

# 횡자속 선형전동기의 추력특성에 따른 선형액추에이터의 동특성

論 文
55B-1-3

## Dynamic Response of Linear Actuator with the Thrust Force of Transverse Flux Linear Motor

禹炳哲<sup>†</sup> · 姜道鉉<sup>\*</sup> · 洪到瑄<sup>\*</sup>  
(Byung-Chul Woo · Do-Hyun Kang · Do-Kwan Hong)

**Abstract** - The proposed paper presents an integrated linear actuator which combines Transverse Flux Linear Motor(TFLM) for Household electric applications. They both use the same primary magnetic circuit, but they have different secondary movers. The paper presents a new design of linear motor for a new electromagnetic linear actuator, an integrated TFLM. The calculated thrust force is good agreement with experiments. We have studied a transient response of a linear actuator with a damping ratio, spring constant and specially a pressed power patterns for a constant stroke control.

**Key Words** : Longitudinal Flux Linear Motor(LFLM), Transverse Flux Linear Motor(TFLM), Linear Motor Linear Actuator, Motor Axis, Spring Stiffness, ANSYS

### 1. 서 론

선형전동기는 일반 회전형 전동기에 비해 직선 구동력이 직접 발생시키는 특유의 장점이 있으므로 직선 구동력이 필요한 시스템에서 회전형에 비해 절대적으로 우세하다. 직선형의 구동시스템에서 회전형 전동기에 의해 직선 구동력을 발생시키고자 하는 경우에는 스크류, 체인, 기어 시스템 등의 기계적인 변환장치가 반드시 필요하게 되는데 이때 마찰에 의한 에너지의 손실과 소음이 필연적으로 발생하므로 매우 불리하다[1],[3]. 선형 전동기를 응용하는 경우는 직선형의 구동력을 직접 발생시키므로 기계적인 변환장치가 전혀 필요치 않기 때문에 구조가 복잡하지 않으며 에너지 손실이나 소음이 발생하지 않고 운전속도에도 제한을 받지 않는 등의 특유의 이점이 있다[2].

선형전동기는 일반적으로 회전형 전동기를 잘라 평면에 펼친 다음 회전형 전동기와 같이 구동할 경우 직선운동을 하는 전동기이다. 회전형 전동기에 비해서 효율 특성은 다소 떨어지지만 직선운동을 위한 전동기가 필요할 경우에는 많이 사용하고 있으며 회전형의 경우 고정자의 공극을 유지하기 위해서 축을 중심으로 구동할 수 있게 제작하고 있는 실정이다. 그러나 선형전동기의 경우 정확한 공극의 유지를 위해서 리니어 가이드(linear guide)를 사용하는 것이 일반적이며 이 가이드로 인해서 고정자와 이동자 사이의 정확한

간격을 유지할 수 있게 된다. 또한 자속의 흐름과 이동자의 이동방향에 따라 일반적으로 선형전동기를 구분하는데 자속의 흐름으로 인해서 만들어지는 평면과 이동자가 움직이는 방향이 같으면 종자속형이라고 하고 횡 방향으로 놓여져 있을 경우에는 횡자속형이라고 한다.

본 연구에서는 횡자속 선형전동기에서 발생하는 추력파형을 적용하여 선형 액추에이터를 설계할 경우 발생하는 추력의 불균일성에 대한 특성평가로서 선형전동기의 추력파형에 따른 선형 액추에이터의 동특성을 알아보았다. 특히 기계적 공진일 경우 선형전동기에서 발생하는 추력파형에 따라 액추에이터의 구동은 동일한 입력 에너지로 약 2배 이상의 변위특성을 얻을 수 있었고 반력은 거의 유사한 특성을 얻을 수 있었다.

### 2. 해석방법

#### 2.1 선형 액추에이터의 구성

선형 액추에이터의 주요 구성부품은 리니어 모터부, 구동 제어부, 오일 공급부, 스프링 및 댐핑부 등으로 나눌 수 있으며 이러한 구성부품들이 결합되어 선형 액추에이터가 구성된다. 특히 높은 주파수로 구동할 경우 선형액추에이터는 이동자의 질량에 의한 관성력이 굉장히 커지고 그 관성력을 스프링의 탄성력으로 대부분 저장하고, 반대방향으로 운동할 때 그 탄성력을 다시 이용하는 방식을 적용하게 된다. 또한 각 부품은 선형 액추에이터의 구동에 영향을 미치고, 선형전동기가 전체 기술에서 핵심 메커니즘에 해당되며 구동을 위한 기구부와 제어하는 구동부로 크게 기술을 나눌 수 있다.

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 韓國電氣硏究員 Mechatronics group · 工博  
E-mail : bcwoo@keri.re.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 韓國電氣硏究員 Mechatronics group · 工博  
接受日字 : 2005年 10月 5日  
最終完了 : 2005年 10月 29日

2.1.1 선형전동기의 구성

선형전동기는 선형 액추에이터에서 가장 핵심적인 부품으로서 선형 액추에이터의 free piston을 구동시키는 동력 발생 부품이다. 이러한 선형전동기는 크게 영구자석 구동형(moving magnet type), 코일 구동형(moving coil type), 철심 구동형(moving iron type)으로 3가지로 구분되지만 최근 영구자석 구동형에 대한 연구가 가장 활발한 실정이다[3],[4]. 이와 같이 영구자석 구동형의 선형전동기에 많은 연구가 집중되고 있는 것은 코일 구동형에 비해서 복잡하지 않아 쉽게 제품화가 가능하기 때문이며 다소 효율은 낮지만 코일 구동형에 비해서 생산성과 작업의 효율성이 좋기 때문이다[4].

선형전동기는 자속이동방향과 구동방향이 일치하는 종자속형(Longitudinal Flux Linear Motor, LFLM)과 자속이동방향과 구동방향이 횡방향인 횡자속형(Transverse Flux Linear Motor, TFLM)으로 크게 나눌 수 있으며, 현재 개발된 많은 제품들의 대부분은 종자속형에 해당되고 최근 들어 많이 연구되고 있는 횡자속형은 그림 1의 (b)와 같다[5],[6],[8],[9].

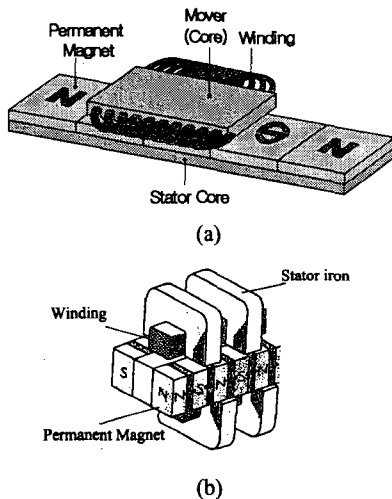


그림 1 종자속과 횡자속 선형전동기의 형상  
Fig. 1 Configuration of LFLM and TFLM  
(a) LFLM (b) TFLM

2.1.2 횡자속 선형전동기의 구성

그림 2는 횡자속 선형전동기의 전류와 자속에 따른 이동자의 이동방향을 설명하고 있으며 자속이 만드는 평면과 이동방향이 횡방향인 것 확인할 수 있다. 또한 이동자는 위쪽 고정자와 서로 미는 힘이 작용하며 아래쪽 고정자와는 서로 당기는 힘이 작용하여 우측으로 이동하게 되며 전류의 극이 반대 방향으로 되면 좌측으로 이동하는 힘이 작용하게 된다[6].

선형전동기는 고효율화와 고풍속화 및 저가격 실현으로 인해서 여러 분야에서 응용되고 있으며 특히 횡자속 선형전동기는 단위 무게당 높은 추력특성과 낮은 생산단가로 인해서 더욱 새로운 분야에 접근할 수 있게 되었으며 산업기기의 이송, 의료계의 직선구동, 고정정을 목적으로 하는 전자산업분야, 대추력이 필요한 항공, 선박, 철도 분야 등 다양한 분야에서 적용되고 있다[4].

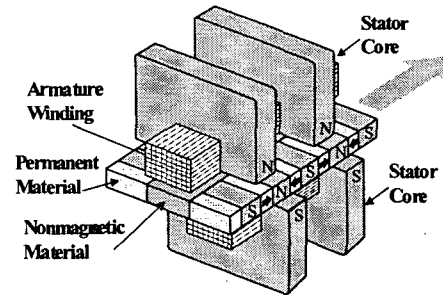


그림 2 횡자속 선형전동기의 상세 설명도  
Fig. 2 Detail Drawing of TFLM

2.2 선형 액추에이터의 구동특성

그림 3과 같이 선형 액추에이터 모델을 구성하였으며 그림 3의 m은 이동자가 움직이는 질량에 해당되고 고정된 구속조건에 따라 시스템 질량 m과 스프링 강성 k가 결정되며 C는 감쇠계수이다. 또한 압축과정에서 발생하는 압력변화는 시간에 따라 변하며 f(t)로 나타내고 전동기에서 발생하는 힘을 사인 함수로 가정하였으며 초기 동적특성을 알아보기 위해서 외부에서 가해지는 선형전동기의 구동력을 적용하여 그 특성을 알아보았다. 또한 구동방정식은 식(1)과 같다[7].

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t - f(t) \quad (1)$$

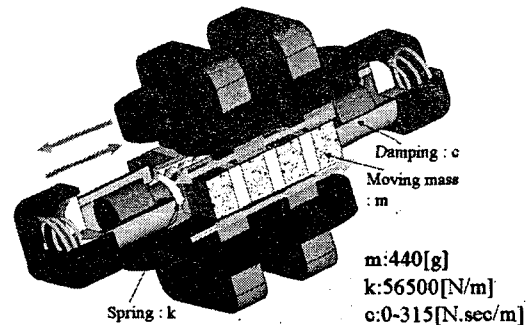


그림 3 선형액추에이터의 구성  
Fig. 3 Configuration of Linear actuator

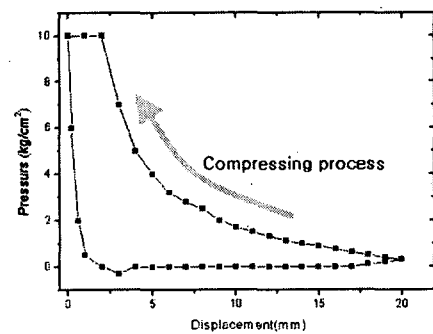


그림 4 액추에이터에 가해지는 압력변화  
Fig. 4 Variation of pressure at compressing unit

본 연구에 사용된 프로그램은 ANSYS를 이용하였으며 구성된 시스템의 고유진동수와 스프링 강성의 변화에 따른 액추에이터의 초기 동적특성을 파악하였다. 초기 동적 구동특성은 200[N]급 선형진동기에서 발생하는 힘의 파형과 구동 주파수의 조절 등에 따라 큰 영향을 받으며 외부의 온도변화와 가해지는 압력변화에 따라 시스템의 초기 구동특성에 큰 영향을 받는다. 특히 횡자속형 선형진동기에서는 추력파형이 주어진 형상에 따라 크게 변화하기 때문에 동특성에 크게 영향을 미친다고 알려져 있다[5].

그림 4는 식(1)의  $f(t)$ 로서 압축기의 압축력을 측정된 결과를 위치에 따라 변동하고 있으며 위치에 따른 압력을 계산하여 해석에 적용하였다. 그림 4의 힘을 계산한 결과 구동력은 60[Hz]로 구동되는 200[N]이었으며 이 결과를 근거로 선형진동기의 최대추력을 적용하였다[7].

2.2.1 선형액추에이터의 초기구동특성

그림 3과 같이 구성된 시스템에서 양단 고정단에 지지되어 있는 free piston type의 이동자와 양단 고정단 사이에 탄성 에너지를 저장할 수 있는 스프링으로 지지하였으며 초기에 마그넷에 의해서 발생하는 힘보다 충분히 크게 초기 가압력을 주어 초기화 하였다. 또한 이동자의 양쪽에 스프링으로 지지하고 가정용 전원인 60[Hz]의 전류에 의해 발생하는 초기 구동특성에 대해서 동적 거동을 해석하여 그림 5에 나타내었다. 본 해석에서 사용한 변수는 질량은 440[g], 감쇠계수는 10[N·sec/m], 선형진동기의 구동력은 200 sin $\omega t$ [N]이고 60[Hz] 구동전원을 사용한다고 가정하였다.

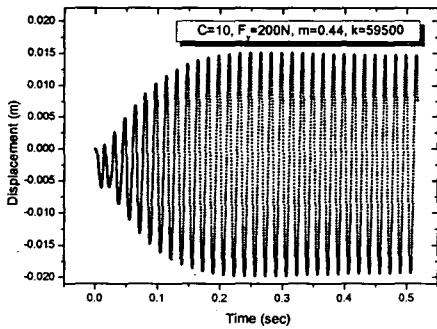


그림 5 200[N]의 정현파 인가 시 초기 변위특성  
Fig. 5 Variation of starting position with 200[N] sine wave

그림 5에서 알 수 있듯이 정지 상태에서 전류가 인가되면 구동부는 선형진동기에 의해 발생한 외력의 힘 방향과 같은 방향으로 움직이게 되고 그 반대방향으로 힘의 방향이 바뀌면 그 반대방향으로 움직이게 된다. 정현파와 유사한 형태의 선형진동기의 추력은 일정주기로 변위의 방향을 바꾸고 인가된 힘의 주파수에 의해서 일정주기로 움직이게 된다. 일정주기의 구동 주파수는 이동자의 질량과 양단 고정단 사이의 스프링 강성에 의해서 고유진동수가 계산되며, 고유진동수와 같은 구동 주파수로 구동하게 되면 공진이 된다. 공진 영역에서는 변위가 크게 증가하게 되고 압축기의 구동에

따라 손실되는 에너지와의 평형관계에서 최대 변위가 얻어진다. 이동자의 질량에 따른 관성력과 스프링 강성에 의한 탄성력은 구동에 따라 서로 에너지를 저장하였다 사용하는 데 속도가 최대일 때는 자중에 의한 관성력이 최대가 되고 정지할 때에는 스프링에 저장되는 탄성력이 최대가 된다. 즉 질량에 의한 관성력과 스프링에 저장되는 탄성력이 서로 변화, 교환하면서 질량에 의한 관성력 손실을 줄이게 되고 에너지 효율이 높아지게 된다. 그림 5에서 약 0.3초 이내에 과도상태가 끝나고 정상상태가 되는 경향을 가지고 있으며 스프링 강성이 59,500[N/m]인 경우 20 주기의 진동 후 정상상태가 되는 것을 알 수 있다. 이것은 압축기와 액추에이터의 용량에 의해서 결정되고 초기 구동 시 발생하는 과도응답특성을 줄이고 정상상태에서 최대 변위를 얻을 수 있는 것이 중요하다[8].

2.3 선형진동기의 추력파형에 따른 구동특성

그림 5의 결과는 선형진동기에서 발생하는 추력이 정현파로 가정하여 스프링 강성변화에 의한 액추에이터의 구동특성을 알아보았다. 이러한 구동은 시간에 따른 압축부하 및 마찰 등의 비가역적 에너지 소모가 거의 같다고 가정하고 해석한 내용으로 시간에 따라 변하는 비가역성을 가진 실제와는 약간의 차이를 가지게 된다.

그림 6은 왜곡된 형태의 선형진동기의 추력형상에 따른 영향을 알아보기 위해서 기본이 되는 정현파를 기준으로 최대 추력이 정현파의 최대 추력이 얻어지는 주기의 25[%]보다 빨리 발생하는 경우와 25[%]보다 늦어지는 경우 그리고 삼각파형도 비교 대상으로 하여 추력파형 변화에 따른 선형액추에이터의 초기 구동특성을 알아보았다.

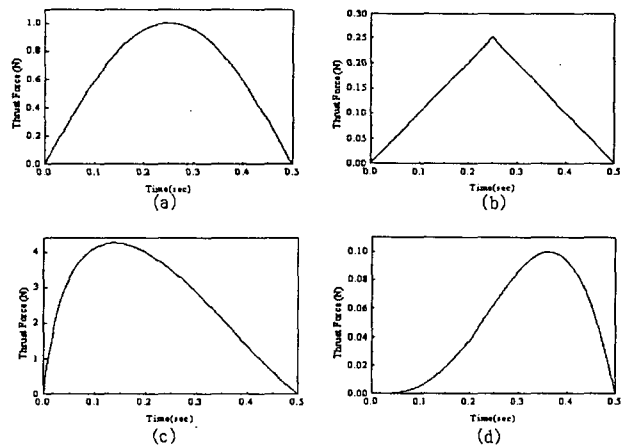


그림 6 시뮬레이션용 추력파형의 변화  
Fig. 6 Variation of thrust force for simulation  
(a) sin wave (b) triangle wave  
(c) A type (d) B type

그림 6에서 사용한 4가지 형태의 추력파형은 각각 동일한 주파수, 동일한 에너지를 가질 수 있도록 각 파형에서 면적을 계산한 다음 추력에서 얻어지는 에너지를 정현파와 같게

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  계수를 산정하였으며 다음 식(2)-(5)로 정리할 수 있다. 또한 스프링 강성은 56,500[N/m]로 적용하였으며 나머지 각 요소는 스프링의 강성변화에 따른 구동특성과 동일하게 적용하였다.

$$\sin(\omega t) \tag{2}$$

$$\alpha (t-n)(n-0.25 < t < n+0.25) \tag{3}$$

$$\alpha (n-t+0.5)(n+0.25 < t < n+0.75)(n=0,1,2,\dots) \tag{4}$$

$$\beta t^2 \sin(\omega t) \tag{5}$$

$$\gamma \frac{1.05}{(t+0.05)} \sin(\omega t) \tag{6}$$

그림 7은 추력파형의 변화에 따른 초기구동에서 얻어지는 구동특성으로서 같은 에너지에서 3배 이상의 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. (a)와 같이 정현파의 경우 최대 10[mm], 최소 -15[mm]의 구동특성을 보이고 있으나 (b)와 같이 삼각파인 경우 최대 21[mm], 최소 -27[mm]의 구동특성을 나타내고 있어 전체 변위는 정현파의 거의 2배의 값을 나타내고 있다. 또한 (c)와 (d)를 비교해 보면 추력파형이 정현파의 앞쪽부분에 최대값을 가지는 경우와 뒤쪽부분에 최대값을 가지는 경우로서 횡자속 선형전동기의 추력파형은 (c)형에 가까운 형상이며, 그림 8에 나타낸 것과 같은 형상이다. 그림 7의 (c)에서 얻을 수 있는 최대 변위는 21[mm], 최소 변위는 -25[mm]이지만 (d)에서 얻을 수 있는 최대 변위는 3[mm], 최소 변위는 -8[mm]로서 (c)와 (d)의 전체 변위는 46[mm]와 11[mm]로 4배 이상의 차이를 보이고 있다.

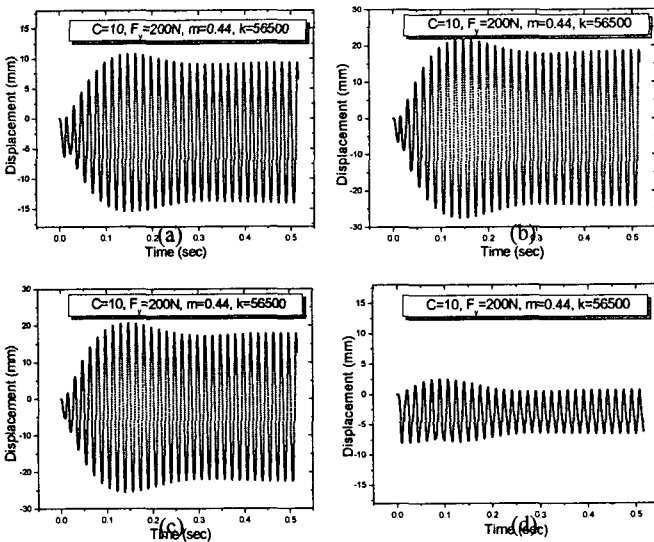


그림 7 선형전동기의 추력변화에 따른 초기 변위특성  
 Fig. 7 Variation of starting position varying thrust force of linear motor  
 (a) sin wave (b) triangle wave  
 (c) A type (d) B type

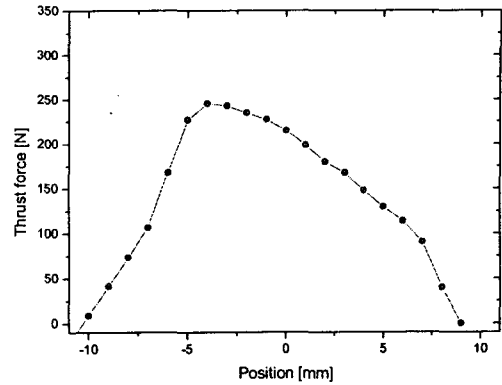


그림 8 구동 위치에 따른 횡자속 선형전동기의 추력변화  
 Fig. 8 Variation of thrust force varying position in TFLM

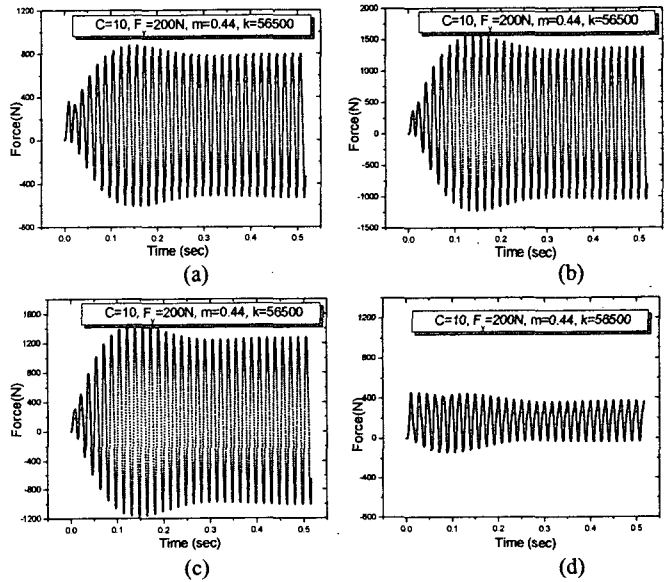


그림 9 선형전동기의 추력변화에 따른 지지부의 반력  
 Fig. 9 Variation of initial reaction force varying thrust force of linear motor  
 (a) sin wave (b) triangle wave  
 (c) A type (d) B type

이러한 특성은 손실부분으로 소비되는 마찰손실의 크기에 따라 다소 영향은 있겠지만 스프링과 구동부 질량관계에서 얻어지는 고유진동수와 선형전동기에서 발생된 구동력 사이의 관계에서 스프링과 실린더에 의해 지지된 선형전동기 이동자의 큰 구동을 위해서 큰 속도가 필요하다는 것을 알 수 있다. 즉 최대변위 또는 최소변위인 위치를 기준으로 반대 방향으로 이동이 시작되고 이 지점에서 가속이 시작되기 때문에 초기에 큰 힘이 큰 변위를 얻을 수 있게 된다.

그림 9는 그림 6과 같은 추력변화에 따라 선형전동기로 인해 전달되는 지지부의 반력특성으로서 정현파에서 발생하는 반력과 비교하여 추력파형 변화에 따라 전달되는 반력은 거의 비슷한 양상을 보이고 있다. 그러나 그림 9의 (a)와 같이 정현파의 경우 초기 900[N]의 최대 하중을 나타내고 정

상상태에 도달하게 되면 거의 800[N]의 최대 하중을 나타내면서 초기와 비슷한 값을 나타내고 있으나 (b), (c), (d)의 경우 초기 최대하중은 1,150~1,200[N]을 나타내지만 정상상태에서 약 20% 작은 값인 850에서 900[N]을 나타내고 있다. 이러한 경향은 초기 구동 시 다소 큰 하중이 전달되며 정상상태로 도달하면서 안정화되는 경향을 가진다. 즉 정현파에 비해서 초기 구동 시 발생하는 소음은 정현파에 비해서 크게 발생할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 특성들을 종합한 결과 구동 추력이 정현파가 가까운 종자속형 선형전동기에 비해 그림 6의 (c)에 가까운 횡자속형 선형전동기를 적용한 액추에이터가 종자속형에 비해서 2배에 가까운 구동변위를 얻을 수 있으나 초기 구동 시 발생하는 소음 특성을 다소 불리할 것으로 판단된다[7].

### 3. 결 론

선형전동기를 이용한 선형 액추에이터의 추력 형상에 따른 초기 구동특성을 검토한 결과 일반 정현파에 비해서 최대 추력점이 얻어지는 시간이 주기의 25[%]보다 빨라지면 정현파에서 얻어지는 구동변위보다 2배 이상을 얻을 수 있었다. 그림 6의 (a)와 같은 추력특성을 가지는 횡자속형 선형전동기가 정현파에 가까운 추력특성을 가지는 종자속형 선형전동기보다 큰 변위의 초기 구동특성을 가질 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 횡자속형 선형전동기의 경우 초기 큰 변위의 구동력을 가지면서 지지부에 가해지는 반력은 약 20%이상 크게 나타났으며 이러한 큰 반력으로 인해서 종자속형에 비해서 다소 큰 소음을 가질 수 있음을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 국무총리산하 산업기술연구회가 지원하는 협동연구사업인 “차세대 냉각시스템 기술개발”의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

[1] K.J.Binns, ed1, “Permanent magnet AC generators”, Proc. IEE, Vol.126, No.7, pp.690-696, July 1979.  
 [2] K.J.Binns, ed2, “The Use of Canned Rotors in High Speed Permanent Magnet Machines”, 5th Int. Conf. on Electrical Machines&Drives, pp.21-25, 1991.  
 [3] T.Alasuvanto, ed1, “Comparison of Four Different Permanent Magnet Rotor Constructions”, Int. Conf. on Electrical Machines, pp.1034-1039, 1990.  
 [4] J.F.Gieras, M.Wing, “Permanent Magnet Motor Technology”, Marcel Dekker, Inc., 1997 Conference on Electrical Engineering 2002, Vol.3, p.1191, 2002.  
 [5] 강도현, Herbert Weh, “철도 차량용 고회전 횡축형 전동기 설계에 관한 연구”, 대한전기학회 논문지 제 48권, 제 6호, B권, pp.301-308, 1999.  
 [6] 우병철, 강도현, 홍도관, “공진형 선형 액추에이터의 스프링

강성 변화에 따른 과도응답특성”, 대한전기학회 논문집 제 54권, 제 3호, B권, pp.134-138, 2005.

[7] 김성진, 강경식, 심재술, “소형 왕복동식 압축기 셀에 가해지는 가진력의 간접적 측정”, 한국소음진동공학회지, 제7권, 제6호, pp.899-907, 1997.  
 [8] 우병철, 강도현, “공진형 선형 액추에이터의 감쇄지수 변화에 따른 과도 응답특성”, 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp.1037-1039, 2004.  
 [9] Arshad, W.M., Backstrom, T., “Analytical design and analysis procedure for a transverse flux machine”, Electric machines and drives conference, IEMDC'01, IEEE International, pp.115-121, 2001.

## 저 자 소 개



#### 우 병 철 (禹炳哲)

1963년 7월 22일생. 1989년 영남대 기계공학과 졸업. 2000년 경북대학교 기계공학과 졸업(박사), 1991년- 현재 한국전기연구원 Mechatronics그룹 팀장  
 Tel : 055-280-1632 Fax : 055-280-1547  
 E-mail : bcwoo@keri.re.kr



#### 강 도 현 (姜道鉉)

1958년 9월 21일생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 독일 Braunschweig대학 졸업(박사), 1986년 - 현재 한국전기연구원 산업전기연구단장  
 Tel : 055-280-1480 Fax : 055-280-1547  
 E-mail : dhkang@keri.re.kr



#### 홍 도 관 (洪到琯)

1972년 2월 22일생. 1998년 동아대 기계공학과 졸업. 2004년 동아대학교 기계공학과 졸업(박사), 2004년 - 현재 한국전기연구원 Mechatronics그룹 선임연구원  
 Tel : 055-280-1429 Fax : 055-280-1547  
 E-mail : dkhong@keri.re.kr