

## The Vibration Characteristic Analysis by Mode Variation of Ring Type Ultrasonic Motor

尹 信 容\* · 白 壽 鉉\*\* · 金 賢 鎰\*\*\*  
(Shin-Yong Yoon · Soo-Hyun Baek · Hyun-Il Kim)

**Abstract** - This paper suggested the vibration characteristic improvement by variation mode of ring type ultrasonic motor. Design for the piezoelectric ceramic and elastic body of stator were calculated by the finite element method(FEM) that consider the resonance frequency, vibration mode and coupling efficiency etc. Through the result of vibration analysis from 6 order mode to 8 mode, the 7 order mode was gained very an excellent results that it was the coupling efficient, minimum power loss and bending vibration value. Here over 7 order mode, this paper was acquired that an output current for input voltage was very a large increased results. The result of vibration calculation, from thickness 0.5[mm] to 2[mm], knew the fact that the vibration displacement at 0.5[mm] is an high value too. From such result, this paper was manufactured the ultrasonic motor of outer diameter 50[mm], inter 22[mm] having the about 43.86[kHz] resonance frequency. We have gated that a simulation result is 42.2[kHz] and an experiment result is 43.86[kHz]. The propriety of this paper was established though comparison, investigation of simulation and experiment result.

**Key Words** : Ring type ultrasonic motor, Variation mode, Piezoelectric ceramic, Elastic body, Resonance frequency.

### 1. 서 론

산업의 자동화 및 정보화에 따라 전기에너지가 기계에너지로 변환하는 구동시스템이 더욱 요구되고 있는 실정이다. 이러한 액추에이터로는 대부분 자계를 이용한 전자력 모터와 전계를 이용한 초음파 모터가 있다. 본 연구에서는 이중 전계를 이용한 초음파모터를 연구대상으로 한다. 초음파모터는 자계의 영향을 받지 않으며 저속, 고 토크를 발생하는 특성을 지니고 있으며 카메라 줌 렌즈, 보안시스템, 원자로의 핵연료 작업용 로봇팔, FA, OA 등에 적용되고 있다.[1]~[5]

초음파모터는 선형 초음파모터와 링형 초음파모터로 크게 분류할 수 있다. 본 연구에서는 링형 초음파모터를 연구대상으로 한다. 초음파모터의 구동은 고정자인 분극형상의 압전 세라믹(Piezoelectric ceramics)과 탄성체(Elastic body)에 90° 위상차를 지닌 2상 고주파 정현전압을 인가하면 분극현상에 의한 압축, 팽창으로 굴곡 진행파를 발생하며 회전자와의 접촉마찰에 의해 이동하게 된다. 초음파모터는 치수구조에 의해 기계적인 공진주파수를 지니게 되는데 이 주파수와 거의 동일한 구동주파수의 구동전압을 인가하면 공진이 발생하며 안정된 회전이 가능하다. 이러한 초음파모터의 기계적인 공진주파수 범위는 약 20~80[kHz]이다. 이를 위해서는 기계적인 공진주파수 범위 내에서 모터를 결정하는 최적의 설계기

술이 요구된다.[6]~[13]

본 연구에서는 링형 초음파모터의 진동모드와 두께에 따른 특성해석을 연구대상으로 하며 이를 위하여 관계이론과 진동해석용 유한요소법 소프트웨어인 ATILA를 이용한다. 이로부터 진동모드의 가변에 따른 공진주파수와 결합효율을 계산하고, 또한 인가전압의 가변에 따른 진동변위와 전류크기를 고려하여 적합한 링형 초음파모터를 설계하고자 한다. 이러한 해석결과의 타당성을 입증하기 위해 제작한 초음파모터의 실험장치에 의한 실험결과를 비교, 검토하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 초음파모터의 원리 및 관계방정식 절

그림 1은 초음파모터에 대한 동작원리를 나타낸 것이다. 여기서 초음파모터의 고정자는 분극인 압전세라믹에 탄성체를 접착하고 고주파 교류전압을 인가한 경우 기계적인 굴곡 진동이 발생한다. 이로부터 탄성체에서 발생하는 진동에너지를 가동자를 마찰 구동하는 원리이다.

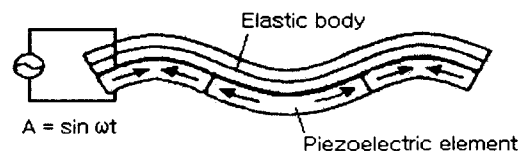


그림 1. 초음파 모터의 구동원리  
Fig. 1. Driving principle of ultrasonic motor

\* 正 會 員 : 동서울大學 電氣情報科 兼任教授 · 工博  
\*\* 正 會 員 : 東國大學 電氣工學科 教授 · 工博  
\*\*\* 正 會 員 : 産業資源部 기술표준원 과장  
接受日字 : 2003年 9月 26日  
最終完了 : 2004年 3月 2日

초음파 모터는 회전자가 압착되어 지는 고정자의 단면이 초음파 타원진동을 함으로써 회전자가 회전하는 현상을 이용한 모터이다. 고정자에서 초음파 타원진동을 여진하는 것은 압전진동자이고 인가된 고주파 전압에 의해 전력을 초음파 진동의 기계에너지로 출력되는 변환자이다.

일반적으로 절연체의 고체에 전압을 인가하면 고체는 변형한다. 고체를 형성하고 있는 원자, 분자가 전계의 작용을 받아 왜형(strain)이 생기는 것이다. 이 현상을 전왜(Electrostriction)라 하며 변형의 크기는 인가전압의 정(+), 부(-)와 관계없이 전압의 제곱에 비례하지만 보통 물질에서는 관측될 수 없을 정도로 작다.

공급전압의 극성을 변화시키면 정 전압에서는 늘어나고 부 전압에서는 줄어드는 물질이 있다. 이러한 물질에 힘을 작용하여 늘리면 양 단면의 정·부의 전하가 나타나서 수축되며, 늘어나는 경우와 반대 극성의 전하가 생긴다. 이러한 물질이 압전성(Piezo-electricity)이고 전압에 대해 신축하고 전하량의 변화량 크기는 힘의 작용량에 비례한다.

초음파 모터는 고정자인 압전세라믹, 탄성체와 회전자인 마찰재 가동자로 구성된다. 이는 전기에너지에 의해서 기계 에너지가 발생되며 즉 이는 전계에 의한 토크와 변위가 발생함을 의미한다. 따라서 이에 관계되는 압전세라믹의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_x = Y_1 (S_x + \nu_t S_y) - e E_z \quad (1)$$

$$T_y = Y_1 (\nu_t S_x + S_y) - e E_z \quad (2)$$

$$T_{xy} = G_t S_{xy} \quad (3)$$

$$D_z = e(S_x + S_y) + \epsilon E_z \quad (4)$$

여기서,  $T$  응력(Stress)벡터,  $S$  왜형(Strain)벡터,  $Y_1$  영률,  $D$  전기변위 벡터,  $E$  전계,  $e$  압전세라믹 상수,  $\epsilon$  유전률,  $K_{31}^2$  물질의 결합계수 및 아래첨자  $t$ 는 압전세라믹을 의미한다. 또한, 얇은 압전세라믹 판의 분극방향은 두께방향인  $z$ 방향이다.

### 2.2 모드가변에 따른 공진주파수 결정

초음파모터는 압전세라믹에 교류 전계를 인가하면 기계적 진동이 여기 되는데, 이 진동수는 압전세라믹의 탄성계수 및 치수로 정해지는 기계적 공진주파수에 거의 일치되면 압전 공진이 발생함을 의미한다. 초음파모터는 기계적인 공진주파수 근처에서 구동주파수를 인가하면 구동하게 된다. 따라서 모터 설계시 구조가변에 의한 적합한 공진주파수의 결정이 가능하다. 이를 위해서는 모터 설계시 압전세라믹의 분극 진동모드와 적합한 두께의 선정이 매우 중요하며 이와 관련된 특성값 관계식은 다음과 같다[1].

그림 2는 공진주파수와 반공진 주파수에 대한 임피던스 특성을 나타낸 것이다.

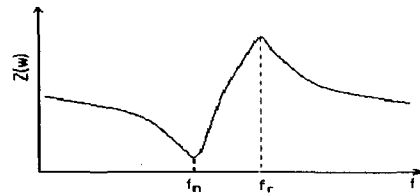


그림 2. 공진주파수와 반공진주파수의 특성  
Fig. 2. Characteristics of resonance frequency and antiresonance frequency

여기서 어드미턴스가 무한대, 즉 임피던스가 0이 될 때 공진상태이고, 반 공진 상태는 임피던스가 무한대 혹은 어드미턴스가 0일 때 생긴다. 공진상태에서는 큰 변형 및 용량의 변화가 있으므로 큰 전류가 흐르지만, 반공진 상태에서의 변형은 소자 내에서 상쇄되기 때문에 치수적인 용량변화가 없으며 전류가 흐르지 못한다.

전기-기계 에너지변환에서 유효분 지수나 압전효과의 세기를 전기-기계 결합계수  $k$ 라 한다. 이는 압전소자에 전기적 입력을 인가할 경우 전기에너지가 기계에너지로 변환되는 효율을 의미한다.

전기-기계 결합계수  $k$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$k \approx \sqrt{1 - \left(\frac{f_n}{f_r}\right)^2} \quad (5)$$

여기서  $f_n$  공진주파수,  $f_r$  반공진주파수

$k$ 는 어떠한 동작상태, 모드인가에 따라 다르며, 그 값은 정이나 부로도 될 수 있다. 다만 %만 문제로 할 때는 절대값  $|k|$ 를 고려하면 된다.

구조가변에 의한 공진주파수는 다음 식에 의해서 구할 수 있다.

$$f_n = \frac{\pi n^2}{2l^2} \sqrt{\frac{Y_1 H}{\rho S}} \quad (6)$$

여기서  $n$  모드수,  $l$  길이,  $Y_1$  영률,  $\rho$  밀도,  $S$  단면적,  $H$  세부면적

이때  $l = \pi(D_1 + D_2)/2$  이다.

그림 3 (a), (b), (c)는 링형 초음파모터의 외형치수를 나타낸 것이다.

그림 3 (a)는 평면도의 치수를 나타낸 것이며 그림 3 (b), (c)는 링형 고정자구조를 절단한 측면도의 치수이다.

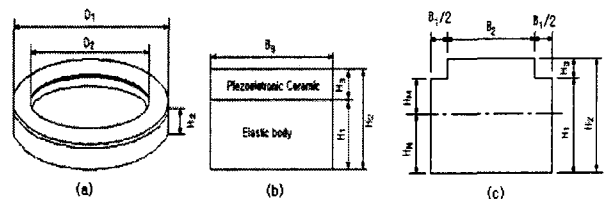


그림 3. 링형 초음파모터의 고정자 구조  
Fig. 3. Stator structure of ring type ultrasonic motor

압전세라믹과 탄성체의 영률이 다른 경우 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{B_2}{B_3} = \frac{Y_t}{Y_m} \quad (7)$$

여기서,  $Y_t$  압전세라믹 영률,  $Y_m$  탄성체 영률, 중간면의 위치  $H_N$  은 다음 식과 같다.

$$H_N = \frac{B_1 H_1^2 + B_2 H_2^2}{2(B_1 H_1 + B_2 H_2)} \quad (8)$$

그림 3 (b)에서 단면적  $S$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$S = B_1 H_1 + B_2 H_2 \quad (9)$$

그림 3 (b)에서 변환된 세부적인 면적은 그림 3 (c)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = \frac{1}{3} B_2 (H_N^3 + H_M^3) + B_1 H_1 \left( H_M - \frac{H_1}{2} \right) + \frac{B_1 H_1^3}{12} \quad (10)$$

여기서  $H_M = H_2 - H_N$

만약 링의 볼록한 부분에서 파형  $m$ 들이 발생할 경우 파장  $\lambda$ 는 다음 식과 같다.

$$\lambda = \frac{\pi(D_1 + D_2)}{2m} \quad (11)$$

여기서  $D_1$  링의 외경,  $D_2$  링의 내경  
진동모드  $n$ 과 극 쌍수  $m$ 의 관계식은  $n = 2m$ 과 같다.

$$\lambda = 2l/n \quad (12)$$

따라서 식(6)의 관계식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_n = \frac{2\pi}{\lambda^2} \sqrt{\frac{Y_1 H}{\rho S}} \quad (13)$$

따라서 위 수식으로부터 모드가변에 따른 적합한 공진주파수를 구할 수 있다.

### 2.3 유한요소법을 이용한 고정자해석

진동에 대한 유한요소법의 지배방정식은 뉴턴법칙(Newton's law)에 의해 표현되며 관계방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot T = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (14)$$

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (15)$$

$$E = -\nabla \cdot \Phi \quad (16)$$

대상 초음파모터의 설계를 위하여 진동해석 프로그램인 ATILA를 사용하여 고정자인 압전세라믹과 탄성체의 크기를 결정하였다. 그림 4는 재질 입력파라미터에 압전세라믹을 7차 진동모드로 분극하고 입력전압 100[V<sub>rms</sub>]를 인가하여 해석한 경우 굴곡 진행과 진동형상을 나타낸 것이다.

구동시 연속적인 진동모습은 각 절점이 타원운동을 하며 한쪽 방향으로 진행되는 해석결과를 나타낸 것이다.

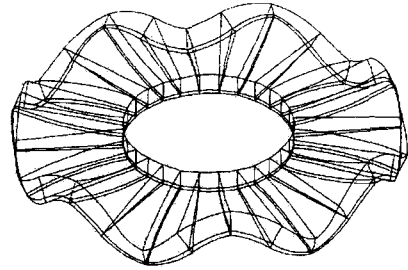


그림 4. 굴곡 진행과 진동

Fig. 4. Vibration of bending traveling wave

여기서 고정자인 압전 세라믹과 탄성체를 다양한 반경으로 해석해본 결과 실제로 진동을 일으키는 반경은 특히 19[mm]에서 25[mm]까지의 영역이었으므로 이를 고려하여 해석하였다. 또한 A상과 B상에 90°위상차를 가진 2상 정현파 입력을 100[V]에서 180[V]까지 20[V]씩 증가시키면서 해석하였다. 여기서 선정한 전압은 속도증가, 전류감소, 전력감소 및 효율증가를 고려하여 적용하였다.

그림 4의 해석결과로부터 진동변위의 크기를 색지수로 나타내면 그림 5와 같이 표현되며 이는 내경이 큰 이상적인 경우의 모델이다. 여기서 왼편이 막대 도표는 색지수의 크기를 나타낸 것으로 가장 위(+)와 가장 아래(-)의 색지수가 진동변위 중 가장 큰 값을 의미하며 이는 그림에서 색지수로 나타내었다.

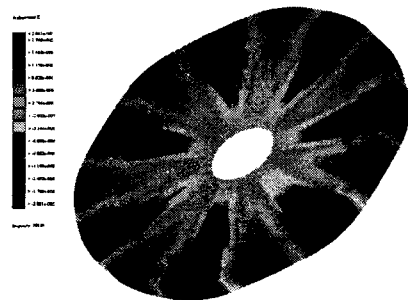


그림 5. 색지수에 따른 진동변위 크기

Fig. 5. Vibration displacement according to color index

그림 6은 제작된 고정자와 동일한 구조의 해석모델에 대한 진동변위의 크기를 나타낸 것이다. 그림 6은 그림 5와 동일한 조건으로 해석한 결과이다. 여기서는 압전 세라믹과 탄성체의 접촉부분 뿐만 아니라 고정자 안쪽의 지지구조까지 고려하여 해석하였다. 볼트로 고정되는 4곳의 구멍은 고려하지 않았으나 볼트에 의해 고정되는 부분은 진동이 일어나지 않으므로 해석시 이를 고려하여 않은 조건으로 계산하였다.

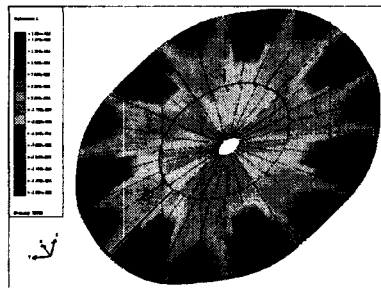


그림 6. 색지수에 따른 진동 변위크기  
Fig. 6. Vibration displacement value with color index

그림 6의 해석결과로부터 각각의 진동모드에 대한 공진주파수와 결합효율은 표 2와 같다.

표 2. 초음파모터 고정자의 공진주파수와 결합효율  
Table 2. Resonance frequency and coupling efficiency

모 드	공진주파수(kHz)	결합효율(%)
6차 진동 모드	33.38	10.24
7차 진동 모드	42.20	12.10
8차 진동 모드	61.92	7.98

여기서 해석결과를 보면 표 2에서는 7차 진동모드에서 결합효율이 가장 큼을 알 수 있다. 그림 7은 각 모드 별 주파수의 계산치와 측정치를 비교한 것이다. 계산치 1은 그림 4와 같은 구조해석에 의한 값이며, 계산치 2는 그림 6과 같이 실제 제작된 고정자 구조에 가까운 해석모델의 값이다. 이상적인 구조 해석에서는 6차 진동모드 계산치 25.77[kHz], 실험치 31.95[kHz]로 측정치가 약 20[%] 더 높고, 7차 진동모드 계산치 33.52[kHz], 실험치 43.86[kHz]로 측정치가 약 30[%] 더 높다. 8차 진동 모드에서는 계산치가 42.10[kHz], 실험치는 57.0[kHz]로 측정치가 약 35[%] 더 높다. 고정자 해석시 이상적인 구조의 압전세라믹과 탄성체가 접촉하는 부분만 고려하여 계산하였다. 즉 압전세라믹과 탄성체의 접촉이 해석에서는 아주 이상적인 접촉으로 간주된 것과 내경을 무시한 것이 오차의 원인으로 분석된다.

그림 6과 같은 실제 제작모델의 계산결과 6차 진동 모드는 33.38[kHz]에서, 7차 진동 모드는 42.2[kHz], 8차 진동 모드는 61.92[kHz]로 각각 오차가 5[%], 7[%], 8[%]로 줄어들어 측정치와 더 가까운 계산치를 얻었다.

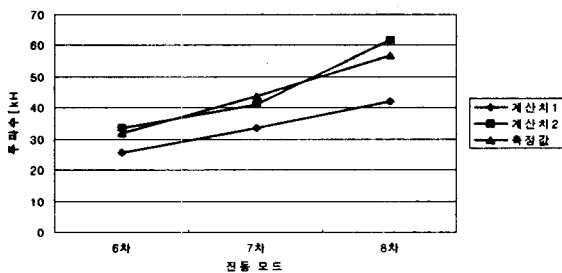


그림 7. 각 모드 별 공진주파수의 계산치와 측정치  
Fig. 7. Calculation and measurement value of resonance frequency for each mode

그림 8은 유한요소법의 틀인 ATILA에 의해 해석된 실제 대상모델의 공진주파수와 반공진주파수의 결과를 나타낸 것이다. 여기서 공진주파수는 약 42.2[kHz] 범위에서 발생함을 알 수 있다.

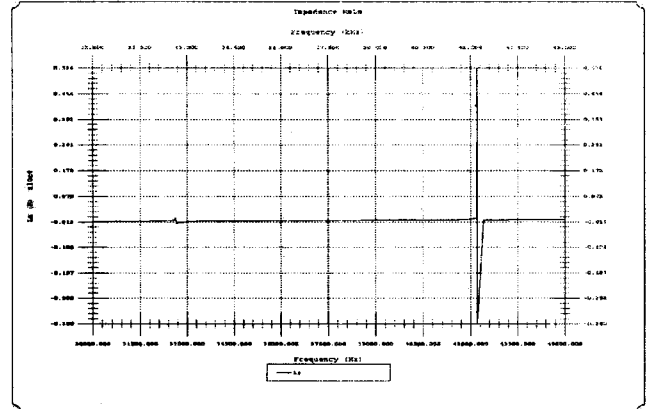


그림 8. 공진주파수와 반공진주파수의 해석결과  
Fig. 8. Analysis result of resonance frequency and antiresonance frequency

### 3. 시뮬레이션 및 실험결과 고찰

표 3은 본 연구에서 대상모델을 FEM으로 해석시 적용한 압전세라믹과 탄성체의 파라미터이며 제작시도 이러한 파라미터를 적용한 결과를 나타낸 것이다.

여기서 실제제작에 사용된 재료의 물질 값들에 대한 식은 참고문헌[9],[10],[11]을 적용하였다.

표 3. 고정자 설계 파라미터  
Table 3. Design parameter of stator

설계 파라미터	치 수[단위]
탄성체 영률 $Y_m$ 포아손 비 $\sigma_m$ 밀도 $\rho_m$	21.5E10[N/m <sup>2</sup> ] 0.33 7900[kg/m <sup>3</sup> ]
압전세라믹 영률 $Y_t$ 포아손 비 $\sigma_t$ 압전 변형률 정수 $d_{31}$ 밀도 $\rho_t$ 기계적인 결합계수 $k_{31}$ 유전정접 $\tan \delta$ 마찰계수	10.7E10[N/m <sup>2</sup> ] 0.313 -1.08[C/N] 7600[kg/m <sup>3</sup> ] 0.121 0.21 0.76
고정자 외경, 내경	50, 22[mm]
압전세라믹의 두께	0.5[mm]

그림 9는 본 연구에서 설계한 링형 초음파모터의 고정자구조이다. 여기서 고정자는 알루미늄(7075-T6)재질로 된 압전세라믹과 탄성체로 구성되어 있다.

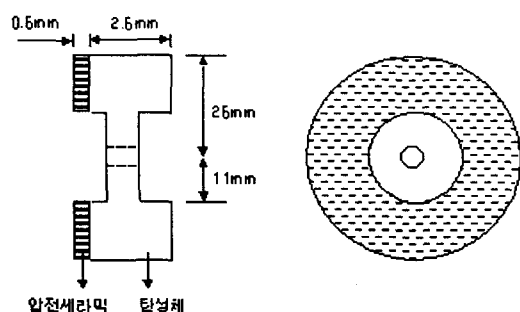


그림 9. 초음파모터의 고정자 구조  
Fig. 9. Stator structure of ultrasonic motor

여기서 왼편 그림은 측면에서 압전 세라믹과 탄성체가 결합된 두께치수와 외경 및 내경을 나타낸 것이다. 오른편 그림은 고정자의 평면도 링형구조를 나타낸 것이다.

그림 10은 압전 세라믹의 분극 형상을 나타낸 것으로 7차 진동모드를 이용하기 위해 양편으로 3쌍씩 (+), (-) 분극으로 배치되어 있으며 그 사이에는 접지와 피드백 부분이 각각 배치되어 있는 구조이다. 여기에 양편 A상과 B상에 90° 위상차를 가진 2상 정현파 교류전압을 인가하면 공진주파수 영역에서 굴곡 진동파를 발생시킬 수 있다.

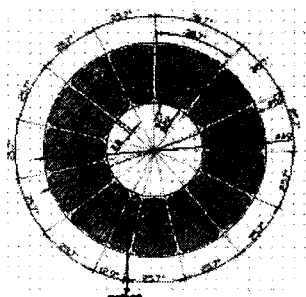


그림 10. 압전세라믹의 분극구조  
Fig. 10. Polarization Structure of piezoelectric ceramics

그림 11은 실제 제작된 회전형 초음파 모터의 고정자구조이다. 그림 11(a)는 압전 세라믹 쪽에서 본 고정자로서 해석과 동일하게 양편에 3쌍씩 (+), (-) 분극 배치를 하였으며, 탄성체와 에폭시계 접착제를 사용하여 접착하였다. 그림 11(b)는 알루미늄을 사용하여 제작한 탄성체 방향에서 본 고정자이다.

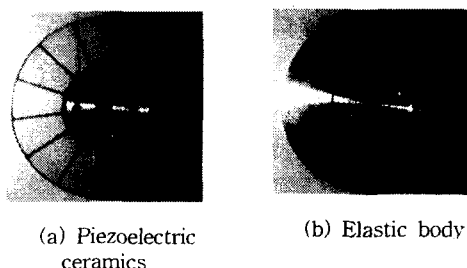


그림 11. 제작된 초음파모터의 고정자 구조  
Fig. 11 Stator structure of ultrasonic motor manufactured

고정자(진동자) 표면의 손실과 노이즈 발생을 억제 및 에너지 변환 효율을 향상시키기 위해 마찰재의 선정은 매우 중요하다. 마찰재는 회전자에 붙여지며, 고정자의 초음파 진동을 증가시켜 회전력으로 변환하는 작용을 하고 있다. 초음파 모터에 사용하는 마찰재에 요구되어지는 특성은 마찰계수가 크며 내마모성이 우수하고 접촉마찰력의 변화가 적으며 마찰음이 발생하지 않는 특성을 지니고 있다.

본 실험에서 마찰재(PA6)의 두께는 0.1[mm]로 하였고 접촉표면은 고은 연마재(No.2000)로 닦아냈으며 마찰재 위의 압력은 160[N]로 하였다. 여기서 슬립손실은 마찰계수와 동적탄성율에 의존하며 회전손실은 유전정접  $\tan \delta$ 에 크게 의존한다. 구동시 고정자와 회전자사이의 적절한 접촉마찰계수의 크기가 매우 중요함을 알 수 있었다. 이러한 사실은 고정자와 회전자사이에서 마찰력이 적을 경우에는 미끄러짐에 의해 헛도는 현상이 발생하지만, 마찰력이 클 경우는 이러한 현상은 없지만 속도가 느리고 전력소모가 많음을 알 수 있었다.

그림 12는 제작한 초음파모터에서 측정된 기계적인 공진주파수의 결과를 나타낸 것이다.

여기서 공진주파수의 측정결과 43.5[kHz]를 얻을 수 있었으며 이는 그림 8의 실제 해석치 42.3[kHz]와 별 차이가 없이 거의 일치함을 알 수 있다.

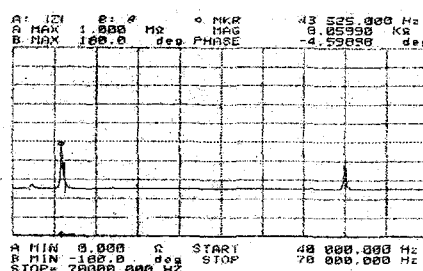


그림 12. 공진주파수 측정결과  
Fig. 12. Measurement result of resonance frequency

그림 13은 초음파모터의 진동을 측정하기 위하여 공진형 인버터를 제작하였다. 여기서 함수발생기를 사용하여 인버터 입력펄스의 주파수를 조정하고, 직류전원을 이용하여 인버터 입력전압의 크기를 조정할 수 있게 하였다. 진동측정은 초음파모터의 고정자에 90°의 위상차를 가진 2상 정현파 입력전원을 인가하여 구동시켜 진동이 발생하면 고정자 표면에 쏘아지는 레이저빔에 의해 감지된 진동을 카메라로 측정하였다. 그림 13은 초음파모터의 고정자 진동측정 시스템을 나타낸다.

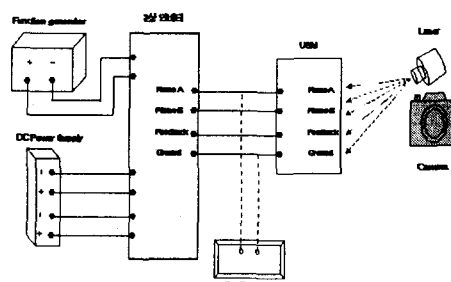


그림 13. 초음파 모터의 진동측정 시스템  
Fig. 13. Vibration measure system of ultrasonic motor

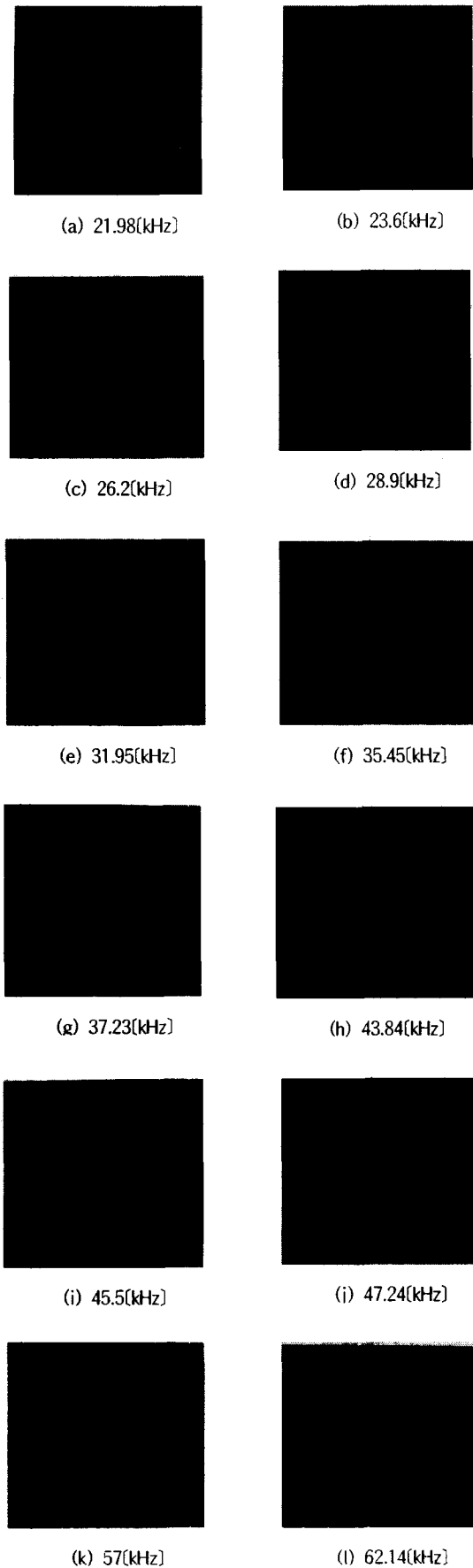


그림 14. 주파수 가변에 따른 진동형상

Fig. 14 Vibration phenomenon to variable frequency

여기서 진한영역은 진동이 발생함을, 약간 연한영역은 진동이 발생하지 않음을 의미한다. 특히 그림 14 (b), (e), (h), (k)는 각각의 진동모드 5차, 6차, 7차, 8차에서 공진주파수에 의한 영역에서 굴곡 진행과 진동형상을 나타낸 것이다. 다른 주파수영역의 진동형태와 구분되는 점은 원주방향으로 진동이 구분되어 막히지 않고 360°전체 영역에서 진동이 가장 크게 발생하고 있음을 나타낸 것이다. 이외의 다른 영역에서는 진행파가 구조에 의해 약간씩 부분 발생함을 알 수 있다. 그림 14 (b), (e), (h), (k)는 주파수와 모드는 다르지만 모두 진행파가 발생하는 공진주파수 영역에서 진동이 발생함을 알 수 있다.

표 5와 그림 15는 초음파 모터의 인가전압이 30[Vrms]와 100[Vrms] 인 경우 각각의 입력전류 값을 나타낸다. 표 5와 그림 15에서 주파수가 높을수록 입력전류가 커지는데 이는 요구되는 토크와 속도에 따라서 증가된다. 초음파모터의 고정자를 설계하거나, 각 공진모드를 이용할 때 공진주파수가 커지면 전류값이 증가하며 구동회로나 압전 세라믹에 많은 열이 나게 되며, 부하변동이나 사고시 큰 전류의 변화에 따른 오동작이나 파손이 발생하게 되므로 사용하려면 이를 고려하여야 한다.

표 5. 공진주파수에 따른 입력전류

Table 5. Input current to resonance frequency

모드별-공진주파수	인가전압[Vrms]	입력전류[A]	직류전압[V]
5차 모드 - 23.6[kHz]	30	0.2	4.0
	100	0.7	14.6
6차 모드 - 1.95[kHz]	30	0.3	4.0
	100	0.98	14.7
7차 모드 - 43.86[kHz]	30	0.6	5.7
	100	1.3	14.8
8차 모드 - 57.0[kHz]	30	0.61	5.1
	100	1.8	14.8

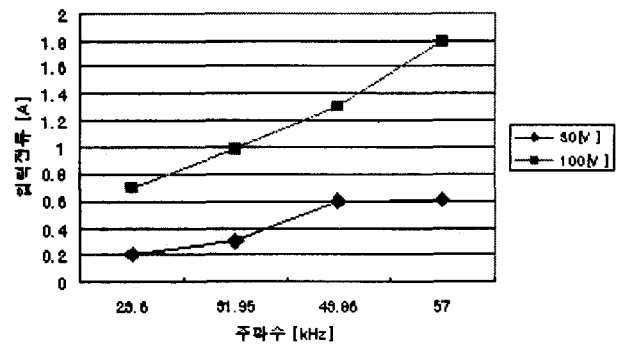


그림 15. 주파수에 따른 입력전류

Fig. 15. Input current to frequency

위의 측정결과, 설계시 선정했던 7차 진동모드에서 공진주파수 영역에서 굴곡 진행과가 발생함을 확인하였고, 공진주파수 역시 43.86[kHz]로 가청주파수 이상의 영역에서 공진이 일어났음을 알 수 있었다. 또한 입력전압에 대한 전류를 측정하여 본 결과 6차, 7차 모드에서는 인가전압 100[V] 일 때 입력전류가 1[A]에 가깝게 흘러 비교적 안정적으로 사용할 수 있으나 8차 모드 이상에서는 2[A]이상의 전류가 흘러 실제 안정하게 사용하기에는 어렵다. 따라서 초음파 모터는 전압의 증가에 따라 전류가 증가함을 알 수 있다. 이에 따라 과열 및 저효율이 발생하고 고 전력이 필요하므로 본 연구에서는 설계 목표에 맞게 7차 모드의 주파수를 구동주파수로 선정하였다. 그러나 토크와 속도, 입력전력에 따라 6차, 8차 진동모드도 구동은 가능하다.

그림 16, 그림 17과 표 6, 표 7은 공진주파수의 설정에 대해 0~30[mm]까지의 정, 역 위치명령에 따라 Z방향(회전자)으로 굴곡 진행과가 발생하는 진동[ $\mu\text{m}$ ]의 크기를 계산한 결과이다. 그림 16은 공진주파수 42.2[kHz]에서 세라믹두께 0.5mm인 경우 전압과 위치의 변화에 따른 Z방향 진동변위를 나타낸 것이다. FEM의 해석결과 두께가 2[mm] 이상 더욱 증가할 경우에는 전류가 많이 증가되며 진동변위가 매우 작아 비효율적으로 간주되어 무시하였다.

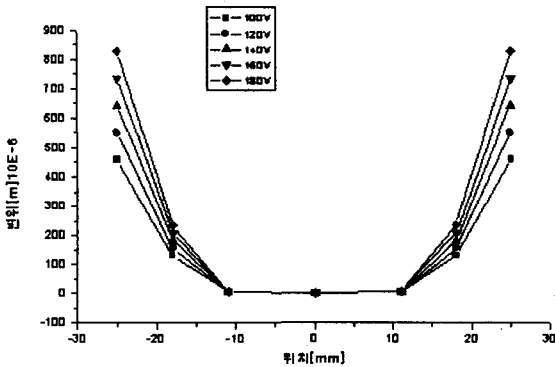


그림 16. 위치에 따른 변위특성  
Fig. 16. Displacement characteristics to position

표 6. 입력전압에 대한 진동변위  
Table 6. Vibration Displacement for input voltage

전압 위치	100[V]	120[V]	140[V]	160[V]	180[V]
25 [mm]	459.1	550.9	642.7	734.5	826.3
18 [mm]	129.8	155.8	181.7	207.7	233.7
11 [mm]	4.191	5.029	5.868	6.706	7.544
0 [mm]	0	0	0	0	0
-11 [mm]	4.191	5.029	5.868	6.706	7.544
-18 [mm]	129.8	155.8	181.7	207.7	233.7
-25 [mm]	459.1	550.9	642.7	734.5	826.3

그림 17은 공진주파수 42.2[kHz]에서 세라믹두께 1.0mm인 경우 전압과 위치에 따른 Z방향 변위를 나타낸 것이다. 여기서 동일한 공진주파수에 대해서 그림 16과 그림 17의 비교결

과 세라믹두께 0.5[mm]인 경우는 두께 1[mm]에 비해서 진동 변위가 더욱 큼을 알 수 있었다.

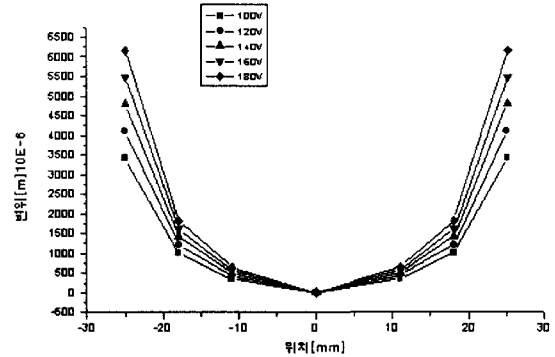


그림 17. 위치에 따른 변위특성  
Fig. 17. Displacement characteristics to position

표 5. 입력전압에 대한 진동변위  
Table 5. Vibration Displacement for input voltage

전압 위치	100[V]	120[V]	140[V]	160[V]	180[V]
25 [mm]	3422	4107	4791	5475	6160
18 [mm]	1014	1217	1420	1623	1826
11 [mm]	359.7	431.7	503.6	575.6	647.5
0 [mm]	0	0	0	0	0
-11 [mm]	359.7	431.7	503.6	575.6	647.5
-18 [mm]	1014	1217	1420	1623	1826
-25 [mm]	3422	4107	4791	5475	6160

표 6은 7차 진동모드로 설계한 각각의 압전세라믹 두께 0.5[mm], 1[mm], 2[mm]에 대해서 인가전압을 100~180[V]까지 가변 할 경우 변위특성을 나타낸 결과이다.

여기서, 두께 2[mm], 100[V] 인 경우는 최소변위 13.24[ $\mu\text{m}$ ]이지만 두께 0.5[mm], 180[V]인 경우는 최대 변위 35.57[ $\mu\text{m}$ ]이다. 본 연구에서는 전류의 크기와 효율을 고려하여 두께 0.5[mm], 100[V]인 19.76[ $\mu\text{m}$ ]를 선정하였다.

표 6. 전압과 세라믹 두께에 따른 최대변위  
Table 6. Maximum distance according to voltage and ceramics thickness

전압 두께	0.5[mm]	1.0[mm]	2.0[mm]
100[V]	19.76	14.46	13.24
120[V]	23.71	17.36	15.89
140[V]	27.67	20.25	18.6
160[V]	31.62	23.14	21.18
180[V]	35.57	26.04	23.83

표 7은 실제 제작한 압전세라믹 두께를 가변하며 FEM에 의해 타당성을 입증하기 위해서 2번 해석한 결과와 실험치를 비교, 검토한 결과이다.

여기서 해석 1, 2는 거의 오차가 없이 일정한 결과를 얻을 수 있었지만 실험 치와 비교할 경우 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 실제 제작상의 마찰계수와 가공정밀도의 차이로 여겨진다.

표 7. 두께변화에 따른 공진주파수

Table 7. Resonance frequency to variable thickness

두께 \ 비교	실험값	해석값 2	해석값 1
0.5[mm]	43.860[kHz]	42.21[kHz]	42.19[kHz]
1.0[mm]	46.300[kHz]	44.84[kHz]	44.86[kHz]
2.0[mm]	49.160[kHz]	47.85[kHz]	47.82[kHz]

4. 결 론

본 연구에서는 링형 초음파모터의 진동모드에 의한 공진주파수를 구하는 관계식과 유한요소법을 이용한 ATILA에 의해 고정자인 압전세라믹과 탄성체를 이상적인 모델과 실제 모델로 각각 해석하여 공진모드의 가변에 따른 공진주파수, 진동형태, 결합효율 및 두께가변에 따른 진동변위를 계산하였다. 해석결과 결합효율이 크고 두께가 얇은 7차 진동모드 공진주파수에서 가장 큰 진동변위가 발생함을 알 수 있었다.

이러한 결과로부터 압전세라믹 두께 0.5[mm], 외경 50[mm], 내경 22[mm], 입력전압 100[V]로 구동되는 초음파모터를 설계, 제작하였으며, FEM의 해석결과와 실험결과와의 비교를 통하여 거의 일치하는 진동특성을 알 수 있었다.

본 연구에서는 7차 진동모드에서의 공진주파수 계산치 42.2[kHz]와 실험치 43.86[kHz]로 거의 일치하는 결과를 얻었다. 여기서 계산 치와 실험 치에 대한 약간의 오차는 압전세라믹과 탄성체로 된 고정자와 회전자 사이의 접촉부분에 의한 마찰계수 차이로 여겨진다. 해석결과와 타당성을 입증하기 위하여 진동모드 및 전압의 가변에 대한 전류 크기, 공진주파수 가변에 따른 진동형상의 크기를 측정하였다. 측정결과 7차 진동모드 이내에서는 전류가 크게 증가되지 않았지만 8차 진동모드 이상에서는 전류가 크게 증가함을 알 수 있었다.

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, 1993
- [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] Oleg Yu. Zharii, "Modeling of a Mode Conversion Ultrasonic Motor in the Regime of Slip", IEEE Trans. Utrason. Ferroelect. Freq. Cont., Vol.40, No.4, pp. 411-417, 1993
- [7] William T. Thomson, "Theory of Vibration with Applications", Prentice-Hall Inc., 1996
- [8] Kenji Nishibori, Shigeru Okuma, Hirohisa Obata and Setsuya Kondo, "Robot Hand with Fingers using Vibration-Type Ultrasonic Motors ( Driving Characteristics)", IEEE Trans, AMC'96-MIE, pp.97-102, 1996
- [9] N. Lamberti, A. Iula, and M. Pappalardo, " A Piezoelectric Motor using Flexural Vibration of a Thin Piezoelectric Membrane", IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control, Vol.45, No.1, pp.23-28, January 1998
- [10] M. Brissaud, " Characterization of Piezoceramics", IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.38, No.6, pp.603-617, November 1991
- [11] Under Revision, "An American National Standard IEEE Standard on Piezoelectricity", ANSI/IEEE Std 176, pp.9-54, 1987
- [12] 백수현, 박기준, 김승호, 정현규, "로봇 손 구동용 초음파 모터의 설계", 대한전기학회, 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp.121-123, 1999
- [13] 백수현, 김 용, 윤신용, 박기준, " 링형 초음파 모터의 고정자해석 및 구동", 동국대학교 산업기술연구원 제 14 논문집, pp.46-58, 2002



## 저 자 소 개



### 윤 신 용 (尹 信 容)

1992년 서울산대 전기공학과 졸업. 1994년 동국대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~현재 동서울대학 전기정보제어과 겸임교수.



### 백 수 현 (白 壽 鉉)

1972년 한양대학교 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 창업지원단 단장.



### 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.