

## Optimal Design of Thin Type Ultrasonic Motor and Development of Driver

정성수<sup>†</sup> · 진호익\* · 박태곤\*\*  
(Seong-Su Jeong · Ho-Ik Jun · Tae-Gone Park)

**Abstract** - This paper proposed optimal design and microcontroller driver for driving the thin-type ultrasonic motor. To find the optimal size of the stator, motions of the motor were simulated using ATILA by changing length, width and thickness of the ceramics. Two sinusoidal waves which have 90 degree phase difference were needed for driving the thin-type motor. The thin-type ultrasonic motor driver was composed of microcontroller (Atmega128), push-pull inverter, encoder and AD-converter. Microcontroller generates four square waves which have variable frequency and 25[%] duty ratio in 20~150[kHz]. The output signals of microcontroller were converted to sine wave and cosine wave by push-pull inverter and were applied to the thin-type ultrasonic motor. The encoder and AD-converter were used for maintaining speed of the thin-type ultrasonic motor. The AD-converter controlled DC voltage of inverter in accordance with output signal of encoder. Using the driver, characteristics of the motor as speed and torque were measured.

**Key Words** : Ultrasonic Motor, Elliptical Motion, FEM, ATILA, Microcontroller

### 1. 서론

초음파 모터는 1973년 H. V. Barth에 의해 최초로 고안된 이후에 압전 세라믹스의 온도특성과 압전특성이 개선됨에 따라 매우 빠른 속도로 발전되고 있다. 세라믹 진동자(vibrator)에 의해 구동되는 고정자(stator)부분 표면입자의 타원진동을 이용하여 회전자(rotor)를 회전시키는 방식의 초음파 모터는 전자기 코일에 의한 자기장 유도에 의한 동력원을 얻는 전자식 모터(electromagnetic motor)와는 전혀 다른 구동원리를 갖는다. 또한 코일 등에 의한 전자파 유도의 위험성이 없다는 점과 접촉력에 의해 구동되므로 강한 정지토크를 지니고 있어 별도의 제동원이 필요치 않으며 응답속도가 매우 빠르기 때문에 차세대 정보 저장 장치로 응용이 가능할 뿐 아니라 자체 제어능력을 가지고 있다. 또한 로봇틱스 분야, 반도체 및 광학장치, 의료용, 군사용 등 소형 경량이면서 정밀제어가 가능하고 전자파에 예민한 기기의 구동용 모터로서 활용이 용이한 고부가 첨단장비를 제작할 수 있는 특성을 지니고 있어 그 응용 분야는 무척 넓다. 초음파 모터에는 진행파형, 원판형, 선형, 평판형 등이 있고 세부적인 응용 분야로는 카메라 자동 초점 기구로 원판형 초음파 모터가 개발되었고, 회전 감시 카메라 구동 기구에 사용되는 초음파 모터는 원판형 초음파 모터로서 그 특징은 저속/고

토크, 무소음, 콤팩트한 것 등 일반적인 초음파 모터의 특징을 가지고 있다. Seiko에서 개발한 초음파 모터를 이용한 최초의 시계는 전자식 모터인 스텝 모터로 대체되었으나, 스텝 모터의 자계의 강한 의존성 때문에 최근에는 자계의 영향을 받지 않고 소형화가 가능한 초음파 모터를 이용하고 있다. 최근 NASA에서는 화성 탐사 로봇 관철로의 응용을 목적으로 초음파 모터를 연구 개발하고 있고, 이는 기존 전자식 모터에 비해 다양한 기능이 있어 유망한 응용분야로 주목받고 있다. 초음파 모터를 렌즈 근처에 설치하여 프리즘 등을 회전시킴으로서, 기계적 조작을 하지 않고 진동 조작만으로 360도 관찰이 가능한 내시경, 초음파 모터의 압전 진동자가 종이를 직접 접촉하는 것이 가능하기 때문에 벨트에 의한 에너지 전달기구가 필요 없어 전지의 소모가 적고 효율이 높은 복사기 또는 프린터 등이 있으며 기타 도어 미러, 도어 로크(Door Lock) 장치 등 자동차 부품에의 응용이 높아지고 있다. 이외에도 초음파 모터는 소형이면서 고 토크를 낼 수 있으므로 가구 이송장치, 전자레인지와 테이프 레코더의 가전기기, Butterfly Valve 등에 이용되고 있다. 최근에는 카메라 포커싱이나 공작기계로서의 활용 가능성을 제시하고 일부 상용화에 있으며 소형화에 따른 휴대폰 카메라 모듈 혹은 의료용 등의 활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1,2,3,4]

이처럼 초음파모터의 급속한 발전에도 불구하고 국내에서의 연구개발은 미비한 실정이며 초음파 모터와 전용 구동드라이버 개발에도 체계적인 연구결과가 보고되고 있지 못하고 있다. 본 연구에서는 초음파 모터의 설계와 구동드라이버의 개발을 위하여 두께가 얇고, 간단한 구조를 갖는 새로운 형태의 박형(thin-type) 스테이터를 가진 초음파 모터를

\* 준 회원 : 창원대학교 전기공학과 석사과정  
 \*\* 종신회원 : 창원대학교 전기공학과 교수  
 † 교신저자, 정회원 : 창원대학교 전기공학과 박사수료  
 E-mail : ssjeong@changwon.ac.kr  
 접수일자 : 2009년 2월 16일  
 최종완료 : 2009년 4월 6일

제안하였다. 먼저 유한요소해석 프로그램을 이용하여 최적 설계를 한 후 제작하였으며 전용 구동드라이버인 마이크로 컨트롤러를 이용한 구동드라이버를 설계 및 제작 하였고, 이를 이용하여 제작된 박형 초음파 모터의 속도, 토크 및 온도 안정성 등의 특성 실험을 통하여 최적의 초음파 모터설계 및 고효율 구동드라이버 개발을 연구하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 박형 초음파 모터의 구조와 원리

박형 초음파 모터는 전체적인 형태가 십자가 모형을 가지며, 중심부가 비어있는 형태의 스테이터를 구성하여 중심부의 네 지점(A, B, C, D)에 로터를 접촉시켜서 회전하는 원리이다. 얇은 탄성체에 압전 세라믹을 윗면과 아랫면에 각각 부착한 형태이고, 로터(rotor)와의 접촉부에서 타원변위가 일어나도록 분극방향과 전압의 위상을 그림 1과 같이 적용한다. 시간의 변화에 따라서 중심부 A, B, C, D의 각 네 타점에서 타원변위가 순차적으로 발생하여 로터를 회전시키는 원리로서 90도 위상차를 갖는 전원을 필요로 하며, sin파와 cos파를 반대로 가하였을 경우에는 회전방향도 바뀐다.

### 2.2 스테이터의 최적설계

유한요소해석을 통한 초음파 모터의 최적설계를 위하여 표 1과 같이 각각의 변수를 지정하여 GID 7.2로 모델링하였

다. 가장 큰 변위를 보이는 모델을 찾기 위하여 변위에 큰 영향을 미치는 세라믹스의 폭과 길이의 비에 많은 변수를 두어 유한요소해석을 진행 하였고, 탄성체의 재질로는 표 2와 같이 영률의 변화가 큰 Aluminum, Brass, Steel, SUS, Coper를 사용하였다. 유한요소 해석의 절차는 각각의 요소를 지정한 후 탄성체와 압전체의 접촉면의 노드가 육면체의 형태로 동일한 형상이 되도록 meshing을 하였다. 해석 프로그램인 ATILA 5.2.4를 이용하여 공진모드, 공진 주파수, 타원변위의 크기를 계산 하였다. modal해석을 통해 공진점을 구하고, harmonic 해석을 통하여 실제 전압 인가에 따른 변위 량을 구하였다. 회전자와의 접촉부인 네 접촉점에 x, y, z 방향의 변위를 구하여 원하는 진동면인 x-y상의 타원변위를 가장 크게 보이는 주파수영역을 선정하는 방식으로 모터의 동작 특성을 예측 하였다. 보다 정확한 결과를 얻기 위하여 처음에는 interval data의 step을 300[Hz]로 정하고 주파수를 20~200[khz]로 넓은 영역으로 해석한 다음 공진특성을 보이는 공진주파수대를 중심으로 주파수 영역을 좁혀서 재해석하여 결과를 검토하였다.[5,6]

유한요소해석 프로그램을 이용하여 각 모델의 변위를 비교하여 가장 큰 변위를 보이는 모델을 선정하였다. 초음파 모터는 공진점을 벗어난 그 주변 영역에서 일어나는 타원변위를 이용하는데 이 공진점 주변영역에서의 변위 비교를 하기에는 각 모델의 주파수 오차범위가 너무 크기 때문에 정확한 결과를 얻기가 힘들다. 그래서 최대변위를 갖는 모델을 선정하기 위하여 공진점의 어드미턴스 값과 변위 값이 비례하는 결과를 토대로 가장 큰 어드미턴스 값을 보이는

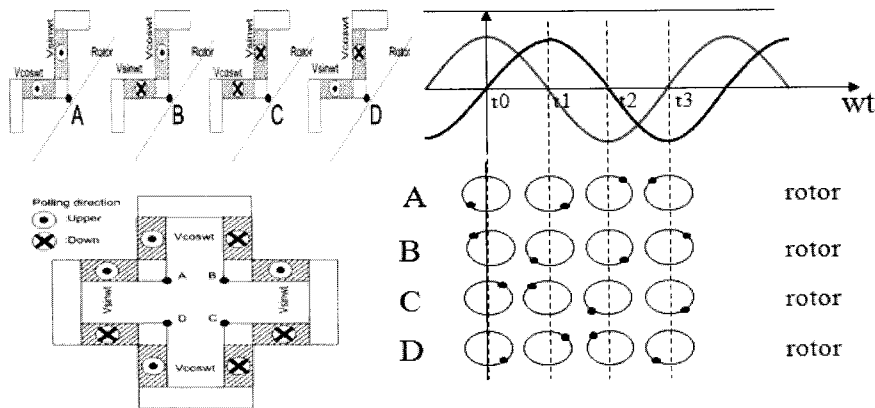


그림 1 네 타점(A, B, C, D)의 타원변위 및 분극방향과 전계

Fig. 1 Generation of elliptical displacement at four contact tips, polarization and electric fields on ceramics

표 1 초음파 모터의 최적설계 변수

Table 1 Parameters for optimal design of ultrasonic motor

Width : Length (1(3[mm]):L_[mm])	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	15	16.5	18	19.5	21	22.5	24	25.5	27	28.5	30
Width : Thickness (1(3[mm]):T_[mm])	0.3		0.6		0.9		1.2		1.5		1.8		2.1		2.4		2.7		3.0
Materials	Aluminum, Brass, Steel, Copper, SUS																		
Clamp	Mid surface clamp, End surface clamp																		

주파수점의 변위를 비교하였다. 최적설계를 위한 변수들의 해석결과는 폭 3[mm], 길이 18[mm], 두께 1.8[mm]의 세라믹 사이즈와 0.2[mm]의 Brass 재질에서 가장 큰 변위를 보였다. 주파수 특성은 약 세 곳에서 공진 특성을 보였고, 변위의 크기 또한 어드미턴스 값이 높은 곳에서 큰 변위를 보였다. 초음파 모터는 타원변위를 이용하므로 공진점의 직선 변위가 아닌 공진점 주변영역에서 타원변위를 보이는 주파수 영역을 운전 주파수로 결정하였고, 최적 설계된 모델에서는 88.6[khz]에서 가장 큰 타원변위를 보였다. 스테이터를 지지하는 클램프 변화에 따른 특성은 그림 2와 같이 중심표면 고정(Mid surface clamp)에서 가장 큰 변위를 보였다.

표 2 스테이터의 재질

Table 2 Material properties of the stator

Materials	Aluminum	Brass	Steel	SUS	Copper
Young's Modulus(E) $\times 10^{10}$ [N/m <sup>2</sup> ]	7.1	9.2	21.0	11.5	10.4
Poisson's ratio ( $\sigma$ )	0.34	0.33	0.28	0.31	0.34
Density ( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	2780	8270	7800	8080	8100

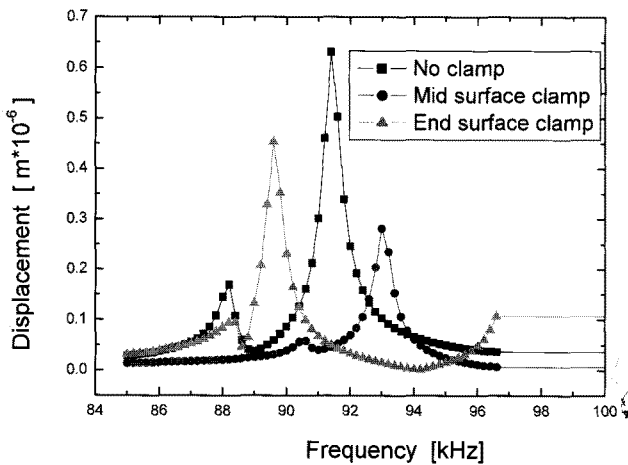


그림 2 클램프 변화에 따른 변위 특성

Fig. 2 Characteristics of displacement depending on the clamp

유한요소해석을 통하여 최적 설계된 모델의 X-Y축의 변위 곡선을 그림 3에서 보여준다. Z축은 고정되어 있으므로 움직임이 없고, X축과 Y축은 90도의 위상차를 보이며 이 위상차는 로터와의 접촉부인 타점에서 타원변위 형태로 나타남을 알 수 있다. 그림 3은 유한요소해석에서 입력 전압을 10[V]로 주어진 값을 보여주는 변위의 크기이고 전압의 증가에 따라 변위의 크기도 증가한다.

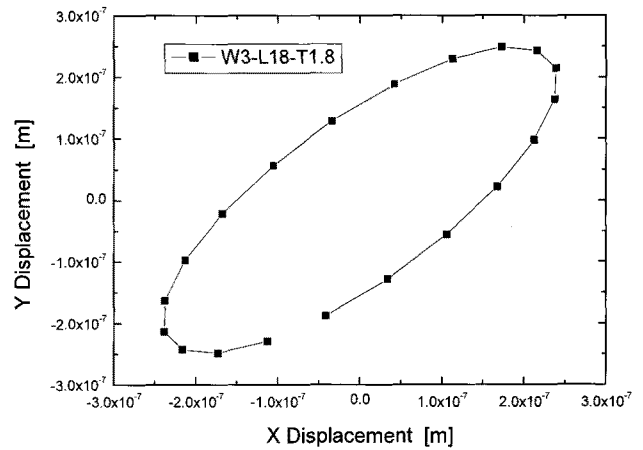


그림 3 스테이터의 변위곡선

Fig. 3 Elliptical trajectory of a tip of the stator

### 2.3 제작 및 실험

유한요소해석을 통하여 최적 설계된 모델을 그림 4와 같이 제작하였다. 먼저 압전 세라믹tm을 다이아몬드 커터를 이용하여 가공하고, 탄성체를 사이즈에 맞게 와이어 커팅하였다. 가열로에서 에폭시 접착제로 탄성체와 세라믹스를 접착한 후 전원선을 연결하고 스테이터를 고정하였다. 에폭시 접착제를 이용한 압전 세라믹과 탄성체의 접합부는 전기적인 결합이 되어야 하는 부분이므로 에폭시의 양이 많아야 접연이 될 수 있기 때문에 적은양의 에폭시로 큰 압력을 가하여 접합하여야 전기적 저항에 의한 손실을 막을 수 있다.[9] 이는 압전 세라믹의 진동이 그대로 탄성체에 전달되어야 하는 부분이므로 초음파 모터의 운전시 접합부가 떨어지지 않도록 강한 접착력이 요구되며, 적정 온도와 시간 그리고 세라믹스에 손상이 가지 않는 적정 압력이 필요하다. 로터와 스테이터의 정확한 접촉을 위하여 구상된 x-y 스테이지의 미세한 변화로 로터와의 네 타점이 정확히 접촉하도록 구성할 수 있고, 프리로드 변화에 따른 특성을 측정하기 위하여 로터를 푸시풀 게이지가 고정된 장치에 접합시켜서 푸시풀 게이지가 상하로 이동하게 되어 프리로드를 자유롭게 가할 수 있다.

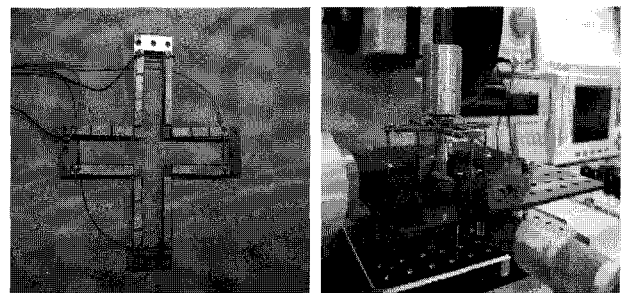


그림 4 초음파 모터의 제작

Fig. 4 Fabrication of ultrasonic motor

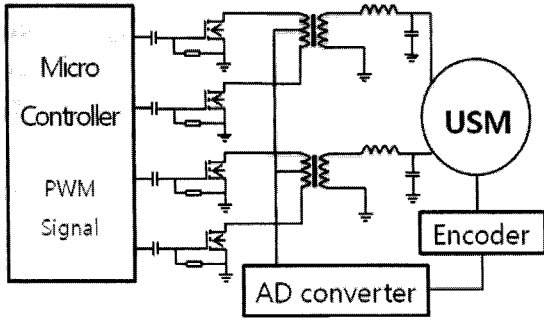


그림 5 구동실험 시스템  
Fig. 5 Measurement system

초음파 모터 구동 드라이버 측정 시스템을 그림 5에서 보여준다. PWM 신호를 출력하는 마이크로컨트롤러와 푸시풀 회로로 구성된 드라이버, 엔코더, AD컨버터를 이용한 피드백 회로로 구성된 측정 시스템이다. 마이크로컨트롤러 ATmega128을 이용하여 한주기 동안 각 각 1/4분주를 갖는 네 개의 PWM신호를 생성하게 되고, 이 신호는 푸시풀 회로를 통하여 sin파와 cos파로 출력되어 모터에 인가된다. 부하 변화에 따라 일어나는 전압강하는 엔코더와 AD컨버터로 구성된 피드백 회로를 통하여 보상된다. 부하변화에 따른 속도변화를 검출하기 위한 엔코더는 비접촉식 적외선 엔코더를 사용하였고, 엔코더로부터 출력된 아날로그 전압은 AD컨버터에 입력되며 이를 통해 변압기의 중간탭의 전압을 조절하여 정속도 운전을 위한 피드백 회로를 구성한다. 모터의 토크측정을 위하여 로터의 회전축에 토크메타를 접촉시켜서 프리로드 변화에 따른 토크특성을 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 6은 마이크로컨트롤러와 push-pull회로를 이용한 구동드라이버의 출력파형을 보여준다. 90도의 위상차가 비교적 깨끗하게 나타남을 오실로스코프로 확인하였고, 두 파형의 전압차이는 변압기의 권수비의 오차와 손실로 예상된다.

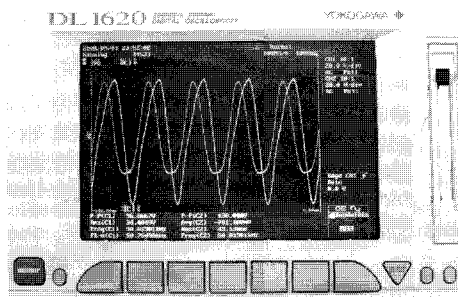


그림 6 구동드라이버의 출력파형  
Fig. 6 Output waves of driver

그림 7은 주파수 변화에 따른 속도 및 전류특성을 보여준다. 원활한 측정을 위하여 입력전압을 40[Vrms], 프리로드를

0.2[N]으로 고정하여 실험을 하였다. 속도는 운전 주파수인 88.6[kHz]에서 약 100[rpm]정도로 가장 빠른 속도를 보였고, 나머지 주파수 영역에서는 회전속도가 현저히 떨어지는 특성을 보였으며 이는 특정 주파수에서만 동작하는 초음파 모터의 특성이며, 유한요소해석의 결과와 일치한다. 속도가 낮은 주파수 영역에서도 많은 전류가 흐르는 것은 구동주파수 외의 주파수영역에서 효율이 현저히 감소함을 알 수 있다.

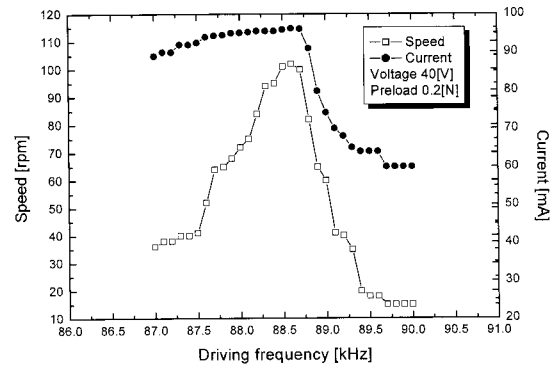
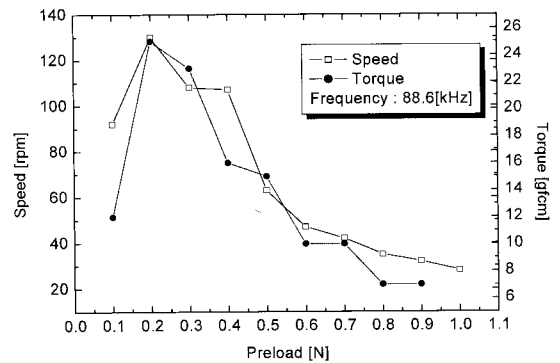
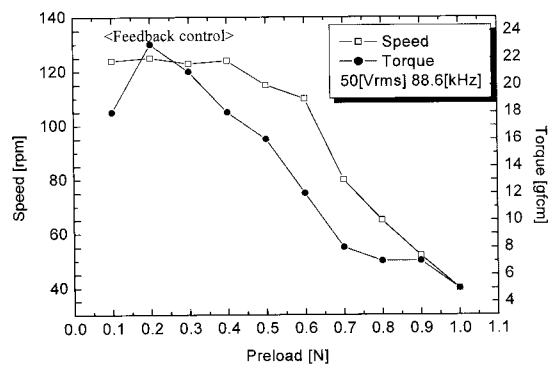


그림 7 주파수 변화에 따른 속도 및 전류특성  
Fig. 7 Characteristics of speed and current depending on the frequency



(a) No feedback control



(b) Feedback control

그림 8 프리로드(Preload) 변화에 따른 속도 및 토크특성  
Fig. 8 Characteristics of speed and torque depending on the preload

전압의 증가에 따른 속도 및 토크특성을 그림 9에서 보여 준다. 입력주파수는 운전 주파수로 정의한 88.6[kHz]이고, 프리로드는 0.2[N]으로 고정하여 실험하였다. 속도특성은 전압이 증가함에 따라 비교적 선형적으로 증가하였고, 토크특성은 선형적인 증가를 보이다가 약 50[Vrms]의 입력전압에서 감소하였다. 본 연구에서 제안된 마이크로컨트롤러를 이용한 초음파 모터 구동드라이버의 성능을 가늠하기 위하여 파워앰프, 신호발생기 등의 고가의 장비들로 구성된 기존의 안정된 측정시스템을 이용한 운전 특성과 비교한 결과를 그림 10에서 보여준다. 전압변화에 따른 속도특성을 보았을 때, 큰 차이를 보이지 않았으며 피드백 컨트롤이 추가되어 더욱 안정된 운전특성을 보임을 확인하였다.[10,11] 초음파 모터의 장시간 운전에 따른 특성변화를 측정할 결과를 그림 11에서 보여준다. 장시간 운전에도 온도 및 속도변화가 작은 것을 확인하였고, 온도변화에 따라 공진주파수가 변화하는 초음파 모터의 특성을 고려해 볼 때 안정적으로 동작함을 알 수 있다.

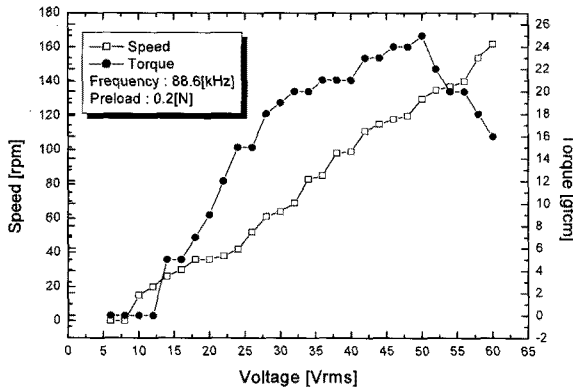


그림 9 전압 변화에 따른 속도 및 토크특성  
Fig. 9 Characteristics of speed and torque depending on the voltage

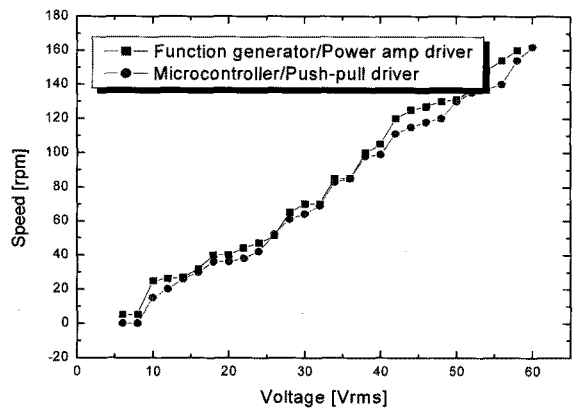


그림 10 마이크로컨트롤러 드라이버 및 파워앰프 드라이버 구동특성  
Fig. 10 Driving characteristics of microcontroller driver and power amp driver

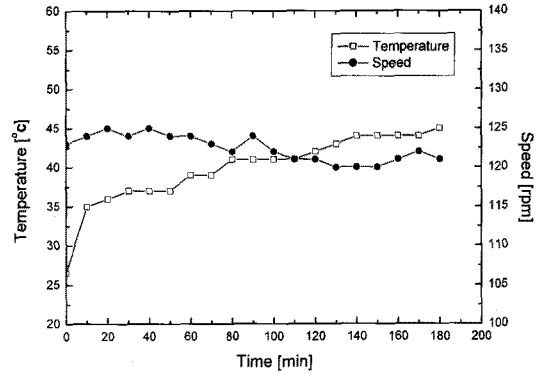


그림 11 시간변화에 따른 속도 및 온도특성  
Fig. 11 Temperature characteristics

4. 결 론

본 연구에서는 박형초음파 모터를 최적설계 및 제작하고, 마이크로컨트롤러를 이용한 구동드라이버를 설계 제작하였다. 유한요소해석 프로그램인 ATILA를 이용하여 박형 초음파 모터의 최적설계를 하였다. 유한요소해석 결과 폭 3[mm], 길이 18[mm], 두께 1.8[mm]의 세라믹 사이즈와 0.2[mm]의 Brass 재질에서 가장 큰 변위를 보였다. 제작된 박형 초음파 모터의 전용 구동 드라이버는 마이크로 컨트롤러 ATmega128을 이용하여 제작되었다. 마이크로컨트롤러를 이용한 구동 드라이버로 박형 초음파 모터의 구동 특성을 측정할 결과, 구동 주파수 88.6[kHz], 프리로드 0.2[N]에서 최적의 운전 특성을 보였고 구동 주파수의 결과는 유한요소 해석의 결과와 일치함을 알 수 있었다. 전압변화에 따른 속도 및 토크 특성을 측정할 결과, 속도는 선형적인 증가를 보였으나 토크는 약 50[Vrms]에서 서서히 감소하는 특성을 보였다. 장시간의 운전에도 안정된 출력특성을 보였고, 마이크로컨트롤러를 이용한 구동드라이버는 기존의 신호발생기 및 파워 앰프를 이용한 고가의 구동장치와 비교해도 큰 차이를 보이지 않았으며 피드백 제어를 실행함으로써 프리로드의 변화에서도 0.1[N]에서 약 0.4[N]까지 안정적인 속도를 유지하는 장점이 있었다.

본 연구의 결과를 통하여 전용 드라이버를 필요로 하는 초음파 모터를 연구함에 있어서 구동 드라이버의 문제로 인한 연구의 불편함을 다소 해소 할 수 있을 것으로 보며, 더 많은 영역의 초음파 모터 연구로 이용 분야가 더욱더 확대되고 전용 드라이버의 소형화 및 저렴화에 관한 연구가 더욱 가속화 될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. S2-2007-000-00492-1)

본 연구는 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-313-D00287)

참 고 문 헌

- [1] Osamu Miyazawa Yasuharu Hashimoto, Tsukasa Funasaka and Makoto Furuhashi, "Investigation of Ultrasonic Motors Using Thin Piezo-Ceramics and a Metal Composite-Plate for Watches", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.38, pp.5608-5611, 1999.
- [2] J. Baborowski, "Microfabrication of Piezoelectric MEMS", Journal of Electroceramics, Vol. 12, pp.33-51, 2004.
- [3] 박태곤, 김명호, "압전세라믹 리니어 모터의 동작원리와 응용", 전기전자재료학회지, 14권, 4호, p. 8, 2001.
- [4] Toshiku Sashida and Takashi Kenjo, "An introduction to ultrasonic motors", Oxford, pp. 17-23, 1993.
- [5] ニューケラスシリーズ編集委員会, "壓電セラミックスの應用", 學獻社, pp.38-40.
- [6] 손창현, "유한요소해석 입문과 선형해석", 태성에스엔이, pp.31-35, 1999.
- [7] H. H. Chong, T. G. Park, M. H. Kim, "A study on driving characteristics of the cross the ultrasonic rotary motor", Journal of Electroceramics, Vol. 17, pp. 561-564, 2006.
- [8] Seong Jeong, Hoik Jun, Hyonho Chong and Taegone Park, "A Push-Pull Drving of the Thin-Type Ultrasonic Motor Using Microcontroller", 5th IWPMA, Drive/Control, 2008.
- [9] Kenji Uchino, "Piezoelectric Actuators and ultrasonic mortors", Kluwer Academic Publishers, pp.129-138, 1997.
- [10] 김진수 외, "초음파 전동기의 이론과 응용", 성안당, pp.167-181, 2000.
- [11] Hyueoung woo Kim, Shuxiang Dong, Pitak Laoratanakul, Kenji Uchino and Tae gone Park, "Novel Method for Driving the Ultrasonic Motor", IEEE, vol 49, No 10, pp.1356-1362, 2002.

저 자 소 개



**정 성 수 (鄭 成 守)**

1979년 2월 23일생. 2004 창원대 전기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2009년 동 대학원 전기공학과 박사수료.

Tel : 055-283-8376

Fax : 055-263-9956

E-mail : ssjeong@changwon.ac.kr



**전 호 익 (田 昊 益)**

1981년 6월 4일 생. 2007 창원대 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 055-283-8376

Fax : 055-263-9956

E-mail : tsobw@hanmail.net



**박 태 곤 (朴 泰 坤)**

1954년 2월 20일 생. 1976 홍익대 전기공학과 졸업. 1985년 연세대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1989~1990 일본 동경공대 객원연구원. 2006~2007 미국 Pennsylvania주립대 객원교수. 1987년 현재 창원대 전기공학과 교수.

Tel : 055-213-3631

Fax : 055-263-9956

E-mail : tgpark@changwon.ac.kr