

초고속열차용 축소형 PM-LSM과 EM-LSM의 변환 설계 연구

박찬배*, 이병송*, 이형우*, 김남포*, 한경희**
 한국철도기술연구원*, 동국대학교**

A Study on a Conversion Design between a Small-scaled PM-LSM and EM-LSM for Ultra-High Speed Railway Transit

Chan-Bae Park*, Byung-Song Lee*, Hyung-Woo Lee*, Nam-Po Kim*, Kyung-Hee Han**
 Korea Railroad Research Institute*, Dongguk University**

Abstract - 일반적으로 자기부상열차는 고속, 내구성, 안전성 등을 만족하는 가장 적합한 시스템 중 하나로 부각되고 있다. 300[km/h] 이하의 중저속 자기부상철도의 경우, 추진용으로 선형유도전동기가 사용되고 있으며, 초고속 자기부상철도의 경우, 선형유도전동기보다 고효율, 고출력의 특성을 가지는 선형동기전동기가 사용되고 있다. 한국철도기술연구원에서는 2008년도부터 700[km/h]급 초고속트브열차용 선형동기전동기 연구를 시작하였으며, 추진/부상 일체형 권선형 선형동기전동기 연구를 수행하고 있다. 따라서 본 논문에서는 초고속트브열차용 선형동기전동기 연구의 일환으로, 축소형 영구자석형 선형동기전동기(PM-LSM)의 수학적 방법에 의한 기본설계를 수행하였으며, 이를 이동자만을 고려한 자기등가회로를 이용하여 권선형 선형동기전동기(EM-LSM)로 변환 설계를 수행하였다. 또한 설계된 PM-LSM과 EM-LSM 모델의 FEM 해석을 이용한 특성 분석을 통하여 본 논문에서 제안한 변환 설계기법의 정확도 검증 연구를 수행하였다.

1. 서 론

인구의 증가와 생활영역의 확대, 고유가 등에 따라 대중교통의 혁신적인 수단에 대한 요구가 증가되어 왔으며, 차세대 교통시스템은 고속, 내구성, 안전성등과 같은 여러 요구사항을 만족하여야 한다. 또한 편리하고 환경 친화적이며 유지보수가 간단하고 경량화 되어야 대량 운송수단으로서 적합하다. 자기부상열차는 이러한 요구조건을 만족하는 가장 적합한 시스템 중 하나로 부각되고 있다. 일반적으로 중저속 자기부상철도의 경우, 추진용으로 선형유도전동기를 사용하고 있으나, 집전장치와 어려움 및 단부효과 등으로 인하여 약 300[km/h] 이하에서 사용되고 있다. 초고속 자기부상철도의 경우, 선형유도전동기보다 고효율, 고출력의 특성을 가지는 선형동기전동기가 더 적합하다[3],[4]. 선형동기전동기는 기존의 회전형 동기전동기와 동일한 구동 원리를 가지며, 회전형 모터에서의 토크가 선형전동기에서는 추력이 된다. 선형동기전동기는 회전형 동기전동기와 달리 상대적으로 큰 공극을 가지며, 직선형으로 펼쳐진 유한한 길이의 비대칭 구조로 나타나게 된 수직력과 입구단, 출구단으로 야기되는 단부효과 및 이동자의 지지구조 등을 고려한 설계가 이루어져야 한다[1],[2]. 한국철도기술연구원에서는 2008년도부터 700[km/h]급 초고속트브열차용 선형동기전동기 연구를 시작하였으며, 추진/부상 일체형 권선형 선형동기전동기 연구를 수행하고 있다. 따라서 본 논문에서는 초고속트브열차용 선형동기전동기 연구의 일환으로, 축소형 영구자석형 선형동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, PM-LSM)의 수학적 방법에 의한 기본설계를 수행하였으며, 이를 이동자만을 고려한 자기등가회로법을 이용하여 권선형 선형동기전동기(Electro-Magnet Linear Synchronous Motor, EM-LSM)로 변환 설계를 수행하였다. 또한 설계된 PM-LSM과 EM-LSM 모델의 FEM 해석을 이용한 특성 분석을 통하여 본 논문에서 제안한 변환 설계기법의 정확도 검증 연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 축소형 PM-LSM의 설계 및 특성 분석

일반적으로 자기부상 추진시스템용 PM-LSM 설계 시 PM-LSM의 기동전력 및 그에 상응하는 용량을 산정해야 한다. 본 연구에서는 축소형 PM-LSM의 기동전력 계산 시 PM-LSM의 Drag force에 의한 저항력을 추가로 고려하였다. 식(2)~(5)에서 보는 바와 같이 Drag force에 의한 저항력은 Aerodynamic drag force, Magnetic drag force, Linear generation drag force로 구분할 수 있다[5].

$$F_{Traction} = F_{Accel} + F_{Drag} \quad (1)$$

$$F_{Drag} = F_A + F_M + F_{LG} \quad (2)$$

$$F_A = 2.8 \times v^2 \times (0.265 \times n + 0.3) \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$F_M = n \times (0.1 \times \sqrt{v} + 0.02 \times v^{0.7}) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} F_B &= 0 && (0 \sim 20 \text{ km/h}) \\ &= n \times 7.3 && (20 \sim 70 \text{ km/h}) \\ &= n \times (146/v - 0.2) && (70 \sim 500 \text{ km/h}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 F_{Accel} 는 기동전력, F_{Drag} 는 Drag force에 의한 저항력, $F_{Traction}$ 은 최종 기동전력, F_A 는 Aerodynamic drag force, F_M 는 Magnetic drag force, F_{LG} 는 Linear generation drag force, v 는 속도 [m/sec], n 은 Train 당 Vehicle 수를 나타낸다. 설계된 축소형 PM-LSM은 Moving Magnet 타입으로 차량에 LSM이 2대 장착된다. 설계된 PM-LSM의 가, 감속도는 $1[m/s^2]$ 이며, 정격속도는 10[km/h]이며, 정격추진력은 275[N], 이에 따른 용량은 500[W]로 선정하였다. 도표 1은 본 연구에 의한 축소형 LSM의 설계사양을 보여준다.

<표 1> 축소형 PM-LSM 설계 사양

항목		설계 결과값	
정격 출력 / 정격속도		500 [W] / 10 [km/h]	
최대 추력 / 정격주파수		275 [N] / 20 [Hz]	
입력 선간전압 / 입력 전류		3φ 220 [V] / 4.1 [A]	
공극		5 [mm]	
극 수 / 극 간격		4 [개] / 69 [mm]	
PM 이동자	요크	길이/폭/높이 276 x 80 x 25 [mm]	
	영구 자석	크기	52(l)×67(w)×5(h) [mm]
		잔류자속밀도	1.23 [T]
		재질	NdFeB
고정자	코일당 턴수	410 [turn]	
	요크 두께 / 치 폭	25 [mm] / 11 [mm]	
	슬롯 폭 / 길이	23 [mm] / 35 [mm]	

2.2 자기등가회로를 이용한 축소형 EM-LSM의 변환 설계

앞 절에서 축소형 PM-LSM의 수학적 방법에 의한 기본설계를 수행하였다. 설계된 PM-LSM의 이동자만을 등가적으로 EM-LSM의 이동자로 변환하기 위하여 본 논문에서는 자기등가회로법을 이용하였다. 그림 1은 PM-LSM과 EM-LSM의 이동자 1극에 해당하는 부분의 자기등가회로를 보여준다. 그림 1에서 보는바와 같이, PM-LSM에서 설계된 고정자를 그대로 EM-LSM에 적용할 것이므로 고정자 부분의 자기회로는 생략하였다. 식 (6)과 (7)는 각각 무부하 조건에서의 PM-LSM과 EM-LSM의 자기회로 방정식을 나타낸다. 앞 절에서 설계된 PM-LSM의 자속을 EM-LSM에 그대로 적용하여 PM-LSM의 기전력 F_{pm} 와 같은 크기의 기전력 F_{em} 을 얻을 수 있도록 EM-LSM의 자기회로상의 이동자 코어를 설계하는 것이 본 논문에서 제시하는 방법이다. 식(8)을 이용하여 이동자의 슬롯 치수를 결정하고, 식 (7)를 이용하여 이동자 코어의 각 치수를 결정하였다.

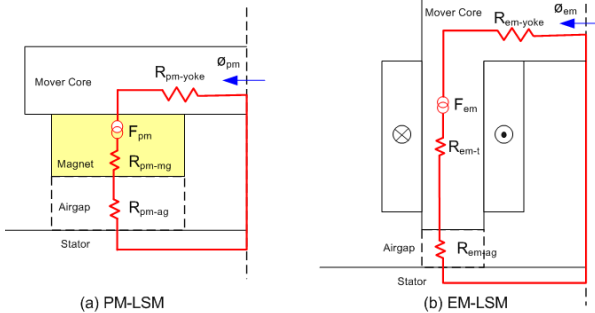
$$\begin{aligned} F_{pm} &= N_{dc} \cdot i_{dc} = \phi_{pm} \sum_k R_k \\ &= B_{pm-ag} \cdot A_{pm-ag} (R_{pm-yoke} + R_{pm-mg} + R_{pm-ag}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F_{pm} &= F_{em} = \phi_{em} \sum_n R_n = \phi_{pm} \sum_n R_n \\ &= \phi_{pm} (R_{em-yoke} + R_{em-t} + R_{em-ag}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$A_{em-winding} = \frac{N_{dc} \cdot i_{dc}}{J_{em}} \cdot \frac{1}{k_f} = \frac{F_{em}}{J_{em}} \cdot \frac{1}{k_f} \quad (8)$$

여기서 ϕ_{pm} 은 PM-LSM의 자속, ϕ_{em} 은 EM-LSM의 자속, B_{pm-ag} , A_{pm-ag} 는 PM-LSM의 공극에서의 평균자속밀도와 공극면적, B_{em-ag} , A_{em-ag} 는 EM-LSM의 공극에서의 평균자속밀도와 공극면적, $A_{em-winding}$

은 EM-LSM의 이동자 코일 총단면적, N_{dc} , i_{dc} 는 EM-LSM의 이동자 코일당 턴수와 DC 전류, J_{em} 은 이동자 코일의 전류밀도, k_f 는 이동자 코일의 접착률을 나타낸다. 표 2는 자기등가회로법에 의한 PM-LSM과 EM-LSM의 각 파라미터 계산결과를 보여주며, 표 3은 자기등가회로법을 이용한 변환설계에 의한 축소형 EM-LSM의 설계 사양을 보여준다. 그림 2는 수치적 방법에 의한 특성 분석을 위한 PM-LSM과 EM-LSM의 설계모델을 보여준다.



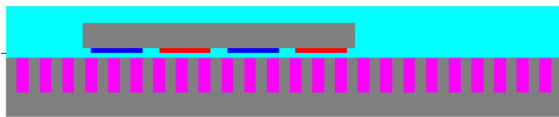
〈그림 1〉 PM-LSM 과 EM-LSM의 이동자 부분 자기등가회로

〈표 2〉 PM-LSM과 EM-LSM의 자기등가회로 파라미터 계산 결과

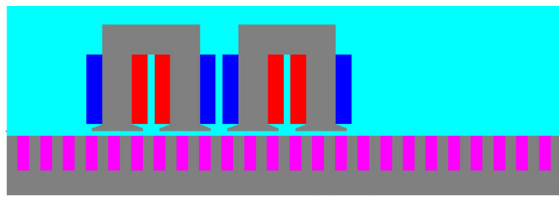
항 목	설계 결과값
R_{pm-ag} / R_{em-ag}	$1.039 \times 10^6 / 2.000 \times 10^6$ [AT/Wb]
R_{pm-mag} / R_{em-t}	$1.039 \times 10^6 / 4.025 \times 10^4$ [AT/Wb]
$R_{pm-yoke} / R_{em-yoke}$	$1.640 \times 10^4 / 1.518 \times 10^4$ [AT/Wb]
$R_{pm-total} / R_{em-total}$	$2.094 \times 10^6 / 2.055 \times 10^6$ [AT/Wb]
Φ_{pm} / Φ_{em}	1.220×10^{-3} [Wb]
F_{pm} / F_{em}	$2.554 \times 10^3 / 2.507 \times 10^3$ [AT]

〈표 3〉 변환 설계에 의한 축소형 EM-LSM 설계 사양

항 목	설계 결과값	
공극	5 [mm]	
극 간격	69 [mm]	
EM 이동자	요크 두께 / 적층폭	27 / 67 [mm]
	치 폭 / 슬롯 깊이	27 / 71 [mm]
	코일당 턴수 / DC 전류	255 [turn] / 10 [A]
고정자	코일당 턴수	410 [turn]
	요크 두께 / 치 폭	25 [mm] / 11 [mm]
	슬롯 폭 / 깊이	23 [mm] / 35 [mm]



(a) PM-LSM 설계 모델



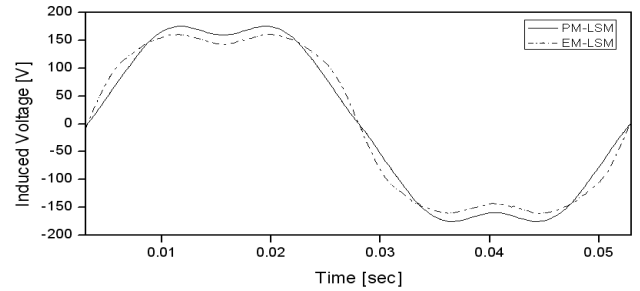
(b) EM-LSM 설계 모델

〈그림 2〉 특성 분석을 위한 PM-LSM 과 EM-LSM 설계 모델

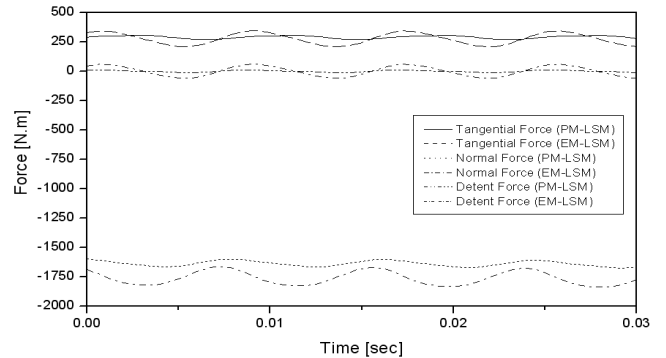
2.3 EM-LSM의 특성 분석을 통한 변환설계 기법의 정확도 검증

축소형 PM-LSM과 EM-LSM의 수치적 방법에 의한 특성 분석을 통한 변환설계 기법의 정확도 검증을 위하여 상용 전자기해석 Tool(Maxwell 2D)을 이용하였다. 해석모델의 소스는 전류원으로 수행하였으며, 최대추력 발생영역에서의 LSM의 전자기적 특성을 분석하였다. 그림 3은 축소형 PM-LSM과 EM-LSM의 수치적 방법에 의한 특성 해석 결과를 보여준다. 그림 3 (a)에서 보듯이 PM-LSM과 EM-LSM의 각 무부하 상역기전력(V_{bemf})의 기본파 성분은 135 [V_{rms}], 130.4 [V_{rms}]이다. 그림 3 (b)는 PM-LSM과 EM-LSM의 Tangential force, Normal force 및 Detent force 특성을 보여준다. 그림 3에서 알 수 있듯이, PM-LSM을 본 논문에서 제시한 변환설계 기법을 통하여 EM-LSM으로 재설계 하였을 경우, 무부하 상역기전력과 Tangential force의 차이는 5% 미만이고, Normal force의 경우 8% 미만으로 특

성이 서로 유사함을 알 수 있다. 다만, 변환 설계된 EM-LSM의 경우, Detent force 최소화를 위한 이동자 코어의 최적설계가 고려되지 않아서 EM-LSM의 Detent force가 PM-LSM 보다 약 4.5배 크게 설계가 되었음을 해석결과를 통하여 알 수 있다. 본 연구의 PM-LSM과 EM-LSM의 각 특성파라미터 해석 결과의 정량적 수치를 표 4에 정리하였다.



(a) 무부하 역기전력 특성



(b) Tangential, Normal, Detent Force 특성

〈그림 3〉 PM-LSM 과 EM-LSM의 수치적 방법에 의한 특성 해석

〈표 4〉 PM-LSM 과 EM-LSM의 특성 분석 결과

항 목	PM-LSM	EM-LSM
상역기전력 기본파 (V_{bemf})	135 [V _{rms}]	130.4 [V _{rms}]
Tangential Force ($F_{tangen.}$)	289.4 [N]	278.4 [N]
Detent Force (F_{detent})	25 [N _{p.top}]	120.6 [N _{p.top}]
Normal Force ($F_{norm.}$)	1,641.6 [N]	1,778.7 [N]

3. 결 론

본 논문에서는 초고속투브열차용 선형동기전동기 연구의 일환으로, 축소형 PM-LSM의 장하분배를 이용한 수치적 방법에 의한 기본설계를 수행하였으며, 이를 이동자만을 고려한 자기등가회로법을 이용하여 EM-LSM으로 변환 설계를 수행하였다. 또한 설계된 PM-LSM과 EM-LSM 모델의 FEM 해석을 이용한 특성 분석을 통하여 본 논문에서 제안한 변환설계 기법의 정확도 검증 연구를 수행하였으며, 해석 결과를 통하여 제시된 변환설계 기법의 정확도를 입증하였다. 향후 본 변환설계 기법에 Detent force 최소화를 위한 이동자 코어의 최적설계 프로세스를 추가 연구를 진행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Higuchi, Tsuyoshi... [et al.], "Short-armature self-excitation type linear synchronous motor for transport system". ICEMS 2007, Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems: 1513-1516, 2007
- [2] Hyun-Man Jang... [et al.], "Design and Electrical Characteristics Analysis of 100HP HTS Synchronous Motor in 21st Century Frontier Project, Korea", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, June 2003
- [3] I. Boldea and S. A. Nasar, Linear motion electromagnetic devices, New York: Taylor & Francis, pp.103-143, 2001
- [4] Jacek F. Gieras and Zbigniew J. Piech, Linear synchronous motors : transportation and automation systems, Boca Raton: CRC Press LLC, pp.85-121, 2000
- [5] 박찬배, 이병송, 이형우, 박현준, "초고속열차용 축소모델 선형동기전동기의 개념 및 기본설계 연구", 한국철도학회 2009 춘계학술대회논문집, pp.905-911, 2009