

평판형 종(L₁)-굴곡(B₈)모드 초음파 전동기의 제작과 특성

Fabrication and Characteristics of Flat-type L₁-B₈ Mode Ultrasonic Motors

禹相鎬* · 李殷學** · 金鎮洙***
(Sang-Ho U · Eun-Hak Lee · Jin-Soo Kim)

Abstract - In this paper, a flat-type L₁-B₈ mode Ultrasonic Motor [USM] having the size of 80×20×1.5 mm(*l*×*w*×*t*) was designed and fabricated to examine the characteristics of an ultrasonic vibration. We used ANSYS simulation program based on FEM to get the optimum design of this USM. As results of experiment, the fastest speed of revolution(*v*), the maximum torque(*T*) and the efficiency(η) were 37.5 cm/s, 5.0 mN·m and 1.17 % when 27.9 kHz, 150 N, 50 V were applied respectively. And this flat-type L₁-B₈ mode USM could be controlled the speed of rotor revolution by applied voltage, frequency and pre-load of rotor as well as showed the characteristics of typical drooping torque-speed, large torque and high speed. So, we think that this flat-type L₁-B₈ mode USM has characteristics of enough torque and velocity to be usable for applications in forwarding device of an electric card or a paper, etc.

Key Words : L₁-B₈ mode Ultrasonic Motor, ANSYS simulation, rotor revolution, forwarding device

1. 서 론

정보화 사회에 들어가면서 국가적 전략으로 정보기술을 비롯한, 생명, 환경, 에너지, 메카트로닉스기술 등과 함께 재료기술을 핵심기술로 다루고 있는 즈음에, 세라믹스가 첨단 신소재로 주목받으면서 이것의 다양한 특성을 이용한 재료기술의 개발이 여러 분야에서 활발히 이루어지고 있다[1, 2]. 그중, 초음파 전동기(Ultrasonic Motor : 이하 USM라 한다)는 세라믹스의 압전 효과를 이용한 액츄에이터의 한 분야로서 지속적인 연구를 거듭해 오고 있다[3, 4]. 특히, 초음파 전동기는 압전 세라믹스에서 초당 수 만회 발생되는 미세 진동을 이용하여 회전자의 기계적인 출력을 얻는 것으로, 간단한 구조, 저속에서의 고폭크, 기동과 정지 시에 우수한 응답 특성 및 자계의 영향을 거의 받지 않는 특성으로 전자식 전동기를 대신하여 오늘날 가정용에서 우주 개발에 이르기까지 다양한 응용 연구가 진행중이다[5, 6].

미국의 H. V. Barth가 처음으로 초음파로 구동하는 전동기에 대한 제안을 한 이후, 초음파 전동기의 연구와 개발이 공진 모드의 조합에 따라 여러 형태로 이루어져 왔으나[7, 8], 국내·외의 경우 선형 운동이 가능한 평판형 초음파 전동기의 다양한 모드에 대한 연구와 이의 응용은 아직 일부분에 편중되어 있다고 하겠다[9].

따라서, 이 연구에서는 1차 모드의 종진동과 8차 모드의 굴곡 진동을 이용한 평판형 L₁-B₈ 모드의 초음파 전동기를 제작하고 그 특성을 측정·분석한 것으로, 전자 카드나 종이 등을 선형 이동시키는 이송 장치용 전동기로 사용하기 위한 기초 연구 결과이다.

2. 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 원리

평판형 L₁-B₈ 모드의 초음파 전동기는 그림 1에서처럼 화살표 방향으로 분극된 압전 세라믹스와 평판형의 금속 탄성체를 epoxy로 접착하여 만든 압전 진동자에 고주파의 2상($\sin \omega t$, $\cos \omega t$) 교류 전원을 인가하면, 압전 특성에 의하여

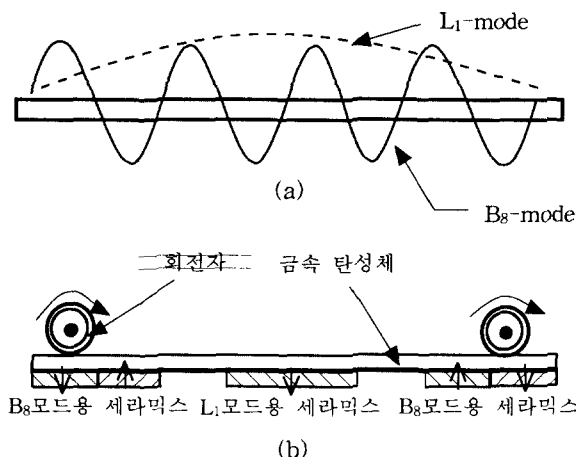


그림 1 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 동작원리
Fig. 1 The driving principle of a flat-type L₁-B₈ mode USM

* 準 會 員 : 韓國敎員大學校 技術敎育科 博士課程
** 正 會 員 : 漢拏大學校 電氣工學科 副敎授 · 工博
*** 正 會 員 : 韓國敎員大學校 技術敎育科 副敎授 · 工博
接受日字 : 2002年 2月 26日
最終完了 : 2002年 5月 31日

그림 1(a)과 같이 압전 세라믹스에 종진동으로 1차 모드(L_1) 및 굴곡진동으로 8차 모드(B_8)가 여진된다. 이것에 의해 발생된 정재파가 합성되어 수십 마이크로미터의 변위를 가진 타원형 진동이 초당 수 만회의 속도로 진동을 발생하게 되고, 그림 1(b)와 같이 고정자 위에 놓인 회전자를 마찰시켜 회전하게 함으로써 기계적인 출력을 얻게 된다.

3. 실험 방법

3.1 유한요소 시뮬레이션에 의한 진동 해석

이 연구에서는 유한요소법(Finite Element Method, FEM)에 의한 시뮬레이션으로 진동 해석을 하여, 평판형 L_1 - B_8 모드 초음파 진동기의 최적 설계를 시도하였다. 이를 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.6을 사용하여 초음파 진동기의 특성을 가장 크게 좌우하는 고정자의 진동 해석을 하였다[10, 11, 12].

그림 2는 FEM 해석을 위해 압전 세라믹스와 탄성체로 이루어진 고정자의 기하학적 형상을 나타낸 대칭적 3차원 구조의 솔리드 모델이다.

고정자 재료로 사용된 금속 탄성체는 탄성계수와 영률이 좋은 스테인리스강을 선택하였다[10].

FEM 시뮬레이션으로 진동 특성을 살펴보고, 가장 좋은 변위 특성과 진동 형상을 찾아 금속 탄성체의 전체 규격은 $80 \times 20 \times 1\text{mm}$ (가로 \times 세로 \times 두께)로 하였고, 압전 세라믹스는 L_1 및 B_8 모드용의 크기를 각각 $20 \times 20 \times 0.5\text{mm}$ 및 $10 \times 20 \times 0.5\text{mm}$ 로 설계하였다. 그림 3은 고정자의 진동 형상과 변위량을 색지수로 나타낸 것이다.

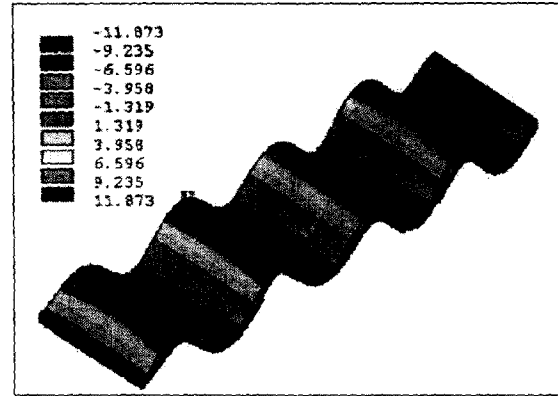


그림 3 ANSYS를 이용한 고정자의 진동 해석
Fig. 3 The analysis of vibration mode in a piezoelectric vibrator using ANSYS

3.2 평판형 L_1 - B_8 모드 초음파 진동기의 제작 순서

그림 3의 FEM 결과에 따라 초음파 진동기의 제작 과정을 그림 4에 나타낸다. 이 연구에서 사용된 압전 진동체의 주재료인 압전 세라믹스는 PZT계로 큐리온도가 높고, 압전성이 우수하며, 두께 방향으로 분극 처리된 것이다[13].

압전 세라믹스와 금속 탄성체의 접착은 에폭시로 접착 두께를 최소화하여 골고루 도포한 후, 균일한 압력을 가하여 압

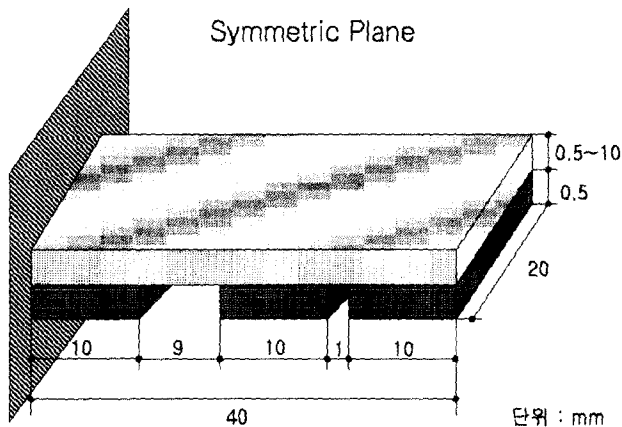


그림 2 FEM을 위한 고정자의 솔리드 모델
Fig. 2 The solid model of a stator for FEM

그림 3에서 보면, 고정자의 양쪽에 골과 마루의 끝 부위가 진한 색깔을 나타냄으로써 진동 변위량이 가장 큰 곳을 나타내고 있는데, 실제로 제작한 초음파 진동기에 회전자를 설치한 뒤 진동 특성을 측정하였을 때에도 비슷한 위치에서 가장 좋은 회전 특성을 보여주었다.

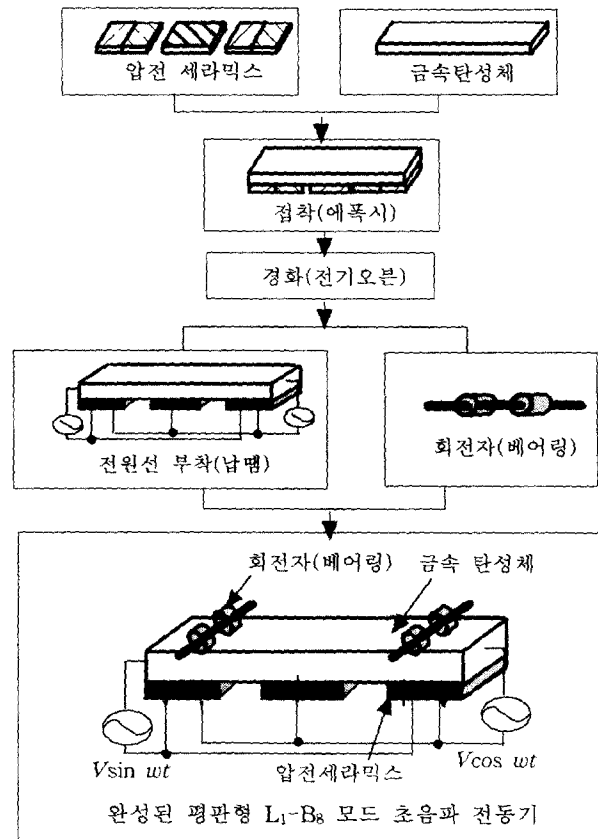


그림 4 평판형 L_1 - B_8 모드 초음파 진동기의 제작 과정
Fig. 4 The fabrication process of a flat-type L_1 - B_8 mode USM

전 세라믹스에서 발생하는 진동이 최대한 전달되게 하였고, 이것을 75°C에서 1시간 정도 전기오븐에서 경화시켰다. 경화 후 압전 세라믹스와 금속 탄성체에 진원선과 접지선을 그림 4와 같은 방법으로 부착하여 납땀하였다. 회전자로 사용된 베어링은 외경과 내경이 각각 10 mm, 3 mm 이고 재질은 스테인리스이며, 회전자 축은 지름 3 mm 인 스테인리스를 사용하였다. 표 1은 이 연구에서 제작한 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 규격이다.

표 1 제작한 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기 규격
Table 1 The size of a fabricated flat-type L₁-B₈ mode USM

구분	단위	값
전체 크기(l×w×t)	mm	80.0×20.0×1.5
압전 세라믹스 무게	L ₁ 모드용	2.13
	B ₈ 모드용	2.11
탄성체 무게	스테인리스	13.1
회전자(베어링)의 무게	g	4.0

3.3 초음파 전동기의 구동 및 측정 방법

평판형 L₁-B₈ 모드의 초음파 전동기의 구동은 함수 발생기를 사용하여 1/2 π rad의 위상차가 나도록 신호를 발생시켜 이 신호를 전력 증폭기로 증폭하였고 이때 구동 전류의 측정은 아날로그 전류계로, 인가한 주파수의 위상차는 디지털 오실로스코프로 측정하였다. 회전자의 회전속도는 디지털 광 회전계를 사용하여 회전자의 측면에 쏜 빛의 반사 신호로 간접 측정하여 선행 연구에서 제시한 방법으로 이송 속도 v %와

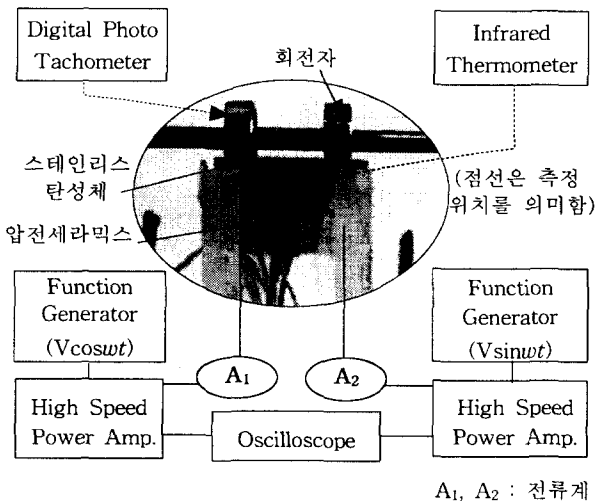


그림 5 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 특성 측정 시스템도

Fig. 5 Measuring system of the characteristics for a flat-type L₁-B₈ mode USM

토크 T N·m를 구하였으며[14], 적외선 온도계를 이용하여 회전자가 놓인 부분에서 압전 세라믹스의 표면 온도를 적외선으로 간접 측정하였다. 그리고, 측정결과는 3회 이상의 측정값의 평균을 취하였다.

그림 5는 초음파 전동기의 구동 및 측정 시스템을 개략적으로 나타낸 것이다.

4. 실험 결과 및 고찰

그림 6은 제작된 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 카드 이송 실험 장치를 보여주고 있다.

FEM 시뮬레이션을 통해 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 주파수가 27.4 kHz 일 때 진동 특성이 우수한 공진 특성을 나타냄을 확인할 수 있었는데, 실제 제작한 초음파 전동기의 실험에서도 비슷한 값인 27.9 kHz 에서 회전속도 625 rpm을 나타내는 가장 좋은 진동 특성을 확인할 수 있었다.



그림 6 카드(이송체)를 이송하는 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기

Fig. 6 Flat-type L₁-B₈ mode USM forwarding a plastic card

그림 7은 인가 전압 50V, 가압력 1.5 N에 고정시켜 두고, 초음파 전동기의 주파수에 따른 무부하시 회전자의 회전속도

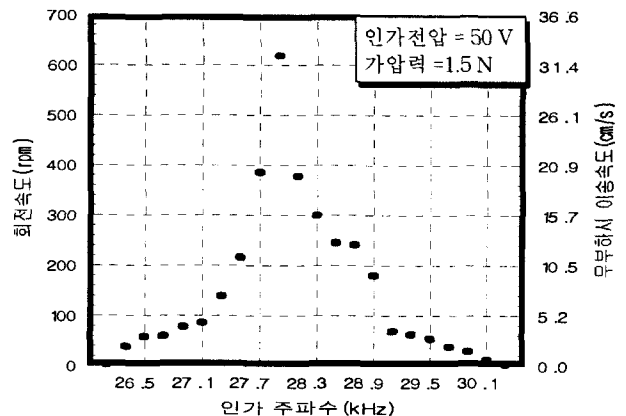


그림 7 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 인가 주파수에 따른 회전속도 및 이송속도

Fig. 7 Feeding speed of L₁-B₈ mode USM by applied frequency

를 측정하고, 이를 이송체의 이송속도로 환산하여 나타낸 것이다.

회전속도는 인가 주파수의 증감에 따라 27.4 kHz를 정점으로 거의 비례하여 증감을 나타내었고, 주파수가 27.4 kHz에서 회전자의 최고 속도는 625 rpm로 무부하시의 최고 이송속도는 32.7 cm/s이었다. 특히, 27.0-29.0 kHz에서는 주파수의 증감에 의하여 초음파 전동기의 속도를 거의 선형적으로 제어할 수 있었다.

그림 8은 인가 전압 50 V, 인가 주파수 27.9 kHz일 때 가압력에 따른 무부하시 회전자의 회전속도를 구하고 이를 무부하시의 이송속도로 환산한 그래프이다.

초음파 전동기의 원활한 구동을 위해 회전자에는 0.5 N 이상의 가압력(pre-load)이 필요하였고, 가압력이 1.5 N일 때 최고 회전속도는 625 rpm를 나타내다가 그 이상의 가압력이 증가할수록 회전속도는 다시 감소함을 알 수 있다.

이것은 가압력이 회전자가 탄성체와의 마찰력에 끼치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

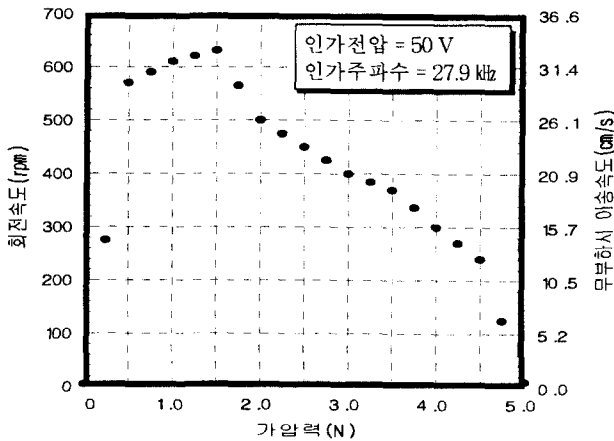


그림 8 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 가압력에 따른 회전속도 및 이송속도

Fig. 8 Feeding speed of a flat-type L₁-B₈ mode USM by pre-load

그림 9는 인가 전압 50 V, 인가 주파수 27.9 kHz일 때 가압력에 따른 이송 가능한 최대 부하를 측정하고, 이를 최대 토크로 환산한 것이다.

가압력이 2.5 N일 때 이송 가능한 최대 부하가 200 g 이었고, 이를 전후로 부하의 크기는 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 이는 가압력이 지나치게 크면 절점에 가해지는 마찰력이 부하의 무게를 감당하기 어려운 것으로 여겨진다. 그러나 이 정도의 크기는 일반적으로 무게 60-135 g/m²인 A4 용지를 충분히 이송할 수 있는 토크이며, 다소 규격의 차이가 있지만 선행연구의 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 경우[14] 이송 가능한 최대 부하의 크기가 40 g 정도인 것에 비하면 매우 큰 값이라 하겠다.

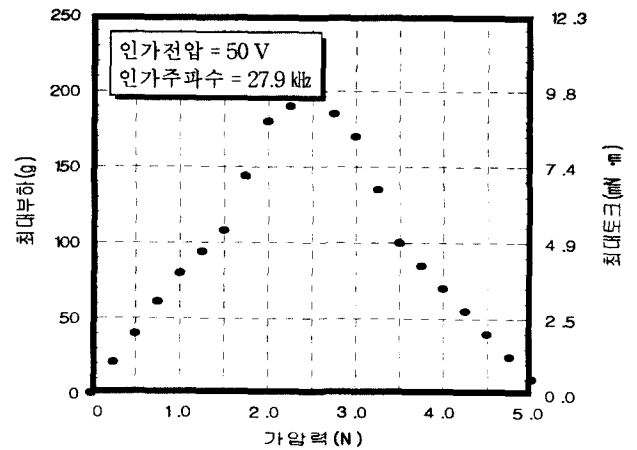


그림 9 가압력에 따른 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 최대부하 및 토크

Fig. 9 Effect of pre-load on maximum load and torque of a flat-type L₁-B₈ mode USM

그림 10은 주파수를 27.9 kHz, 가압력은 1.5 N로 고정시켜 놓고, 인가 전압에 따른 무부하시 회전자의 회전속도를 측정하여 이를 이송속도로 환산한 것이다.

회전자의 속도와 이송속도는 인가 전압이 증가할수록 비례하는 증가현상을 보였다. 이는 인가 전압을 통해 이송속도의 제어가 가능함을 보여주는 것이라 하겠다. 그리고, 인가 전압이 50 V일 때부터는 회전자의 속도 변화가 거의 나타나지 않았으며, 인가 전압이 10 V 정도 이하에서는 초음파 전동기가 구동하지 않았다. 이것은 10 V 이하의 낮은 전압에서는 압전 진동자에 의해 발생하는 토크가 회전자에 가해지는 가압력과 회전자와 탄성체간의 마찰력보다 작아 회전자를 회전시키지 못하는 것으로서, 이것으로 초음파 전동기의 구동을 위해 최소 10 V 이상의 전압이 필요함을 알 수 있다.

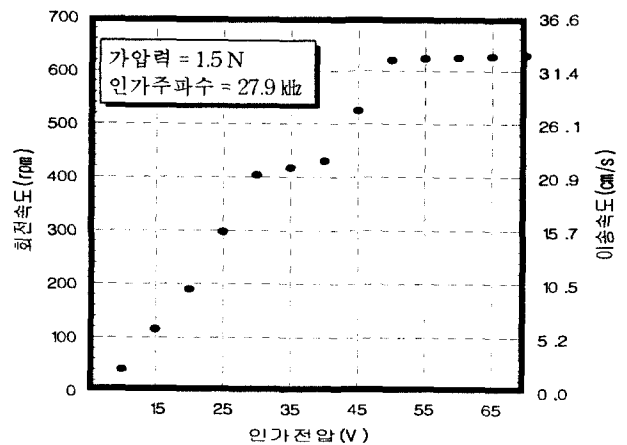


그림 10 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 인가 전압에 따른 회전속도 및 이송속도

Fig. 10 Effect of applied voltage on feeding speed of a flat-type L₁-B₈ mode USM

그림 11은 인가 전압에 따른 초음파 전동기의 이송 가능한 최대 부하의 크기를 측정하고 식을 이용하여 토크로 환산한 것이다[14].

이송 가능한 최대 부하는 전압이 증가함에 따라 대체로 비례하여 증가하는 현상을 나타내었다. 50 V 이상에서는 증가의 정도가 포화상태를 나타내었고, 전압 상승에 따른 초음파 전동기 자체의 급격한 온도 상승으로 인해 구동 전압으로는 안정적이지 못함을 알 수 있었다. 따라서, 인가 전압이 20-50 V의 범위가 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 효율적인 구동 전압으로 충분하다고 하겠다.

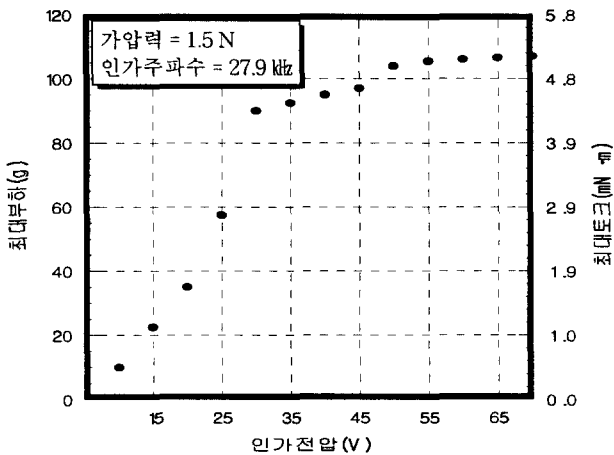


그림 11 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 전압에 따른 최대 부하의 크기 및 토크

Fig. 11 Effect of voltage on maximum load or torque of a flat-type L₁-B₈ mode USM

그림 12는 부하의 크기를 변화시키면서 발생된 토크와 이송속도의 관계를 측정하는 것이다.

토크의 크기가 가장 작을 때인 무부하시의 이송속도는 32.7 cm/s로 가장 빠른 속도를 나타내었고, 토크가 증가할 수

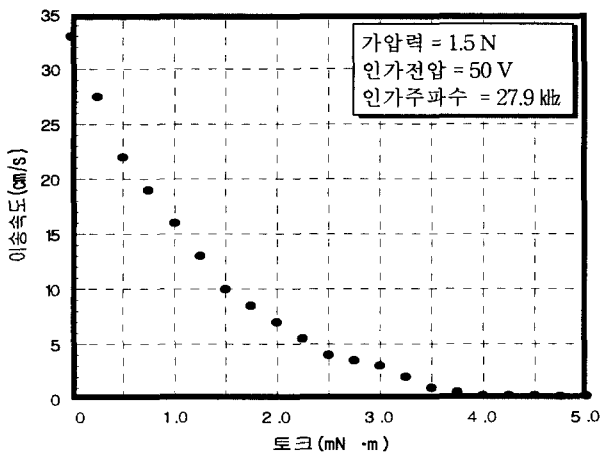


그림 12 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 토크에 따른 이송속도

Fig. 12 Feeding speed of a flat-type L₁-B₈ mode USM by torque

록 이송속도는 거의 선형적으로 감소하다가 토크가 5.0 mN·m에서는 이송속도가 거의 0 cm/s에 이르는 저속 고토크 현상을 보였다. 이러한 수하(垂下) 특성과 저속 고토크 현상은 L₁-B₄ 모드의 초음파 전동기에 대한 선행 연구에서와 같은 경향을 보이며[14], 이것은 초음파 전동기의 특징 중의 하나로 알려진 현상이다.

그림 13은 가압력 1.5 N, 인가 전압 50 V, 인가 주파수 27.9 kHz 일 때 토크에 따른 초음파 전동기의 효율을 측정하는 것이다.

토크의 효율은 1.0 mN·m에서 약 1.17 %로 가장 높았는데, 이는 선행 연구에서 보인 일본의 L1-B8 모드 초음파 전동기가 4.3 W(70 V)의 경우에 약 0.5 %의 효율보다는 나은 값이지만[9], L1-B4 모드의 초음파 전동기가 2.14%인 것에 비하면 작은 값이라 하겠다. 그러나, 평판형 L1-B8 모드 초음파 전동기의 응용으로 사용될 이송체 부하의 크기에 적절한 전압과 가압력을 가해 소비전력을 낮추고, 선행 연구의 L1-B4 모드 초음파 전동기에 설치한 변위확대 기구를 설치함으로써 효율의 개선은 이루어 질 수 있다고 여겨진다[15].

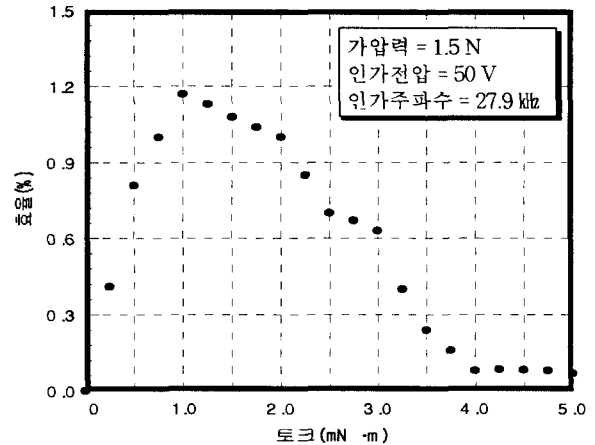


그림 13 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 토크에 따른 효율

Fig. 13 Effect of torque on efficiency of a flat-type L₁-B₈ mode USM

4. 결 론

이 연구에서는 평판형 L₁-B₈ 모드의 초음파 전동기를 제작하고 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) FEM 시뮬레이션을 이용한 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기의 진동특성은 실제 제작시 나타나는 특성과 유사하여 최적 진동 특성 구현에 유효하였다.
- (2) 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기는, 인가 전압 50 V, 인가 주파수 27.9 kHz에서 가압력이 1.5 N일 때 최고 회전속도 32.7 cm/s를 나타내었다.
- (3) 평판형 L₁-B₈ 모드 초음파 전동기에 인가하는 전압과 회전자에 가한 가압력에 의해 회전자의 회전속도가 거의 비례하여 증가하므로 전압과 가압력으로 이송체의 이송속도를 조절할 수 있었다.

- (4) 부하에 따른 토크가 증가할수록 회전자의 회전속도는 감소하는 전형적인 초음파 전동기의 수하(垂下) 특성과 저속 고토크 현상을 나타내었다.
- (5) 평판형 L1-B8 모드 초음파 전동기에 있어 최대 효율은 탄성체가 스테인리스인 경우 약 1.17 %로 고속 회전과 고 토크를 발생하지만 소비전력에 비해 기계적 출력은 낮았다.

이상의 결론으로 평판형 L1-B8 모드 초음파 전동기는 토크와 이송속도 특성이 우수하여 다양한 이송체의 이송에 응용될 수 있을 것으로 생각하며, 현재 이에 대한 연구가 진행 중에 있다.

참 고 문 헌

- [1] 김진수, 이명훈 공역, "초음파 전동기의 이론과 응용", 성안당, pp. 3-5, 2000.
- [2] 김진수, "공업교육", 동일출판사, pp. 327-330, 2002.
- [3] 이종섭, 임기조 외, "L1-B4 진동모드를 이용한 평판형 선형 초음파 모터의 설계 및 시제작", 전기전자재료학회 논문지, Vol. 11, No. 10, pp. 267, 1997.
- [4] 김태열, 박태곤 외, "L1-B4 샌드위치형 진동자를 이용한 선형 초음파 모터의 설계 및 특성", 전기전자재료학회 논문지, Vol. 13, No. 12, pp. 1025-1031, 2000.
- [5] 육재호, 이덕출, 富川義朗, "L1-B2 다중모드 압전진동자를 이용한 초음파 모우터의 특성과 카드이송장치에의 응용에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol. 42, No. 4, pp. 39-46, 1993.
- [6] 김영균, 김진수, "풍차형 초음파 전동기의 제작과 토크 및 정·역 회전특성", 대한전기학회 논문지, Vol. 50C, No. 3, pp. 105-109, 2001.
- [7] K. Uchino, "Piezoelectric Actuators And Ultrasonic Motors", Kluwer Academic Publishers, Boston, p. 267, 1992.
- [8] Jin-Soo Kim, Man-Ju Park and Kenji Uchino, "Composite Ultrasonic Motors using a Piezoelectric Disc and an Elastic Body of WINDMILL Type", Ferroelectrics, Vol. 232, pp. 185-190, 1999.
- [9] T. Kosawada, K. Suzuki, T. Tomikawa, "A Card sending Linear Ultrasonic Motor using Multi-Beam Piezoelectric Vibrators", International Journal of Applied Electromagnetics in Materials 2, pp. 285-290, 1992.
- [10] 이상호, 김진수 외, 유한요소해석 시뮬레이션을 이용한 평판형 "L1-B8 모드 초음파 전동기의 최적 설계", 한국기전자재료학회 하계학술대회 논문집, pp. 664, 2001.
- [11] 고재용, "ANSYS와 유한요소법", 시그마프레스, pp. 12-14, p. 230, 2001.
- [12] Y. Kagawa, T. Tsuchiya, T. Kataoka, "Finite Element Simulation of Dynamic Responses of Piezoelectric Actuators", Journal of Sound and Vibration, 194(4), pp. 519-538, 1996.
- [13] Jin-Soo Kim, So-Jung Kim, Ho-Gi Kim, Duck-Chool

- Lee and Kenji Uchino, "Piezoelectric and Dielectric Properties of Fe₂O₃-Doped 0.57Pb(Sc_{1/2}Nb_{1/2})O₃-0.43PbTiO₃ Ceramic Materials", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 38, No. 3A, pp. 1433-1437, 1999.
- [14] 이명훈, 김진수, "L1-B4 모드 선형 초음파 전동기 제작과 운전특성", 대한전기학회 논문지, Vol. 50C, No. 6, pp. 257-261, 2001.
- [15] 이명훈, 이상호, 김진수, "변위확대기구를 이용한 선형 초음파 전동기의 효율 개선", 한국전기전자재료학회 추계학술대회 논문집, 한국전기연구소, pp. 177-180, 2000.

저 자 소 개



우 상 호 (禹 相 鎬)

1968년 3월 23일생. 1996년 영남대 전자공학과 졸업. 2002년 한국교원대학교 대학원 기술교육과 졸업(석사). 현재 청도전자고등학교 전자과 교사. 현재 한국교원대학교 기술교육과 박사과정 재학(공업교육전공).
Tel: 054-372-2592
E-mail: osidit@hitel.net



이 은 학 (李 殷 學)

1946년 9월 5일생. 1974년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 명지대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 전남대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1984년 발송배전기술사. 1994년 (주)삼안건설기술공사 전무이사. 현재 한라대학교 전기 공학과 부교수.
Tel: 033-760-1243
E-mail: ehlee@hit.halla.ac.kr



김 진 수 (金 鎭 洙)

1960년 9월 6일생. 1986년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년 경원전문대학 조교수. 1996년-1997년 미국 Pennsylvania State University(Post-doc.). 1992년~현재 한국교원대학교 기술교육과 부교수. 현재 대한전기학회 편집위원, 현재 대한공업교육학회 편집위원장. 주관심분야: 초음파 전동기, 압전 세라믹 액츄에이터, 전기교육, 공업교육 등.
Tel: 043-230-3743 Fax: 043-230-3787
Homepage: http://cc.knue.ac.kr/~jskim
E-mail: jskim@cc.knue.ac.kr