

# 고추력용 철심형 영구자석 선형동기전동기의 운전조건을 고려한 설계

(Research on Design Characteristics of Steel-Cored PMLSM with High Thrust Force Considering Running Condition)

정상용\*

(Sang-Yong Jung)

## 요 약

본 논문에서는 철심형 영구자석 선형동기전동기(PMLSM, Steel-Cored Permanent Magnet Linear Synchronous Motor)에서 운전 특성을 고려한 설계 특성 및 전략 등에 대한 내용을 다룬다. 특히 반송장치의 운송궤적에서 요구하는 동적특성과 전동기의 동적용량(Dynamic Capability)을 고려한 동적제약조건(Dynamic Constraints) 규정을 통하여, 짧은 변위의 급가감속 왕복운전을 위한 철심형 PMLSM의 최적설계 전략을 살펴본다. 이와 더불어 동특성이 두드러진 PMLSM의 설계특성으로 열적인 특성, 디텐트력 해석 및 저감, 그리고 자계의 포화특성에 대하여 추가 고찰한다.

## Abstract

This paper presents the design characteristics and strategies applied for steel-cored PMLSM(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor) considering the running conditions. Particularly, optimal design consideration on steel-cored PMLSM for short reciprocating trajectory using dynamic capability and dynamic constraints has been performed. Furthermore, thermal aspects, detent force, and magnetic saturation in design of steel-cored PMLSM have been investigated.

Key Words : PMLSM(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor), Dynamic capability, Dynamic constraints, Thermal characteristics, Detent force, Magnetic saturation

## 1. 서 론

일반적으로 선형기기는 짧은 구간내의 반복운전으로 항시 과도상태에서 동작하게 되어, 기존의 정상상태를 기준으로 한 설계기준과 기법 적용에는 한계가 있다[1-5]. 특히 선형기기는 전기적인 사항 외에도 요구되는 운전 궤적과 스트로크의 변위, 마찰

\* 주저자 : 동아대학교 전기공학과 전임강사  
Tel : 051-200-7733, Fax : 051-200-7743  
E-mail : syjung@dau.ac.kr  
접수일자 : 2007년 3월 30일  
1차심사 : 2007년 4월 2일  
심사완료 : 2007년 4월 12일

고추력용 철심형 영구자석 선형동기전동기의 운전조건을 고려한 설계

력 등과 연관되어 다양한 동적인 특성을 나타내게 되는데, 본 논문에서는 전동기의 동적용량(Dynamic Capability)으로 설명하고자 한다. 동적용량은 입력되는 구동원의 최대전압, 전류에서 발생할 수 있는 과도 상태에서의 속도별 선형기기 최대추력을 의미한다. 이를 통하여 극피치, 역기전력상수, 상저항, 인덕턴스로 구성된 새로운 설계 기준인 동적제한조건(Dynamic Constraints)을 설정할 수 있으며, 설계 변수도 함께 선정할 수 있다. 본 논문에서는 동적인 설계 특성을 고려하여 고추력이면서 동시에 고속운전(짧은 변위 왕복 운전용)이 가능한 철심형 PMLSM의 설계특성과 최적 설계로의 확장을 다루고 있다.

아울러 동특성이 두드러지는 철심형 PMLSM에서 고려해야할 설계특성으로, 냉각 방식을 고려한 국부 온도 분포, 철심 구조로 인한 디텐트력 존재와 저감 방안, 대전류 인가시 자계 비선형성 고려 등이 있다 [6-9]. 열 해석에서는 해석적인 방법과 수치해석적인 방법을 적용하여, 자연냉각과 강제냉각(수냉)에 따른 입력 전류밀도 별 온도특성을 나타낸다. 또한, 철심형 구조에서는 추력 맥동의 주 원인을 디텐트력에서 찾을 수 있으며, 이에 대한 이론적인 규명과 제작 용이성을 고려한 저감 방안을 제시한다. 마지막으로, 대전류 인가시 발생하는 비선형적인 철심의 자계 포화특성을 고정투자율법(Fixed Permeability Method)을 적용하여 규명한다.

## 2. 운전조건을 고려한 철심형 PMLSM 설계특성

### 2.1 철심형 PMLSM

그림 1의 철심형 PMLSM은 가동 코일형으로 가동 자석형에 비해 높은 제어성을 보이며, 철심 구조로 인한 높은 추력 밀도를 나타내어, 공작기계, 반도체 장비 등의 고추력을 요구하는 곳에 많이 응용된다.

한편 그림 2는 PMLSM의 제작성을 높이기 위한 단절 집중권 결선구조와 4극 3코일 형태의 조합을 나타내었다.

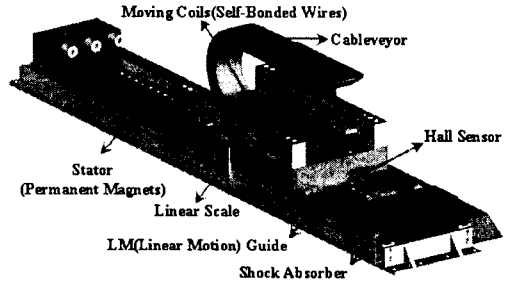


그림 1. 철심형 PMLSM  
Fig. 1. Steel-cored PMLSM

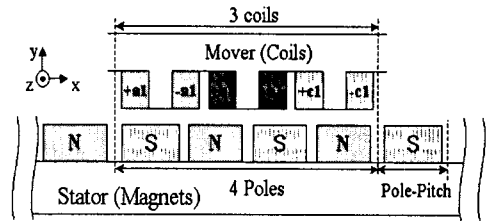


그림 2. 철심형 PMLSM의 4극 3코일 구조  
Fig. 2. Structure of steel-cored PMLSM

### 2.2 운전모드 및 PMLSM 추력곡선

인버터의 최대 허용전압 ( $V_{max}$ )과 전류 ( $I_{max}$ )에서 PMLSM이 낼 수 있는 속도별 추력은 다음과 같이 정의될 수 있다[1].

$$F_{e, max} = \frac{3}{2} K_e \min \left( \frac{C_1 + \sqrt{C_2 - C_3}}{R_s^2 + (\pi/\tau)^2 L_s^2 \nu^2}, I_{max} \right) \quad (1)$$

$$C_1 = -R_s \left\{ K_e \nu + \left( \frac{2L_s}{3K_e} \right) \left( m \frac{da}{dt} + Ba \right) \right\},$$

$$C_2 = \left\{ \left( \frac{\pi}{\tau} \right)^2 L_s^2 \nu^2 + R_s^2 \right\} V_{max}^2$$

$$C_3 = \left( \frac{\pi}{\tau} \right)^2 L_s^2 \nu^2 \left\{ K_e \nu + \left( \frac{2L_s}{3K_e} \right) \left( m \frac{da}{dt} + Ba \right) \right\}^2$$

$\tau$  : 극피치[m],  $K_e$  : 역기전력 상수[V/(m/sec)]  
 $R_s$  : 저항[Ω],  $L_s$  : 동기인덕턴스[H]

식 (1)은  $i_e=0$ 일때 유도되는 속도별 출력 가능한 최대 추력을 나타내는 동적용량으로, 가속도 a와 저

크( $J = da/dt$ )와 같은 시변요소를 포함하고 있어 동적 특성해석에 유용하다.

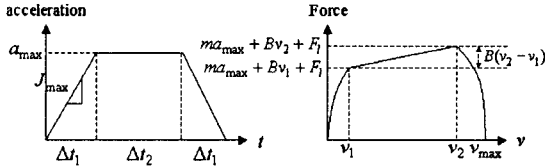


그림 3. 사다리꼴 가속도 운전모드  
Fig. 3. Trapezoidal motional profile

그림 3에서는 선형기기에 주로 사용되는 사다리꼴 가속도 운전모드와 이와 관련된 추력-속도 특성을 나타내었으며, 다음과 같이 요약될 수 있다.

$$F_e(v) = \begin{cases} m\sqrt{\frac{2a_{\max}}{\Delta t_1}} \nu + B\nu + F_l & (0 < \nu \leq \nu_1) \\ ma_{\max} + B\nu + F_l & (\nu_1 < \nu \leq \nu_2) \\ m\sqrt{\frac{2a_{\max}(\nu_{\max} - \nu)}{\Delta t_1}} + B\nu + F_l & (\nu_2 < \nu \leq \nu_{\max}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\nu_1 = (a_{\max} / 2) \cdot \Delta t_1, \quad \nu_2 = a_{\max} (\Delta t_1 / 2 + \Delta t_2)$$

### 2.3 동적용량을 적용한 설계특성

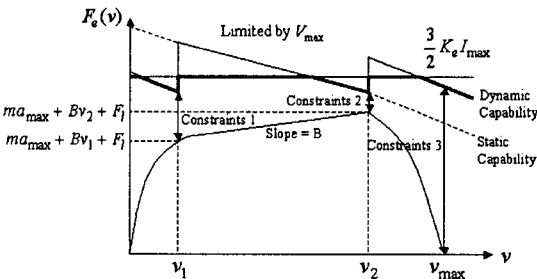


그림 4. 동적용량 특성  
Fig. 4. Dynamic Constraints of PMLSM

이론적으로 식 (1)로 표현되는 동적용량은 식 (2)로 나타나는 힘-속도의 요구 궤적보다 모든 운전 영역에서 큰 값을 지녀야한다. 그림 4에서는 동적용량과 요구되는 동작 궤적을 비교하고 있는데, 전류와 전압의 제한조건에 의해 각각 얻어지는 두 추력값 중 작은 값이 최종 동적용량(두꺼운 실선)이 되며,

이 값이 요구되는 동작 조건보다 커야 한다는 제한 특성이 동적제한조건이다. 따라서 속도  $v_1, v_2, v_{\max}$ 에서의 동적용량이 요구궤적 용량보다 커야하며, 이를 요약하면 다음과 같다.

<동적조건 1 :  $v = v_1, J = J_{\max}, a = a_{\max}$ >

$$\frac{3}{2} K_e \frac{C_1 + \sqrt{C_2 - C_3}}{R_s^2 + (\pi/\tau)^2 L_s^2 \nu^2} \gg ma_{\max} + B\nu_1 + F_l \quad (3)$$

<동적조건 2 :  $v = v_2, J = 0, a = a_{\max}$ >

$$\frac{3}{2} K_e \min \left\{ \frac{C_1 + \sqrt{C_2 - C_3}}{R_s^2 + (\pi/\tau)^2 L_s^2 \nu^2}, I_{\max} \right\} \gg ma_{\max} + B\nu_2 + F_l \quad (4)$$

<동적조건 3 :  $v = v_{\max}, J = -J_{\max}, a = 0$ >

$$\frac{3}{2} K_e \frac{C_1 + \sqrt{C_2 - C_3}}{R_s^2 + (\pi/\tau)^2 L_s^2 \nu^2} \gg 0 \quad (5)$$

따라서 동적제한조건으로  $\tau, K_e, R_s, L_s$ 에 대한 설계 기준을 마련할 수 있으며, 이는 설계 변수로부터 정의되어 설계안의 타당성을 확인할 수 있는 좋은 제한조건 역할을 한다.

### 2.4 $K_e$ 에 따른 PMLSM 설계 특성

일반적으로 PMLSM의  $K_e$ 는  $v_2$ 를 기준하여,  $V_{\max} / V_{\max} \leq K_e \leq V_{\max} / (2v_{\max})$ 의 범위에서 존재한다. 그림 5에서는  $K_e$ 에 따른 설계 변수 조합의 분포와 허용 가능 설계 조합수를 나타내었다.  $K_e$ 가 증가함에 따라 개선된 효율을 구현할 수 있으나,  $V_{\max} / v_{\max}$  근처( $K_e = 39$ )에서는 설계 조건이 강하게 작용함을 알 수가 있으며,  $K_e = 20 (= V_{\max} / 2v_{\max})$ 일 때 설계 변수 조합수가 최대가 됨을 알 수가 있다.

동적제한조건을 적용하여  $\tau, K_e, R_s, L_s$ 에 대한 설계기준이 제시되었다면, 설계변수를 극피치( $\tau$ ), 자석높이( $h_m$ ), 공극길이( $g_0$ ), 슬롯 높이( $S_h$ ) (또는, 슬롯내 권선수)와 같이 선정하는 것이 타당하다. 선정된 설계 변수와 동적제한조건에 의해 제시

고추력용 철심형 영구자석 선형동기전동기의 운전조건을 고려한 설계

된 설계 제한 조건, 그리고 기계적인 전동기 전체 치수 제한에 따라 동작 특성을 만족하는 최적 설계를 수행할 수 있으며, 그림 6에는 최적설계 순서도를 나타내었다.

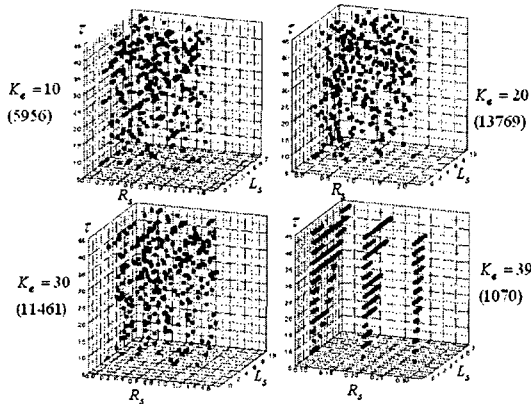


그림 5.  $K_e$ 에 따른 설계조합 분포 및 개수  
Fig. 5. Admissible design combination of PMLSM versus  $K_e$

( $V_{max} = 160(V)$ ,  $I_{max} = 150(A)$ ,  
 $J_{max} = 3000(m/s^3)$ ,  $m = 37(kg)$ ,  
 $F_l = 50(Nm)$ ,  $B = 100(N/(m/s))$ ,  
 $a_{max} = 20(m/s^2)$ ,  $v_{max} = 4(m/s)$ )

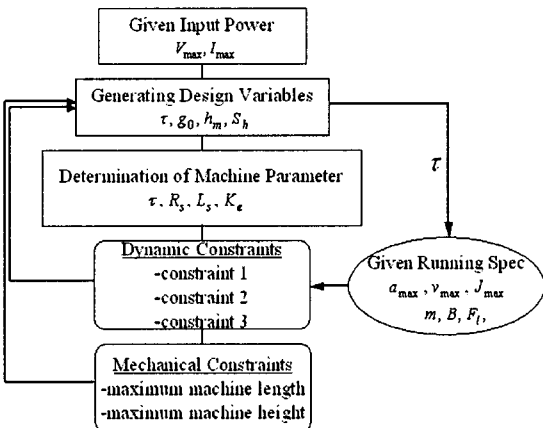


그림 6. 최적설계 순서도  
Fig. 6. Optimal design flow chart

표 1에는 300[mm] 왕복 운전, 최대/연속 추력 7500/1500[N],  $v_{max} = 4[m/s]$ ,  $a_{max} = 20[m/s^2]$ ,  $J_{max} = 3000[m/s^3]$ , 입력전압 220[V], 최대 입력 전류

150[A], 추력리플 5%(연속 추력대비)이내에 부합하는 설계 제원을 나타내었으며, 각 시스템 파라미터는  $R_s = 0.42[\Omega]$ ,  $L_s = 3.5[mH]$ ,  $m = 37[kg]$ ,  $B = 100[N/(m/s)]$ ,  $F_l = 50[N]$ ,  $K_e = 31.8[V/(m/s)]$ 와 같다. 설계된 철심형 PMLSM의 동작 특성은 그림 7에 나타나 있는데, 요구 추력에 비하여 전동기 용량곡선이 충분히 확보됨을 알 수 있으며,  $v_2$  근처에서 충분한 제어 마진을 두고 있다.

표 1. 설계된 철심형 PMLSM 제원  
Table 1. Specification of Designed PMLSM

	제 원	치 수
일반 (수냉)	공극 길이	1[m]
	철심장(S45C)	100[mm]
	전압(선간)	220[V]
고정자 (영구자석)	자석높이/폭	9/27[mm]
	극피치	30[mm]
	자석재 및 등급	NdFeB, 44H
	스큐각	30[°](5[mm])
가동자 (전자자 코일)	슬롯폭/치폭	14/8[mm]
	슬롯당 권선수	180[회]
	코일경	1[mm]
	치 챔퍼링	3*3[mm]

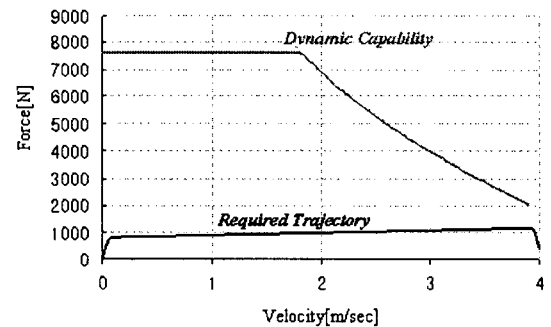


그림 7. 설계된 철심형 PMLSM의 동작특성  
Fig. 7. Performance of designed PMLSM

3. 열적 특성

선형기기 운전에서 급가감속을 위하여, 대전류 인가는 불가피하며, 각 부의 절연 등급 규정 온도 상승

허용치에 따라 최대 전류밀도[A/mm<sup>2</sup>]가 제한된다. 허용되는 최대 전류밀도는 설계 시 제한 조건으로 작용하게 된다.

### 3.1 열 해석

본 논문에서는 푸리에 열전달 방정식을 이용한 1D 해석해 도출, 열 등가회로망법 및 수치해석을 이용한 2D 해석을 하여, 각 해석법의 효용성을 검증하였다. 식 (6)에는 푸리에 열전달 방정식(Fourier Heat Transfer Equation)을 나타내었다[9].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{W_c}{k} = 0 \quad (6)$$

여기서  $k$ 는 전도계수[W/m°C]이며,  $W_c$ 는 부피당 열원[W/m<sup>3</sup>]에 해당된다. 선형기기의 경우 동작 주파수가 매우 낮아 주된 열원은 동손이 되며, 대전류 인가시 더욱 현저하게 나타난다.

B.C6(y=e)	V	Yoke	$k_y$
B.C5(y=d)	IV	Coil Winding	$k_c, W_c$
B.C4(y=c)	III	Air-Gap	$h_a$
B.C3(y=b)	II	Permanent Magnet	$k_m$
B.C2(y=a)	I	Stator Back-Iron	$k_y$
B.C1(y=-∞)			

그림 8. 분할된 다중 해석영역  
Fig. 8. Multi-layered region for thermal analysis

식 (6)은 그림 8에 나타난 분할된 각 영역에 적용되며, 각 영역별 해는 다음과 같이 일반화 될 수 있다.

$$T(y) = -\frac{W_c}{2k} y^2 + C_1 y + C_2 \quad (7)$$

위 식에서  $C_1, C_2$ 는 영역간의 경계 조건으로 구하게 되며, 경계조건은 Dirichlet 조건(일정 경계 온도), Neumann 조건(일정 표면 열속), 대류 표면 조건으로 나뉘며, 영역간 특성에 따라 다음과 같이 적

용된다.

$$T(-\infty) = T_{amb} \quad (8)$$

$$T_{II}(a) = T_I(a), \quad k_m \frac{dT_{II}(a)}{dy} = k_y \frac{dT_I(a)}{dy} \quad (9)$$

$$-k_m \frac{dT_{II}(b)}{dy} = h_a [T(b) - T(c)] \quad (10)$$

$$-k_c \frac{dT_{IV}(c)}{dy} = h_a [T(b) - T(c)] \quad (11)$$

$$T_{V}(d) = T_{IV}(d), \quad k_y \frac{dT_{V}(d)}{dy} = k_c \frac{dT_{IV}(d)}{dy} \quad (12)$$

$$-k_y \frac{dT_{V}(e)}{dy} = h_a [T(e) - T_{amb}] \quad (13)$$

(강제냉각시  $T_{V}(e) = T_{for}$ )

여기서  $T_{amb}$ 는 외기온도[°C],  $T_{for}$ 는 냉매 온도[°C],  $h_a$ 는 대류 계수[W/m<sup>2</sup>°C]에 해당되며, 공극의 내외면에는 대류 경계 조건이 인가되었다. 또한 강제냉각시 Water Jacket은 코일 윗면 요크내에 있다고 설정하여, 식 (13)과 같이 최외각을 냉각 방식에 따라 달리 적용하였다.

2D 해석에서는 열 등가회로망법을 사용하였는데, 열속 경로에 따라 다음과 같은 행렬식을 구성할 수 있다.

$$[G][T] = [W] \quad (14)$$

[G]는 열적 컨덕턴스(Thermal Conductance)로 구성된 시스템 행렬이며, [T]는 각 부의 온도 행렬, [W]는 열원(손실) 행렬에 해당된다. 위 행렬식을 풀면 다음과 같이 유도된다.

$$T_i (i=1, 2, 3, \dots, n) = \frac{\Delta i (i=1, 2, 3, \dots, n)}{\Delta} \quad (15)$$

여기서  $\Delta i$ 는  $i$ 번째 Augmented Matrix이며,  $\Delta$ 는 행렬 [G]의 det에 해당된다.

### 3.2 전류 밀도에 따른 열적 특성

그림 9와 10에는 제안된 방법을 적용하여, 냉각방식별 인가된 입력 전류 밀도에 따른 코일부(최대 온도 상승부) 온도 특성을 나타내었으며, 각 방법별 결과가 상응함을 보인다. 그림 10의 강제 냉각은 수냉시 결과로써 냉각수 온도가 27[°C]로 조절되는 경우를 나타내며, 두 결과 모두  $h_a=25[W/m^2C]$ ,  $T_{amb}=27[°C]$ ,  $k_y=52[W/m^2C]$ ,  $k_m=14.2[W/m^2C]$ ,  $k_c=401[W/m^2C]$ 가 적용되었다.

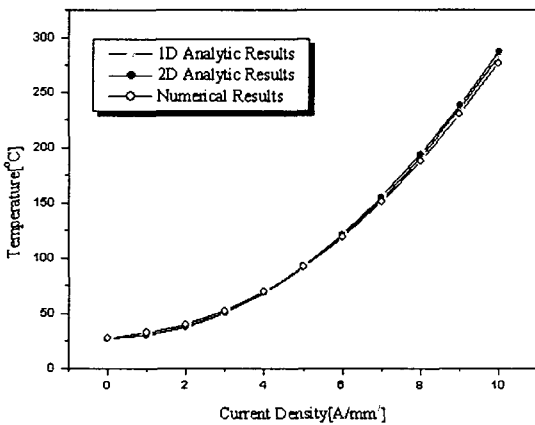


그림 9. 자연냉각시 전류밀도별 코일 온도  
Fig. 9. Coil temperature versus current density in case of natural cooling

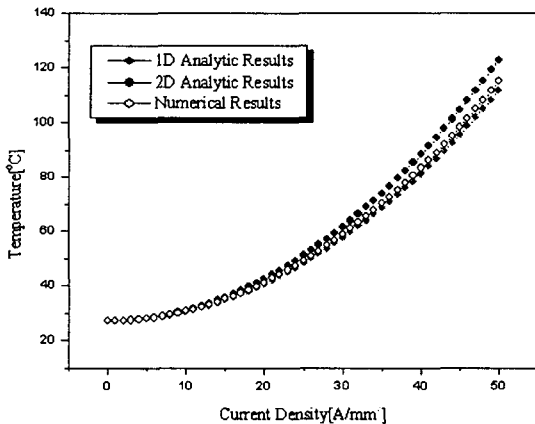


그림 10. 강제냉각시 전류밀도별 코일 온도  
Fig. 10. Coil temperature versus current density in case of forced cooling

한편, 철심형 PMLSM에서는 종종 코일 고정을 위하여, 에폭시(절연등급 : E) 몰딩 처리를 하는 경우가 있는데, 그림 9와 10에서와 같이 자연 냉각시 입력 전류밀도가 6[A/mm²] 이하로 제한되며, 일반 NOMEX 절연지나 Kepton Film(Du Pont사, H종) 등의 경우 전류밀도는 8[A/mm²]로 제한을 받는다. 반면, 강제 냉각(27[°C] 수냉)의 경우, 50[A/mm²]까지 허용된다.

### 4. 디텐트력

디텐트력은 철심형 PMLSM에서 추력 리플의 주원인으로, 발생 원리에 따라 철심 디텐트력과 치 디텐트력으로 나뉜다. 철심 디텐트력은 전기자 철심과 자석간의 작용력으로 주기는 극피치와 같고, 치 디텐트력은 전기자 치와 자석간에 발생하면서 주기는 치 피치와 극 피치의 최대공약값(GCD)에 해당된다. 그림 11과 같이 각각의 디텐트력은 서로 다른 주기로 나타나며, 각기 다른 저감방법을 통하여 최종적인 디텐트력을 저감하게 된다.

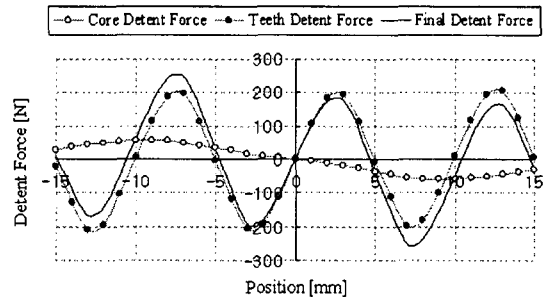


그림 11. 디텐트력 구성 및 주기  
Fig. 11. Detent force periodicity of PMLSM  
(극피치 : 30(mm), 치피치 : 40(mm),  
GCD : 10(mm))

우선, 철심 디텐트력은 그림 11에서 나타나듯이 전체 디텐트력의 작은 비중을 차지하며, 파형 자체는 정현적임을 알 수 있다. 저감 방법으로는 철심 양단부의 챔퍼링(Chamfering)과 철심 전체 길이 조절을 들 수 있다. 철심의 챔퍼링은 철심이 자석간을 이동할 때 발생시키는 자기저항의 변화량을 최소화하는 목적이며, 철심 전체길이 조절은 양단부 각각 받

생하는 두 디텐트력 파형의 위상차를 식 (16)과 같이 조절하여 서로 상쇄 시키고자하는(정현파의 경우 180[°] 위상차) 원리이다.

$$\theta = (2n - 1)\pi, \quad n : \text{정수} \quad (16)$$

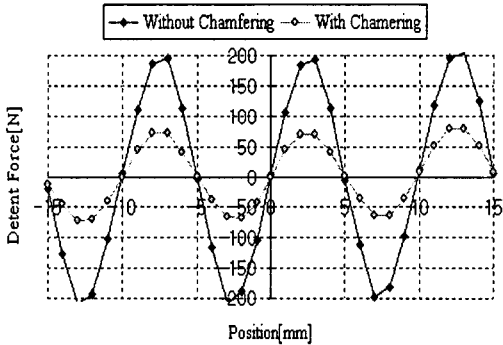


그림 12. 챔퍼링에 의한 치 디텐트력 저감  
Fig. 12. Teeth detent force reduction by means of chamfering

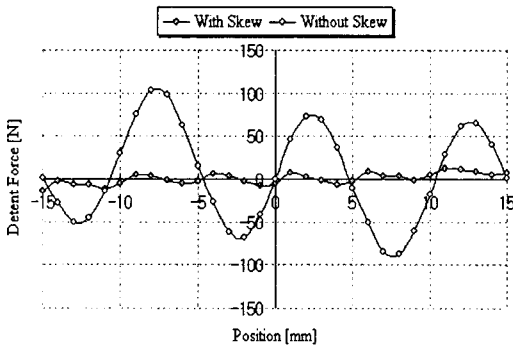


그림 13. 스큐 적용으로 인한 치 디텐트력 저감  
Fig. 13. Teeth detent force reduction by means of skewing

한편 치 디텐트력은 전체 크기의 대부분을 차지하면서, 동시에 주기가 짧아 이동시 자주 발생하므로, 효과적인 저감 방법이 요구되는데, 본 논문에서는 제작 용이성을 바탕으로 치의 챔퍼링과 자석스큐를 제안한다. 치의 챔퍼링은 철심의 챔퍼링과 마찬가지로 치에 의한 톨러턴스 변화를 감소시키고자 하는 목적이며, 그림 12에서 보듯이 저감 효과가 탁월하다. 이와 더불어 스큐 구조를 PMLSM에 적용하여 치 디텐트력을 저감할 수 있는데, 다음과 같은 스큐

각을 적용한다.

$$\text{Skew Angle[전기각]} = \frac{GCD}{2\tau} \times 180[^\circ] \quad (17)$$

그림 13은 챔퍼링이 있는 구조에서 스큐를 적용한 결과(스큐각 30[°])로, 90[%]이상의 저감 효과를 보인다. 이와 같은 결과는 우선 디텐트력이 정현적으로 분포되었다는 점에서 기인하며, 약간의 인덕턴스 저감과 역기전력 저감(대략, 4.65[%])을 감수한다면, 스큐 적용을 통하여, 치 디텐트력이 거의 완벽하게 제거된다.

### 5. 자계포화특성

시스템이 자계포화 영역에서 운전될 때, 예측가능한 전동기 출력과 정확한 운전 제어를 위해서는, 각각의 자계원(PMLSM에서는 영구자석과 전기자 전류)으로부터 영향을 구분할 필요가 있다. 즉 코일단에서 영구자석에 의한 역기전력 성분과 전기자 전류에 의한 인덕턴스 전압 강하를 명확히 구분해야 한다는 의미이다. 그림 14에서, 시스템이 포화 상태(T지점,  $B_T = \mu_T H_T$ )가 된 경우, 각각 독립 여자(동작점 A, B) 결과와 비교할 때,  $B_T \neq B_1 (= \mu_1 H_1) + B_2 (= \mu_2 H_2)$ 가 된다. 이 경우(T지점)에서,  $H_1$ 과  $H_2$  영향을 분리하기 위해선  $\mu_T$ 를 고정하여, 선형적으로 시스템을 재해석해야 하며, 결과적으로 C와 D지점으로 귀결되어,  $B_T = B_3 (= \mu_T H_1) + B_4 (= \mu_T H_2)$ 과 같은 결과를 도출할 수 있다. 궁극적으로 이를 통하여 포화 영향 하에서도 선형적인 제어 상수를 추출할 수가 있다.

이와 같은 고정투자율법(Fixed Permeability Method)은 여러 자계원으로부터 결과적으로 포화가 발생할 경우, 각각의 영향을 구분 지음으로써, 포화 영역에서도 선형적인 해석 및 제어를 가능하게 하며, 아울러, 영구자석 기기에서 발생하는 dq상간의 교호작용(cross-coupling) 등에도 명확한 해를 제시할 수가 있다.

고주력용 철심형 영구자석 선형동기전동기의 운전조건을 고려한 설계

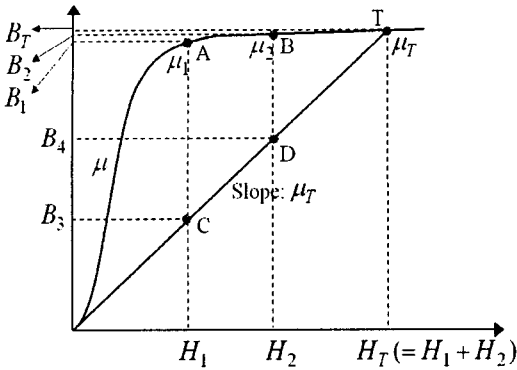


그림 14. BH 곡선에서의 고정투자율법 특성  
Fig. 14. Fixed Permeability Method

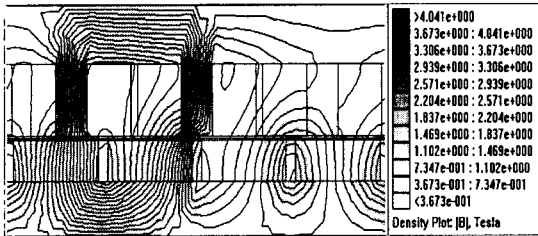


그림 15. 영구자석과 전기자전류(150(A)) 동시여자  
Fig. 15. Double excitation of PM and current

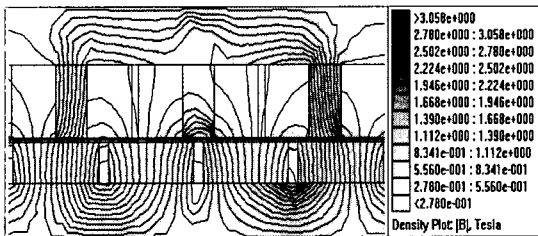


그림 16. 영구자석 개별여자  
Fig. 16. Single excitation of PM

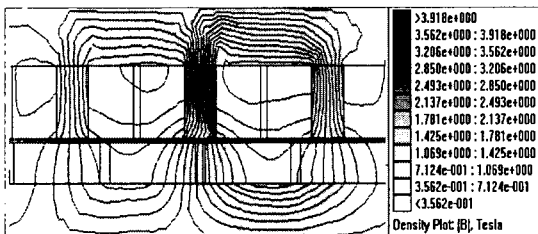


그림 17. 전기자전류 개별여자  
Fig. 17. Single excitation of current

그림 15에는 두 자계원이 동시 여자 된 경우의 자계 특성으로 철심 내부에서 포화가 일어남을 알 수 있다. 인가된 최대 전류는 150[A], 발생추력은 6672[N]이므로, 이 경우  $K_e$ 는 29.67[V/(m/s)]에 해당한다. 한편 이 시스템은 선형 영역에서  $K_e$  = 36.33으로, 포화시 상당한 값 차이를 보이며(20[%] 정도), 고정투자율법을 적용하지 않는 일반적인 해석결과(그림 14에서 A지점 해석)로는 포화시  $K_e$  = 35.13이 된다. 기존의 해석 결과로는 포화시 특성과 많은 오차를 보이는데, 만약 고정투자율법이 적용되면, 그림 16에서 나타난 결과로  $K_e$  = 30.74가 되어, 그림 15의 추력에서 역산된 결과( $K_e$  = 29.67)와 상응함을 알 수가 있다. 역기전력 성분이 만족한다면, 전류만의 개별여자를 통하여  $L$  [mH]를 구할 수가 있는데, 우선 선형 구간에서는 3.82, 포화영역에서 기존의 방법으론 3.12, 고정투자율법에선 3.09의 값을 얻게 되었는데, PMLSM의 경우 이러한 인덕턴스의 영향이 크게 영향을 미치지 않더라도, 포화 영역 운전시 정확한 제어성을 보장할 수 있다.

따라서 제안된 방법으로 포화시 철심내의 자계 비선형 문제가 해결될 수 있으며, 각각의 자계원에 대하여 선형적인 시스템 정수로 추출할 수 있어, 좀더 효과적인 동작예측과 분석을 할 수 있으며, 동시에 선형적인 제어성도 갖출 수가 있게 된다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 운전조건을 고려한 동적용량 및 동적제한조건을 이용하여 철심형 PMLSM에 대한 설계 특성 및 전략을 제시하였으며 설계 기준과 설계 변수 선정 및 이를 적용한 최적 설계도 함께 나타내었다. 아울러 열적 특성, 디텐트력 저감, 철심 포화 특성에 대한 사항을 살펴보았으며, 이를 통해 전류 밀도별 온도상승, 추력 맥동 저감용 국부적 구조 변경, 포화 영역에서의 시스템 파라미터 추출을 나타낼 수 있었다. 본 논문에서 제시된 설계특성은 선형전동기의 산업설비 등에서 주로 응용되는 동적운전 특성에 부합할 수 있는 최적설계안 도출을 위한 주요 설계전략이 될 것으로 사료된다.



## References

- [1] Y.O.Kim, D.S.Choi, I.J. Ha, "Time-Optimal Control Linear BLDCM under Physical Limitations," Proc. of LDIA01, pp.489-494, Oct. 2001.
- [2] David L. Trumpher, Won-Jong Kim, Mark E. Williams, "Design and analysis framework for linear permanent-magnet machines" IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, No. 2, pp.371-379, 1996.
- [3] Wang Xudong, Yuan Shiyng, Jiao Liucheng, "Dynamic Mathematical Model of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", Proc. of ICEM2000, pp.90-93, August, 2000.
- [4] H. Wakiwaka, H. Yajima, S. Senoli, H. Yamada, "Simplified Thrust Limit Equation of Linear DC Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.32, No.5, pp.5073-5075, September, 1996.
- [5] Dae-Yeong Jeon, Dongsoo Kim and Song-Yop Hahn, "Optimum Design of Linear Synchronous Motor using Evolution Strategy Combined with Stochastic FEM", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.35, No.3, pp.1734-1737, May, 1999.
- [6] Sun-Ki Hong, "Analysis of the Thickness Effect for Hysteresis Ring of Hysteresis Motor with Vector Hysteresis Model", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol.20 No.9, pp. 84-89, 2006. 11.
- [7] T. Yoshimura, H. J. Kim, Watada, S. Torii, D. Ebihara, "Analysis of the Reduction of Detent Force in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 31, No.6, pp.3728-3730, 1995.
- [8] P.H.Mellor, D.Roberts, D.R.Turner, "Lumped Parameter Thermal Model for Electrical Machines of TEFC design", IEE Proc.-B, Vol. 138, No. 5, pp.205-218, Sep. 1991.
- [9] M. Shanel, S. J. Pickering, D. Lampard, "Application of Computational Fluid Dynamics to the Cooling of Salient Pole Electrical Machines", Proc. of ICEM2000, pp.338-342, August, 2000.

## ◇ 저자소개 ◇

### 정상용 (鄭相龍)

1973년 9월 20일생. 1997년 서울대학교 전기공학부 졸업(학사). 1999년 동대학원 졸업(석사). 2003년 동대학원 졸업(박사). 2003~2006년 현대기아연구개발본부 선임연구원. 2007년~현재 동아대학교 전기공학과 전임강사.