

탄성체 재질 변화에 따른 16각형 초음파모터의 토크 특성 연구

천성규¹, 정성수¹, 이병하¹, 하용우¹, 김명호¹, 박태곤^{1,a}

¹ 창원대학교 전기공학과

A Study on the Torque Characteristics Depending on the Elastic Body Materials of a Hexadecagon Shaped Ultrasonic Motor

Seong-Kyu Cheon¹, Seong-Su Jeong¹, Byung-Ha Lee¹, Yong-Woo Ha¹,
Myong-Ho Kim¹, and Tae-Gone Park^{1,a}

¹ Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

(Received February 25, 2014; Revised March 17, 2014; Accepted March 27, 2014)

Abstract: In this study, novel ultrasonic rotary motor of hexadecagon shape stator was proposed. Stator of the hexadecagon ultrasonic motor was composed of an elastic ring and ceramics. The elastic ring had sixteen sides and sixteen angular points. Eight ceramics were attached on the outer surface of the eight sides of the ring. When rotor of cylindrical shaft was inserted inside of the ring stator, central lines of the sixteen sides of the stator hold the shaft by the slight pressures(frictions). This slight pressure was a preload of the motor and it could be controlled by radius and thickness of the ring. When two sinusoidal voltages which have 90 degree phase difference were applied to each four ceramics, elliptical displacements of inner surface of the ring were obtained. These elliptical displacements of the inner surface rotated the shaft rotor through the frictions. The proposed hexadecagon ultrasonic motor was designed and analyzed by using the finite element method (FEM), depending on materials of the elastic ring. Based on the FEM results, one model of motor which showed maximum displacement at contact points was chosen and fabricated. And characteristics of the motor were compared with simulated results. When the motor was fabricated with these results, EL20ET0.5CT0.5CW2 model showed 115[rpm] speed about input voltage of 60[Vrms] at 65.6[kHz]. And the maximum torque of 6[gfcm] was obtained. From these results, the hexadecagon shaped ultrasonic motor can be used to actuator for optical device which needs detailed position control. Also it can be used to medical and portable device by reducing size and weight.

Keywords: Ultrasonic motor, Piezo motor, FEA (finite element analysis), ATILA, Ring type stator

1. 서 론

최근 활발한 연구가 진행되고 있는 초음파모터는 전류와 자계의 상호작용에 의해 구동력을 얻던 전자식모터와는 달리, 인가된 전계에 의해 생성되는 압전세라믹의 진동을 이용하여 고정자와 회전자의 마찰력을 회전력으로 변환시켜 출력을 얻는 방식으로서 반응 속도가 0.1 ms 이하이며, 정밀 위치제어가 가능하고 고폭, 저속을 필요로 하는 응용분야에 적용할

a. Corresponding author; tgpark@changwon.ac.kr

수 있는 장점을 가지고 있다.

제안된 초음파모터는 기존의 원환형 초음파모터에 비해 구조가 간단하다는 장점이 있으며, 진동자 내부로 회전자가 삽입되는 구조로서 진동자와 회전자 간의 외압을 주기가 용이하다. 제안된 초음파모터의 탄성체 재질 변화에 따른 공진 특성, 변위 특성 등을 파악하기 위해 압전 유한요소해석 프로그램인 ATELA를 사용하였으며 해석 결과를 바탕으로 실제 초음파모터를 가공 및 제작하였다. 제작된 모터의 실험을 위해 초음파모터 구동 시스템을 구축하였고, 초음파모터의 인가전압에 따른 모터의 속도 및 토크 특성을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 구조 및 원리

2.1.1 Hexadecagon-shaped 구조

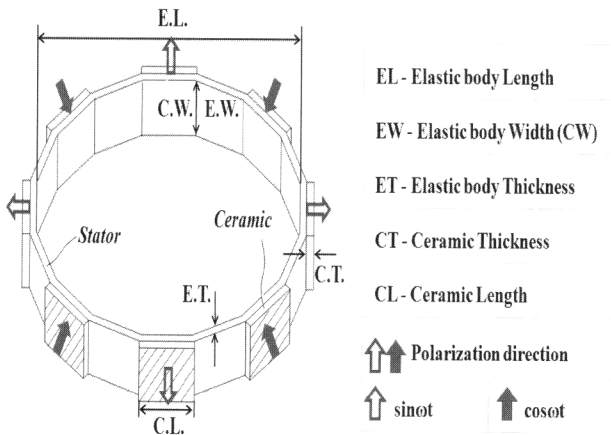


Fig. 1. Structure of the Hexadecagon shaped ultrasonic stator.

그림 1은 제안된 16각형 초음파모터의 기본 구조와 세라믹에 인가되는 전원을 나타내었다. 전원은 화살표로 정의하였으며 속이 빈 화살표가 $V_0 \sin \omega t$, 속이 찬 화살표가 $V_0 \cos \omega t$ 이다. 중심에는 16각 형태의 탄성체를 구성하고 탄성체의 바깥쪽 면에 화살표와 같은 분극 방향을 가지는 압전세라믹이 부착된다. 탄성체 외부 전체 길이가 E.L이고, 부착되어진 세라믹의

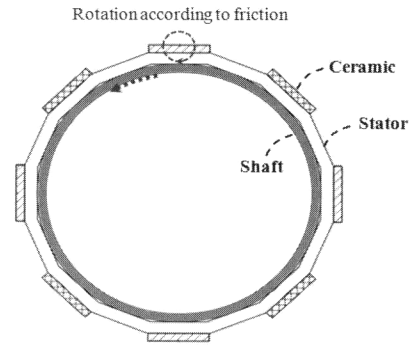


Fig. 2. Cross-section of the Hexadecagon shaped ultrasonic motor.

Table 1. Material characteristics of the stator.

Size of the stator	E.L[mm]	E.T[mm]	C.W[mm]	C.T[mm]
	20	0.5	2	0.5
Material characteristics				
PZT4	Density	Qm	Poisson's ration	
	7,070[kg/m ³]	1,500	0.32	

길이는 C.L이다. 탄성체의 전체 두께는 E.T이며 부착된 세라믹의 두께는 C.T이다.

그림 2는 초음파모터의 진동자와 회전자를 나타내고 있다. 세라믹에 인가되는 교류전원에 의해 탄성체의 각 면에서 타원변위가 발생하게 되며 발생한 타원변위는 회전자와 마찰하여 회전자를 회전시키게 된다.

표 1은 진동자의 사이즈 및 압전 세라믹의 특성에 대해 나타낸 것이다.

2.1.2 타원변위 발생 원리

그림 3는 제안된 초음파모터의 동작 원리를 나타낸 것이다. 16각 형태의 탄성체의 한 부분을 하나의 외팔보로 정의하고 세라믹이 동일한 분극 방향을 가진다고 정의하였을 때 인가되는 전원에 의해 발생하는 진동형상을 나타내고 있다, 인가된 전압은 90도 위상차를 가지는 두 전압의 순서에 상관없이 동시에 인가되며, 가장 기본적인 원리는 LIB4의 동작원리를 기본으로 한다 [1]. 물결이 치듯이 진동을 하는데 이를 진행파형 진동이라 하며, 3개의 외팔보 탄성체를 따로 확인할 경우 각각의 내부 면에서 타원변위의 형상을 보임을 확인할 수 있다. 또한, 한주기가 변하는 동안

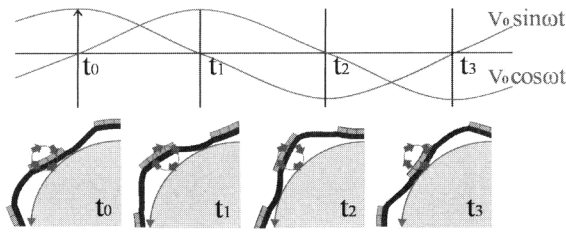


Fig. 3. Principle of the elliptical motion at the contact point.

각 진동자와 회전자의 접촉점에서 일어나는 변위는 각 접촉점들이 동시에 접촉을 하지 않으며, 회전자를 밀어내는 형상을 보인다. 인가되는 90도 위상차 전원에 의해 타원변위가 탄성체의 내부 외팔보에서 각각 발생하게 된다 [2]. 인가된 90도 위상차 전원의 한 주기를 t_0 에서 t_3 까지라 할 때 (t_0 와 t_4 는 동일한 상태) 위상차에 의해 발생된 타원변위가 시계 방향으로 회전한다고 가정하면 발생한 진동은 그림 3과 같은 순으로 순차적으로 회전자에 접촉하게 되며 회전자는 반 시계 방향으로 회전하게 된다.

2.2 유한요소해석

2.2.1 공진모드

제안된 16각형 초음파 모터의 진동 형상 및 변위의 크기를 확인하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 ATILA를 사용하였다 [3].

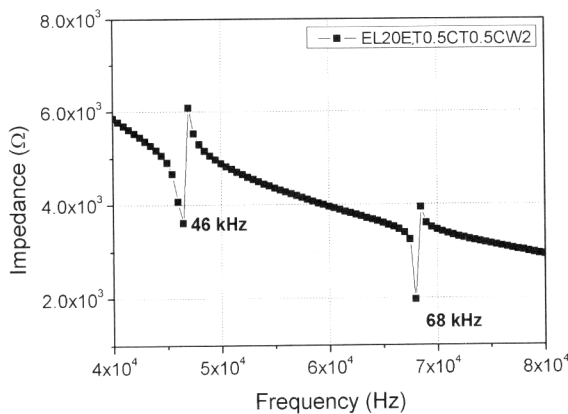


Fig. 4. Characteristics curve of the impedance.

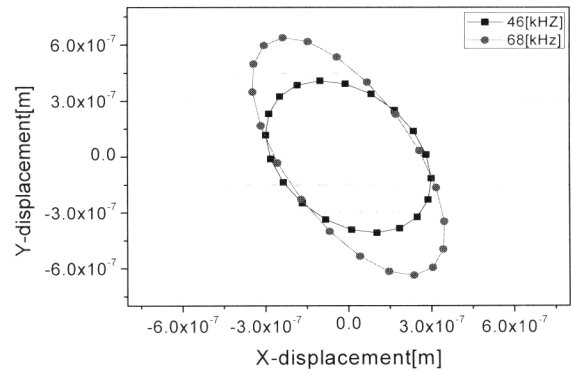


Fig. 5. Elliptical displacements characteristics of the resonance modes.

최대 변위를 가지는 모델의 주파수 영역에 따른 공진 모드를 모드 (mode1)에서 모드 (mode2)까지 나누어 확인하였다.

그림 4는 진폭, 주기, 위상을 결정하는 해석법인 하모닉 (harmonic) 해석을 통한 임피던스 특성 곡선을 나타낸 것이다. 주파수 범위는 20[kHz]에서 100[kHz] 사이로 500[Hz] 단위로 해석하여 공진모드를 확인하였다. 20[kHz]에서 100[kHz] 사이에 두 개의 공진모드가 존재하는 것을 확인하였다. 주파수 범위가 20[kHz]에서 100[kHz]일 때 최대 변위량은 그림 5와 같이 두 번째 공진모드인 68[kHz]에서 발생하였으며 탄성체 내부에서 타원변위의 형태가 나타났다. 이때, X축과 Y축은 모터의 회전 범위를 나타낸 값이다.

2.2.2 탄성체의 재질변화에 따른 유한요소해석

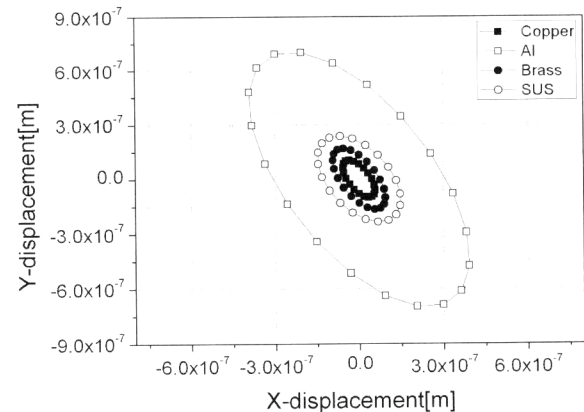


Fig. 6. FEA results depending on the material's.

Table 2. Material properties of the stator.

	Al	SUS304	Copper	Brass
Density[kg/m ³]	2,780	8,080	8,360	8,270
Young's modulus (E) 10 ¹⁰ [N/m ²]	7.14	19.3	11.7	9.2
Poisson's ratio	0.34	0.31	0.33	0.33

제안된 16각형 초음파모터의 특성을 파악하기 위해 진동자의 재질에 따른 변수를 고려하였다. 먼저 진동자를 선택하여 (EL20ET0.5CT0.5CW2) 각각의 재질을 변화시켜 그 특성을 해석하였다. 초음파모터의 하모닉 해석에서 입력 진압의 한주기 동안의 재질의 변화에 따른 진동자의 한 점의 변위를 그림 6에 나타내었다.

세라믹에 인가되는 전원은 10[Vrms]로 90도 위상차를 가지며, 위에서 언급한 내용과 같이 두 번째 공진모드 (68[kHz])에서 발생한 타원변위를 나타내었다. 고정자의 재질에 따른 변위 크기는 밀도에 반비례함을 알 수 있었다. 변위가 가장 큰 알루미늄은 밀도가 2780이며, 변위가 가장 작은 구리는 밀도가 8,360이다 [4]. 비슷한 변위를 가지는 구리[8,360], 황동[8,270], 서스[8,080]의 경우 비슷한 밀도를 가진다.

3. 결과 및 고찰

3.1 구동특성 실험

3.1.1 초음파모터

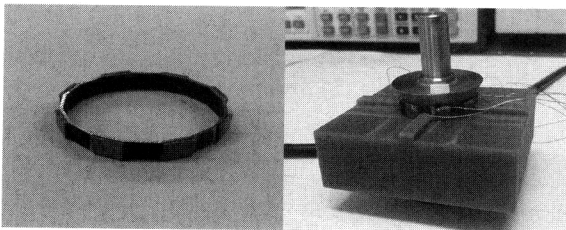


Fig. 7. Fabricated stator and ultrasonic motor.

그림 7은 제작된 16각형 초음파모터를 나타낸다. 유한요소해석 결과를 바탕으로 최대 타원변위를 가지는 모델 EL20ET0.5CT0.5CW2를 선택하여 가공하였다.

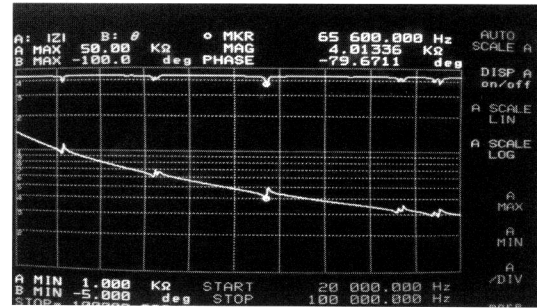


Fig. 8. Measured resonance frequency.

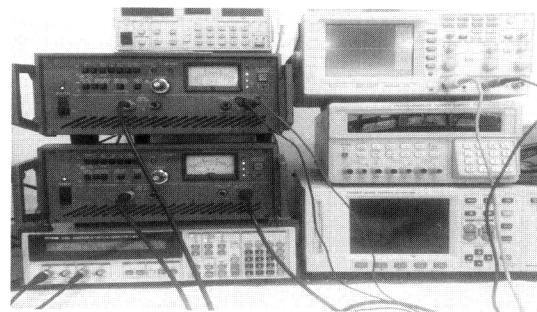


Fig. 9. Ultrasonic motor experiment system.

가공된 진동자를 고정하기 위한 케이스를 가공하였고 진동자 내부와 접촉할 수 있는 회전자를 제작하였다. 제작된 초음파모터를 구동하기 전에 그림 8과 같이 임피던스 분석기를 통해 제작된 진동자의 공진주파수를 측정된 후 측정된 공진주파수로 모터를 구동시킨다.

유한요소해석을 통해 측정된 공진주파수는 68[kHz]이며 실제로 측정된 공진주파수는 65.6[kHz]이다. 이는 제작상의 오류로 사료되며 초음파모터를 구동시키는 조건으로서 문제를 주지는 않는 범위이다.

그림 9는 구축된 실험 시스템이다. 90도 위상차의 신호를 출력하는 함수 발생기와 이를 증폭하기 위한 증폭기, 그리고 출력 신호를 확인하기 위한 오실로스코프로 구성된다.

3.1.2 탄성체의 재질변화에 따른 구동특성

재질을 알루미늄, 서스, 구리, 황동으로 하여 실험을 진행하였다. 모델은 EL20ET0.5CT0.5CW2를 기준으로 제작하였으며 모터에 인가되는 전압 변화에 따른 속도를 측정하였다. 모터의 속도 특성은 그림 10과

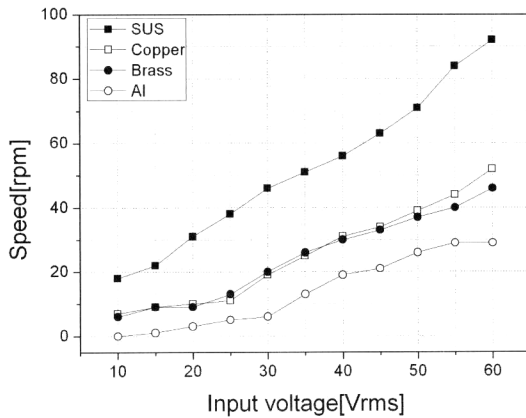


Fig. 10. Speed characteristics depending on the material's.

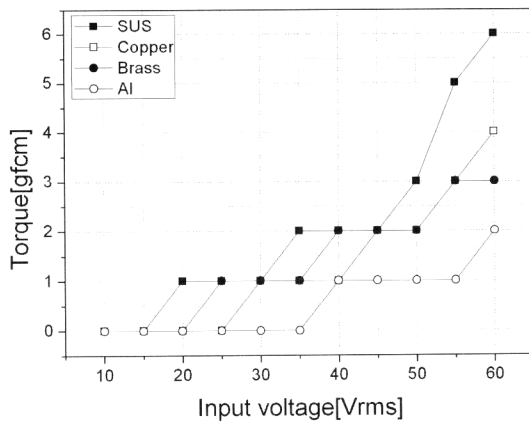


Fig. 11. Characteristics of the torque depending on the material's.

같다. 실험 결과 가장 큰 속도 특성을 가지는 SUS의 경우 가장 빠른 속도를 나타내었다. 이와 같은 결과는 재료의 영률과 관계가 있음을 알 수 있다.

SUS의 경우 높은 영률로 인해 가장 빠른 속도 특성을 나타내었고, 낮은 영률을 가지는 Copper와 Brass의 경우 SUS의 절반 정도의 속도 특성을 나타내었다. 특히 Al의 경우 밀도와 영률이 낮고 변동이 심하여 측정에 어려움을 겪었다. 해석 결과의 경우 고정자의 변위만 확인하였으나, 실험은 회전자와의 마찰에 의한 마모를 고려하지 않을 수 없다. 마모성이 큰 구리, 황동, 알루미늄은 오랜 실험을 버티지 못하고 마찰에 의한 마모가 생겼으며, 마모에 의해 특성이 바뀌는 문제점이 있었다.

그림 11은 재질변화에 따른 모터의 토크를 나타낸 것이다.

앞서 측정했던 속도 실험과 동일하게 SUS에 대한 토크 특성이 가장 높게 나타났으며 영률이 가장 낮은 Al의 경우 가장 낮은 토크를 가진다. 알루미늄의 경우, 다른 탄성체들에 비해 강성이 낮기 때문에 변위는 크더라도 탄성체와 탄성체간의 마찰에 의해 구동되는 초음파모터의 특성상 속도와 토크 특성이 낮을 수밖에 없다. 또한 진동자와 회전자의 접촉식 구동으로 인한 동작 때문에 Al, Brass, Copper의 경우 모터의 동작시간이 길어짐에 따라 접촉부의 마모가 지속적으로 나타나 일정한 토크 값을 얻기 어려웠다. 높은 속도와 토크를 가지는 초음파모터를 제작하기 위해서는 영률이 높고 내열성과 마모성에 강한 SUS를 선택해야 할 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 16각 형태의 단순한 구조를 가지는 초음파모터를 제안하였다. 제안된 초음파모터는 세라믹이 부착된 각각의 외팔보의 정제파 형태의 진동을 이용하여 진동자의 내부에서 타원변위를 생성한다. 발생하는 진동형상 및 공진주파수 특성을 파악하기 위하여 유한요소해석을 실시하였고 진동자의 전체 직경이 20[mm] 폭 3[mm], 두께 0.5[mm]일 때, 세라믹의 길이가 4[mm], 폭이 3[mm](EL20EH3ET0.5CLA)로 최적화된 모델을 통해 탄성체의 재질을 변화시켜 각각의 출력 특성을 확인하였다. 선정된 모델을 가공하여 제작하고, 실험을 위한 구동시스템을 구축하였다. 각각의 재질변화를 바탕으로 인가전압에 따른 모터의 속도 및 토크 특성을 확인하였다.

유한요소해석을 통해 탄성체의 재질을 고려하였다. 타원변위의 크기만을 고려하는 해석에서는 밀도가 큰 영향을 미쳤다. 결과적으로 밀도가 작은 알루미늄이 큰 변위를 보였으며, 밀도가 큰 구리가 가장 작은 타원변위를 보였다. 그러나 실험에서는 해석 결과와 상관없이 서스가 가장 좋은 속도와 토크 특성을 보였다. 이는 재료의 영률과 관련이 있으며 탄성체와 탄성체 사이의 마찰에 의한 마모와 발생하는 열이 실험 결과에 많은 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 향후 모터의 보다 더 안정적인 구조 및 사이즈의 최적화를 통해 단순한 구조에서 보다 더 높은 특성을 가지는 새로운 형태의 모터 개발이 가능할 것으로 보이며,

이는 곧 소형 모터산업에서 초음파 모터의 특수성을 이용한 산업 전반의 발전에 기여할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2013년도 산학연협력 기술개발사업(No. C0118988)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0030058).

REFERENCES

- [1] C. H. Park, S. S. Jeong, and T. G. Park, *J. Korean Physical Society*, 6, 887 (2012).
- [2] J. W. Kim, C. H. Park, J. H. Lim, S. S. Jeong, J. K. Park, and T. G. Park, *J. Cent. South Univ.*, 20, 71 (2013).
- [3] K. Uchino, *FEM and Micromechatronics with ATILA Software* (CRC Press, 2008) p. 245.
- [4] T. G. Park, H. H. Chong, S. S. Jeong, and K. Uchino, *Journal of Electroceramics*, 23, 317 (2008).