

The Stator Analysis and Design of Ring Type Ultrasonic Motor

尹信容* · 白壽鉉** · 金龍*** · 金澈珍§ · 金賢鎰§§
 (Shin-Yong Yoon · Soo-Hyun Baek · Yong Kim · Cherl-Jin Kim · Hyun-Il Kim)

Abstract - This paper describes with the stator analysis and design of a ring type ultrasonic motor. The design for piezoelectric ceramic and elastic body of stator were calculated by using the finite element method (FEM) that consider the resonance frequency, vibration mode and coupling efficiency. Namely, such results were acquired the calculation result of the piezoelectric ceramic thickness 0.5[mm], elastic body thickness 2.0[mm], resonance frequency 51.8[kHz], vibration mode 7 order and coupling efficient 12.5[%], the outer and inner diameter of vibrator 50[mm], 38[mm]. On the basis of such result, the ring type ultrasonic motor was manufactured. Also for driving characteristics of ring type ultrasonic motor, 2-phase inverter was constructed. Then the propriety of this paper was established from comparison of the simulation and an experiment results of the ring type ultrasonic motor.

Key Words : Ring type ultrasonic motor, Piezoelectric ceramic, Elastic body, Vibration mode, Coupling efficiency

1. 서 론

초음파 모터는 1973년 미국의 H.V. Barth에 의해 처음 개발되었으며 1981년 일본의 T. Sashida가 더욱 개선된 모델을 개발하였다. 1985년 이후에는 일본의 Matsushita사에 의해서 더욱 발전하게 되었으며 현재는 IBM사 등에서 컴퓨터 주변기기로 개발하고 있는 실정이다. 초음파 모터의 특징은 다음과 같다. 첫째, 자기식 모터는 자속밀도의 제한에 의해 소형화에 한계가 있는 것에 비해 초음파 모터는 권선이 필요 없는 단권 박형의 구조이므로 자기의 영향이 없고 모터의 소형, 경량화 및 박형화로 인하여 단위 중량당 고 토크를 얻을 수 있다.

둘째, 저속 운전시 감속기어를 사용하지 않고 무 기어화(No gearless)가 가능하며, 전원을 끊은 후에도 큰 마찰력을 지니고 있으므로 무 브레이크가 가능하다. 셋째, 직류모터와 마찬가지로 위치제어 및 속도제어가 가능하다. 넷째, 자계를 이용하지 않으므로 자기 노이즈가 전혀 없는 구동력을 얻는다. 다섯째, 설계 자유도가 높은 잇점이 있다. 그러나 반면 효율이 낮고, 발열이 크며, 정밀한 고주파 공진형 전원장치를 필요로 한다.[1]~[3]

초음파 모터는 공진주파수 근처에서 구동하며 이때 구동주파수는 약 20~80[kHz]정도의 범위이다. 초음파 모터의 기본적인 원리는 압전 세라믹의 초음파 진동을 이용하여 압전 진동자와 회전자사이의 마찰력을 매개로 회전력을 얻어내는 액추에이터이다.

본 논문에서는 최적의 링형 초음파모터의 해석 및 설계를 연구대상으로 하였다. 이를 위한 초음파 모터의 설계는 공진 주파수와 진동 모드수를 고려하여 고정자인 압전 세라믹 과 탄성체 두께를 결정하였다. 이를 위하여 최적의 압전 진동자 설계를 위해 압전 세라믹의 이론적인 접근과 진동해석 소프트웨어인 ATILA를 이용한 고정자의 진동해석 결과를 기준으로 압전 진동자를 제작하였다. 또한 실험 결과를 통하여 이에 대한 타당성을 입증하였다.

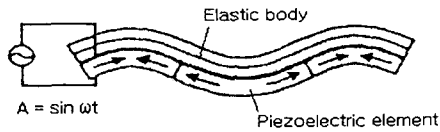
2. 초음파모터의 이론과 해석

2.1 초음파모터의 동작원리

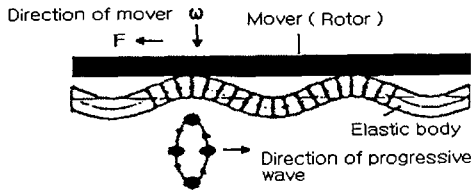
초음파 모터는 탄성체에 상호 분극한 압전소자를 부착하고 여기에 고주파 전압을 인가하면 압전소자는 횡방향으로 신축운동을 하면서 정재파동을 야기하며 기계적인 회전에너지 발생한다.[4]~[7]

그림 1(a),(b)는 초음파 모터에 대한 동작원리를 나타낸 것이다. 여기서 그림 1(a)는 상호 분극한 압전소자에 금속의 탄성체를 접착하여 고주파 전압을 인가한 경우이며 그림 1(b)는 진행파의 진행방향과 역방향으로 운동이 발생함을 나타낸 것이다. 여기서 진행파를 여진하는 탄성체의 상부에 이동체(회전자)가 있으며 압력 ω 를 인가하는 것

* 正會員 : 東國大 産業技術研究員 傳任研究員 · 博士
 ** 正會員 : 東國大 電氣工學科 教授 · 博士
 *** 正會員 : 東國大 電氣工學科 副教授 · 博士
 § 正會員 : 漢拏大 電氣電子通信工學部 · 博士
 §§ 正會員 : 産業資源部 品質研究員 博士課程
 接受日字 : 2003年 5月 7日
 最終完了 : 2003年 8月 21日



(a) High frequency input



(b) Stress for bending vibration

그림 1 초음파 모터의 구동원리

Fig. 1 The driving principles of ultrasonic motor

에 의해 이동체는 진행파의 진행방향과 반대방향으로 힘 F 를 발생하며 이동하게 된다.

2.2 고정자의 지배방정식

초음파모터의 특성 해석을 위해서는 압전 세라믹과 탄성체의 지배방정식, 응력과 변형의 관계를 고려한 이론정립이 필요하며 이에 대한 관계식은 다음과 같다. 초음파 모터는 압전 세라믹에 고주파 전압을 인가할 경우 전계의 영향을 받아 탄성체가 변형되어 왜형이 발생하는 특성을 지니고 있다. 이때 초음파 모터의 고정자는 얇은 박형판의 굴곡 진동(Bending vibration)에 의해 작은 휨(Deflection) w 이 발생하며 이것에 의해 이동이 가능하다. 이에 대한 박형 판에서 작은 휨에 대한 왜형(Strain) S 의 관계는 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} S_x &= -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ S_y &= -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ S_{xy} &= -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (1)$$

또는 $[S] = z[\epsilon]$

여기서, $[S] = [S_x, S_y, S_{xy}]^T$: 박형판의 왜형행렬

$$[\epsilon] = - \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right]^T$$

압전 세라믹의 분극방향은 두께방향(Z방향)이며 압전 세라믹의 전계는 등차방정식으로 고려될 수 있고 링형 압전 방정식에 응용된다. 이때 지배방정식은 식(2)와 같다

$$T_x = Y_1 (S_x + \nu_t S_y) - e E_z$$

$$T_y = Y_1 (\nu_t S_x + S_y) - e E_z$$

$$T_{xy} = G_t S_{xy}$$

$$D_z = e(S_x + S_y) + \epsilon E_z \quad (2)$$

여기서 $Y_t = 1/S_{11}^E$, $\nu_t = -S_{12}^E/S_{11}^E$,

$$Y_1 = Y_t / (1 - \nu_t^2), \quad G_t = Y_t / 2(1 + \nu_t)$$

$$e = d_{31} Y_t / (1 - \nu_t), \quad \epsilon = \epsilon_{33}^T \left(1 - \frac{2K_{31}^2}{1 - \nu_t}\right)$$

$$[T]_t = z [D'_t][\epsilon] - [e]^T [E] \quad (3)$$

이때 T : 응력(Stress)벡터, D : 전기변위 벡터, E : 전계, e : 압전세라믹 상수, ϵ : 유전률, K_{31}^2 : 물질의 결합계수 및 아래첨자 t 는 압전세라믹 부분을 의미한다. 여기서 얇은 압전 세라믹 판의 분극방향은 두께방향인 z 방향이다.

탄성체에서 $[e]=0$ 일 경우 식 (2)에서 Y_t, ν_t 은 Y_m, ν_m 로 변환할 수 있으며 이때 탄성체의 지배방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$[T]_m = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_{xy} \end{bmatrix}_m = z [D'_m][\epsilon] \quad (4)$$

$$[D'_m] = \frac{Y_m}{1 - \nu_m^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu_m & 0 \\ \nu_m & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu_m}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

압전소자의 전극에 전압을 인가하면 전극사이의 두께 t 는 왜형 지게 되며 이 두께의 변화는 인가전압의 크기에 비례한다. 식 (3)과 (4)에서 응력과 왜형은 판의 두께방향에 따라 선형적인 변화가 발생함을 얻을 수 있다. 여기서 첫 번째 항 z 는 기수함수이다. 또한 탄성체와 압전세라믹의 포아송비 ν_m, ν_r 가 거의 이상적일 때 판의 두께 방향에 따른 적분항은 0이 된다.

2.3 압전방정식

압전세라믹과 탄성체로 구성된 고정자의 중간면 위치는 그림 2와 같으며 이에 대한 관계식은 다음과 같다.[1][5]

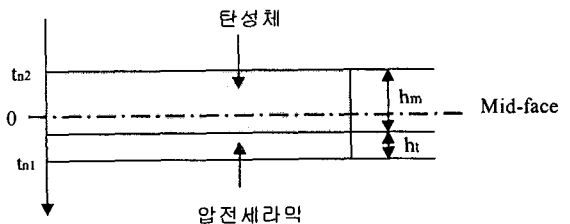


그림 2 고정자의 중간면 위치

Fig. 2 Middle-plate position of stator

$$t_{n1} = (h_m + h_t) - t_{n2}$$

$$t_{n2} = \frac{Y_2 h_m^2 + Y_1 h_t^2 + 2 Y_1 h_t h_m}{2(Y_2 h_m + Y_1 h_t)} \quad (6)$$

인가전압 V_E 와 관련된 벡터 식(3)의 두 번째 적분항은 0이 아니므로 박형 압전판에 대해서 식(7)과 같이 나타낸다. 이때 인가전압은 고정자의 굴곡을 만드는 등가 응력벡터 행렬로 변환될 수 있다.

$$[E] = [M_E] V_E \quad (7)$$

여기서, $[M_E] = [0 \ 0 \ 1/h_t]^T$
 식(3)과 식(4)에 대한 고정자의 굴곡 토크는 다음과 같다.

$$[M] = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t_{n2}}^{(h_m - t_{n2})} z \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_{xy} \end{bmatrix}_m dz + \int_{h_m - t_{n2}}^{(h_m - t_{n2}) + h_t} z \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_{xy} \end{bmatrix}_t dz \quad (8)$$

이때 식(8)은 식(9)와 같이 변환된다.

$$[M] = ([D_m] + [D_t])[\epsilon] - \alpha [e]^T [E]$$

$$= [D][\epsilon] - \alpha [e]^T [E] \quad (9)$$

여기서 $[D] = [D_m] + [D_t]$ 휨 강성, $[M]$ 내력 (internal force) 및 응력, α 구조 파라미터를 의미한다.

압전세라믹의 전기변위가 단면에서 일정한 정수를 가질 경우 관계식은 다음과 같다.

$$[D_{eh}] = \alpha [e][\epsilon] + h_t \epsilon [I][E] \quad (10)$$

여기서 $[I]$ 단위행렬, $[D_{eh}]$ 평면체의 전기 변위벡터, $[D_{eh}] = h_t [D_e]$ 를 나타낸다.

이러한 식(9)와 식(10)의 결과로부터 얇은 압전세라믹과 탄성체인 고정자의 작은 휨 조건에 대한 압전 방정식은 다음 식과 같다.

$$[M] = ([D_m] + [D_n])[\epsilon] - \frac{\alpha}{h_t} [h]^T [D_{eh}]$$

$$[E] = -\frac{\alpha}{h_t} [h]^T [\epsilon] + \frac{1}{\epsilon h_t} [I][D_{eh}] \quad (11)$$

압전 방정식인 식(11)의 두 번째 식에서 $[D_{eh}]$ 를 구하여 첫 번째 식에 대입하면 식(12)를 얻을 수 있다.

$$[M] = ([D_m] + [D_n] - [J])[\epsilon] - \frac{\alpha V_E}{h_t} [H] \quad (12)$$

2.4 고정자 해석

초음파 모터는 공진 주파수의 범위에서 회전이 가능하므로 초음파 모터의 설계시 이를 고려하여야 하며 이 범위는 약 20~80[kHz] 정도이다. 또한 초음파 모터는 분극 현상에 의한 구동을 위해서 진동모드의 설정이 필요하며 본 연구에서는 공진 주파수의 범위에 적합한 7차 진동모드를 선정하였다. 이때 진동모드와 공진 주파수와의 관계는 진동모드가 클수록 공진 주파수는 커짐을 알 수 있다.

초음파 모터의 설계와 해석은 압전방정식을 이용한 진동해석용 유한요소법 소프트웨어인 ATILA를 이용하였으며 이로부터 초음파 모터의 설계에 필요한 고정자의 진동모드와 공진 주파수를 구할 수 있었다. 이를 위한 설계 방법은 공진 주파수를 고려한 진동모드를 선정하며, 초음파모터 고정자의 외경과 내경에 대해 압전 세라믹과 탄성체의 두께를 선정하였으며 이때 가장 큰 결합효율을 얻었다.

그림 3은 유한요소법에 의해 해석하고자 하는 초음파모터 고정자의 요소분할 모델을 나타낸 것이다.

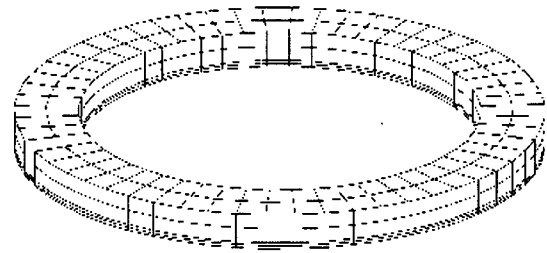


그림 3 고정자 해석 모델
 Fig. 3 Model for stator analysis

그림 4는 고정자의 7차 진동 모드시 굴곡진동 모습이다. 이때 굴곡 진동을 위한 공진 주파수와 압전세라믹과 탄성체 사이의 결합 효율이 중요하다. 여기서 그림 4는 그림 3의 모델에 표 1의 파라미터를 적용하여 해석한 굴곡진동의 형상이다. 본 모델선정의 타당성을 위하여 공진 주파수 범위인 6, 7, 8차 진동모드인 경우에 대해 해석하였다.

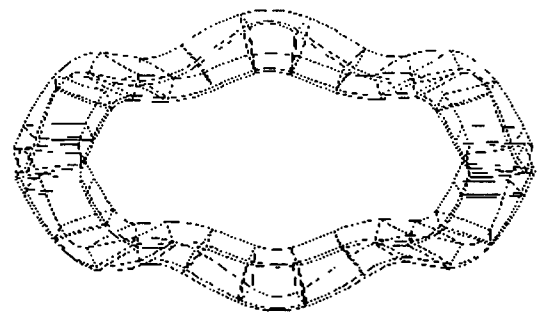


그림 4 7차 진동모드에서 고정자의 굴곡진동
 Fig. 4 Stator bending vibration at 7 order mode

이러한 해석결과 6차 진동모드에서는 공진주파수 42.82[kHz]와 결합효율 10.64[%], 7차 진동모드에서는 공진주파수 51.8[kHz]와 결합효율 12.5[%] 및 8차 진동모드에서는 공진주파수 60.3[kHz]와 결합효율 9.75[%]의 결과를 얻을 수 있었으며 이중 본 연구에서는 결합효율이 가장 높은 7차 진동모드를 선정하였다. 이러한 해석결과를 통하여 압전세라믹 (두께 0.5[mm], 내경 38[mm], 외경 50[mm]) 와 탄성체 (두께 2.5[mm], 내경 38[mm], 외경 50[mm])의 결과를 얻을 수 있었다.

그림 5는 7차 진동모드에서 해석한 초음파모터의 진동 변위량을 색지수로 나타낸 것이다.

이때 인가전압 100[Vrms]에 대한 해석모델의 외부 적 색 색지수의 진동 진폭은 22.6[μm]이며 내부로 갈수록 진폭이 작음을 알 수 있었다.

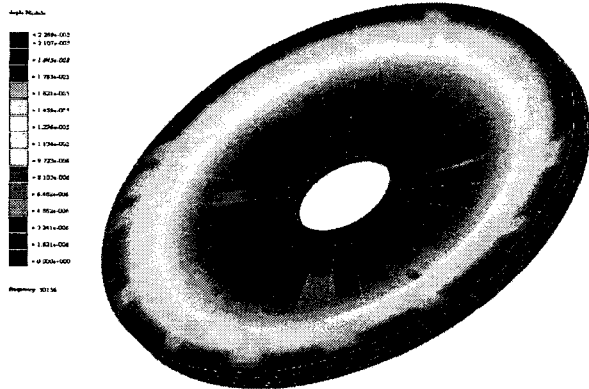


그림 5 7차 진동 모드시 고정자의 변위량
Fig. 5 Stator displacement at 7 order vibration mode

그림 6은 공진 주파수의 변화에 따른 변위량을 나타낸 것이다. 여기서 선정된 7차 진동모드 모델의 설계치수에 대한 유한요소법의 해석결과 공진 주파수 51.8[kHz]를 계산하였으며 이때 변위량이 가장 큼을 알 수 있었다.

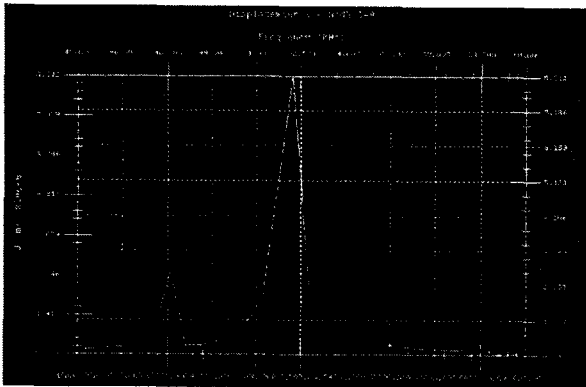


그림 6 공진주파수에 대한 변위
Fig. 6 Displacement with resonance frequency

그림 7은 초음파모터 해석용 유한요소법을 이용한 링형 고정자인 압전세라믹과 탄성체의 해석 및 설계 플로차트이다.

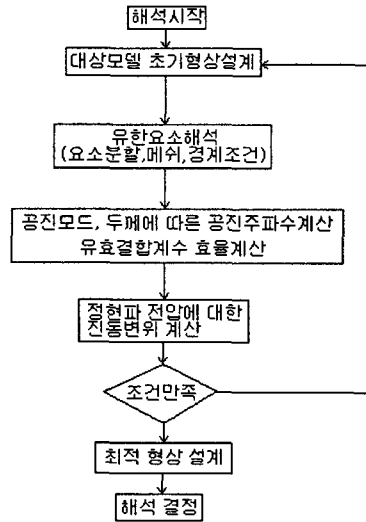


그림 7 유한요소법을 이용한 설계순서
Fig. 7 Design flowchart using the FEM

그림 8과 9는 유한요소법의 해석으로부터 설계된 압전 세라믹과 탄성체 도면을 나타낸다.

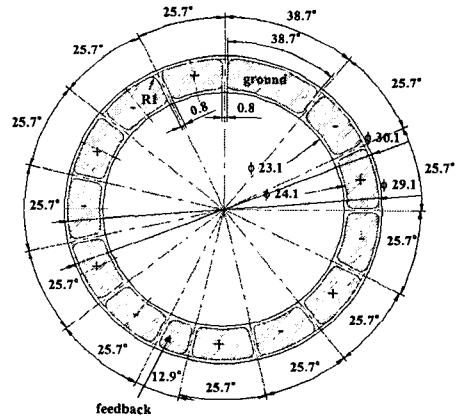


그림 8 고정자의 설계 구조도(분극배치)
Fig. 8 Design of piezoelectric ceramics

여기서 그림 8은 7차 공진 모드를 이용한 링형 초음파 모터의 고정자에 접착된 압전세라믹의 전극배치와 분극방향(+,-)을 나타낸 것이다. 이때 (+) 분극방향은 여현파, (-) 분극방향은 정현파를 발생하므로 구동회로에서는 이러한 90° 위상차의 2상 구동전압을 인가하면 구동이 가능하다. 본 모델은 7차 진동 모드를 사용하기 때문에 A상에 25.7°씩 6개, B상도 마찬가지로 25.7°씩 6개의 세라믹으로 분할하여 분극하였고 접지는 38.5°, 피드백 부분은 12.8°로 분할하여 배치하였다.

그림 9는 고정자의 앞면 압전세라믹과 접촉되는 뒷면 탄성체의 설계도면이다.

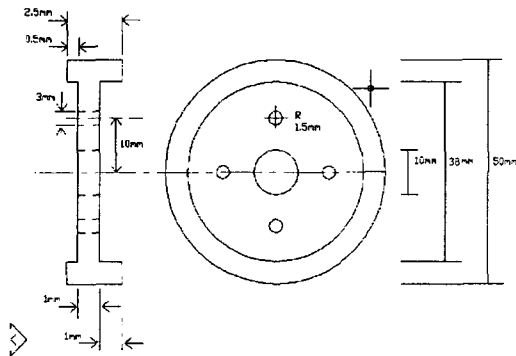


그림 9 탄성체의 설계도
Fig. 9 Design drawing of elastic body

3. 시뮬레이션 및 실험결과

그림 10과 11은 유한요소법에 의해서 탄성체에 두께에 따라 공진 주파수와 결합효율을 계산한 결과이다. 여기서 본 연구에서는 고정자의 외경 50[mm]와 내경 38[mm]의 경우 압전세라믹의 두께 0.5[mm]와 1[mm]에 대해서 탄성체의 두께를 1[mm]로부터 4.0[mm]까지 변화시키면서 공진주파수와 결합효율을 계산한 결과이다.[1][3][4]

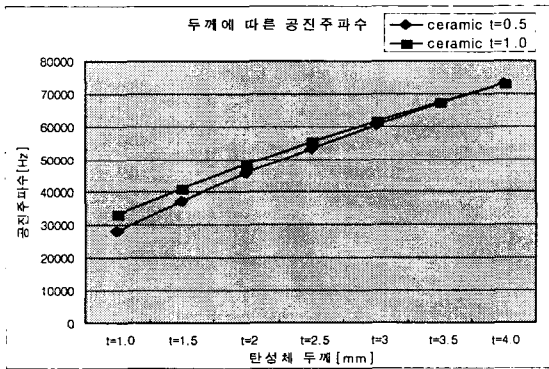


그림 10 탄성체 두께에 대한 공진주파수
Fig. 10 Resonance frequency for elastic thickness

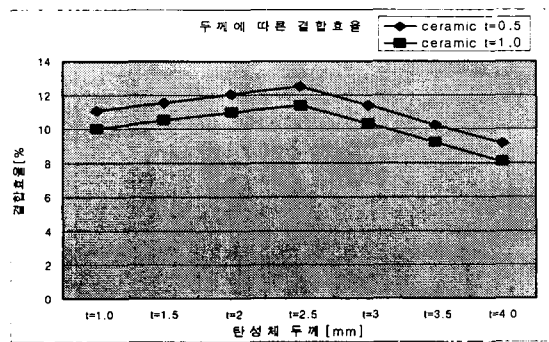


그림 11 탄성체 두께에 따른 결합효율
Fig. 11 Coupling efficiency with elastic thickness

따라서 유한요소법에 의한 계산결과 탄성체의 두께를 증가시키에 따라 공진주파수가 증가함을 알 수 있으며 이때 공진 주파수는 약 28[kHz]로부터 73[kHz]까지를 얻을 수 있었다. 압전세라믹의 두께가 0.5[mm]와 1.0[mm]에 대해서 탄성체의 두께를 가변 하였을 경우 2.5[mm] 두께에서 상대적으로 높은 효율인 12.5 %와 11.1 %을 얻을 수 있었다.

표 1은 본 연구에서 설계를 위해 적용한 초음파모터의 압전 세라믹과 탄성체 파라미터와 제작된 결과값을 나타낸 것이다. 여기서 적용한 탄성체는 알루미늄 합금재질은 T6-7570을 적용하였다.

표 1 압전세라믹과 탄성체의 사양

Table 1 Specification of piezoelectric ceramic and elastic body

항 목	설계치	실험치
정 토크 T	0.1[Nm]	0.095[Nm]
정속도 n	150[rpm]	150[rpm]
공진주파수 ν_0	51.8 [kHz]	48.8[kHz]
탄성체 영률 Y_m 포아손 비 ν_m 밀도 ρ_m 강성계수 ϵ 응력 M 탄성률 k 유전률 ϵ_{33}	21.5E-10 [N/m ²] 0.33 2800 [Kg/m ³] 28 [GPa] 500 [MPa] 72 [GPa] 3500	
압전세라믹 영률 Y_t 포아손 비 ν_r 밀도 ρ_t 결합계수 k_{31} k_{33} 기계적인 질계수 Q 강성계수 S_{11}^E S_{12}^E S_{13}^E S_{33}^E 변형(응력)계수 d_{31} d_{33}	10.7E-10 [N/m ²] 0.313 7600 [Kg/m ³] 0.41 0.75 70 12.3E-12[m ² /N] -4.05E-12[m ² /N] -5.31E-12[m ² /N] 15.5E-12[m ² /N] -150E-12[C/N] 340E-12[C/N]	
진동자의 내경, 외경	38, 50[mm]	
압전세라믹의 두께	0.5[mm]	
탄성체의 두께	2.5[mm]	

그림 12는 Impedance Analyzer(HP4194A)를 사용하여 측정된 결과이다. 여기서 압전 세라믹의 두께 0.5[mm]와 탄성체 두께 2.5[mm]로 제작된 초음파 모터에 대해서 탄성체에 접착된 압전 세라믹의 유전 및 압전정수를 구하였다. 측정 파라미터의 값은 구동주파수의 변화 동안 임피던스의 크기와 위상을 측정함으로써 얻을 수 있다. 따라서 계산에 의한 공진주파수 51.8[kHz]은 실험에 의한 공진주파수 48.6[kHz]에 가까운 결과를 얻었다. 계산값과 실

힘값의 차이는 고정자와 회전자사이가 이상적인 접촉을 한 것으로 간주하였기 때문이다.

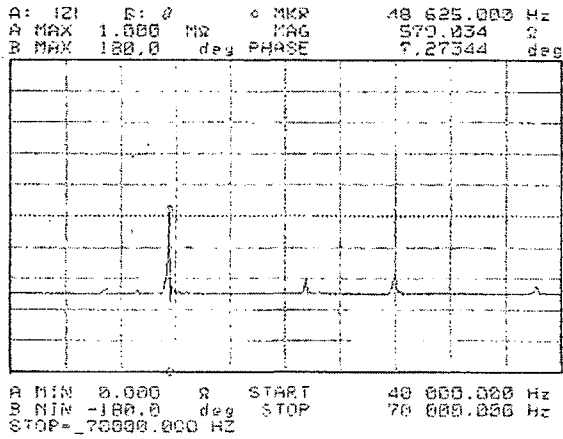


그림 12 공진주파수의 측정파형
Fig. 12 Measurement waveform of resonance frequency

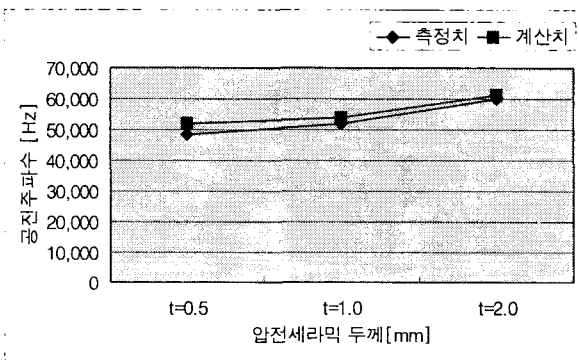


그림 13 압전세라믹 두께에 대한 공진주파수 비교
Fig. 13 Comparison of resonance frequency to piezoelectric ceramic thickness

그림 13은 제작된 고정자 모델에 대한 공진주파수의 계산치와 측정치의 비교 결과이다. 여기서 공진 주파수의 계산치와 측정치는 압전세라믹의 두께에 따라 약 4[kHz]의 오차가 발생함을 알 수 있다. 이러한 원인으로 계산치의 경우는 접착부분에 대해 이상적인 조건을 적용하였으며 또한 실제 탄성체 구조에 대한 나사구멍 등을 고려하지 않았기 때문이다. 따라서 접착부분에 대한 실제 조건과 구조에 대한 실제적 조건을 고려하게 되면 오차를 억제할 수 있다.

그림 14(a), (b)는 7차 진동모드시 공진주파수에 따른 진동상태를 나타낸 것이다. 그림 14(a)는 19.62[kHz]로 구동시 진동 형태로 여기서 흰색 부분은 진동이 전달되지 않는 것으로 진행과가 발생하지 않음을 의미한다. 그러나 그림 14(b)의 검정색은 원주방향으로 진동이 막히지 않고 360°전체 영역에서 진행과가 발생하는 공진주파수 48.6[kHz]영역에서의 진동 형태를 나타낸 것이다. 이때 기계적인 공진주파수는 48.6[kHz]이지만 초음파모터의 동작

을 위한 구동주파수는 초음파모터의 공진주파수보다 약간 높은 51.6[kHz]에서 구동됨을 알 수 있었다. 이에 따라 동기이탈 없이 연속구동이 가능하다. 이때 입력전압은 100[Vrms] 및 입력전류는 0.3[A]이다.

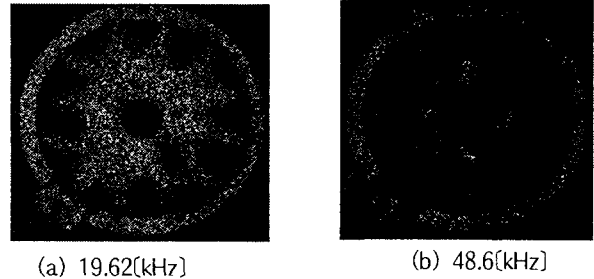


그림 14. 주파수에 따른 진동 형상
Fig. 14 Vibration configuration with frequency

그림 15는 그림 8과 그림 9의 설계도면을 기준으로 제작한 고정자의 압전세라믹과 탄성체의 실제구조이다.

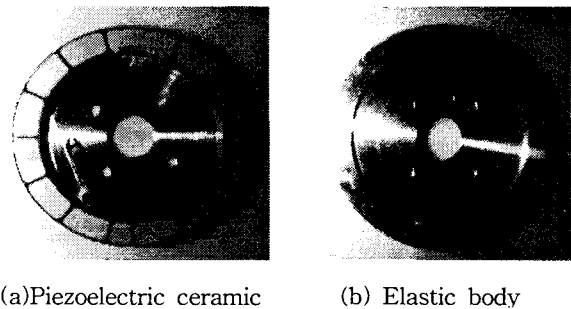


그림 15 제작된 고정자 형상
Fig. 15 Stator structure manufactured

그림 16은 초음파모터를 분해한 각 부품이다. 여기서 제작된 시작기는 압전세라믹과 탄성체로 이루어진 고정자, 회전자, 축, 스프링과 스프링 판으로 이루어진 가압기구 및 끝 평면(End Plate)으로 구성되어 있다. 여기서 너트와 굴곡 스프링을 사용하여 전체 면에 일정한 압력을 가할 수 있는 구조로 되어있다. 여기서 가압기를 통하여 고정자와 회전자 사이에 적합한 접촉 마찰을 지니도록 제작하였다.

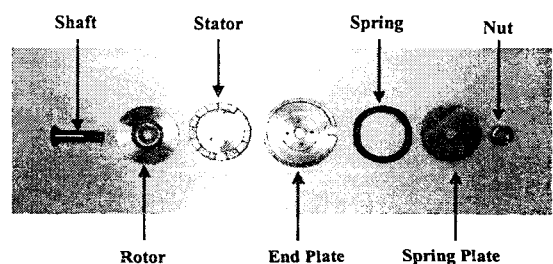


그림 16 링형 초음파모터의 분해도
Fig. 16 Dismantle drawing of ring type ultrasonic motor

4. 결 론

본 연구에서는 링형 초음파모터의 해석에 필요한 고정자인 압전세라믹과 탄성체의 지배방정식과 여기에 굴곡진동 변위를 위해 두께를 고려한 응력과 변형의 관계를 정립하였다. 본 연구에서는 진동모드, 공진주파수 및 결합효율을 고려하여 최적의 링형 초음파 모터의 고정자인 압전세라믹과 탄성체를 설계, 제작하였다. 이러한 설계를 위해서 유한요소법을 이용하였다.

이러한 결과로부터 내경 38[mm], 두께 0.5[mm] 압전세라믹을 갖는 링형 초음파 모터를 제작하였다. 제작된 링형 초음파 모터는 드라이버의 실험장치를 통하여 설계된 이론의 공진주파수 51.6[kHz]에 가까운 실제 공진주파수 48.6[kHz]에서 진동이 발생하며 구동됨을 알 수 있었다. 여기서 실제와 약간의 오차는 제작상 접촉면 마찰에 의한 것으로 간주된다.

앞으로 본 링형 초음파 모터는 자기에너지의 영향이 없으므로 작은 부피로 고 토크를 발생할 수 있는 원자로의 로봇 손, 자동 카메라 조절용 렌즈 및 각종 소형 액츄에이터 등에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Toshiku Sahida and Takashi Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motor", Oxford Science Publications, pp.117-124, 1993
- [2] Hiroshi Hirata and Sadayuki Ueha, "Design of a Traveling Wave Type Ultrasonic Motor", IEEE Trans. Utrason. Ferro-elect. Freq. Cont., Vol.42, No.2, pp.225-231, 1995
- [3] S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa and N. Nakamura, "Ultrasonic Motors Theory and Application", Clarendon Press Oxford, 1933
- [4] Nesbitt W. Hagood IV and Andrew J. McFarland, "Modeling of a Piezoelectric Rotary Ultrasonic Motor", IEEE Trans. Utrason. Ferroelect. Freq. Cont., Vol.42, No.2, pp. 210-224, 1995
- [5] Reinhard Lerch "Simulation of Piezoelectric Devices by Two-and Three-Dimensional Finite Elements", IEEE Trans. Utrason. Ferroelect. Freq. Cont., Vol.37, No.2 pp.233-247, 1990
- [6] William T. Thomson, "Theory of Vibration with Applications", Prentice-Hall Inc., 1996
- [7] 백수현, 박기준, 김승호, 정현규, "로봇 손 구동용 초음파 모터의 설계", 대한전기학회, 하계학술대회 논문집 pp.121-123, 1996

저 자 소 개



윤 신 용 (尹 信 容)

1964년 9월 1일생. 1992년 서울산대 전기공학과 졸업. 1994년 동국대 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1999년~현재 동국대 산업기술연구원 전임연구원. 1997년~현재 동서울대학 전기정보제어과 겸임교수.



백 수 현 (白 壽 鉉)

1949년 5월 2일생. 1972년 한양대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1977~현재 동국대 전기공학과 교수. 현재 대한전기학회 전기기계 및 에너지변환분야(B) 회장(평의원). 1999~현재 동국대 산업기술연구원 원장 및 창업 지원단 단장.



김 용 (金 龍)

1957년 3월 20일생. 1981년 동국대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1998년~1995년 대림대학 제어계측과 교수. 1995년~현재 동국대 전기전자공학부 부교수.



김 철 진 (金 澈 珍)

한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991~1995 생산기술연구원, KETI 제어 기기 연구실장. 1995~현재 한라대학교 전기전자통신공학부 교수.



김 현 일 (金 賢 鎰)

1956년 11월 8일생. 1979년 충북대 전기공학과 졸업. 1995년 국방대학원 졸업(석사). 2002년~현재 동국대 대학원전기공학과 박사과정. 1979년~1996년 공업진흥청 전기전자산업과장. 2000년~현재 산업자원부 기술표준원 제품안전과장 및 IEC (국제전기기술위원회) 이사.