

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.9.869

압전 소자를 이용한 선형 모터 설계 및 제작

조재욱*, 황재혁**, 김병규**

Design of a Linear Motor using Piezoelectric actuator

Jae-Uk Jo*, Jai-Hyuk Hwang** and Byung-Kyu Kim**

ABSTRACT

Recently, a piezo actuator based linear motor has been actively studied because of its higher power density, compactness and quick response. However, the characteristic of small displacement makes the application of a piezo actuator limitative. In order to overcome this limitation, some actuation mechanisms using a piezo actuator are designed by bi-metal composite or more than two piezo actuators. Therefore, it enables to generate large displacement and have high resolution. In the proposed piezo motor, we have designed a bi-directional linear motor that can be operated by only one piezo actuator. In addition, it is activated with low frequency of the applied voltage, since, we utilize first mode shape of structure of motion generator to vibrate. Finally, moving direction can be simply controlled by changing the ratio of input frequency to natural frequency of structure of motion generator.

초 록

압전 소자는 부피에 비해 발생 힘이 크고 빠른 응답 특성을 갖기 때문에, 최근 압전 소자를 이용한 모터의 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 발생 변위가 작아, 압전 소자의 직접적인 변위 특성을 이용하는 것에 한계가 있다. 따라서 큰 변위를 확보하기 위해, 바이메탈을 사용하거나 한 개 이상의 압전 소자를 사용한 모터가 연구되었다. 본 연구를 통해 제안된 선형 모터는 구동부의 첫 번째 모드 형상을 이용하기 때문에 낮은 구동 주파수에서 작동이 가능하다. 또한 한 개의 압전 소자를 사용하여, 구동 주파수와 구동부의 공진 주파수 비에 따라 모터의 방향을 제어할 수 있도록 고안되었다.

Key Words : Frequency ratio(주파수 비), Linear motor(선형 모터), Natural frequency(공진 주파수), Phase difference(위상차), Piezo actuator(피에조 액추에이터)

기 호

A	: 과도 응답의 진폭	Θ	: 정상 응답의 위상
ϕ	: 과도 응답의 위상	ζ	: 감쇠비
X	: 정상 응답의 진폭	ω_n	: 고유 진동수
		ω_d	: 감쇠 고유 진동수
		ω	: 구동 진동수 (구동 주파수)
		x_0	: 초기 위치
		v_0	: 초기 속력
		f_0	: 단위 질량 당 가진력

† 2010년 8월 2일 접수 ~ 2010년 8월 21일 심사완료

* 정회원, 한국항공대학교 기계공학과 대학원

** 정회원, 한국항공대학교 기계공학과
교신저자, E-mail : bkim@kau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

I. 서 론

압전 소자는 전원을 인가하면 분극 방향을 따라 변형이 일어나는 특성이 있다. 이러한 압전 소자를 액추에이터에 적용하였을 경우, 얻을 수 있는 이점은 다음과 같다. PZT 액추에이터는 일반적인 액추에이터와 달리 기어가 필요 없으며, 부피 및 중량 대비 큰 출력을 얻을 수 있다. 또한 구동 및 정지에 즉각적인 반응을 할 수 있고, 출력 변화가 작기 때문에 정밀한 위치제어가 가능하다[1]. 이러한 PZT 액추에이터의 특성 때문에 최근 이를 이용한 항공우주용 모터의 개발이 활발하게 이루어지고 있다[2]. 특히, Elliptec, Nanomotion, Phsikinstrument 같은 회사들은 PZT를 이용한 모터를 제작하여 상용화하고 있다 [3]. 하지만 PZT가 발생시키는 작은 변위와 구동부의 마찰에 의한 마모, 높은 구동 주파수 등의 한계가 있기 때문에 PZT 모터의 성능 향상을 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 일반적인 PZT 모터의 특징은 스테이터의 타원형 움직임에 의해 로터의 직선 운동 혹은 회전 운동이 발생된다는 것이다. 이러한 타원형 운동을 유발하기 위해 두 개 이상의 PZT를 사용하거나[4][5], 바이메탈의 변형률 차를 이용하여 굽힘 운동을 발생시키는 방법[6]등이 주로 사용된다. 본 연구는 모터의 구동 시스템을 간소화하기 위해 PZT 한 개를 이용한 선형 모터를 제안한다. 기존에 이미 PZT 한 개를 사용하여, PZT를 지지하는 구조물의 모드 형상을 이용하는 모터가 상용화 되어 있으나[7], 수십 kHz 이상의 구동 주파수를 필요로 한다. 이는 전자회로 구성에 고비용을 요구하므로 이와 차별화하기 위해서 본 연구에서는 1차 모드 부근에서 나타나는 시간 응답의 위상차를 이용하여 방향 제어가 가능하고, 1kHz 이내의 낮은 구동 주파수를 이용하여 구동이 가능한 선형 모터를 제안한다.

II. 본 론

2.1 구조

고안된 선형 모터는 Fig 1과 같은 형상의 구동부 사이에 PZT를 고정시켜, PZT로부터 발생하는 힘을 이동부에 직접적으로 전달시킬 수 있도록 설계되었다. 또한 PZT에 의해 발생한 구동부의 타원 운동을 효율적으로 이동부에 전달시키기 위하여 구동부의 끝을 돌출시켜 선 접촉을 유도하였다. Fig 2는 선형 모터의 구성품을 나타낸다.

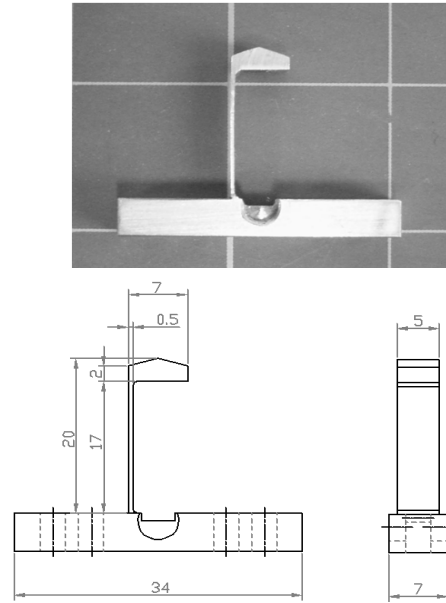


Fig. 1. Motion generator

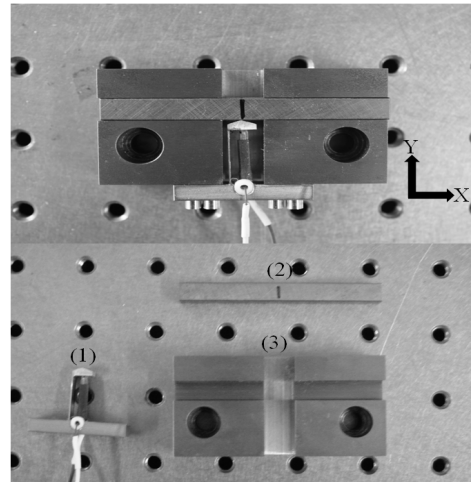


Fig. 2. Components of the Motor
(1)Motion generator, (2)Moving element,
(3)Guide

선형 모터는 PZT를 구속하고, 모터를 구동 시키는 구동부(Motion generator)와 구동부에 의해 선형 움직임을 일으키는 이동부(Moving element), 이동부의 이탈을 방지하고 이동부와 마찰력을 발생시켜 전진 및 후퇴를 일으키는 가이드(Guide)까지 총 세 부분으로 구성된다. PZT 액추에이터는 절연을 위해 수축 튜브를 사용하여 전극을 외부와 차단하였으며, 구동부에 구속시키기 위해 PZT의 끝단이 위치하는 부분에 무두볼트를 체결

하여 고정할 수 있도록 설계하였다. 이동부 및 이동부의 이탈을 방지해주는 가이드는 마찰을 줄이고, 구동부와와의 마찰을 작게 하기 위해 고탄소강을 소재로 제작하였다.

2.2 작동 원리

PZT 선형 모터의 기본적인 이동 원리는 PZT 액추에이터의 주기적인 길이 변화에 의한 구동부와 이동부 간의 stick & slip 현상이며, Fig 3에 도시하였다. PZT 액추에이터의 변위가 증가하면, 사전 하중의 증가로 인해 구동부와 이동부 간의 마찰력이 증가하여, 밀립(stick) 현상이 발생한다. 반대로, PZT 액추에이터의 변위가 감소하면, 마찰력이 감소하여, 구동부와 이동부 사이에는 미끄러짐(slip)이 발생한다. 따라서 이동부의 방향을 결정하기 위한 중요한 변수는, PZT 액추에이터의 변위가 증가하는 구간에서 구동부의 x방향 변위이며, 이에 대한 해석이 필요하다. PZT 액추에이터의 진동에 의해 나타나는 구동부 끝의 x방향 감쇠 강제 조화 응답은 다음과 같다[8].

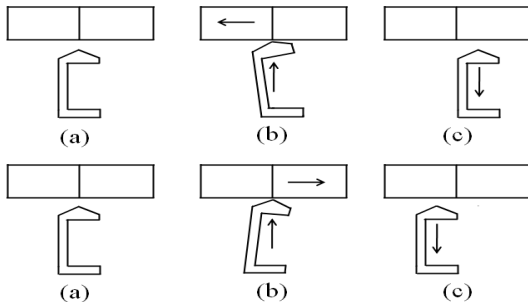


Fig. 3. Moving by stick & slip
(a)Initial, (b)stick, (c)slip

$$x(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) + X \cos(\omega t - \theta)$$

$$\left[\begin{aligned} \phi &= \tan^{-1} \frac{w_d(x_0 - X \cos \theta)}{v_0 + (x_0 - X \cos \theta)\zeta\omega_n - \omega X \sin \theta} \\ A &= \frac{x_0 - X \cos \theta}{\sin \phi}, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{2\zeta\omega_n \omega}{\omega_n^2 - \omega^2} \\ X &= \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n \omega)^2}} \end{aligned} \right]$$

여기서 정상상태의 위상각 θ 를 진동수비 r 의 함수로 표현하면,

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\zeta r}{1 - r^2}, \quad r = \frac{\omega}{\omega_n}$$

이다. 감쇠비 ζ 값에 따른, 진동수비 r 에 대한 위상각 θ 의 값을 도시하면, 감쇠비 ζ 와 진동수비 r 에 따른 응답 함수의 위상차 발생 경향을 알 수 있다[8]. 주목할 점은 감쇠비 ζ 가 0.01일 경우, 응답함수의 위상이, 구동 진동수와 고유 진동수가 같아지는 $r=1$ 인 점을 기점으로 약 180° 변한다는 것이다. 즉, 구동부의 x축에 대한 거동 방향이 반대가 되는 것이다. 따라서 고안된 PZT 선형 모터는, 공진 주파수를 기점으로 이동 방향을 효과적으로 제어할 수 있도록 감쇠비 ζ 를 0.01에 가깝게 설계하였다. 또한 실제, PZT 액추에이터의 진동에 의해 나타나는 구동부 끝의 응답은 x, y방향의 2자유도계지만, 구동부의 감쇠비 ζ 가 0.01에 가깝게 설계되었고, PZT 액추에이터의 발생 변위가 $15\mu\text{m}(100\text{V})$ 로 매우 작기 때문에, 구동부 끝의 y방향 응답은 PZT 액추에이터의 신호와 같다고 가정할 수 있다. 따라서 PZT 액추에이터에 의한 구동부의 거동은 x방향의 1자유도 강제 조화 진동으로 모델링 할 수 있다. 이를 바탕으로 모드 해석(modal analysis)을 통해 구동부의 공진 주파수를 찾고, 시간응답해석(time response analysis)과 이동부의 가속도 측정 결과를 비교하여 PZT 선형 모터의 이동 양상을 예측, 검증하였다.

2.3 모드 해석(Modal analysis)

PZT를 지지하는 ‘c’형 구동부의 x방향 1차 공진 주파수와 모드 형상을 알아보기 위해 ANSYS v12.0을 사용하여 모드해석을 수행하였다. 구동부의 해석은 밀도 4.5g/cm^3 , 탄성계수 235Gpa , 포아송비 0.313인 고탄소강을 소재로 하여 수행되었으며, x방향 첫 번째 공진 주파수는 573.6Hz 로 나타났다. 일반적으로 가늘고 긴 기둥에 압축력이 작용하면, 기둥의 강성은 작아진다[9]. 이는 압축력이 작용할 경우, 기둥의 공진 주파수가 작아짐을 의미한다. 따라서 사전 하중(preload)이 증가할수록, 구동부의 공진 주파수는 작아지며, Table 1의 해석 결과를 통해 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 선형 모터는 주파수 제어를 설계 목표로 하기 때문에, 앞서 설명한 사전 하중에 의한 공진 주파수의 변화를 배제해야 할 필요성이 발생한다. 따라서 구동부에 작용하는 사전 하중을 일정하게 제한하였다.

Table 1. 1st modal frequency

Preload (gf)	0	50	100	150	200	300
1 st modal frequency (Hz)	573.6	569.39	567.59	565.77	563.95	560.29

2.4 시간 응답 해석(Time response analysis)

PZT 선형 모터 구동부의 방향성을 예측하기 위해, 구동부의 모델을 x방향 1자유도로 가정하고, ANSYS v12.0을 사용하여 입력 주파수 300Hz~1kHz 사이의 x방향 변위를 해석하였다. 또한 y방향의 변위는 입력 주파수의 위상과 일

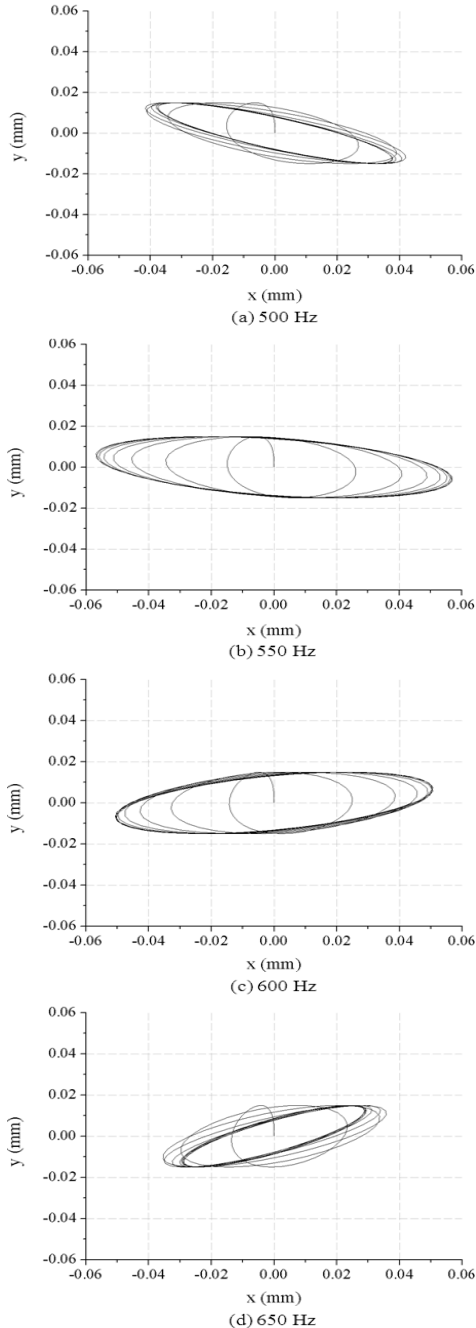


Fig. 4. Time response analysis

치한다는 가정 하에, y방향 변위를 계산하여, y 방향 변위에 대한 x방향 변위 값을 Fig 4에 도시하였다. y방향 변위가 증가하는 구간이 앞서 설명한 밀립 현상이 일어나는 구간이며, 이 때 x방향 변위의 변화 양상을 살펴보면, 구동부의 공진 주파수인 573.6Hz 부근을 기점으로, 이동부의 이동방향이 Fig 2의 좌표계를 기준으로 (-)에서 (+)로 변화함을 알 수 있다.

2.5 실험 장치 구성

앞선 FEM 해석에서 알 수 있듯이, PZT 선형 모터는 마찰력에 직접적 영향을 미치는 구동부의 수직방향 사전 하중에 영향을 받는다. 따라서 사전 하중을 가하고, 이를 측정할 수 있는 시스템이 필요하다. Fig. 5는 선형 모터의 성능을 측정할 수 있도록 고안한 실험 장치를 보여준다. 구동부에 발생하는 마찰력을 사전 하중에 의해 발생한 마찰력으로 제한하기 위해, 로드 셀과 이동부의 접점에 베어링을 설치하였다. 선형 모터를 구동하기 위한 구동 시스템은 Fig. 6과 같으며, 주기적 신호를 입력하기 위한 함수 발생기(Tektronix AFG 3252)와 입력 신호를 PZT의 정격전압(100V)으로 증폭하기 위한 앰프(PI E-663 LVPZT-Amplifier)로 구성된다. 또한 실험에 사용된 PZT 액추에이터는 입력 전압 100V에서 15 μ m의 변위 특성을 가지는 PI(Physik Instrument)사의 P-882.50 모델을 사용하였다.

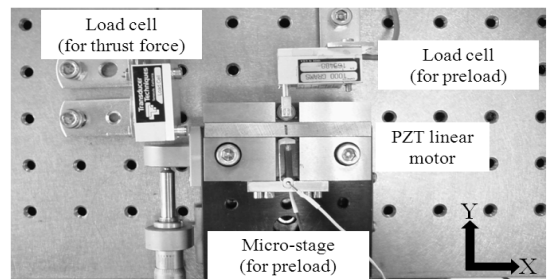


Fig. 5. Motor configuration of the experiment

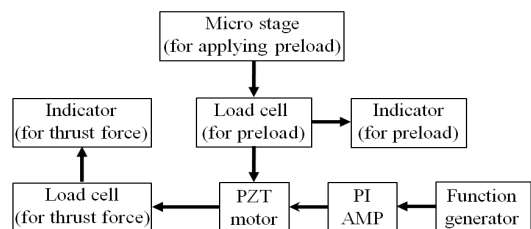


Fig. 6. System configuration of the experiment

2.6 이동부 가속도 실험

이동부의 방향성을 예측하기 위한 가정과 해석에 의한 주파수별 이동 방향을 검증하기 위해 이동부의 가속도를 측정하였다. 가속도계(Bruel & Kjaer 4525-B-001)에 의해 측정된 값의 부호는 이동 방향을 직접적으로 나타내주기 때문에, 입력 주파수에 대한 이동부의 이동 방향을 확인할 수 있다. 이동 방향의 판단은, 이동부에 부착된 가속도계의 응답 신호로부터, 주기적인 반복성을 나타내는 임의의 정상상태 한 주기 신호를 적분하여, 결과 값의 부호로부터 판단하였다. Fig. 7 은 이동부의 가속도 실험으로부터 판단한 이동 방향을 도시한 것이며, 공란은 적분 값이 0에 근접하여 이동 방향을 단언할 수 없는 주파수 대역이다. 앞선 시간응답 해석 결과, 이동부의 이동 방향은 구동부의 공진 주파수를 기점으로 (-)에서 (+) 방향으로 바뀔 수 있었다. 가속도 실험 역시 해석을 통한 이동 방향의 예측과 동일한 결과를 얻을 수 있었고, 이로부터 1자유도계 모델링의 타당성을 검증할 수 있었다.

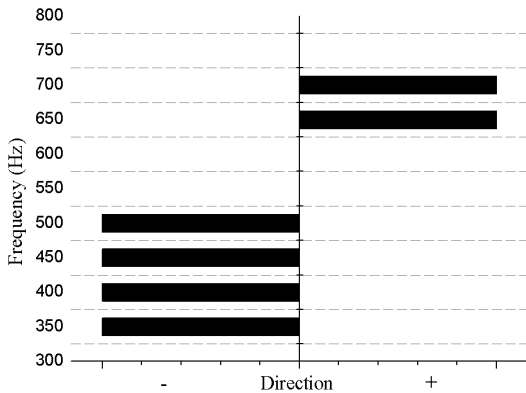


Fig. 7. Direction of the moving element by acceleration experiment

2.7 구동 속도 측정

앞선 모드 해석을 통해, 사전 하중의 변화에 따라 구동부의 공진주파수 역시 이동함을 알 수 있었다. 고안된 PZT 선형 모터의 설계 목표는 구동 주파수에 의한 방향 제어이기 때문에, 사전 하중을 일정하게 제어할 필요성이 있다. 따라서 모터의 성능 실험에 앞서, 사전 하중을 일정하게 제한하였다. 실험 결과, 사전 하중 150gf는 구동부의 양 방향 움직임이 가장 원활히 나타나는 하중 조건임을 확인 하였다. 따라서 사전 하중을 150gf로 일정하게 유지하며, 주파수별 속도를 측

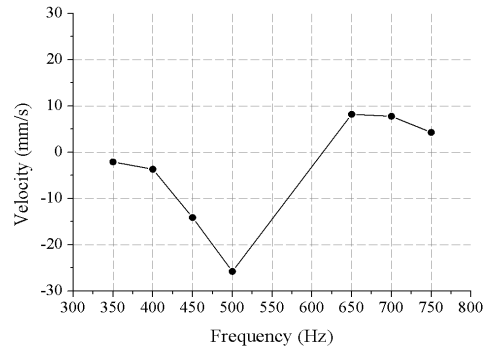


Fig. 8. Average velocity

정 하였다. 실험은 이동부의 이동이 비교적 안정적으로 나타나는 350Hz 부터 50Hz 간격으로, 목표 구동 주파수 범위인 1kHz 내에서 실시하였고, 각 주파수 조건에서 10회씩 반복 실시하여 평균값을 표기 하였다. 550Hz와 600Hz는 (-)방향 이동 특성이 나타나긴 하지만 속도 및 추력 값이 안정성 있게 나타나지 않아, 평균값의 의미가 없기 때문에, 결과에서 제외시켰다. 방향을 정의하는 부호는 Fig. 5에 명시된 좌표계를 기준으로 하였으며, 측정 결과는 Fig. 8에 도시하였다. 실험 결과를 살펴보면, (-)방향에서는 500Hz, (+)방향에서는 650Hz의 속력이 각각 가장 빠름을 알 수 있다. 이는 앞서 작동 원리에서 설명한대로, 사전 하중이 150gf일 때, 구동 주파수가 이동 방향의 변화 기점인 구동부의 공진 주파수 565.77Hz에 근접하기 때문이다. 또한 'c'형의 비대칭적인 구동부 형상 때문에 (+)방향의 이동은 (-)방향에 비해 짧은 주파수 영역에서 나타나며, 그 결과 또한 작음을 확인할 수 있었다.

2.8 추력 측정

앞에서 수행한 PZT 선형 모터의 속도 측정과 같은 방법으로, 일정한 사전 하중 150gf 하에서, 이동부의 추력을 측정하였다. 실험 결과는 Fig. 9

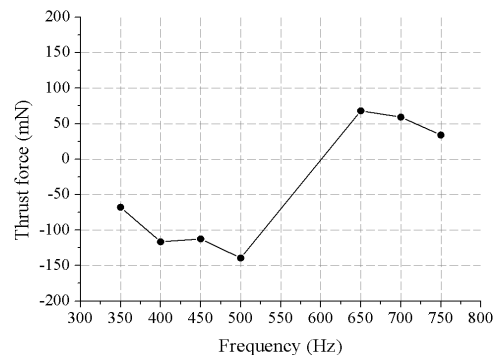


Fig. 9. Average thrust force

에 도시하였으며, 속도 측정 결과와 마찬가지로, 구동 주파수가 구조물의 공진 주파수 565.77Hz에 가장 근접한 500Hz와 650Hz에서 그 값이 각각 크게 측정되었다. Fig. 8과 Fig. 9를 비교해본 결과, 일정한 사전 하중인 150gf 하에서, 구동 주파수에 대한 속도와 추력은 서로 비례 관계에 있음을 알 수 있다.

III. 결 론

전압을 인가하면 변위가 발생하는 압전 소자의 특성을 이용하여 선형 모터를 설계하였다. 제안된 선형 모터는 기존의 상용화된 PZT 모터에 비해 구조가 간단하고 구동 주파수가 낮은 특성을 가지고 있다. 선형 모터의 속도 및 추력에 영향을 미치는 중요한 변수는, PZT 액추에이터에 수직으로 작용하는 사전 하중과 구동 주파수이다. 따라서 반복 실험을 통한 최적 사전 하중을 150gf로 결정하였고, 이를 일정하게 제어함으로써, 설계 목표인 주파수 제어 선형 모터를 제작할 수 있었다. 모터의 방향 별 최적 주파수는 (-)방향 500Hz, (+)방향 650Hz로 도출할 수 있었다. 현재 모터의 성능은 최대 속도 25.79mm/s, 최대 추력 139.3458mN으로 다양한 항공우주시스템의 적용에 다소 한계가 있다. 추후 이러한 모터의 한계를 극복하기 위해서, 동특성이 더 강한 고전압 PZT 액추에이터의 사용 및 모터의 구조적인 개선을 통해 성능과 신뢰성 향상 연구를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 우주원천기술개발사업(the National Space Laboratory Project, 2010-0015077)의 일환으로, 교육과학기술부의 연구비 지원에 의해 수행된 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Scott L. Sharp, "Design of a linear ultrasonic piezoelectric motor", 2006, pp. 1~16.
- 2) P. Janker, F. Claeysen, B. Grohmann, M. Christmann, T. Lorkowski, R. LeLetty, O. Sosniki, A. Pages, "New Actuators for Aircraft and Space Applications", *ACTUATOR 2008*, 2008, pp. 346~354.
- 3) T. Hemsel, M. Mracek, J. Twiefel, P. Vasiljev, "Piezoelectric linear motor concepts based on coupling of longitudinal vibrations", *Ultrasonics 44 (2006)*, 2006, pp. e591~e596.
- 4) Sadayuki Ueha and Minoru Kurosawa, "Ultrasonic Motors", 1988 *IEEE Ultrasonic Symposium*, 1988, pp. 519~522.
- 5) James Friend, Member, IEEE, Kentaro Nakamura, and Sadayuki Ueha, "A Traveling-Wave, Modified Ring Linear Piezoelectric Microactuator with Enclosed Piezoelectric Elements-The "Scream" actuator", *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Vol. 52, No. 8, 2005, pp. 1343~1353.
- 6) Hyun-Phill Ko, Kyong-Jae Lee, Kyoung-Ho Yoo, Chong-Yun Kang, Sangsig Kim and Seok-Jin Yoon, "Analysis of Tiny Piezoelectric Ultrasonic Linear Motor", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 45, No. 5B, 2006, pp. 4782~4786.
- 7) www.elliptec.de/
- 8) Daniel J. Inman, *Engineering Vibration 2nd Edition*, Korean language Edition, 2002, pp. 105~116.
- 9) Leonard Meirovitch, *Analytical methods in vibrations*, 1967, pp. 436~463.