

영구자석 여자 횡축형 선형 전동기(TFLM)를 이용한 가진기 제어

임태윤^{*U} · 강도현^{**} · 김종무^{**} · 김동희^{*}
 영남대학교^{*} · 한국전기연구원^{**}

Control of Vibrator using PM Excited Transverse Flux Linear motor

Tae Yun Lim^{*U}, Do Hyun Kang^{**}, Jong Moo Kim^{**}, and Dong Hee Kim^{*}
 Yeungnam University*, KERI^{**}

ABSTRACT

본 논문은 높은 추력비(전동기 추력/전동기 중량 =N/ Kg)를 갖는 영구자석 여자 횡축형 선형 전동기(TFLM)를 가진기 액츄에이터로 사용하여 부피와 체적을 줄이고 적은 중량이 요구되는 고출력 전동식 가진기 시스템을 유압식을 대체하여 구현하고 가변 변위 및 가변 속도가 가능한 제어 방법을 개발하여 적용하고자 한다.

1. 서 론

가진기는 물체에 기계적인 동력(가진력)을 제공하는 장치로써 건축물 및 기계 구조물의 동적 특성 해석을 위한 진동 시험 및 압축기(compressor)등의 산업용과 더불어 시뮬레이터와 같은 가진력을 요하는 다양한 분야에 적용되고 있으며 앞으로 더 많은 분야에서 필요로 될 것이다. 실제 이러한 가진기는 유압식이 대부분이며 또한 거의 수입에 의존하고 있는 실정이다. 가진기는 가진력의 발생기에 따라 기계식, 전자식, 유압식, 전동식, 압전식 등으로 나눌수 있고 고출력을 요하는 분야에서는 유압식 가진기가 주로 사용되고 있다. 그러나 유압식은 전동식에 비해 발생 가진력과 가진폭을 크게 할 수 있는 반면, 부피와 체적이 크며 유지 보수가 어렵고 높은 진동수에서 제어성능이 떨어지는 단점이 있다. 이는 이미 개발된 높은 추력비의 영구자석 여자 횡축형 선형 전동기를 액츄에이터로 사용하여 가진기의 구동 및 제어방법을 개발·적용하면 부피와 중량이 적고 제어성능이 좋은 고출력 가진기 시스템을 구현할 수 있다.

따라서 본 논문은 영구자석 여자 횡축형 선형 전동기의 특성을 바탕으로 동특성을 해석하기 위해 가진기 시스템을 모델링하여 진동 주파수 제어 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 바탕으로 적절한 영구자

석 여자 횡축형 선형전동기를 이용한 가진기 제어 기술을 개발·제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 영구자석 여자 횡축형 선형 전동기

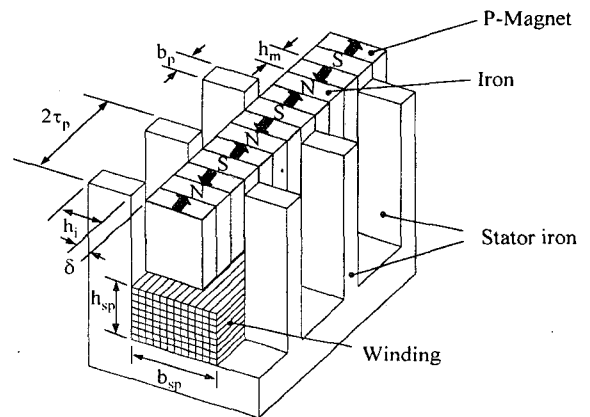


그림 1 영구자석형 TFLM의 기본 구조

그림 1은 영구자석형 TFLM의 기본 구조를 나타낸다. 이동자에 포함된 영구자석에서 발생된 자계는 공극에서의 자계를 집중시키므로 높은 공극 자속 밀도를 얻을 수 있어 출력밀도를 증가시킨다.

이동자의 영구자석의 극배치는 자속을 일정한 방향으로 발생시키도록 교대로 설치되며, 일정한 방향으로 추진력을 얻기 위해 권선이 있는 고정자 철심은 양측 극간격이 τ_p 만큼 엇갈리게 설계되었다.

그림 2는 2상 영구자석형 TFLM의 상배치를 그림 3은 이동자의 위치에 따른 기자력과 발생 추력과 합성 추력을 나타낸다. 그림 3에서 알 수 있듯이 이동자가 일정한 방향으로 움직이기 위해서는 2상 이상의 여자로 일정한 방향의 힘이 연속적으로 발생되어야 하므로, 두 상의 이동자를 일정한 간격

$\tau_p/2$ 을 두고 배치하고 각 상의 $0 \leq x \leq \tau_p$ 구간에서는 고정자의 자속이 영구자석의 자속방향과 같은 방향이 되도록 전류를 인가하고, $\tau_p \leq x \leq 2\tau_p$ 구간에서는 반대방향의 전류를 인가하여야 한다^[1].

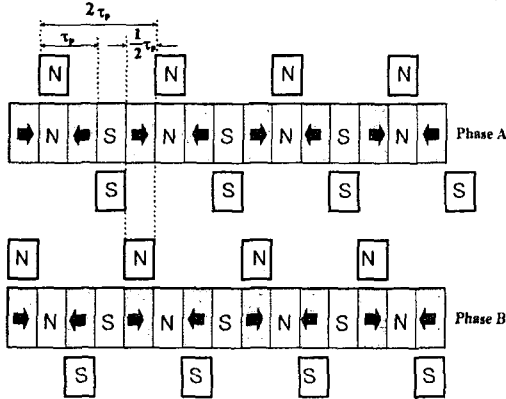


그림 2 2상 영구자석형 TFL의 상배치도

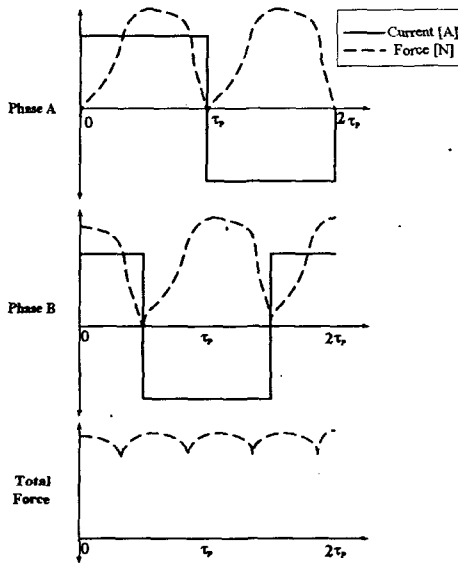


그림 3 이동자의 위치에 따른 발생추력과 두 상의 합성 추력

고정자 권선에 그림 3과 같은 기자력 θ_a 을 인가했을 경우의 자기 에너지를 W_{co} 라 하면, 발생 추력 F_x , 추력 밀도 F_{xd} 는 다음 식 (1), (2)와 같다.

$$F_x = \frac{\partial W_{co}}{\partial x} \quad [N] \quad (1)$$

$$F_{xd} = B_o \frac{\theta_a}{2\tau_p} \quad [N/m^2] \quad (2)$$

단, B_o 는 무부하 공극 자속밀도를 나타낸다.

2.2 가진기 제어 시스템 모델링

가진기의 동특성 해석에서는 전기적인 요소와 기계적인 요소가 결합된 특성방정식을 이용한다. 선형 전동기의 기계적인 특성식은 다음 식 (3)과 같다^[2].

$$F_x = M \frac{dv}{dt} + Cv + k_s x \quad (3)$$

k_s : 스프링상수 [N/m], M : 질량 [Kg]
 C : 점성마찰계수 [$Kg \cdot m/s$], v : 속도 [m/s]

이다. 그리고 전동기의 전류의 상태 방정식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{N \frac{\partial \Phi}{\partial i}} \left(V - R \cdot i - N \frac{\partial \Phi}{\partial x} v \right) \quad (4)$$

i : 전류 [A], V : 전압 [V], R : 권선의 저항 [Ω]
 Φ : 쇄교자속 [wb], N : 턴수

식 (4)에서 자기회로가 비선형이므로 그림 4에서 쇄교자속이 $\Phi(i_1, \theta_1)$ 로부터 $\Phi(i_2, \theta_2)$ 로 이동할 때, 전류 변화에 따른 유기전력인 인덕턴스는 식 (5)로, 위치 변화에 따른 유기전력은 식 (6)으로 계산된다.

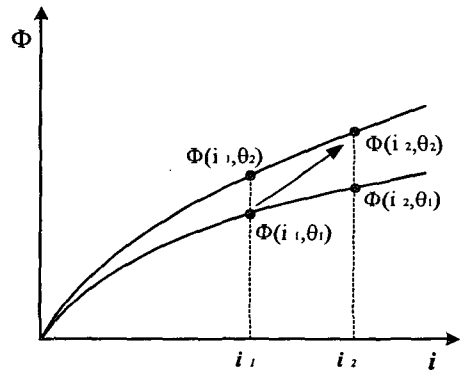


그림 4 전류-자속 그래프

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial i} &= \frac{\Phi(i, \theta) - \Phi(i - \Delta i, \theta)}{\Delta i} \\ &= \frac{\Phi(i_2, \theta_2) - \Phi(i_1, \theta_2)}{i_2 - i_1} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} &= \frac{\Phi(i, \theta) - \Phi(i, \theta - \Delta \theta)}{\Delta \theta} \\ &= \frac{\Phi(i_2, \theta_2) - \Phi(i_2, \theta_1)}{\theta_2 - \theta_1} \end{aligned} \quad (6)$$

가진기의 제어 대상물에 원하는 주파수로 가진을 제공하기 위해서는 부하조건에 맞는 가진력을 액츄에이터가

발생하여야 하며, 가진력은 전동기의 권선에 인가된 기
자력 즉 전류에 의하여 결정된다. 즉 제어량은 전류가
된다. 그리고 전류는 목표로 하는 가진동작을 결정하는
전동기의 속도에 의하여 결정된다. 즉 속도 제어기의 출
력이 전류가 된다. 가진 변위가 식 (7)과 같이 주어지면
속도 지령은 식 (8)과 같이 되며 이때의 발생 가진력은
마찰과 스프링을 무시하면 식 (3)으로부터 식 (9)와 같이
나타낼 수 있다.

$$x = D \sin \omega t \text{ [m]} \quad (7)$$

$$v = D\omega \cos \omega t \text{ [m/s]} \quad (8)$$

$$F_x = -MD\omega^2 \cos \omega t \text{ [N]} \quad (9)$$

속도제어는 응답 특성이 빠른 PI제어기를 사용하였으
며 전류제어는 그림 5의 히스테리시스 PWM 방식을 사
용하였다^[3].

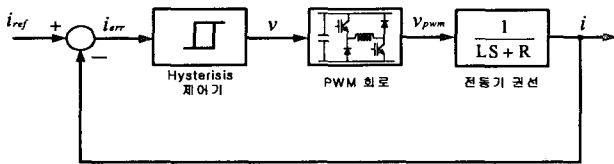


그림 5 Hysterisis PWM 전류 제어기

그림 6은 가진기의 전체 제어 시스템 블록도를
나타낸다. EPSG 블록에서는 그림 3에서와 같이 이
동자의 위치에 따른 각 상의 전류 시퀀스를 발생하
고 SACL 블록에서는 전동기의 운전 조건에 따른
스위칭 각을 제어하고 발생하는 로직이다.

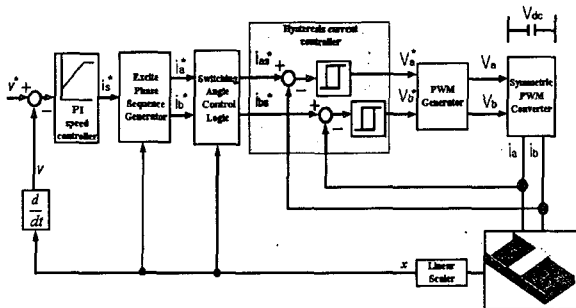


그림 6 가진기 제어 시스템 블록도

2.3 가진기 동특성 해석

2.2 절에서 모델링 된 제어시스템을 대상으로 동
적 시뮬레이션을 수행하여 동특성 해석을 수행하였
다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 가진기의 기계적
전기적 파라미터가 된다. 시스템의 전기적인 특성
을 해석하기 위하여 스프링상수와 이동자의 감쇠비
는 무시하였다.

표 1 특성 해석을 위한 가진기 시스템 파라미터

기계적 사양		전기적 사양	
가진 주파수	4 [Hz]	권선 저항(R)	1.6 [Ω]
스프링 상수(k)	0 [N/m]	정격 기자력	20×76 [AT]
감쇠비	0		
변위(D)	120[mm]	V _{dc}	297 [V]
질량(M)	6.6 [Kg]	정격 출력	4 [Kw]
		전류 주파수	60[Hz]

표 1과 같이 6.6[Kg]의 이동자를 4[Hz]로 변위
가 p-p 120[mm]로 가진시키기 위하여 필요한 가
진력 F_x 는 식 (7),(8),(9)에 의하여 500[N]이 된다.

이때의 가진력, 가진변위, 속도와 가속도의 응답
파형은 그림 7과 같다. 그림 8은 각 상의 전류와
발생 추력을 나타낸다.

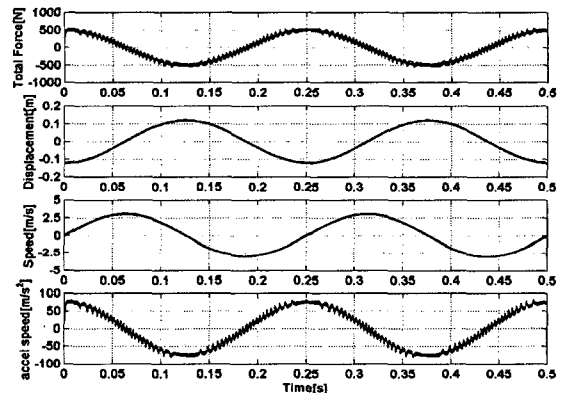


그림 7 가진시의 합성추력과 가진변위·속도·가속도
(주파수 4[Hz] 변위 0.12[m] 질량 6.6[Kg])

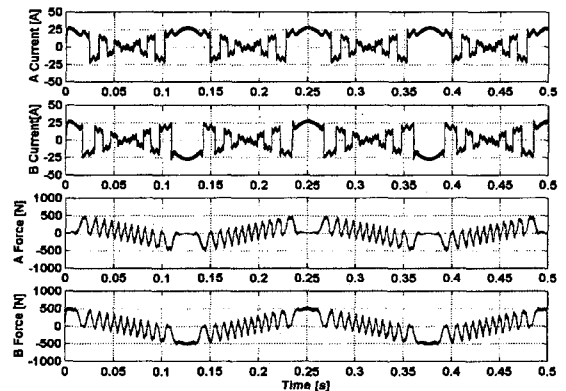


그림 8 가진시의 각상의 전류와 발생 추력
(주파수 4[Hz] 변위 0.12[m] 질량 6.6[Kg])

가진변위의 한 주기 동안의 각 상의 이동자의 위치에 따른 전류를 원좌표축으로 나타내면 그림 9와 같이 나타내지며 $\pi/2$ 의 위상차를 가지고 정현의 가진력을 발생하기 위하여 위치에 따라 전류의 크기가 정현적으로 제어됨을 알 수 있다.

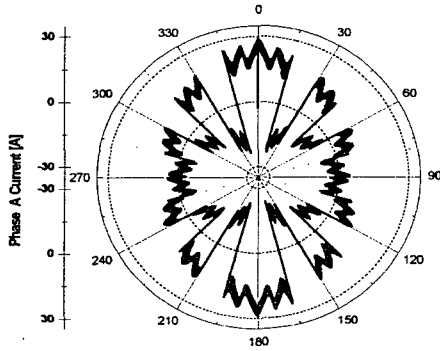


그림 9(a) 원좌표축으로 변환된 변위에 대한 A상 전류

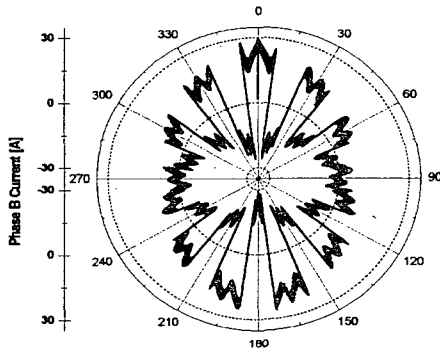


그림 9(b) 원좌표축으로 변환된 변위에 대한 B상 전류

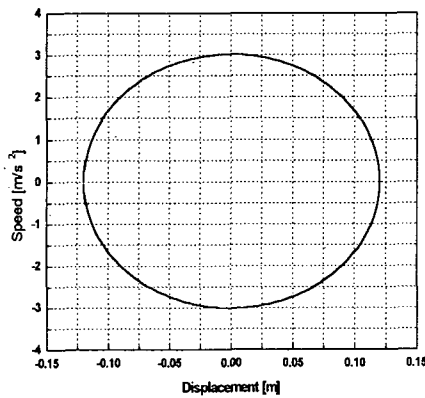


그림 10 가진 변위에 대한 가진 속도

횡축형 전동기는 전동기 특성상 그림 7과 같이 킬러턴스 토크에 의한 토크 리플이 존재하나 속도와 변위는 이의 적분에 해당하므로 거의 리플이 존재하지 않는 정현적인 특성을 갖는다. 따라서 가진 변위와 속도가 $\pi/2$ 의 위상차를 갖고 정상적인 정현적인 운동을 하면 변위에 대한 속도를 그림으로 나타내면 다음 그림 10과 같이 원 형태로 나타난다.

그림 11은 실제 제작된 영구자석형 표 1의 사양으로 설계된 가진기의 시제품을 나타낸다.

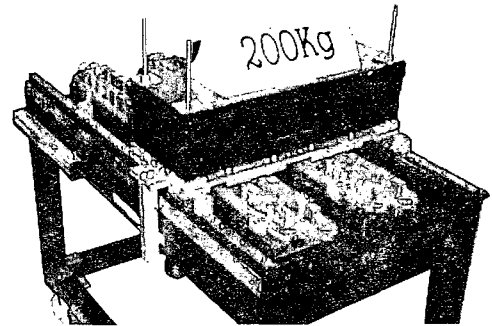


그림 11 영구자석형 TFLM가진기 시제품

3. 결 론

동특성 해석을 통해 영구자석형 TFLM의 가진 동작이 잘 수행됨을 알 수 있었다. 가진력의 추력 리플을 줄이고 실시간 가변 주파수, 가변 변위 제어는 변위와 추력제어가 포함된 제어 알고리즘을 개발·적용함으로써 가능하다. 현재 시뮬레이션을 통한 동특성 해석에서 입증된 제어알고리즘을 바탕으로 실험이 진행중이며 향후 연구 과제는 주파수와 변위의 가변 제어특성이 강한 제어알고리즘을 개발함에 있다.

본 연구는 한국 과학 재단 목적기초연구 (1999-2-30200-008-3)지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 강도현, 정연호, "고출력 횡축형 선형전동기의 원리와 응용" Proceeding of KIEE. Vol. 43, No. 10, oct. 1999.
- [2] 임태운, 김종무, 강도현, 김동희 "횡자속 선형 전동기를 이용한 가진기 구동시스템 구현" 대한전기학회 학술대회, July, 2001.
- [3] Ion Boldea, S.A.Nasar, "ELECTRIC DRIVES", CRC Press, 1999.