

L1-B4 진동모드를 이용한 평판형 선형 초음파 모터의 설계 및 시제작

논문
11-10-18

Design and Trial Fabrication of Plate-Type Linear Ultrasonic Motor Using L1-B4 Vibration Mode

이종섭*, 정수현**, 임기조*, 임태빈***, 강성택***, 채홍인***

(J. S. Lee, S. H. Jeong, K. J. Lim, T. B. Im, S. T. Kang, H. I. Chae)

Abstract

A plate-type linear ultrasonic motor using longitudinal and bending multi-vibration mode was designed and fabricated for the application to card-forwarding device. The stator consisted of PZ-PT-PMS piezoelectric ceramic plate and stainless steel. The performances of the motor were measured. As the experimental results, no-load speed of the motor was 0.6 m/s when applied voltage was 80 V_{rms} in resonance frequency. Starting torque was 1.4 mNm and maximum efficiency was 1.2 %.

Key Words (중요용어) : Longitudinal Mode(종진동모드), Bending Mode(굴곡진동모드), Plate-type Linear Ultrasonic Motor(평판형 선형 초음파 모터)

1. 서 론

최근 압전 세라믹 기술의 급속한 발전과 함께 압전체를 이용한 압전 디바이스의 개발도 급속하게 이루어지고 있다¹⁻²⁾. 특히, 초음파 모터 분야가 그러하다. 초음파 모터는 압전 세라믹의 초음파 진동을 이용하여 회전자와 고정자의 마찰력을 매개로 하여 기계적인 출력을 얻는다. 이런 초음파 모터는 H. V. Barth가 최초로 제안하였고 1980년 T. Sashida의 썩기형 초음파 모터에 의해 비약적으로 발전하게 되었다. 그 후 진행과를 이용한 초음파 모터의 개발 등이 이루어졌다. 이 때부터 초음파 모터의 연구가 본격적으로 시작되었고 다양한 초음파 모터의 개발 및 실용화가 이루어졌다. 실용화의 대표적인 예는

Canon사의 카메라에 장착된 자동 초점용 링형 초음파 모터이다.

초음파 모터는 기존의 전자식(電磁式) 모터에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있다. 그 장점을 살펴보면, 저속에서 고토크를 내고, 단위 중량당 기계적 출력이 매우 크며(5 ~ 10배), 마찰력을 이용하므로 이동자의 관성이 매우 낮아서 기동 및 정지시에 응답 특성이 매우 우수하다. 또한, 자계에 의한 영향이 거의 없다. 저속에서 안정한 운전이 가능하므로 감속기어가 필요없다³⁻⁶⁾.

이와 같이 초음파 모터는 전자식 모터에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있기 때문에 특정 응용 분야에서는 앞으로 크게 각광 받을 수 있을 것으로 기대되고 있다.

특히, NASA에서는 우주공간에서 보편적으로 사용되고 있는 전자식 스텝핑 모터를 대체하기 위해 초음파 모터를 개발, 응용하고 있다⁷⁾.

본 논문에서는 카드전송장치로서 L1-B4 진동모드를 이용한 평판형 선형 초음파 모터를 제작하였고, 제작한 초음파 모터의 부하 특성, 속도 특성 등을 측정, 검토하였다.

* : 충북대학교 전기공학과

(충북 청주시 개신동 산 48, Fax:0431-261-2424

E-mail : kjlim@trut.chungbuk.ac.kr)

** : 대원공과대학 전기과

*** : 전자부품종합기술연구소

**** : 주성대학 전기과

1998년 7월 22일 접수, 1998년 9월 19일 심사완료

<'98 춘계학술회에서 우수논문으로 추천됨>

2. 평판형 선형 초음파 모터의 동작원리

일반적으로 초음파 모터는 회전자와 고정자의 마찰력을 매개로 회전이나 선형운동을 하게 되며, 압전 세라믹의 형태, 이용하는 진동모드와 파의 종류에 따라 분류할 수 있다. 특히, 링형과 디스크형 초음파 모터를 비교해 보면 링형 초음파 모터는 진행파를 이용하고 디스크형 초음파 모터는 정재파를 이용하므로 압전 세라믹의 형태나 이용하는 파의 종류는 다르다. 그러나, 공통점으로는 탄성체 표면에 타원운동을 유기시키는 것은 동일하다⁸⁾.

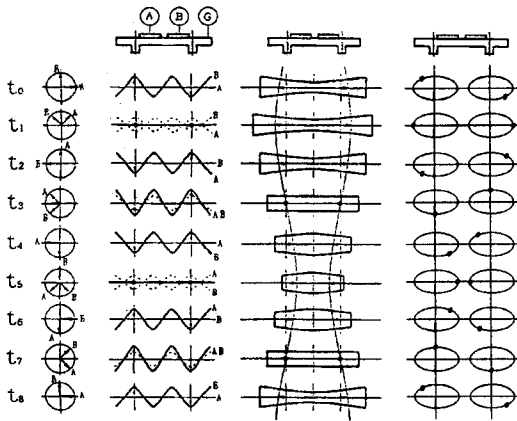


그림 1. 평판형 초음파 모터의 동작원리
Fig. 1. Operation principle of plate-type ultrasonic motor

그림 1은 평판형 선형 초음파 모터의 동작원리를 시간에 따라 도식적으로 보이고 있다. 이 평판형 선형 초음파 모터는 종진동(L1)모드와 굴곡진동(B4)모드를 이용한다. 그림 1에 보이듯이 분극방향을 서로 반대가 되도록 한 2개의 segment를 갖는 압전 세라믹 판을 탄성체에 붙이고 각각의 압전 세라믹에 2상의 전기적 신호를 인가하면 시간에 따라 탄성체 표면에는 1차 종진동과 4차 굴곡진동이 동시에 발생하게 된다. 이와 같은 종진동과 굴곡진동에 의한 변형을 합성하여 시간에 따라($t_0 \sim t_8$) 나타내면, 그림 1의 우측 그림에서 보듯이 탄성체의 표면에 타원운동이 발생하게 된다. 이 질점에 롤러를 설치하여 수직가압하면 롤러는 회전하게 된다. 이것이 평판형 선형 초음파 모터의 동작원리이다.

평판형 선형 초음파 모터도 일반적인 초음파 모터와 마찬가지로 고정자, 회전자(롤러), 마찰재로 구성

된다.

이런 구성 요소 중 압전 세라믹과 탄성체로 이루어지는 고정자는 초음파 모터의 가장 핵심적인 부분이라 할 수 있다. 고정자 설계시 고려해야 할 사항 중 하나로 탄성체의 기하학적 크기가 있다. 탄성체는 종진동과 굴곡진동의 공진주파수를 고려하여 설계하였다. 1차 종진동모드와 n차 굴곡진동모드의 공진주파수는 식(1)에 의해 결정된다³⁻⁴⁾.

$$f_{L1} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$f_{Bn} = \frac{\alpha_n^2 t}{4\pi\sqrt{3} l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} : \alpha_n \approx \left(\frac{2n+1}{2}\right)\pi \quad (1)$$

여기서 E, ρ , l, t는 각각 탄성체의 영률, 밀도, 길이, 두께를 나타낸다. 1차 종진동모드와 n차 굴곡진동모드의 공진주파수가 일치할 때 가장 좋은 효율을 얻을 수 있으므로 본 연구에서는 탄성체 설계시 $f_{L1} = f_{B4}$ 조건을 고려하여 탄성체 크기를 설계하였다. 따라서, 식(1)에서 설계 조건을 만족시키는 식(2)를 도출할 수 있다.

$$l = \alpha_4^2 t / 2\pi\sqrt{3} \quad (2)$$

식(2)로부터 탄성체의 길이와 두께를 결정할 수 있다. 설계된 탄성체의 크기는 $48 \times 10 \times 2.6 \text{mm}^3$ 이다.

3. 실험

3.1 평판형 초음파 모터의 고정자

본 연구에서는 고정자를 제작하기 위해 고진동 레

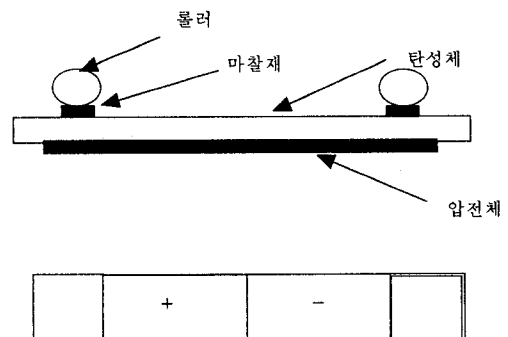


그림 2. 고정자의 구성도
Fig. 2. Structure of the stator

벨에서의 압전 특성이 우수한 것으로 알려져 있는 PZ-PT-PMS의 삼성분계 조성을 이용하였는데, 이 조성의 전기적 기본 특성을 표 1에 나타낸다⁹⁾. 또한, 밀도가 균일한 평판형 압전 세라믹을 제조하기 위해 CIP(Cold Isotropic Press)를 이용하고 44mm×10mm×0.5mm 크기의 압전 세라믹을 만들었다.

제조된 압전 세라믹 판은 4개의 segment로 분할 하였으나 그림 2에 보이듯이 2개의 segment만을 서로 분극 방향이 반대가 되도록 80 ~ 100 °C의 절연 유층에서 4 kV/mm의 전계하에서 분극하였다. 압전 세라믹에 탄성체를 에폭시((株)昭和高分子)를 이용하여 상온에서 접착하여 고정자를 제작하였다. 그림 2는 고정자의 구조이다. 그림 2에서 탄성체와 물리는 stainless steel(밀도 : $8.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 영율 : $10.2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$)로 만들었다. 최대변위점에 마찰재로서의 성능이 우수한 PPS(Polyphenylene Sulfide)를 접착력이 우수한 에폭시로 부착하였다¹⁰⁾.

3.2 평판형 초음파 모터의 구동 및 측정

평판형 초음파 모터의 구동, 주파수 및 부하를 측정하기 위한 블록도를 그림 3에 나타내었다. 2상 구동을 위해 A상(sin상)과 B상(cos상)의 90° 위상차를 갖는 전기적 신호를 Universal Source(HP 3245A)에서 발생시켜 Power Amplifier(NF 4015)를 통해 증폭하였다. 또한, 이때 흐르는 전류는 전류 프로브를 이용하여 측정하였다. Universal Source를 이용하여 주파수와 입력 전압을 가변시키면서 입력 전류가 최대치를 보이는 주파수를 공진주파수로 정하였다. 또한, 속도-부하 특성은 롤러에 실을 부착시키고 무게 m [gf]의 물체를 매다는 방식으로 기계적 부하를 주면서 이 때의 속도를 타코메타로 측정하였다.

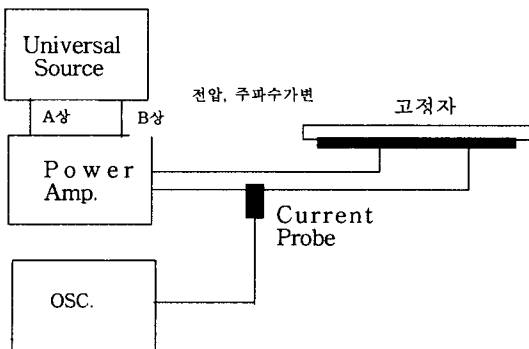


그림 3. 평판형 선형 초음파 모터의 구동 블록도
Fig. 3. Block diagram for driving plate-type linear ultrasonic motor

4. 실험결과 및 논의

4.1. 주파수 특성

초음파 모터는 압전 세라믹의 공진현상을 이용하고 효율을 고려하여 공진주파수 근처에서 구동을 한다. 일반적으로 압전 세라믹의 공진주파수는 임피던스 어닐라이저를 이용하여 측정하게 된다.

표 1. 저전계하에서의 압전 세라믹의 특성
Table 1. Characteristics of piezoelectric ceramic under low electrical field

Resonance Frequency	38.1kHz
R	64.2812Ω
C	649.785pF
C _d	6.61444mF
L	27.2638mH
k ₃₁	0.5
Q _m	1200

표 1은, 본 실험에 사용된 압전 세라믹의 저전계하에서의 특성을 나타낸 것이다. 표 1에서 알 수 있듯이 압전 세라믹의 공진주파수는 38.1 kHz이다. 그러나, 압전 세라믹의 공진주파수는 탄성체의 부착여부, 인가전계에 따라서 변화한다. 그림 4는 입력 전압 80 V_{rms}를 인가했을 때 주파수에 따른 속도와 전류

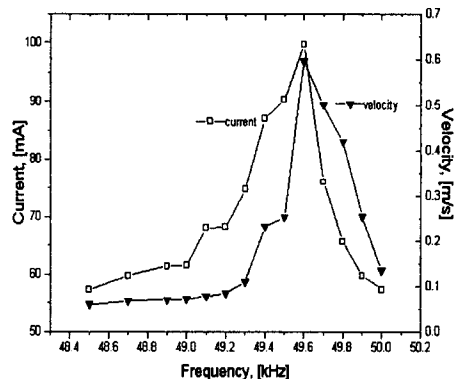


그림 4. 인가 주파수에 따른 입력전류 및 속도
Fig. 4. Current and speed as a function of applied frequency at applied voltage 80V

를 나타내고 있다. 주파수가 증가할수록 입력전류와 속도는 서서히 증가하였으며 49.6 kHz에서 최대치를 나타내고 있다. 공진시의 전류는 99.7 mA이고 속도는 약 0.6 [m/s]이다. 저전계하에서 압전세라믹 단독 일 때의 공진주파수와 탄성체를 부착하였을 때의 공진주파수는 많이 상이함을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 탄성체를 부착함에 의해 압전 진동자에는 질량의 변화가 생기므로 공진주파수 또한 변화하게 된다. 또한, 그림에서 알 수 있듯이 주파수를 변화함에 따라 속도가 변화하므로 인가 주파수를 변화시켜 속도를 제어할 수도 있다¹¹⁾.

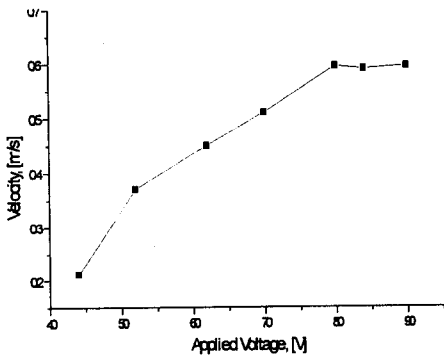


그림 5. 인가전압에 따른 속도의 변화
Fig. 5. Speed as a function of applied voltage

그림 5는 인가전압에 따른 속도의 변화를 보이고 있다. 이 그림에서 80 V_{rms}까지는 인가전압과 속도는 선형적인 관계를 보이지만 80 V_{rms}이상에서는 포화되고 있음을 알 수 있다.

저전계하에서는 압전 세라믹의 진동속도와 인가전압은 선형적인 관계에 있다. 그러나, 고전계하에서의 압전 세라믹의 진동속도는 레이저 진동계를 이용하여 측정된 결과에 의하면 인가전압에 비선형적임을 보이고 있다. 이와 같은 이유는 기계적 품질 계수와 압전 세라믹의 온도를 측정함으로써 알 수 있는데 진동레벨을 증가함에 따라 기계적 품질 계수는 급격하게 감소하고 온도는 지수함수적으로 증가한다. 즉, 어느 진동레벨을 넘게 되면 진동 손실 에너지만이 증가하게 되고 따라서 인가전압과 진동속도와의 관계는 선형성에서 이탈하여 포화된다¹²⁻¹³⁾. 이와 같은 압전 세라믹의 비선형성에 의해 압전 진동자에서도 어느 전압이상에서는 그림 5와 같이 인가전압과 속도의 관계에는 비선형성이 발생한다.

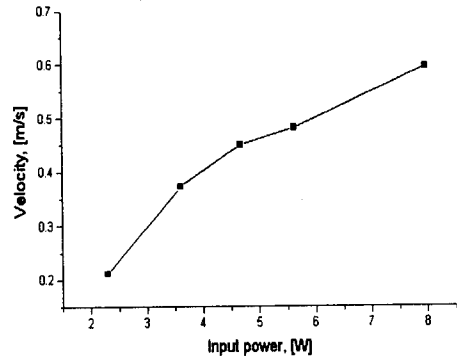


그림 6. 입력 전력에 따른 무부하 속도
Fig. 6. No-load speed as a function of input power

그림 6은 입력 전력에 따른 무부하 속도의 변화를 보이고 있다. 이 때의 구동 주파수는 49.6 kHz이다. 입력이 증가함에 따라 속도는 거의 선형적으로 증가하였다. 79 W(80 V_{rms})에서의 속도는 0.6 m/s이다.

그림 7은 부하에 따른 속도의 변화를 보이고 있다. 입력전압은 80 V_{rms}이고 주파수는 49.6 kHz이었다. 부하가 증가함에 따라 속도가 감소하는 수하특성을 보이고 있다. 무부하시 속도는 약 0.6 m/s이고, 최대효율은 약 1.2 %정도이다. 최대효율일 때의 토크는 0.7 mNm이며 속도는 0.25 m/s이다.

현재 국내의 공중전화카드의 무게가 약 2 g 정도 인 것을 감안하면 카드전송용 기구로 응용 가능함을

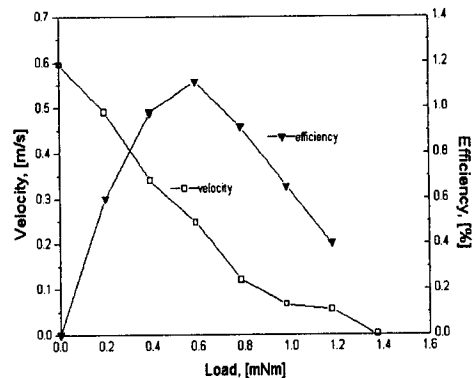


그림 7. 토크에 따른 속도와 효율
Fig. 7. Speed and efficiency as a function of torque

알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 카드전송용 디바이스의 응용을 목적으로 기존의 초음파 모터와는 그 형태가 다른 평판형 선형 초음파 모터를 제작하고 성능을 검토하였다. 이 모터는 종진동모드와 굴곡진동모드를 이용한 모터로서 종래의 진행파나 정재파를 이용하는 디스크형, 링형, 원통형 모터와는 상이하다. 구성은 압전 세라믹과 탄성체가 고정자를 이루고 그 위에 롤러를 설치하여 가압한다. 이런 단순한 형태이므로 기존의 선형운동을 이끌어내기 위한 복잡한 형태의 초음파 모터에 비해 박형화, 소형화, 경량화가 가능하다. 주파수 특성을 살펴보면 압전 세라믹 자체의 공진주파수는 38.1 kHz인데 비해 탄성체를 접착하면 그 공진주파수는 49.6 kHz로 상당히 변화하게 된다. 공진주파수 근처에서 80 V_{rms}로 구동하였을 때, 무부하시 속도는 0.6 m/s이고 최대효율은 1.2 %이며, 토오크는 0.7 mNm이고, 속도는 0.25 m/s이다. 본 연구에서 시작한 평판형 선형 초음파 모터를 이용하여 현재의 카드전송 디바이스의 응용이 가능할 것으로 생각되나 향후 고효율화를 위한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 산업자원부의 97년 공업기반개발사업의 지원으로 수행되었기에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Junhui Hu, Kentaro Nakamura and Sadauki Ueha, "Optimum Operation Conditions of an Ultrasonic Motor Driving Fluid Directly, JJAP, Vol. 35, No. 115, pp. 3289-3294, 1996.
2. Zhigang Yang, Katsuyoshi Susuki and Guangming Cheng, "Ultrasonic Motor Using a Plate Vibrator with Projections", 日本機械學會論文集, Vol. 62, No. 602, pp. 3938 - 3943, 1996.
3. S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa and N. Nakamura, "Introduction to Ultrasonic motor", OXFORD, 1993.
4. S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa and N. Nakamura, "Ultrasonic Motors - Theory and Applications", OXFORD, 1993.
5. Shoji Isobe, Masakatsu Takemoto and Ichiro Takano, "A Study of Ultrasonic Motor", 工學院大學研究報告第 72号, pp. 113 - 123, 1984.
6. Yoshiro Tomikawa, Takashi Nishitsuka, Toshiharu Ogasawara and Takehiro Takano, "A Paper or Card Forwarding Device Using a Flat-Type Ultrasonic Motor", JJAP, Vol. 1, No. 4, pp. 359 - 365, 1989.
7. R. Le Letty, F. Claeysen, F. Barillot, M. F. Six, P. Bouchilloux, "A New Amplified Piezoelectric Actuator for Precise Positioning and Semi-Passive Damping", 2nd Space Microdynamics & Accurate Control Symp., pp. 389 - 401, 1997.
8. Tomoaki Sakuma, Takemitsu Aya and Tomio Kotaki, "Ultrasonic Linear Motor using Anisotropic Elastic Material", 日本時計學會誌, Vol. 15, No. 152, pp. 5 - 18, 1995.
9. D. J. Lee, S. H. Jeong, D. W. Shin, K. J. Lim, H. H. Kim, S. G. Park, "Piezoelectric Characteristics of PZ-PT-PMS Ceramics for Large Displacement Application", ICEE'97, pp. 415 - 418, 1997.
10. Robert W. Messler, Jr., "Joining of Advanced Materials", ISUM, pp. 553 - 559, 1993
11. Katsuyoshi Suzuki, Tatsuichi Hiromoto and Tadashi Kosawada, "Ultrasonic Motor using a plate Vibrator with Displacement Amplification Mechanism", JJAP, Vol. 28, No. 6, pp. 23 - 28, 1993.
12. S. Takahashi, S. Hirose and K. Uchino, "Stability of PZT Piezoelectric Ceramic under Vibration Level Change", JJAP, Vol. 77, No. 9, pp. 2429-2432, 1994.
13. S. Takahashi and S. Hirose, "Vibration-Level Characteristics of Lead-Zirconate-Titanate Ceramics", JJAP, Vol. 31, No. 9, pp. 3055-3057, 1992.