

링형 초음파모터의 진동모드 변화에 따른 진동특성 해석

윤신용^{*}, 백수현^{*}, 김 응^{*}, 김 일남^{**}, 김철진[†], 김수석[#]
 동국대학교^{*}, 동서울대학^{**}, 한라대학교[†], 서울산업대학교[#]

Vibration Characteristic Analysis by Mode Variation of Ring Type Ultrasonic

S.Y. Yoon^{*}, S.H. Baek^{*}, Y. Kim^{*}, I.N. Kim^{**}, C.J. Kim[†], S.S. Kim[#]

Dongguk University^{*}, Dongseoul College^{**}, Halla University[†], Seoul National University of Tec

Abstract - This paper describes for vibration characteristic analysis by mode variation of ring type ultrasonic motor. Design for piezoelectric ceramic and elastic body of stator was calculated by Atila using the finite element method(FEM) that considers the resonance frequency, vibration mode and coupling efficiency etc. The propriety of this paper was established through simulation and experiment results of ring type ultrasonic motor.

1. 서 론

산업의 자동화 및 정보화에 따라 전기에너지를 기계에너지로 변환하는 구동시스템이 더욱 요구되고 있는 실정이다. 이러한 액츄에이터로 초음파모터가 있다. 본 구동기는 자체의 영향을 받지 않으며 저속에서 고폭폭을 발생할 수 있는 특성을 지니고 있으므로 카메라 줌 렌즈, 감시카메라, 원자로의 핵연료용 작업용 로봇팔 등에 적용이 되고있다.[1][2]

이러한 대표적인 구동시스템이 초음파 모터이다. 초음파 모터는 90° 위상차를 지닌 2상 정현파를 인가하면 고정자인 압전소자와 탄성체의 압축, 팽창에 의해 굴곡진 행파를 발생하며 회전운동하게 된다. 초음파모터의 구동은 고유의 공진주파수를 지니고 있는데 이 범위에서 구동주파수를 인가하여야 안정된 구동이 가능하다. 이러한 초음파모터의 구동주파수는 약 20~80 [kHz]의 범위에서 구동된다.[3][4] 본 연구에서는 초음파모터중 링형 초음파 모터의 진동모드 가변에 따른 특성해석을 연구대상으로 하였다. 이를 위하여 진동해석용 유한요소법 소프트웨어인 ATILA를 이용한다.

이를 이용하여 진동모드의 가변에 따른 공진주파수와 결합효율을 계산하고, 또한 인가전압의 가변에 따른 이동변위를 얻어 안정된 링형 초음파모터를 설계를 하고자 한다. 이에 대한 타당성을 입증하기 위하여 진동측정 실험장치에 의해 제작된 초음파모터의 진동특성을 시뮬레이션된 진동특성과 비교 검토하고자 한다.

2. 본 론

2.1 초음파모터의 원리 및 관계방정식

그림 1은 초음파 모터에 대한 동작원리를 나타낸 것이다. 여기서 그림 1은 상호 분극한 압전소자에 탄성체를 접착하고 고주파 전압을 인가한 경우이다.

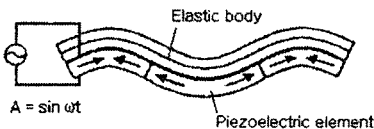


그림 1. 초음파 모터의 구동원리

초음파 모터는 고정자인 압전세라믹, 탄성체와 회전자인 마찰제 가동자로 구성된다. 또한 전기에너지에 의해서 기계적인 토크를 발생하며 이때 압전세라믹의 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

$$T_{xy} = G_l S_{xy}$$

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

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

2.2 고정자의 구조

그림 2는 본 연구에서 제시된 회전형 초음파 모터의 고정자(Model1) 구조이다. 여기서 고정자는 알루미늄(7075-T6)재질로된 탄성체(elastic body)와 압전세라믹(piezoelectric ceramics)으로 구성되어 있다. 이때 표 1은 고정자의 설계 파라미터이다.

탄성체는 치구조가 없으며, 압전세라믹의 분극은 그림 3과 같이 7차 진동 모드를 이용하기 위해 양편으로 3쌍씩 (+), (-) 분극으로 배치되어 있으며 그 사이에는 접지와 피드백 부분이 각각 배치되어 있는 구조이다. 양편 A 상과 B 상에 90° 위상차를 가진 정현파 입력을 그림 1과 같이 인가하여 공진 주파수 영역에서 굴곡진 행파를 발생시켰다.

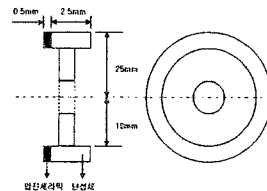


그림2. 초음파모터 고정자구조



그림 3. 압전세라믹 형상

표 1. 고정자 설계 파라미터

설계 파라미터	치 수[단위]
탄성체 영률 E_b 포아손 비 σ_b 밀도 ρ_b	21.5E10[N/m ²] 0.33 7900[kg/m ³]
압전세라믹 영률 E_b 포아손 비 σ_b 압전 변형률 정수 d_{31} 밀도 ρ_b	10.7E10[N/m ²] 0.313 -1.08[C/N] 7600[kg/m ³]
고정자 외경, 내경	50, 38[mm]
압전세라믹의 두께	0.5[mm]

표 3. 전압에 따른 변위진폭

인가 전압 [V _{rms}]	진폭 [μ m]
100	12.12
120	14.55
140	16.97
160	19.39
180	21.82

그림 5는 7차 진동 모드, 인가전압 100[V_{rms}]에서 회전하며 나타난 진동변위의 크기를 색지수로 나타낸 것이다. 여기서 왼쪽 맨위 적색 색지수가 변위가 가장 큼을 의미한다.



그림 5. 색지수에 따른 진동변위

2.3 유한요소법을 이용한 고정자해석

대상 초음파모터의 설계를 위하여 진동해석 프로그램인 ATILA를 사용하여 고정자인 압전세라믹과 탄성체의 크기를 결정하였다. 그림 4는 물질 입력파라미터에 다양한 조건을 가변하여 선정된 입력전압 100[V_{rms}]에서의 7차 진동모드 굴곡진행과 진동모형을 나타낸 것이다.

고정자 해석은 압전세라믹과 탄성체가 실제적으로 진동을 일으키는 반경 25[mm]에서 19[mm] 까지의 영역만 고려하여 해석하였으며, A상과 B상에 90° 위상차를 가진 정현파 입력을 100[V]에서 180[V]까지 20[V]씩 증가시키면서 해석하였다.

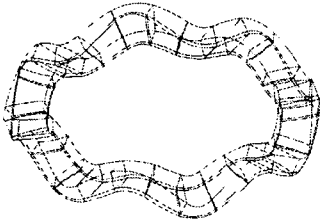


그림 4. 굴곡 진행과 진동

해석결과, 각각의 진동모드에 대한 공진주파수 영역과 결합효율 및 각각의 전압에 대한 진동변위의 결과치를 얻었으며 그 결과는 표 2, 표 3과 같다.

표 2. 초음파모터 고정자의 공진주파수와 결합효율

모 드	공진주파수(kHz)	결합효율[%]
6차 진동 모드	26.05	8.84
7차 진동 모드	37.17	10.59
8차 진동 모드	47.13	6.95

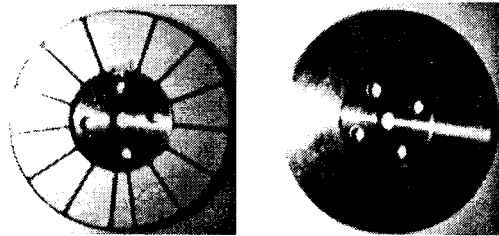
위 해석 결과를 보면 7차 진동 모드에서 가장 높은 결합효율을 보이고 있다. 이는 고정자 설계시 압전세라믹의 배치를 그림 3과 같이 양편에 3쌍씩 배치함으로써 7차 진동 모드에서 초음파 모터를 구동하려는 설계에 부합된 결과이다.

그림 4와 같이 정지된 모습으로 보면 7개의 정현적인 진동모습이 나타나고 있으며, 구동시 연속적인 진동모습은 각 절점이 타원운동을 하며 한쪽 방향으로 진행하는 듯 보이게 된다. 이를 진동 변위의 크기로만 나타내면 그림 5와 같은 색지수로 표현된다.

표 3은 7차 진동 모드시 전압의 증가에 따른 이동변위의 진폭을 나타낸 것이다.

3. 실험 결과

그림 6은 설계 결과에 의해 제작된 회전형 초음파 모터의 고정자구조이다. 그림6.(a)는 압전세라믹 쪽에서 본 고정자로서 해석과 동일하게 양편에 3쌍씩 (+), (-) 분극 배치를 하였으며, 탄성체와 에폭시계 접착제를 사용하여 접착하였다. 그림6.(b)는 알루미늄(7075-T6)을 사용하여 제작한 탄성체쪽에서 본 고정자이다.



(a) 압전세라믹 방향에서본 고정자 (b) 탄성체 방향에서본 고정자

그림 6. 제작된 초음파모터의 고정자 구조

초음파모터 고정자의 진동측정을 하기 위하여 2상 공진형 인버터를 제작하였으며, 합수발생기를 사용하여 인버터 입력펄스의 주파수를 조정하고, 직류전원을 사용하여 인버터 입력전압의 크기를 조절할 수 있게 하였다. 진동측정은 초음파모터의 고정자에 2상 정현파 입력전원을 인가하여 구동시켜 진동이 발생하면 고정자 표면에 쏘아지는 레이저빔에 의해 감지된 진동을 카메라로 측정하였다.

진동 측정결과, 초음파모터의 공진주파수 영역에서 굴곡진행과 발생을 확인하였고, 측정결과는 표 4와 같다. 또한 실제로 진행과 발생하여 회전자를 움직일 수 있는지 확인하기 위하여 회전자를 부착, 초음파 모터를 구동시켜 구동주파수 영역에서 진행과가 정확히 발생함을 확인하였다.

표 4. 초음파모터 고정자의 공진주파수

모드 종류	공진주파수[kHz]
5차 진동 모드	17.7
6차 진동 모드	27.7
7차 진동 모드	39.0
8차 진동 모드	51.6

그림 7(a)~(h)는 각 주파수에 따른 진동형태를 나타낸 것으로 각각의 공진주파수 사이에 여러형태의 진동이 발생하고 있음을 알 수 있다.

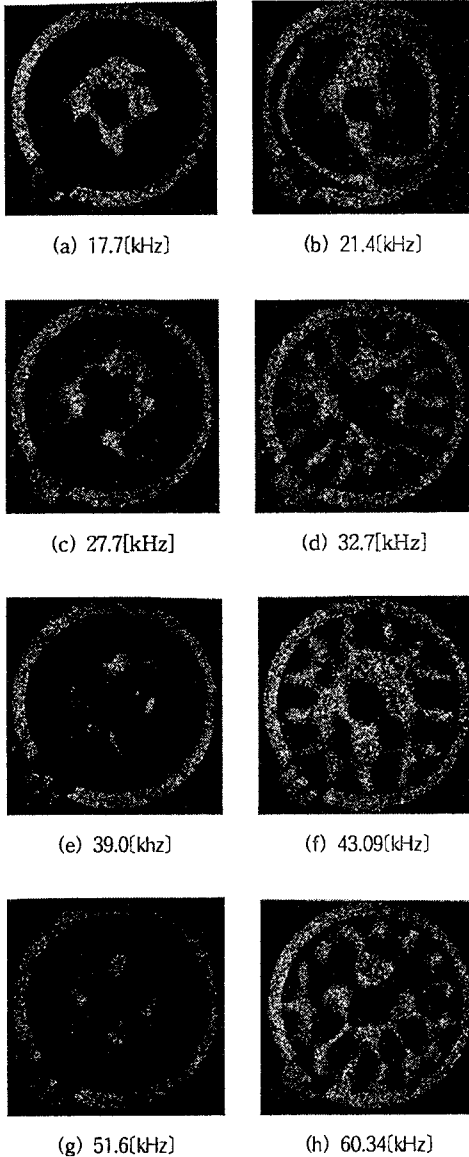


그림 7. 주파수 가변에 따른 진동형상

그림7 (a), (c), (e), (g)는 각각 5차, 6차, 7차, 8차 공진 주파수에서의 굴곡 진행파 진동모드이다. 여기서 다른 주파수 영역의 진동 형태와 구분되는 점은 원주방향으로 진동이 구분되어 막히지 않고 360° 전체 영역에서 진동

이 발생하고 있다. 이는 다른 영역에서는 진행파가 생성되지 않고 있다는 것을 증명해 준다. 따라서 그림7 (a), (c), (f), (h)는 주파수와 모드는 다르지만 모두 진행파가 발생하는 공진주파수 영역에서의 진동 형태임을 알 수 있다.

그림 8은 전압이 30[V]와 100[V]일 경우 각 주파수의 가변에 따른 입력전류를 나타낸 것이다.

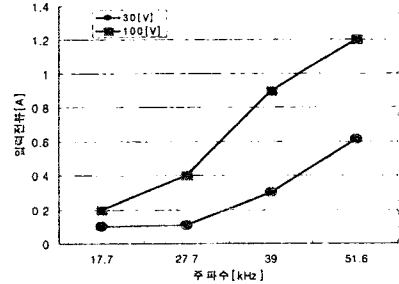


그림 8. 주파수에 따른 입력전류

측정결과 5, 6, 7, 8차 모드에서는 인가전압 100[V]일 때 주파수의 가변에 따라 입력전류가 0.2~1.2[A] 까지 비교적 안정적으로 증가하였으나 9차 모드 이상에서는 2[A]이상의 급격한 전류가 흘러 실제 안정하게 사용하기에는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 설계치에 맞게 7차 진동모드의 주파수를 구동주파수로 선정하였으며, 토오크와 속도, 입력전력에 6차, 8차 진동모드도 사용할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소법 프로그램을 사용하여 고정자인 압전세라믹과 탄성체를 결합한 경우 각 진동모드의 가변에 따른 공진주파수와 결합효율을 얻을 수 있었으며, 또한 전압의 가변에 따른 진동변위와 일정전압에서 주파수의 변화에 따른 입력전류의 변화를 알 수 있었다. 해석결과 결합효율이 가장큰 7차 진동모드에서 공진주파수를 선정하였다.

진동측정 실험을 통하여 7차 공진모드의 공진주파수 계산치 37.17[kHz]와 근접한 실험치 39.0[kHz]의 구동주파수 범위에서는 실제 굴곡진행파를 발생하며 회전운동이 가능함을 확인하였다. 여기서 계산치와 실험치에 대한 약간의 오차는 압전세라믹과 탄성체가 접촉하는 부분의 마찰면 차이로 여겨진다. 또한 실험결과 7차 진동모드의 구동주파수에서는 구동전류도 안정되며 적게 소비됨을 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. Ultrason. 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] Reinhard Lerch "Simulation of Piezoelectric Devices by Two and Three Dimensional Finite Elements", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont., Vol.37, No.2, pp.233-247, 1990