이빨을 부착하여 진동의 진폭을 최대화하고, 로터와의 접촉시 힘의 전달이 최대가 되게 하고 또한, 마모로 인한 칩이 빠져나가기 쉽게 한다. 단, 이빨은 스테이터의 최대변위가 발생하는 위치에 부착하여야 한다. 즉, Fig.4에서 보면 알 수 있듯이, ω_{0n}에 가까운 가진주파수를 가하여 스테이터를 진동시키는 경우에는 이빨을 스테이터의 바깥쪽 반지름 부분에 부착하여야 하듯이, ω_{1n}, ω_{2n}에 가까운 가진주파수를 가하여 스테이터를 진동시키는 경우에도 이빨을 변위의 최고점에 부착하여야 효율적이다. 설계시 한 가지 더 고려해야 할 점은 인간의 가청 주파수가 20Hz~20kHz이므로 소음 없는 압전모터를 만드는 것이 목적이라면 20kHz 이상의 가진주파수로 가진시켜야 한다.

5.3 압전판과 스테인레스 강판 두께비의 변화에 따른 결과

Fig.8은 Free-Free 경계조건에서 압전판과 스테인레스 강판의 두께비($H_p(h_{p_1}+h_{p_2}=2h_p)/h_s$)의 변화에 따라서 Nodal Diameter 수가 4인 경우의 고유진동수 변화를 나타낸다. 그래프에서 볼 수 있듯이 H_p/h_s가 커질수록, 즉 압전 재료판의 두께가 커질수록 고유진동수가 증가되는 현상을 보였다. 그러나 Poling 조각수를 8로 하고 고유진동수보다 1Hz 작은 진동수로 가진 시켰을 때, Fig.9에서 볼 수 있듯이, H_p/h_s를 변화 시켜도 변위는 압전모터의 성능에 영향을 줄 수 있을 정도의 큰 차이를 보이지 않았다. 그러므로 압전판과 스테인레스 강판의 두께비(H_p/h_s)의 변화는 변위와는 거의 무관하고 고유진동수의 변화에 주로 영향을 미치고 있는 것으로 보인다. 따라서 압전모터의 출력에는 거의 영향을 미치지 않고 압전모터의 속도에 주로 영향을 미친다고 보여진다.

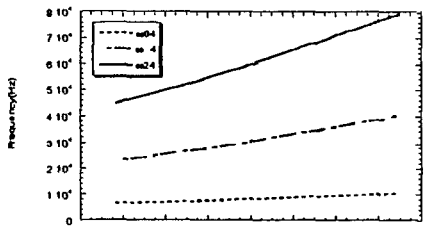

Fig. 8 Variation of natural frequencies with the thickness ratio H_p/h_s
(Free-Free BCs, 8 poling pieces)

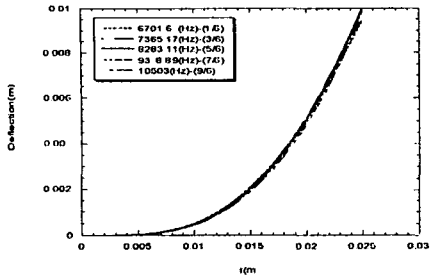

Fig. 9 Deflection responses of piezoelectric motor stator for different thickness ratio H_p/h_s (Free-Free BCs, 8 poling pieces)

6. 결론

본 연구에서는, 중공원판형태의 압전모터 스테이터(Rotary Piezoelectric Motor Stator)의 모델을 제시하고, 스테이터의 안반지름(r_{in})과 압전판과 스테인레스 강판의 두께비의 변화에 따른 고유진동수와 변위의 변화를 살펴보았으며 또한 압전판의 Poling 조각수를 변화에 따른 동적 거동, 즉 변위를 관찰하였다. 이러한 결과들로부터 최적의 압전모터의 스테이터를 설계 할 수 있는 정보를 제공하였다. 그러나 압전모터는 스테이터와 로터로 구성되어있는바, 제시된 모델로부터 최적의 압전모터를 설계하기 위해서는 스테이터와 로터가 접촉시의 운동거동 즉, 마찰 및 접촉문제가 고려되어야 하며, 이 분야의 연구는 차후의 과제로서 수행되어질 것이다.

참고문헌

(1) T. Sashida and T. Kenjo, "An Introductoin to Ultrasonic Motors", Clarendon Press Oxford, 242, 1993.

(2) S. Ueha and Y. Tomikawa, "Ultrasonic Motors-Theory and Applications", Clarendon Press Oxford, 297, 1993.

(3) P. Hagedorn and J. Wallashek, "Travelling Wave Ultrasonic Motors, Part I : Working Principle and Mathematical Modeling of the Stator", Journal of Sound and Vibration, Vol. 155(1), pp. 31-46, 1992.

(4) P. Hagedorn, J. Wallashek and W. Konrad, "Travelling Wave Ultrasonic Motors, Part II : A Numerical Method for the Flexural Vibrations of the Stator", Journal of Sound and Vibration, Vol. 168(1), pp. 115-122, 1993.

(5) Y. Kagawa and T. Tsuchiya and T. Kataoka, "Finite Element Simulation of Dynamic Responses of Piezoelectric Actuators", Journal of Sound and Vibration, Vol. 191(4), pp. 519-538, 1996.

(6) Nesbitt W. Hagood IV and Andrew J. McFarland, "Modeling of Piezoelectric Rotary Ultrasonic Motor", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 42. No. 2. March 1995.

(7) J. R. Friend and D. S. Stutts, "The Dynamics of an Annular Piezoelectric Motor Stator", Journal of Sound and Vibration, Vol. 204(3), pp. 421-437, 1997.

(8) W. Soedel, "Vibrations of Shells and Plates", Second Edition, Marcel Dekker, New York, 470, 1993.

(9) J. N. Reddy "Mechanics of Laminated Composite Plates-Theory and Analysis", CRC Press, 1997.

(10) G. K. Ramaiah and K. Vijayakumar, "Natural Frequencies of Polar Orthotropic Annular Plates", Journal of Sound and Vibration, Vol. 26(4), pp. 517-531, 1973.

(11) T. A. Lenox and H, D. Conway, "An Exact, closed Form, Solution for The flexural Vibration of A Thin Annular Plate having A Parabolic Thickness Variation", Journal of Sound and Vibration, Vol. 68(2), pp. 231-239, 1980.

(12) H. S. Tzou and J. P. Zhong, "Eletro-mechanics and Vibrations of Piezoelectric Shell Distributed Systems", Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control , Vol. 115, pp. 506-517 September 1993.