3차원 해석적 방법을 이용한 슬롯리스형 영구자석 선형 동기전동기의 동특성해석 및 PI제어를 이용한 제어성능 향상

김미용*, 조성호, 안호진, 강규홍, 김규탁
창원대학교 전기공학과

Dynamic Analysis of Slotless PM linear Synchronous Motor Using 3-D Analytical Method And Improvement of Controllability Using PI Control System

Mi-Yong kim*, Sung-Ho Cho, Ho-Jin Ahn, Gyu-Hong Kang, Gyu-Tak Kim
Department of Electric Engineering, Changwon National University

Abstract - This paper is presents dynamic analysis of slotless PM linear synchronous motor using 3-D analytical method and improvement of controllability using PI control system. In oredr to calculate dynamic characteristic, back - EMF waveform and inductance are caculated by PM's magnetic field and winding's magnetic filed respectively. PMLSM simulated by PI control system.

1. 서 론

슬롯리스형 PMLSM은 영구자석과 치-슬롯 구조에 의해 발생하는 디텐트력을 근본적으로 제거할 수 있어 뛰어난 제어성능을 가지고 있다. 또한 최근 고에너지 밀도의 영구자석이 개발되고 있어 슬롯리스형 PMLSM은 리니어 시스템에서 요구되는 고속 성능과 정밀 위치제어 성능을 겸비한 최적의 구동원이라 할 수 있다.[1]

공간고조파등의 해석적 방법은 복잡한 형상과 재질의 비선형성을 고려하기 어렵다는 단점이 있으나 초기 설계시 빈번한 설계변수의 변화에 따른 특성파악이 용이하다는 장점으로 슬롯리스형 PMLSM과 같은 전기자의 형상이 간단하고 철심의 포화 현상이 발생하지 않는 모델에 매우 유용한 해석 방법이다.[2]

따라서 본 논문에서는 3차원 해석적 방법을 통해 슬롯리스 PMLSM의 특성해석을 수행하였다. 3차원 해석적 방법에서는 2차원 해석적 방법에서 고려되지 않은 축방향 누설성분을 고려함으로서 보다 정확한 인덕턴스와 역기전력을 산출하였다. 3차원 해석적 방법의 타당성을 검증하기 위해 인덕턴스와 추력을 실험치와 비교하였다.

슬롯리스형 PMLSM의 운전 성능을 확인하고 고속 정밀제어 시스템에 이용하기 위해 페루프 제어를 통한 속도제어를 수행하였고 만족할만한 제어 성능을 확인할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 3차원 해석적 방법을 이용한 자계 해석

본 논문에서는 3차원 공간고조파법을 이용해 자계 해석을 수행하였고 영구자석에 의한 자계와 전기자 전류에 의한 자계를 계산하여 중첩하였다.

표 1. 해석 모델의 사양

항 목	기호	값[단위]	항 목	기호	값[단위]
극 수	$2p$	12	극 피치	τ_p	28.5[mm]
잔류자속밀도	B_r	1.2[T]	코일 높이	h_c	11[mm]
영구자석 높이	h_p	12[mm]	코일 폭	w_c	12[mm]
영구자석 길이	l_p	73.5[mm]	코일 간격	d_c	12[mm]
영구자석 폭	w_p	26[mm]	공극 길이	l_g	2[mm]

영구자석에 의한 자계 해석시 계변수를 자기 스칼라 퍼텐셜 φ로 두었을 때 공극과 영구자석 영역에서의 지배방정식은 각각 식 (1)및 (2)와 같다.

$$\nabla^2\varphi_I(x,y,z)=0 \tag{1}$$

$$\nabla^2\varphi_{II}(x,y,z)=\frac{\nabla\cdot\boldsymbol{M}}{\mu_r} \tag{2}$$

식 (2)에서 $\boldsymbol{M}$은 영구자석의 자화벡터를 나타낸다. 자화는 경계조건으로 적용되며 자화분포는 무한히 주기적인 분포를 가진다는 가정하에 식 (3)과 같이 푸리에 급수로 나타낼 수 있다.

$$M_y=\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}M_{mn}\cos(mk_x x)\cos(nk_z z) \tag{3}$$

$$M_{mn}=\frac{16M_{pm}}{mn\pi^2}\sin(ma_x\frac{\pi}{2})\sin(na_z\frac{\pi}{2}) \tag{4}$$

공극 자속밀도는 아래의 식 (5), (6), (7)과 같다.

$$B_{xI}^{pm}=-\sum_{m=1,3}^{\infty}\sum_{n=1,3}^{\infty}\frac{mk_x}{k_{mn}}\beta_{3I}^{pm}\cdot \sin(mk_x x)\sinh(k_{mn}y)\cos(nk_z z) \tag{5}$$

$$B_{yI}^{pm}=+\sum_{m=1,3}^{\infty}\sum_{n=1,3}^{\infty}\beta_{3I}^{pm}\cdot \cos(mk_x x)\cosh(k_{mn}y)\cos(nk_z z) \tag{6}$$

$$B_{zI}^{pm}=-\sum_{m=1,3}^{\infty}\sum_{n=1,3}^{\infty}\frac{nk_z}{k_{mn}}\beta_{3I}^{pm}\cdot \cos(mk_x x)\sinh(k_{mn}y)\sin(nk_z z) \tag{7}$$

$$\beta_{3I}^{pm}=\frac{\mu_0 M_{mn}\sinh(k_{mn}(y_m-y_s))}{\left[\begin{array}{l}\mu_r\cosh(k_{mn}y_m)\sinh(k_{mn}(y_m-y_s))\\-\cosh(k_{mn}(y_m-y_s))\sinh(k_{mn}y_m)\end{array}\right]} \tag{8}$$

영구자석에 의한 자계 해석과 같은 방법으로 전기자 전류에 의한 자계도 구할 수 있다. 그림 1은 해석적 방법에 의해 구한 공극 자속밀도와 유한요소 해석법으로 구한 공극 자속밀도를 나타낸 것으로 오차가 발생하지 않음을 알 수 있다.

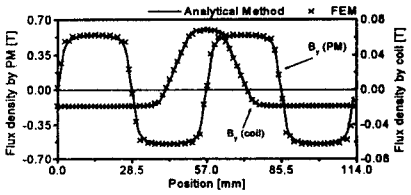


그림 1. 공극 자속밀도 분포

2.2 역기전력 및 인덕턴스

역기전력은 식 (9)로부터 구할 수 있다.

$$e = -N\frac{d\Phi}{dt} = -N\frac{d}{dt}\int_x B^{lm}dx \qquad (9)$$

그림 2는 해석적 방법과 유한요소 해석에 의한 역기전력과 쇄교자속을 나타내고 있으며 거의 일치함을 알 수 있다.

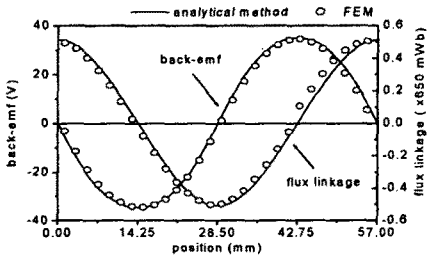


그림 2. 역기전력과 쇄교자속

A상 전류만 여자 시킬 경우 자기 및 상호 인덕턴스는 식 (10), (11)과 같다.

$$L_{self} = N\Phi / I = N\int_A^{\overline{A}} B^{\infty}dx / I \qquad (10)$$

$$L_{mutual} = N\Phi' / I = N\int_B^{\overline{B}} B^{\infty}dx / I \qquad (11)$$

표 2. 인덕턴스 비교

	Analytical Method		FEM	실험치
	2-D	3-D		
self[mH]	34.25	30.03	30.86	29.38
mutual[mH]	9.07	8.46	9.08	-

표 2는 인덕턴스의 해석치와 실험치를 비교하고 있다.

2.3 추력 및 수직력

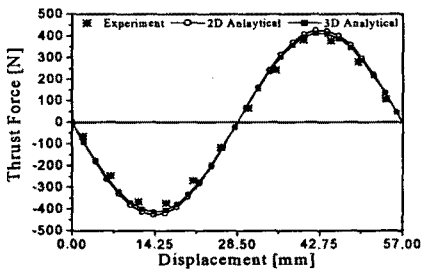
공극에서의 발생력은 맥스웰 응력(Maxwell stress)으로부터 식 (12), (13), (14)과 같이 구할 수 있다.

$$F_x = \frac{1}{\mu_0}\int\int B_x B_y\,dxdz \qquad (12)$$

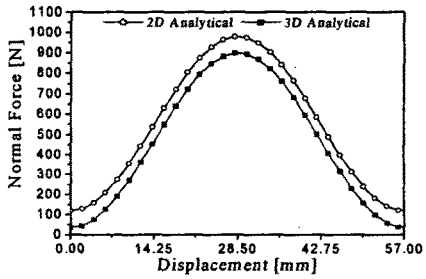
$$F_y = \frac{1}{2\mu_0}\int\int (B_y^2 - B_x^2 - B_z^2)\,dxdz \qquad (13)$$

$$F_z = \frac{1}{\mu_0}\int\int B_y B_z\,dxdz \qquad (14)$$

그림 3은 가동자 변위에 따른 추력 및 수직력을 나타내고 있다.



(a) 추력



(b)수직력

그림 3. 가동자 변위에 따른 추력 및 수직력

3차원해석에서 구한 공극 자석의 z축 방향 누설 성분으로 인해 추력 및 수직력은 2차원해석에서 보다 작게 나타나는데 영구자석의 축방향 길이가 짧은 기기일수록 그 차이는 더 크게 나타나므로 3차원 해석이 절실함을 알 수 있다.

2.4 동특성 해석

선형 전동기는 구조 및 운전 특성상 정특성 해석보다는 동특성이 중요하다. 그래서 과도상태운전에서의 정확한 해석을 위해 미소시간 간격으로 순시적인 추력 및 역기전력을 계산하여 전압방정식과 운동방정식을 결합하여 동특성 해석을 시행하였다.

2.4.1 개루프 제어시 동특성

그림 4는 V/f 비에 따른 기동특성을 보여주고 있다. 가속 구간에서 거의 일정한 추력으로 우수한 가속성능을 보이고 있지만 정상상태에서 속도 지령치에 수렴하지 못하고 장시간 맥동하고 있는 모습을 확인할 수 있다.

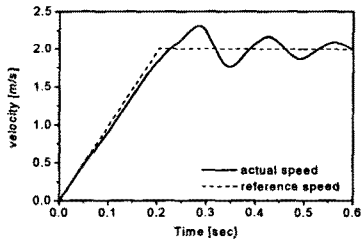


그림 4. Vm = 1.5f+47 일 때 속도 특성

V/f 비, 초기부하각과 부하에 따른 시뮬레이션 결과 기동이 되지 않는 경우도 발생했고 V/f 비의 조절만으로는 만족할 만큼의 운전 성능을 나타내지 못했다. 따라서 고속 성능과 정밀위치제어 성능을 얻기 위해 폐루프 제어시스템의 도입이 필수적이다.

2.4.2 폐루프 제어시 동특성

슬롯리스 PMLSM의 전압방정식을 2상 동기 좌표계로 나타내면 식 (15)와 같다.[3]

$$\begin{aligned} pi_d &= \omega_r i_q + \frac{R_s}{L_s} i_d + \frac{1}{L_s} V_d \\ pi_q &= -\frac{R_s}{L_s} i_q + \omega_r i_d - \frac{\phi_f}{L_s}\omega_r + \frac{1}{L_s} V_q \end{aligned} \qquad (15)$$

그림 5는 PI 제어기를 이용한 폐루프 제어 시스템 구성도이다. 폐루프 제어특성을 알아보기 위해 속도제어를 수행하였으며 제어방식은 연속치계의 제어계통 설계에 있어서 가장 널리 쓰이고 있는 PI제어 방식을 이용하였다.

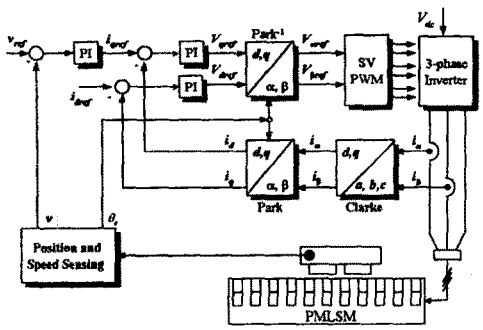
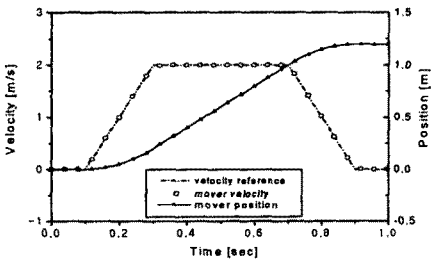
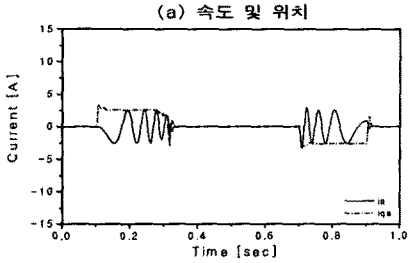


그림 5. PI 제어 시스템 구성도

속도제어를 위한 지령치로서 운전구간을 1.2[m]로 설정하고 정상 상태시 운전속도는 2[m/s]가 되도록 하였다.

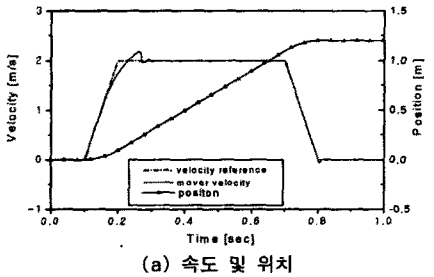


(a) 속도 및 위치

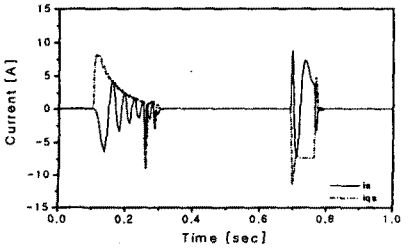


(b) a 상전류 및 q 축 성분전류

그림 6. 가속도 1G시 동특성

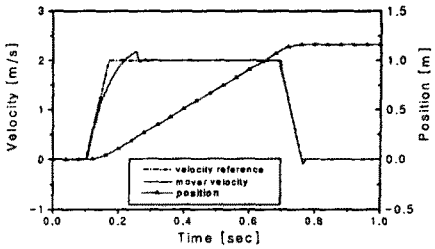


(a) 속도 및 위치

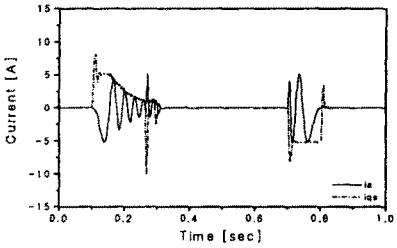


(b) a 상전류 및 q 축 성분전류

그림 7.가속도 2G시 동특성



(a) 속도 및 위치



(b) a 상전류 및 q 축 성분전류

그림 8.가속도 3G시 동특성

그림 6, 7, 8은 각각 가속도를 1G, 2G, 3G로 하였을 때 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 그림 6(a)는 오차 및 지연현상 없이 속도 지령치에 매우 잘 추종하고 있는 것을 볼 수 있다. 그림 7, 8에서 가속도를 2G, 3G로 증가시킴에 따라 기동 시 다소 지연되는 현상과 속도 맥동이 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 가동자의 관성에 의한 결과이다. 그림 7, 8과 같이 가속도가 증가함에 따라 가감속 구간에서 전류값이 크게 상승함을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과를 통해 속도 및 위치 지령에 비교적 빠르고 안정적으로 도달하는 것을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 3차원 해석적 방법으로 공극자속 밀도를 계산하고 이로부터 인덕턴스와 역기전력을 산출하여 전압 방정식으로부터 전동기의 동특성해석을 수행하였다. 해석의 정확도를 검정하기 위해 유한요소 해석과 비교한 결과 거의 일치된 값임을 확인할 수 있었다. 또한 슬롯리스형 PMLSM의 운전 성능을 알아보기 위해 PI 제어를 이용한 속도제어 시뮬레이션을 하였다. 2G, 3G에서 다소 지연현상이 발생하였지만 아주 양호한 제어 성능을 얻을 수 있었다.

향후, 실제 제어기를 구성하여 실험 결과와 비교하므로써 3차원 해석적 방법과 동특성 시뮬레이션의 결과의 타당성을 검토할 계획이다.

[참 고 문 헌]

[1] 안호진, 강규홍, 홍정표, 김규탁, "해석적 방법을 이용한 슬롯리스형 영구자석 선형전동기의 특성해석", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 2001.

[2] 이주민, 강규홍, 홍정표, 김규탁, "3차원 공간고조파법을 이용한 슬롯리스형 영구자석 선형 동기전동기의 자계 및 추력특성 해석", 전기학회논문지, 제50권 6호, 255-262, 2001.

[3] 임기채, "수치해석법을 이용한 영구자석 선형 동기전동기의 특성해석 및 제어기 구현", 창원대학교 박사학위논문, 2000.