

## 횡자속 선형전동기의 추력특성에 따른 선형액추에이터의 동특성

우병철 홍도관 강도현 장정환 김종무

한국전기연구원

### Dynamic response of linear actuator with the thrust force of transverse flux linear motor

B.C.Woo, D.K.Hong,D.H.Kang,J.H.Jang and J.M.Kim

Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - 선형전동기는 일반적으로 회전형 전동기를 잘라 평면에 펼친 다음 회전형 전동기와 같이 구동할 경우 직선운동을 하는 전동기이다. 회전형 전동기에 비해서 효율특성을 다소 떨어지지만 직선운동을 위한 전동기가 필요할 경우에는 많이 사용하고 있는 실정이며 회전형의 경우 고정자와 회전자의 극간격을 유지하기 위해서 축을 중심으로 구동할 수 있게 제작하고 있는 실정이다. 그러나 선형전동기의 경우 정확한 극간경의 유지를 위해서 LM guide를 사용하는 것이 일반적이며 이로 인해서 고정자와 이동자 사이의 정확한 간격을 유지할 수 있게 된다. 또한 자속의 흐름과 이동자의 이동방향에 따라 일반적으로 선형전동기를 구분하는데 자속의 흐름으로 인해 만들어지는 평면과 이동자가 움직이는 방향이 같은 경우 상에 있으면 종자속이라고 하고 횡방향으로 놓여질 경우 횡자속 선형전동기라고 부른다.

본 연구에서는 횡자속 선형전동기에서 발생되는 추력 특성을 고려하여 선형액추에이터를 설계할 경우 발생되는 추력의 불균일성이 대내 내용으로 전동기의 추력 특성 과정에 따른 성형 액추에이터의 동특성을 알아보았다. 특히 액추에이터에서 발생되는 공진특성을 기준으로 볼때 같은 에너지로 약 2배의 동특성을 얻을 수 있었고 반력은 거의 같은 특성을 얻을 수 있었다.

### 1. 서 론

리니어 모터는 일반 회전형 모터에 비해 직선 구동력을 직접 발생시키는 특유의 장점이 있으므로 직선 구동력이 필요한 시스템에서 회전형에 비해 절대적으로 우세하다. 직선형의 구동시스템에서 회전형 모터에 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.

리니어 모터를 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.

본 논문에서는 선형전동기를 이용한 직선운동과 기구적인 공진특성을 이용한 액추에이터의 특성에 대해서 알아보았으며 free piston type의 선형운동을 구축하기 위해서 시스템을 구동 질량과 스프링, 댐퍼로서 구성하고 외부에서 작용하는 압력에 따라 발생하는 액추에이터의 초기구동과 지지부의 반력 특성을 알아보았다. 또한 스프링 강성으로 인해서 얻어지는 액추에이터의 구동 특성이 시스템의 고유진동수와 구동특성에 미치는 영향에 대해서 알아보았다.

### 2. 해석방법

#### 2.1 선형 액추에이터의 구성

선형 액추에이터의 주요 구성부품은 리니어 모터부, 구동제어부, 오일 공급부, 스프링 및 댐핑부 등으로 나눌 수 있으며 이러한 구성부품들이 결합되어 선형 액추에이터가 작동하게 된다. 이와 같이 구성부품들은 선형 액추에이터에서 매우 중요한 부품들이며, 리니어 모터가 전체 기술에서 핵심 메커니즘에 해당되며 구동을 위한 기구부와 제어하는 구동부로 크게 기술을 나눌 수 있다.

#### 2.1.1 선형전동기의 구성

선형전동기는 선형 액추에이터에서 가장 핵심적인 부품으로서 리니어 액추에이터의 free piston을 구동시키는 동력 발생부품이다. 이러한 선형전동기는 크게 moving magnet type, moving coil type, moving iron type으로 3가지로 구분되지만 최근 moving magnet type에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다. 이와 같이 moving magnet type의 선형전동기에 많은 연구가 집중되고 있는 것은 moving magnet type이 moving coil type에 비해서 복잡하지 않아 쉽게 제품화가 가능하기 때문이며 다소 효율은 낮지만 moving coil type에 비해서 생산성과 작업의 효율성이 좋기 때문이다.

선형전동기는 전류방향과 구동방향이 일치하는 종자속형(Longitudinal Flux Linear Motor, LFLM)과 전류방향과 구동방향이 횡방향인 횡자속형(Transverse Flux Linear Motor, TFLM)으로 크게 나눌 수 있으며, 기존에 많은 제품들이 종자속형에 해당되고 그림 1의 횡자속형은 최근에 많은 연구가 이루어지고 있다.

#### 2.1.2 횡자속 선형전동기의 구성

그림 2는 횡자속 선형전동기의 전류와 자속에 따른 이동자의 이동 방향을 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.

선형전동기는 고출력화와 고효율화 및 저가격 실현으로 인해서 여러 분야에서 응용되고 있는 실정이며 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 그리고 대추력이 필요한 항공, 선박, 철도 분야 등 다양한 분야에서 적용되고 있는 실정이다.

#### 2.2 선형 액추에이터의 구동특성

그림 3과 같이 선형 액추에이터 모델을 구성하였으며 그림 2의 이동자가 움직이는 질량에 해당되고 고정된 구속조건에 따라 시스템의 질량  $m$ 과 스프링의 강성  $k$ 가 결정되면  $C$ 는 감쇠계수이다. 또한 압축과정에서 발생하

는 압력변화 및 스프링 강성 등의 영향에 따른 구속력을 고려하였으며 초기 동적특성을 알아보기 위해서 외부에서 가해지는 선형전동기의 구동력을 적용하여 그 특성을 알아보았다.

본 연구에 사용된 프로그램은 ANSYS를 이용하였으며 구성된 시스템의 고유진동수와 스프링 강성의 변화에 따른 액추에이터의 초기 동적특성을 파악하였다. 초기 동적특성은 액추에이터의 구동에서 발생할 수 있는 변위의 overshooting 문제와 적절한 구동 주파수의 조절 등에 큰 영향을 미치며 외부의 온도변화와 가해지는 압력변화에 따라 구성된 시스템의 초기 구동특성에 큰 영향을 미친다.

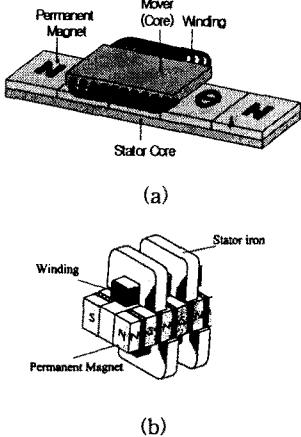


그림 1 종자속과 횡자속 선형전동기의 형상  
(a) LFLM      (b) TFLM

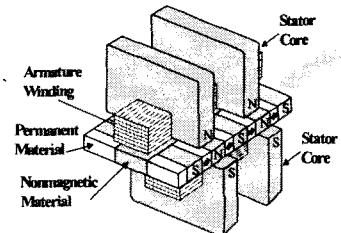


그림 2 횡자속 선형전동기의 상세 설명도

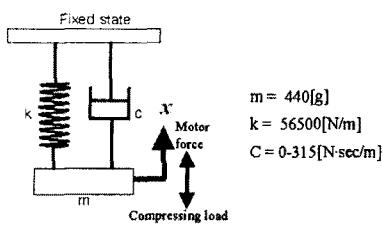


그림 3 선형액추에이터의 구성

그림 4는 기존 개발제품에서 압축력을 측정한 결과로서 약  $10[\text{kg}/\text{cm}^2]$ 의 압력으로 구동되고 있는 것을 해석에 사용하였다. 그림 4에서 얻은 결과는  $60[\text{Hz}]$ 로 구동되고 있는  $200[\text{N}]$ 의 힘을 가진 모터의 경우로서 압축 시와 달리 이완 시에는 대기압 이하의 압력이 가해지고 있다.

### 2.2.1 스프링 강성에 따른 특성변화

그림 3과 같이 구성된 시스템에서 고정자에 지지되어 있는 free piston type의 이동자와 고정자 사이에 스프링 탄성에 의한 관성 에너지를 저장할 수 있는 스프링으로 지지하였으며 초기에 마그넷에 의해서 발생되는 힘보다

충분히 크게 초기 가압력을 주어 초기화 하였다. 또한 스프링의 강성에 따른 액추에이터의 초기 구동특성을 알아보기 위해서 스프링, 질량 시스템에서 일어지는 고유진동수의 1%에서 100% 구간에서 발생되는 초기 구동특성을 해석하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 약 0.3초 이내에 안정화 되는 경향을 가지고 있으며 스프링 상수가  $585[\text{N}/\text{m}]$ 인 경우 1.5회 진동 후 안정화 되는 경향을 가지며  $585000[\text{N}/\text{m}]$ 인 경우 수 백회 이상의 진동 후 안정화 되는 것을 알 수 있다. 이것은 초기 구동시 발생하는 과대응답특성을 줄이고 최대 변위를 얻을 수 있는 특성을 얻는데 중요한 특성이다.

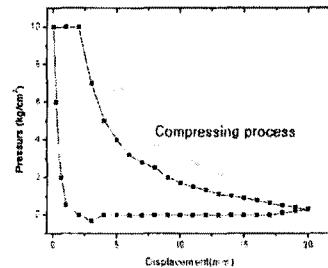


그림 4 액추에이터에 가해지는 압력변화

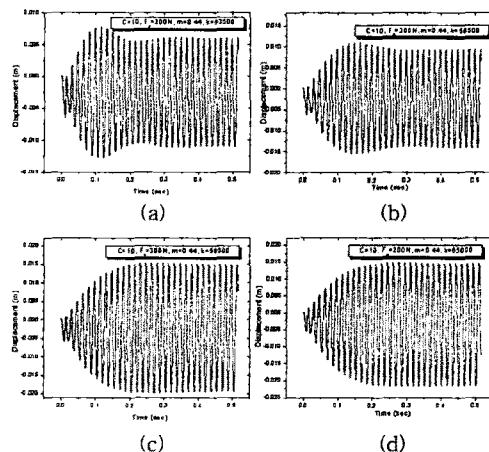


그림 5 스프링의 강성변화에 따른 지지부 반력

- |                                     |                                      |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| (a) $k = 565[\text{N}/\text{m}]$    | (b) $k = 5,650[\text{N}/\text{m}]$   |
| (c) $k = 56,500[\text{N}/\text{m}]$ | (d) $k = 565,000[\text{N}/\text{m}]$ |

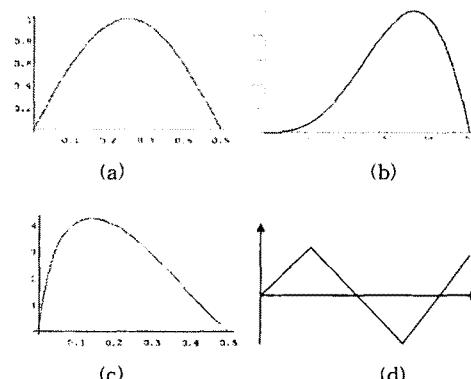


그림 6 선형전동기의 추력특성 과정

- |   |  |
|---|--|
| (a) $\text{Sin}[2\pi t]$                      | (b) $\text{Sin}[2\pi t]xt^2$                                 |
| (c) $\text{Sin}[2\pi t] \times 1.05/(t+0.05)$ | (d) $t-n(n-0.25 < t < n+0.25), n-t+0.5(n+0.25 < t < n+0.75)$ |

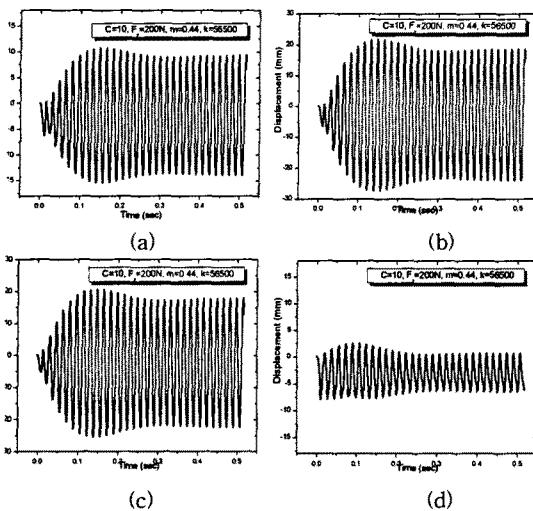


그림 7 선형전동기의 추력파형에 따른 구동특성

(a)  $\text{Sin}[2\pi t]$  (b)  $\text{Sin}[2\pi t]xt^2$   
 (c)  $\text{Sin}[2\pi t]x1.05/(t+0.05)$   
 (d)  $t-n(n-0.25 < t < n+0.25), n-t+0.5(n+0.25 < t < n+0.75)$

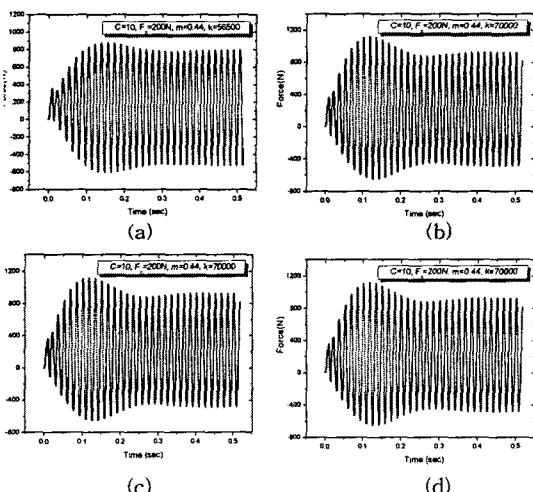


그림 8 선형전동기의 추력파형에 따른 지지부의 반력

(a)  $\text{Sin}[2\pi t]$  (b)  $\text{Sin}[2\pi t]xt^2$   
 (c)  $\text{Sin}[2\pi t]x1.05/(t+0.05)$   
 (d)  $t-n(n-0.25 < t < n+0.25), n-t+0.5(n+0.25 < t < n+0.75)$

### 2.2.2 선형전동기의 추력파형에 따른 특성변화

그림 6은 선형전동기에서 얻을 수 있는 정현파를 기준으로 추력파형을 변화시킬 경우 선형액추에이터에서 일어나는 특성을 알아보았다. 그림 6에서 각 파형의 특성을 균일하게 하기 위해서 힘과 시간의 곱으로 얻어지는 에너지가 동일하게 적용하기 위해서 정현파와 같은 면적을 얻기 위해서 상수를 곱하여 균일한 에너지에 따른 선형액추에이터의 특성을 알아보았다. 먼저 정현파의 특성을 알아보고 정현파를 기준으로 앞부분에 힘이 큰 경우와 뒤부분에 힘이 큰 경우에 대한 특성을 알아보고 삼각파의 경우와 비교하였다.

그림 7은 그림 6과 같은 추력파형에 따라 얻어지는 이동자의 변위특성을 알아보았으며 정현파의 경우인 (a)에서 최대에서 최소변위의 폭이 약 25mm를 얻을 수 있었다. 그림 6의 추력파형에 따른 특성으로 최대추력이 뒷

부분에 있는 경우에서는 최대폭이 약 10mm이고 최대추력이 앞부분에 있는 경우에서는 약 45mm의 변위폭을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었으며 삼각파의 경우와 거의 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 특성을 정리하면 추력파형에서 최대추력이 발생하는 부분이 앞부분에 정현파에 비해서 앞부분에 있는 경우가 더 큰 변위를 얻을 수 있게 된다.

또한 그림 8은 이러한 추력파형에 따라 지지부에 가해지는 반력을 특성을 알아보았으며 추력파형의 변화에 따라 거의 변화가 없음을 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

횡자속 선형전동기를 이용한 선형액추에이터의 제작에서 전동기에서 발생하는 추력파형을 분석한 결과 정현파에서 조금 외곡된 형태의 추력특성을 기준으로 외곡된 형태에 따른 액추에이터의 구동특성을 알아본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

선형액추에이터의 구동특성은 스프링의 강성에 따라 큰 특성변화를 얻을 수 있었으며 공진점을 기준으로 조금 더 큰 스프링강성에서 우수한 정상구동특성을 얻을 수 있었다. 또한 추력파형에 따른 구동특성에서 정현파에서 최대값이 앞부분으로 외곡될수록 더 큰 변위특성을 얻을 수 있으며 지지부의 반력에는 큰 변화가 없음을 알 수 있었다.

### [후기]

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

### [참 고 문 헌]

- Wauus M, Arshad, Peter Thelin, Thomas Backstrom, Candur Sadarangani, "Use of Transverse-Flux Machines in a Free-Piston Generator", Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03. IEEE International ,Vol. 3, pp.1428-1434, 2003
- Arshad, W.M., Backstrom, T., Sadarangani, C., "Analytical design and analysis procedure for a transverse flux machine", Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2001. IEEE International, pp. 115-121, 2001
- Kang, D.H., Chun, Y.H., Weh, H., "Analysis and optimal design of transverse flux linear motor with PM excitation for railway traction", Electric Power Applications, IEE Proceedings, Vol. 150, No. 4, pp. 493-499, 2003
- 박종찬, 왕세명, 정충민, “Linear compressor에서 발생하는 마찰에 의한 진동연구”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp.695-700, 2003
- 우병철, 강도현, “공진형 선형 액추에이터의 강쇄지수 변화에 따른 과도 응답특성”, 대한전기학회하계학술대회논문집, pp.1037-1039, 2004
- 우병철, 강도현, 홍도관, “공진형 선형액추에이터의 스프링 강성변화에 따른 과도응답특성”, 대한전기학회논문지, Vol.54B, No.3, pp.134-138, 2005