

선형액추에이터의 톱핑에 따른 구동력과 이동자 사이의 위상 변화

우병철 홍도관 김중무 장정환 강도현 박성제\*  
한국전기연구원 한국기계연구원\*

Variation of phase difference between applied force and moving element in linear actuator

B.C.Woo, D.K.Hong, J.M.Kim, J.H.Chang, D.H.Kang, S.J.Park\*  
Korea Electrotechnology Research Institute, Korea Institute of Machinery & Materials\*

**Abstract** -리니어 모터는 일반적으로 회전하는 모터와 같이 여러 형상의 극간에서 발생하는 힘의 균형에 의해서 구동되는 것이 일반적이다. 특히 하나의 극간에서 미소 구동하는 리니어 모터는 구동력과 실제 이동하는 위치 사이에서 댄핑이나 무게와 함 사이에서 발생하는 가속력의 차이에 의해서 주어진 힘의 파형과 움직이는 위치의 피적이 만들어가는 이동자의 위치 사이에는 다소 시간 차질이 발생하게 된다. 본 논문에서는 구동력과 실제 이동하는 위치 사이의 시간 차질의 원인으로 알려져 있는 댄핑의 조건을 변화시키고 이에 다른 구동력의 변화를 알아보았다. 댄핑이 전혀 없는 조건과 댄핑이 조금씩 증가함으로 인해서 주어진 시스템의 기계적 공진 영역에서 발생하는 여러 가지 구동특성을 정량적으로 평가해 보았다. 60[Hz]가 공진인 이동자와 탄성체로 이루어진 시스템에서 58-62[Hz]에서 구동될 경우 힘의 주파수와 가해진 힘에 따라 이동자의 초기 거동을 알아보았으며 초기 0.3초 구간에서 구동되는 특성을 알아보았다. 전체적으로 이동자의 구동 피적과 주어진 힘의 파형 사이에서 발생하는 시간 차질은 댄핑계수에 가장 지배적인 영향을 받았으며 구동 힘의 주파수가 공진주파수보다 작으면 점점 증가하고 크면 점점 감소하는 경향을 가지며 공진주파수의 구동력이 가해진다면 시간 차질은 거의 변화가 없음을 알 수 있었다.

1. 서 론

선형전동기는 회전하는 일반적인 모터에서 원형을 직선으로 편 상태로 직선으로 이동자와 고정자를 나열하면 선형전동기의 형상이 된다. 선형전동기는 일반 회전형 전동기에 비해 직선 구동력을 직접 발생시키는 특유의 장점이 있으므로 직선 구동력이 필요한 시스템에서 회전형에 비해 절대적으로 우수하다. 직선형의 구동시스템에서 회전형 전동기에 의해서 직선 구동력을 얻으려고 하는 경우에는 스크류, 체인, 기어 시스템 등의 기계적인 변환장치가 반드시 필요하게 되는데 이때 마찰에 의한 에너지 손실과 소음이 필연적으로 발생하므로 매우 불리하다. 선형전동기를 응용하는 경우는 직선형의 구동력을 직접 얻으므로 기계적인 변환장치가 전혀 필요치 않기 때문에 구조가 복잡하지 않고 에너지 손실이나 소음이 발생하지 않고 정상적인 운전 속도에도 제한을 받지 않는 등의 특유의 장점이 있다. 일반적으로 널리 사용하고 있는 유압이나 공압 방식의 선형구동에 비해서 선형전동기를 사용하면 출력면에서는 다소 떨어지지만 빠른 응답성, 반복성, 지속구동, 간단한 구조적 특성과 관리가 간편하다는 등의 장점을 가지고 있는 그 수요가 점차 증대되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 선형전동기를 구성하고 있는 시스템을 기준으로 단순 질량과 스프링 및 댄핑부 등으로 구성된 경우를 대상으로 구동특성을 알아보고 고유진동수 부근에서 구동할 경우에 발생하는 변위변화를 결정된 다음 댄핑과 부하변화에 따른 구동특성을 알아보았다. 특히 구동특성 중 주어진 입력 구동력에 따른 이동자의 위치변화를 시간에 따른 변화의 식으로 계산하면 입력 구동력의 주기성과 구동부의 구동의 주기성 사이에서 발생하는 위상변화를 관찰할 수 있다. 즉 힘의 최대점과 이동자의 위치의 최대점에 도달하는 시간을 계산한 다음 시간차를 주기로 계산하여 위상각으로 표시하면 주어진 특성을 정확히 표현할 수 있게 된다.

2. 본 론

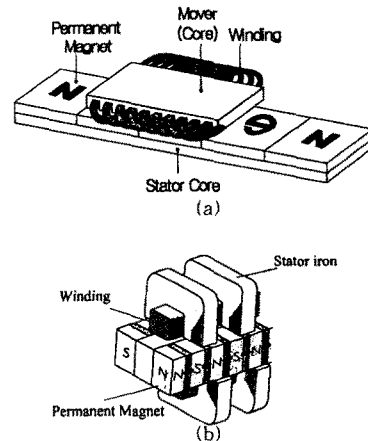
2.1 해석방법

선형 액추에이터의 주요 구성부품은 리니어 모터부, 구동제어부, 오일 공급부, 스프링 및 댄핑부 등으로 나뉠 수 있으며 이러한 구성부품들이 결합되어 선형 액추에이터가 구성된다. 특히 수십~수백[Hz]로 구동될 경우 선형액추에이터는 이동자의 자중에 의한 관성력이 굉장히 커지기 때문에 스프링의 관성력으로 일부 저장하고 그 관성력을 이용하는 방식을 적용하게 되고 스프링 계수는 고유진동수가 되게 설계하여야 관성력에 의한 에너지를 줄일 수 있다. 또한 각 부품은 선형 액추에이터의 구동에 영향을 미치게 되며 선형전동기가 전체 기술에서 핵심 메카니즘에 해당되며 구동을 위한 기구부와 제어하는 구동부로 크게 기술을 나뉠 수 있다.

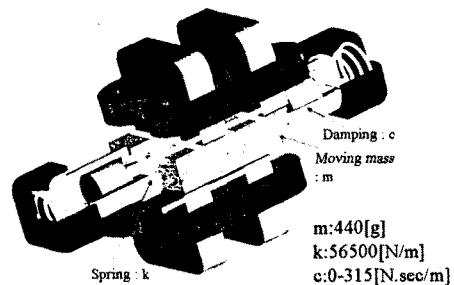
2.1.1 선형전동기의 구성

선형전동기는 선형 액추에이터에서 가장 핵심적인 부품으로서 선형액추에이터의 free piston을 구동하는 동력 발생의 핵심부품이다. 이러한 선형전동기는 크게 영구자석 구동형(moving magnet type), 코일 구동형(moving coil type), 철심구동형(moving iron type)으로 크게 3가지로 구분되지만 이

러 가지 형상의 혼합형들이 많이 사용되고 있는 실정이고 최근들어 영구자석 구동형에 대한 연구가 가장 활발한 실정이다. 이와같이 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. 선형전동기는 자속 이동방향과 구동방향이 일치하는 종자속형(Longitudinal Flux Linear Motor, LFLM)과 자속이 만들어 내는 평면과 이동방향이 횡방향인 횡자속형(Transverse Flux Linear Motor, TFLM)으로 크게 나뉠 수 있으며 기존에 많은 제품들이 종자속형에 해당되고 그림 1의 횡자속형은 최근들어 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다.



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



<그림 2> 선형액추에이터의 구성

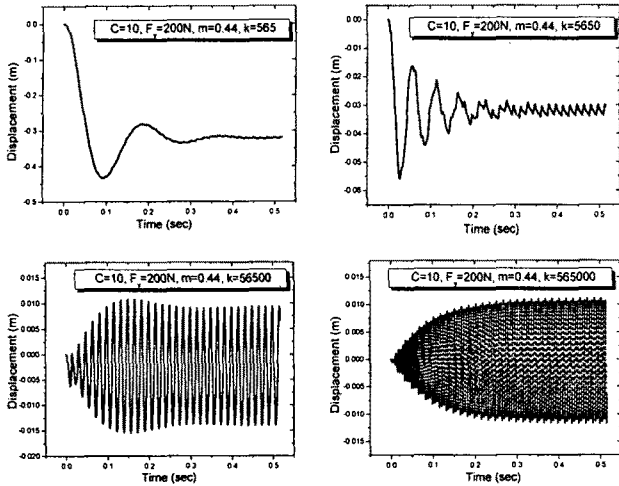
2.1.2 선형액추에이터의 구성

그림 2는 선형액추에이터의 전체적인 형상을 도시하였으며 전체 무게, 스프링 강성 및 댄핑계수는 다양한 조합으로 실제 구성할 수 있는 가능성을 타진해 보았다. 즉 그림 2의 m은 이동자가 움직이는 질량에 해당되고 고정된 구조조건에 따라 시스템의 질량 m과 스프링의 강성 k가 결정되며 c는 감쇠계수로서 압축과정에서 발생하는 압력변화에 따른 감쇠특성까지 고려되어야 한다. 그리고 압축과정에서 발생하는 압력변화는 피스톤의 위치변화에 따라 압력이 달라지므로 정확한 위치에 따른 경로함수로 정의하여야 하며 초기 구동되는 동적특성을 알아보기 위해서 외부에서 가해지는 선형전동기의 구동력을 적용하여 그 특성을 알아보았으며 구동방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

## 2.2 스프링의 강성에 따른 초기 구동특성

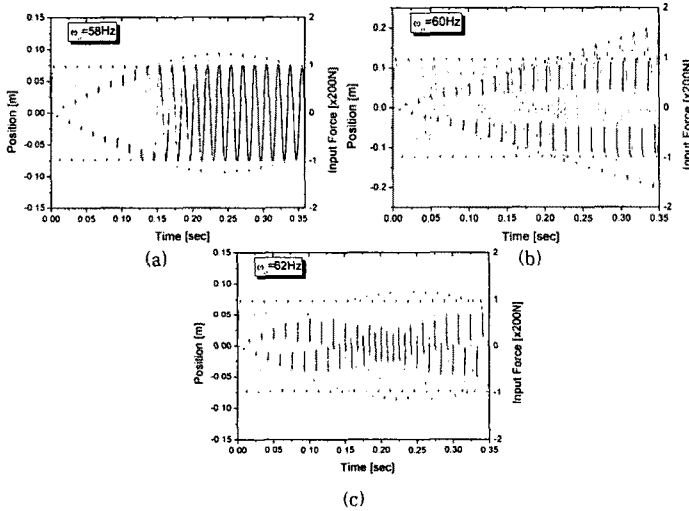
그림 3은 스프링의 성성에 따른 선형액추에이터의 초기 구동특성을 알아보기 위해서 스프링과 댐퍼가 장착된 일반상황에서 관성력과 스프링 강성의 변화에 따른 초기구동특성을 알아보았으며 본 해석에서 사용한 댐핑계수는 10[N.sec/m], 질량은 440[g], 선형전동기의 구동력은 최대 200[N]인 60[Hz]의 정현파의 힘을 적용하였다.



<그림 3> 스프링의 강성변화에 따른 초기 변위특성

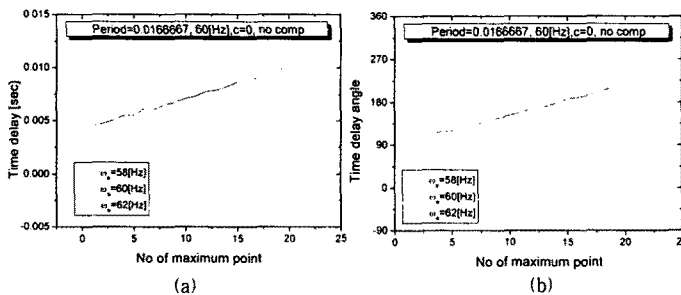
- (a)  $k = 565$ [N/m]      (b)  $k = 5,650$ [N/m]  
 (c)  $k = 56,500$ [N/m]      (d)  $k = 565,000$ [N/m]

그림 4는 고유진동수를 58,60, 62[Hz]가 되게 스프링의 강성을 변화시키고 댐핑과 압축기 부하가 없을 경우 발생하는 초기 구동특성이다.



<그림 4> 댐핑과 압축기 부하가 없는 경우 구동특성(c=0, No comp.)

- (a)  $k = 54,617$ [N/m]      (b)  $k = 56,500$ [N/m]  
 (c)  $k = 58,383$ [N/m]



<그림 5> 댐핑과 압축기 부하가 없는 경우 시간지연(c=0, No comp.)

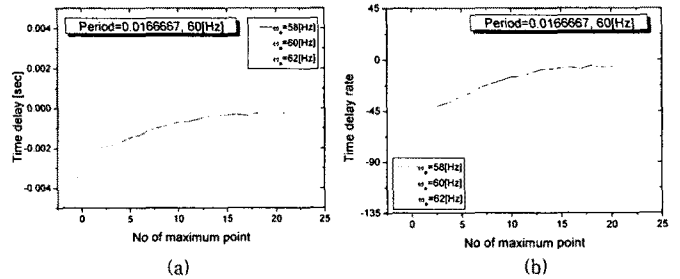
- (a) 시간 처짐      (b) Time delay angle

그림 5는 그림 4에서 전류의 최고점과 이동자의 음의 방향으로 최대점에 도달하는 시간을 측정한 다음 초기 구동에 따른 힘과 구동부의 최고점 도달 시간차를 계산하여 주기의 함수로 표시한 time delay angle( $360 \times \text{delay time/period}$ )을 나타내고 있다.

그림 5의 (a)와 같이 공진주파수와 구동주파수가 같은 60[Hz]인 경우 초기 구동에 따라 거의 일정한 time delay 특성을 나타내고 있으나 구동주파수보다 공진주파수가 낮은 58[Hz]인 경우 time delay는 커지고 구동주파수보다 공진주파수가 높은 62[Hz]인 경우 time delay는 초기 구동에 따라 작아지는 경향을 가진다.

## 2.3 부하에 따른 초기 구동특성

2.2절에서 설명한 바와 같이 압축기의 부하와 댐핑계수를 적용한 경우 압축기의 구동방향과 입력된 60[Hz]의 힘 사이에서 발생하는 위상차를 정리하기 위해서 압축부하와 실제에 가까운 부하에 따른 초기 구동특성을 알아 보았다. 초기 구동특성은 부하의 크기에 따라 위상차가 크게 변화하지만 일정시간이 지나면 안정된 구동특성을 보이는 것이 일반적이다.



<그림 6> 댐핑과 압축기 부하를 적용한 경우의 시간지연

- (a) 시간 처짐      (b) Time delay angle

그림 6의 (a)는 입력구동력의 최대 힘이 얻어지는 지점과 구동부의 최대 점을 통과하는 시간사이에서 발생하는 시간지연을 나타내었음 (b)의 경우는 시간지연을 주기로 나누고 그 크기를 위상각으로 표시한 결과이다. 그림의 (b)와 같이 공진주파수와 구동주파수가 같은 60[Hz]인 경우 약 55도의 위상각을 가지면서 균일하게 유지되고 있고 초기 3주기의 진행으로 안정된 영역으로 접근하는 것을 알 수 있다. 그러나 주파수가 조금 변하면 급격하게 변화함을 알 수 있고 안정된 영역으로 도달하려면 시스템의 주위 환경에 민감하게 변화할 것으로 판단된다. 그림 5와 그림 6을 비교해 보면 최대적인 60[Hz]의 구동특성은 거의 시간지연이 거의 동일하지만 2[Hz]의 주파수 변화에 따라서 큰 시간지연특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉 정확한 구동특성을 제어하기 위해서는 시간지연특성을 정확히 파악하고 시스템 전반의 댐핑 특성을 정확히 정의하여야 구동특성을 제어하고 신뢰성을 확보할 수 있다.

## 3. 결 론

회자속 선형전동기를 이용하여 선형 액추에이터를 설계하였으며 제작된 압축기의 초기 특성에 따른 구동특성을 정확히 파악하기 위해서는 주어진 시스템의 정확한 질량, 강성, 댐핑특성과 정확한 선형전동기의 구동특성을 알아야 하며 특히 댐핑계수의 변화와 고유진동수와 구동주파수사이의 위상차로 인해서 시간지연 또한 민감하게 변화함을 확인하였다.

## [참고 문헌]

- [1] T.Alasuvanto, etl, "Comparison of Four Different Permanent Magnet Rotor Constructions", Int. Conf. on Electrical Machines, pp.1034-1039, 1990.
- [2] J.F.Gieras, M.Wing, "Permanent Magnet Motor Technology", Marcel Dekker, Inc., 1997 Conference on Electrical Engineering 2002, Vol.3, p.1191, 2002.
- [3] 강도현, Herbert Weh, "철도 차량용 고속력 펄스형 전동기 설계에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 제 48(B)권, 제 6호, pp.301-308, 1999.
- [4] 우병철, 강도현, 홍도관, "공진형 선형 액추에이터의 스프링 강성 변화에 따른 과도응답특성", 대한전기학회 논문지 제 54(B)권, 제 3호, pp.134-138, 2005.
- [5] 우병철, 강도현, 홍도관, "회자속 선형전동기의 추력특성에 따른 선형액추에이터의 동특성", 대한전기학회논문집, 제 54(B)권, pp.16-20, 2006.
- [6] 우병철, 강도현, "공진형 선형 액추에이터의 감쇄지수 변화에 따른 과도 응답특성", 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp.1037-1039, 2004