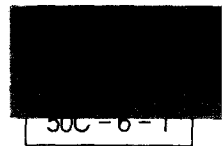


L₁-B₄모드 선형 초음파 전동기의 제작과 운전 특성



Fabrication and Operation Characteristics of Linear Ultrasonic Motor Using L₁-B₄ Mode

李明薰* · 金鎮洙**
(Myung-Hun Lee · Jin-Soo Kim)

Abstract - In this paper, a linear ultrasonic motor using piezoelectric ceramics was fabricated, and its operation characteristics were investigated. A linear ultrasonic motor using L₁-B₄ mode was composed of a stator and a rotor, and a stator was composed of piezoelectric ceramics and an elastic body.

When applied frequency and voltage were 58.4 kHz and 56 V respectively, the feeding speed of the motor was 19.8 cm/s. A linear ultrasonic motor could be moved in left and right directions by the phase difference. Feeding speed and feeding force of a linear ultrasonic motor could be controlled by applied voltage. A linear ultrasonic motor had a dropping torque-speed characteristic. The maximum efficiency of a linear ultrasonic motor was 2.14 %.

Therefore, this linear ultrasonic motor can be expected to be used for a card-forwarding device, such as a card reader device and so on.

Key Words : linear ultrasonic motor, piezoelectric ceramics, elastic body, feeding speed

1. 서 론

현재 국내외에서 활발하게 연구되고 있는 초음파 전동기(Ultrasonic Motor, USM)의 경우 각광을 받기 시작한지 십여년밖에 되지 않았으나, 소형 경량이고, 저속에서도 높은 토크를 발생하고, 단위 중량당 발생하는 기계적 출력이 높으며, 구조가 단순하여 생산 공정이 쉽고, 자계와 무관하기 때문에 전자 유도 장애가 없으며, 빠른 응답과 폭넓은 속도 범위를 갖는 등 많은 장점을 가지고 있다[1, 2]. 특히 선형 초음파 전동기(Linear Ultrasonic Motor, LUSM)의 경우 기어와 벨트 같은 부속장치 없이 선형의 동력을 얻을 수 있다.

따라서, 선형 초음파 전동기는 구동장치의 단순화로 소형·경량화가 가능하고, 고장 발생률이 적으며, 응답이 빨라 기존의 전자식 전동기를 대신하여 각종 기기(공중 전화기, 현금 인출기, OMR 카드 리더기, 지하철 개찰기 등)에 적용이 가능하다.

국내에서도 임기조[3], 박태곤[4] 등에 의하여 종-굴곡모드를 이용한 평판형 선형 초음파 전동기에 관한 논문이 최근 발표되고 있으며, 본 논문에서는 선형 초음파 전동기의 출력 특성을 중심으로 연구를 진행하였다.

따라서 본 연구에서는 1차 종(L₁)-4차 굴곡(B₄)모드를 이용한 선형 초음파 전동기를 제작하여, 여러 가지 운전 특성에 대하여 측정·분석하였다.

2. L₁-B₄모드의 선형 초음파 전동기 제작

본 연구에서 제작한 L₁-B₄모드의 선형 초음파 전동기는 그림 1과 같이 고정자와 회전자로 이루어져 있으며, 고정자는 압전 세라믹스와 금속 탄성체로 이루어져 있다.

그림 1과 같은 선형 초음파 전동기에 초음파 영역의 교류 전기 신호를 인가하면, 그림 2와 같이 하나의 마디를 가진 종(Longitudinal)모드(L₁)와 4개의 마디를 가진 굴곡(bending)모드(B₄)가 여진된다. 따라서 가로(x축)방향으로만 변위를 일으키는 종모드와 세로(y축)방향으로만 변위를 일으키는 굴곡모드가 합성되어, 금속 탄성체 표면의 질점은 타원운

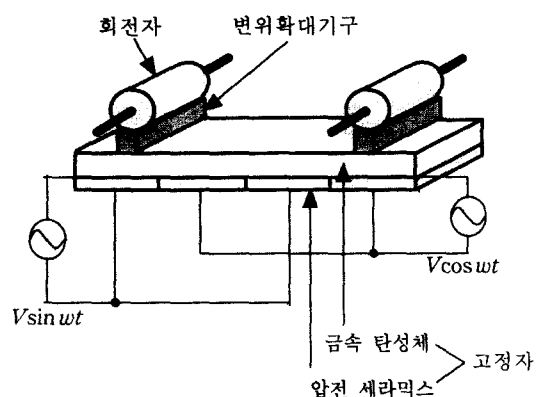


그림 1 제작한 선형 초음파 전동기의 구조
Fig. 1 The structure of a linear ultrasonic motor

* 準會員 : 서울大 農·産業敎育科 博士課程
** 正會員 : 韓國敎員大 技術敎育科 敎授·工博
接受日字 : 2001年 2月 14日
最終完了 : 2001年 5月 15日

동을 하게 된다. 여기에 슬라이더를 밀착시키면 타원운동에 의하여 슬라이더가 선형으로 움직이게 되는데 이것이 기본 원리이다[5].

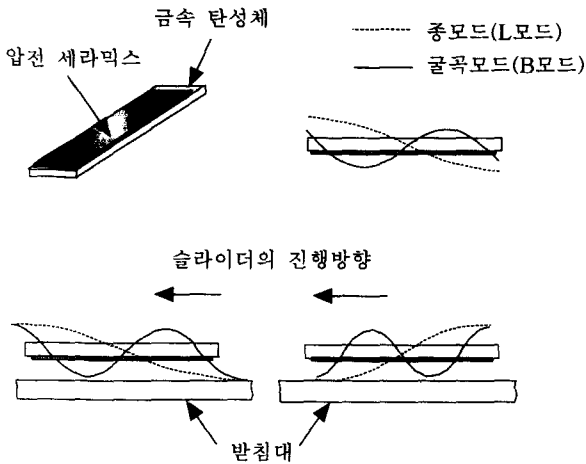


그림 2 L₁-B₄모드의 선형 초음파 전동기의 구동 원리
Fig. 2 The driving principle of a linear ultrasonic motor using L₁-B₄ mode

압전 세라믹스 진동자는 압전성이 우수하고, 큐리온도가 높은 PZT 압전 세라믹스를 분극처리하여 사용하였다[6]. 그림 3은 압전 세라믹 진동자의 구조를 나타낸 것으로, 형상은 36.0 mm×10.0 mm×1.0 mm(*l*×*w*×*t*)이다. 그림에서 +, - 부호는 분극 방향이 서로 반대임을 나타낸 것이다. 압전 세라믹스의 조성식은 0.35PZ-0.15PT-0.5PMN+0.1wt% MnO₂이다.

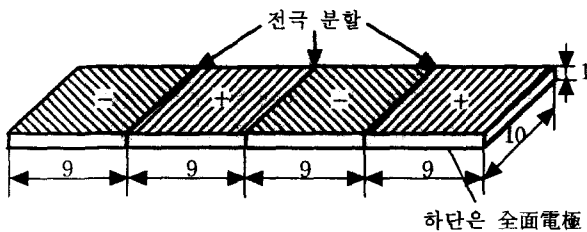


그림 3 압전 세라믹 진동자의 구조
Fig. 3 The structure of piezoelectric ceramics vibrator

초음파 전동기의 고정자의 금속 탄성체 재료로는 스테인리스강, 인청동, 황동 등 다양한 금속이 사용되고 있다 [7-10]. 본 연구에서는 가공은 어렵지만 탄성 계수와 영률이 다른 금속에 비하여 우수한 스테인리스강(36.0 mm×10.0 mm×2.0 mm)을 사용하였다.

압전 세라믹스와 금속 탄성체의 접착에는 접착력이 우수한 2-type 에폭시 접착제(에프스 화학공업주식회사: 한국)를 사용하였다. 접착면에서 발생할 수 있는 기포를 제거하고 경화시키기 위하여 전기 오븐(DMC 122, 한국)에서 75℃로 1시간 동안 유지하였다. 이 접착 방법은 본 연구팀의 회전형 초음파 전동기 제작과 같은 방법을

사용하였다[10].

전원선은 압전 세라믹스의 각 세그먼트 표면에 납땜하였으며, 접지선은 탄성체 표면에 부착하였다. 납땜시 큐리온도 (300 ℃)보다 높은 온도가 압전 세라믹스에 가해지지 않도록 인두의 온도가 280 ℃를 넘지 않도록 유의하여야 한다. 입력단자는 지름이 0.35 mm인 구리선을 사용하였다.

그림 4는 위의 공정에 의하여 설계 제작한 선형 초음파 전동기의 고정자 형상을 나타낸 사진이다.

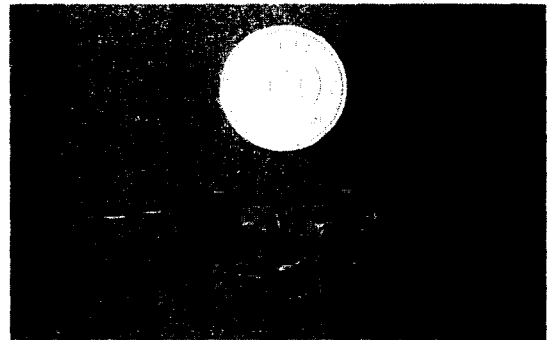


그림 4 제작한 선형 초음파 전동기의 고정자 형상
Fig. 4 A stator of the linear ultrasonic motor fabricated

그림 1에 나타난 회전자는 탄성체 표면의 미소한 변위 타원운동을 받아서 회전하게 되므로 외경 8 mm, 내경 3 mm인 베어링(재질: 스테인리스)을 사용하여 제작하였다.

그림 5는 선형 초음파 전동기의 제작 순서도를 나타낸 것이다.

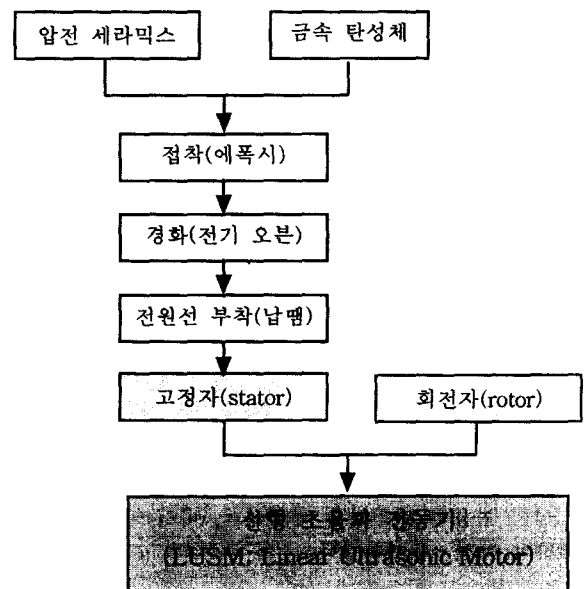


그림 5 선형 초음파 전동기의 제작 순서도
Fig. 5 Flow chart for manufacturing linear ultrasonic motor

3. 선형 초음파 전동기의 구동 및 측정 시스템

그림 6은 본 연구에서 제작한 선형 초음파 전동기의 구동 시스템을 나타낸 사진이다. L₁-B₄모드의 선형 초음파 전동기도 일반적인 선형 초음파 전동기처럼 2상(sin ωt, cos ωt)으로 구동된다[7]. 2대의 함수 발생기(HP 33120A, 미국)를 이용하여 90° 위상차를 갖는 2상의 사인파 교류 신호를 발생시키고, 이 신호의 전압을 2대의 전력 증폭기(NF 4015, 일본)로 각각 증폭하여 초음파 전동기를 구동시켰다[6]. 인가 전압과 주파수는 함수 발생기를 이용하여 조절하고, 2상 교류의 위상차는 함수 발생기로 조절하며, 오실로스코프(HC 5802, 한국)로 관측하였다.

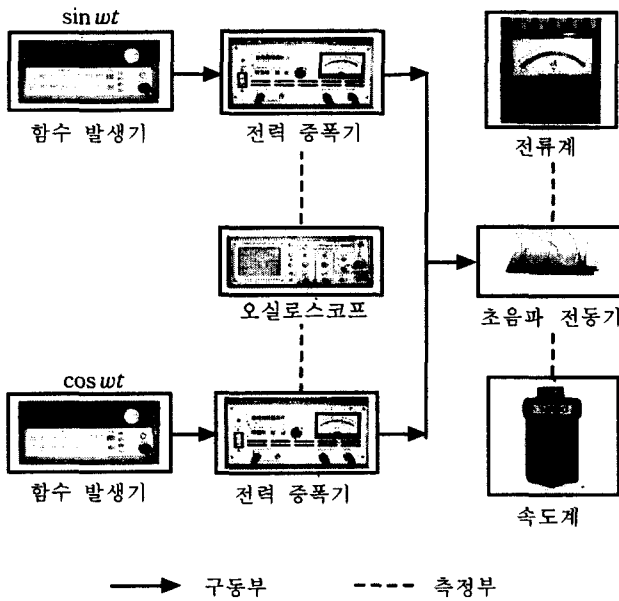


그림 6 선형 초음파 전동기의 구동 시스템
Fig. 6 Driving system of a linear ultrasonic motor

카드의 이송속도(feeding speed)를 측정하기 위하여 국내 H통신에서 발행하는 상용의 공중전화 카드(2.7 g)를 사용하였다.

토크(torque)는 그림 7과 같이 전동기의 회전자에 실로 추를 연결하고 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$T = 9.8 m \cdot r \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (1)$$

여기서 m 은 추의 질량(kg), r 은 회전자의 반경(m)이다.

또한, 이송력(feeding force)은 토크값을 구하는 방식과 동일한 방식으로 측정하였으며, 다음 식으로 구하였다.

$$F = 9.8 m \text{ [N]} \quad (2)$$

효율은 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$\text{효율} = \frac{\text{기계적출력}}{\text{전기적입력}} = \frac{2\pi n \cdot T}{P} \times 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

여기서 n 은 회전자의 초당 회전수(rps), T 는 토크(N·m), P 는 전력(W)이다.

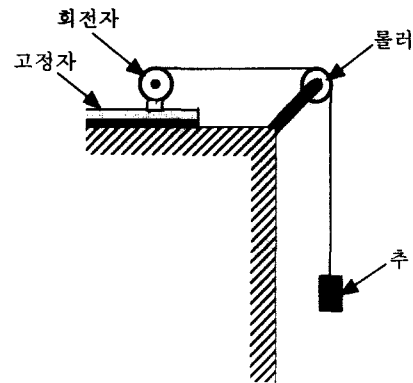


그림 7 토크 측정 시스템
Fig. 7 Torque measurement system

4. 실험 결과 및 고찰

제작한 선형 초음파 전동기의 규격을 표 1에 나타내었다. 구동 주파수 58.5 kHz, 구동전압 56 V, 압전 세라믹스의 무게는 3.09 g, 탄성체의 무게는 5.46 g, 회전자의 무게는 6.8 g이었다. 또한 그림 8은 실험을 위해 제작된 카드 이송기기이다.

그림 9는 인가 주파수에 따른 초음파 전동기의 카드 이송속도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 인가 주파수를 증가시키에 따라 카드 이송속도는 거의 선형적으로 증가하였으며, 58.4 kHz에서 최대의 이송속도(19.8 cm/s)를 나타내었다가 다시 선형적으로 감소하였다. 즉, 인가 주파수를 변화시키면 이에 따라 이송속도가 변화한다는 것을 알 수 있다. 따라서 인가 주파수에 의하여 선형 초음파 전동기의 카드 이송속도 조절이 가능하다.

표 1 제작된 선형 초음파 전동기의 규격
Table 1 Specification of a manufactured linear ultrasonic motor

	단위	값
크기(길이×폭×높이)	mm	36.0×10.0×2.0
구동 주파수	kHz	58.4
구동전압	V _{rms}	56.0
압전 세라믹스의 무게	g	3.09
탄성체의 무게	g	5.46
돌기의 무게(2개)	g	0.81
회전자의 무게(2개)	g	6.8

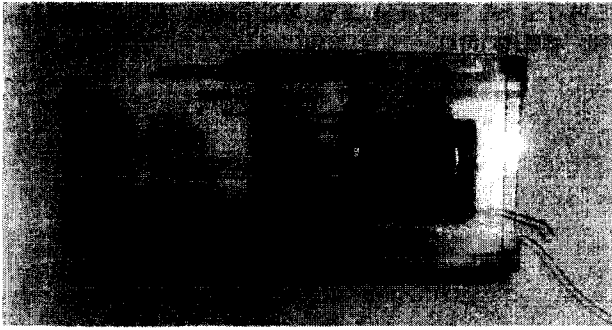


그림 8 제작된 선형 초음파 전동기
Fig. 8 Manufactured linear ultrasonic motor

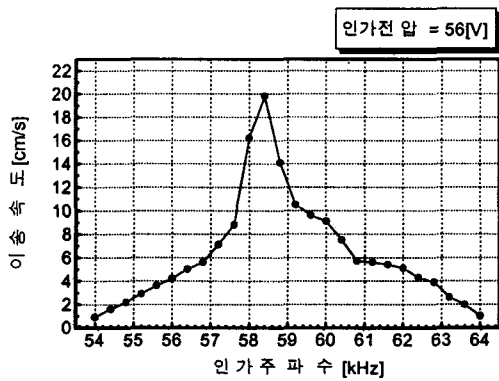


그림 9 인가 주파수에 따른 선형 초음파 전동기의 카드 이송 속도
Fig. 9 Effect of applied frequency on feeding speed of the linear ultrasonic motor

그림 10은 인가 전압에 따른 초음파 전동기의 카드 이송 속도를 측정 한 것이다. 그림에서 보는바와 같이 인가 전압이 증가함에 따라 카드 이송속도는 선형적으로 증가하였으며, 인가 전압이 56 V일 때 이송속도는 19.8 cm/s이었다. 그 이상의 전압에서는 이송속도는 거의 증가하지 않았다.

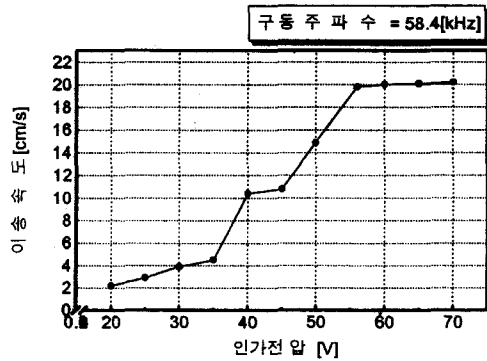


그림 10 인가 전압에 따른 선형 초음파 전동기의 카드 이송 속도
Fig. 10 Effect of applied voltage on feeding speed of the linear ultrasonic motor

그리고 20 V 이하의 인가 전압에서는 선형 초음파 전동기가 구동되지 않았다. 이 결과는 본 연구에서 제작한 선형 초음파 전동기를 구동시키기 위해서는 최소 20 V 이상의 기동전압이 필요하다는 것을 의미한다.

그림 11은 인가 주파수를 58.4 kHz로 고정시켜 놓고 인가 전압에 따른 초음파 전동기의 카드 이송력을 측정 한 것이다. 그림에서 보는바와 같이 인가 전압이 증가함에 따라 카드 이송력은 거의 선형적으로 증가하였으며, 60 V일 때 이송력은 402 mN이었다. 그 이상의 전압에서는 이송력은 증가하지 않고 일정하였다. 이 정도의 이송력으로 일반 전자 카드(최대 5 g정도)는 충분히 이송시킬 수 있다.

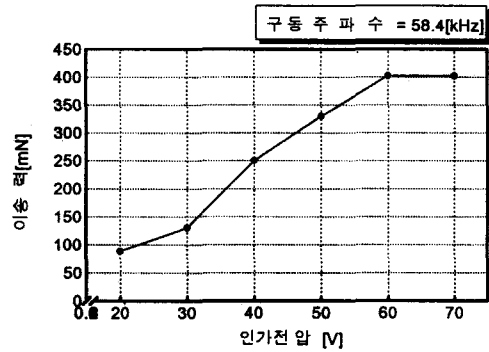


그림 11 인가 전압에 따른 초음파 전동기의 카드 이송력
Fig. 11 Effect of applied voltage on feeding force of the linear ultrasonic motor

그림 12는 앞에서의 연구 결과치에 따라 주파수와 인가 전압을 58.4 kHz, 56 V로 고정시켜 놓은 후 토크와 카드 이송속도의 관계를 측정 한 것이다. 토크가 0.2 mN·m일 때 카드 이송속도는 16.5 cm/s이었으며, 토크가 1.8 mN·m 이상에서는 회전자가 움직이지 않았다. 그리고 토크가 증가함에 따라 이송속도가 감소하는 수하(垂下) 특성이 나타났다. 또한, 그림 7과 같은 시스템에서 부하의 무게를 변화시킴으로써 토크값을 구했으므로, 부하의 무게가 증가함에 따라 카드 이송속도는 감소한다는 것도 알 수 있다.

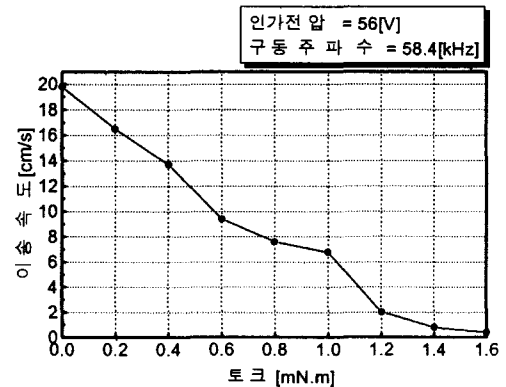


그림 12 토크에 따른 선형 초음파 전동기의 카드 이송 속도
Fig. 12 Effect of torque on feeding speed of the linear ultrasonic motor

그림 13은 주파수와 인가 전압을 58.4 kHz, 56 V로 고정 시켜 놓고, 초음파 전동기에 인가하는 두 전압의 위상차 크기와 방향을 변화시켜 가면서 카드 이송속도를 측정한 것이다. 두 전압의 위상차가 0°에 가깝거나 180°에 가까운 경우 선형 초음파 전동기는 거의 동작되지 않았다. 그리고 위상차가 90°에 가까운 경우 우측 방향(x방향)으로 최대 카드 이송속도(19.8 cm/s)를 나타내었으며, -90°에 가까운 경우 좌측 방향(-x방향)으로 최대 카드 이송속도(15.6 cm/s)를 나타내었다. 이는 그림 2의 구동 원리에서 설명한 바대로 나타난 결과이다. 그러므로 두 개의 인가 전압의 위상차에 의해 초음파 전동기를 좌, 우 양방향으로 쉽게 구동시킬 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 선형 초음파 전동기의 좌, 우 양방향 운전에 관한 연구 논문은 아직까지 발표된 바 없었으며, 이를 상품화에 적용할 예정으로 연구 중에 있다.

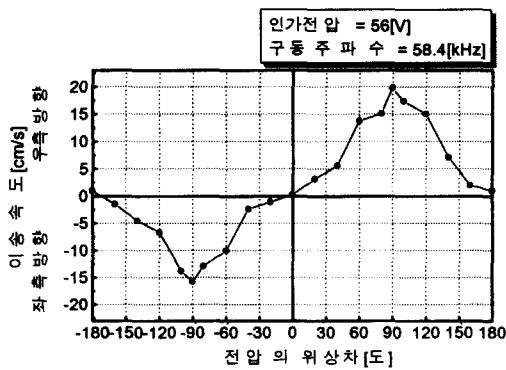


그림 13 전압의 위상차에 따른 선형 초음파 전동기의 카드 이송속도

Fig. 13 Effect of phase differency on feeding speed of the linear ultrasonic motor

그림 14는 주파수와 인가 전압을 58.4 kHz, 56 V로 고정 시켜 놓고 식 (3)을 이용하여 초음파 전동기의 토크에 따른 효율을 측정한 것이다.

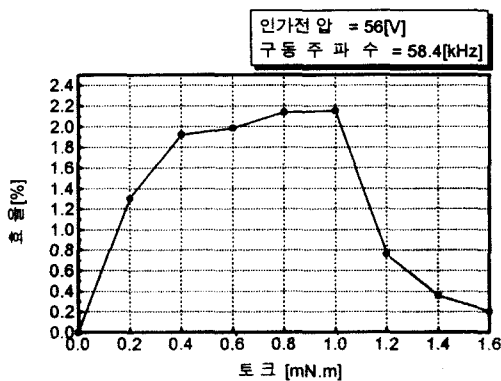


그림 14 선형 초음파 전동기의 토크에 따른 효율

Fig. 14 Effect of torque on efficiency of the linear ultrasonic motor

토크가 0.8 mN·m일 때 효율은 2.14 %이었으며, 그림에서와 같이 토크가 0.4 ~ 1.0 mN 범위에서는 효율이 높았다. 그러나 전반적으로 효율이 낮은 것은 고정자와 회전자 접촉면의 마찰에 크게 영향을 받는 것으로 효율을 높이기 위해서는 고정자와 회전자의 보다 완벽한 접촉이 요구되며, 이 부분에 대한 연구를 진행 중에 있다.

선행 연구[3]에 비하여 본 연구에서 제작한 선형 초음파 전동기의 외형 크기는 20 %정도 작은데도 불구하고, 효율은 선행 연구의 1.2 %보다 높은 2.14 %로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서 크기가 36.0 mm×10.0 mm×2.0 mm(*l*×*w*×*t*)인 선형 초음파 전동기를 제작하여 여러 가지 운전 특성을 측정·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인가 주파수를 증가시키에 따라 카드 이송속도는 증가하여 58.4 kHz에서 최대값 19.8 cm/s를 나타내었다가 다시 감소하였다. 따라서 주파수에 의한 전동기의 이송속도 조절이 가능하다.

(2) 두 인가 전압의 위상차가 90°인 경우 우측방향(x방향)으로 19.8 cm/s의 최대 카드 이송속도를 나타내었으며, -90°인 경우 좌측방향(-x방향)으로 15.6 cm/s의 최대 카드 이송속도를 나타내었다. 그러므로 두 전압의 위상차를 이용하여 초음파 전동기를 좌우 양방향으로 쉽게 구동시킬 수 있음을 확인하였다.

(3) 인가 전압이 높아질수록 전동기의 이송속도가 증가하므로 전압 제어에 의한 이송속도 조절이 가능하다.

(4) 카드 이송력도 인가 전압이 증가함에 따라 증가하였으며, 60 V일 때 이송력은 402 mN이었다.

(5) 토크가 0.8 mN·m일 때 효율은 2.14 %이었다.

이러한 결과로부터 공중 전화카드나 신용카드의 이송기기, 지하철 개찰기의 승차권 이송기기 등으로 충분히 응용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 김진수, 이명훈 공역, 초음파 전동기의 이론과 응용, 성안당, pp. 120-122, 2000.
- [2] K. Uchino, Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors, Kluwer Academic Publishers, Boston, p. 267, 1997.
- [3] 이종섭, 정수현, 임기조, 임태빈, 강성택, 채홍인, "L₁-B₄ 진동모드를 이용한 평판형 선형 초음파 모터의 설계 및 시제작", 전기전자재료학회논문지, Vol. 11, No. 10, pp. 861-865, 1998.
- [4] 김태열, 김범진, 박태곤, 김명호, Kenji Uchino, "L₁-B₄ 샌드위치형 진동자를 이용한 선형 초음파 모터의 설계 및 특성", 전기전자재료학회논문지, Vol. 13, No. 12, pp. 1025-1031, 2000.
- [5] Y. Tomikawa, T. Nishitsuka, T. Ogasawara, and T. Takano, "A Paper or Card Forwarding Device Using a Flat-Type Ultrasonic Motor", Sensors and Materials, 1-6, pp. 359-379, 1989.

- [6] 이명훈, 김진수, "L₁-B₄ 모드를 이용한 선형 초음파 전동기의 시제작과 속도 특성", 대한전기학회 충북지부 춘계학술대회 논문집, 충주대학교, pp. 21-24, 2000.
- [7] T. Sashida and T. Kenjo, An Introduction to Ultrasonic Motors, Clarendon Press, Oxford, pp. 17-24, 1993.
- [8] 指田年生, 見城尚志 공저, 超音波モーター入門, 統合電子出版社, pp. 187-193, 1991.
- [9] Jin-Soo Kim, Man-Ju Park, Kenji Uchino, "Composite Ultrasonic Motors Using a Piezoelectric Disc and an Elastic Body of 'Windmill' Type", Ferroelectrics, Vol. 232, pp. 185-190, 1999.
- [10] 김영균, 김진수, "풍차형 초음파 전동기의 회전자에 인가된 힘이 회전특성에 미치는 영향", 전기전자재료학회논문지 Vol. 13, No. 5, pp. 390-395, 2000.
- [11] 박만주, 김진수, "단상 초음파 전동기의 공진 및 진동 속도 특성에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지 Vol. 12, No. 4, pp. 312-318, 1999.

저 자 소 개



이 명 훈 (李明薰)

1968년 7월 7일 생. 1991년 충남대 전기공학교육학과 졸업. 2001년 한국교원대 대학원 기술교육과 졸업(석사). 현재 서초전자고등학교 전자과 교사. 현재 서울대 농·산업교육과 박사과정 재학

Tel : 02-522-4074
E-mail : lee6877@hanmail.net



김 진 수 (金鎭洙)

1960년 9월 6일 생. 1986년 인하대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1989년-1992년 경원전문대 전기과 조교수. 1996년-1997년 Pennsylvania State University(Post-doc). 1992년~현재 한국교원대 기술교육과 부교수. 현재 대한공업교육학회 편집위원장. 주관 심분야: 초음파 전동기, 압전세라믹 액츄에이터, 전기교육, 공업교육, 기술교육 등.

Tel : 043-230-3743, Fax : 043-230-3787
E-mail : jskim@cc.knue.ac.kr