

600km/h급 초고속열차 용 공심형 LSM의 권선방식에 따른 특성 연구 A Study on the Stator-Mover Structure of Linear Synchronous Motor for 600km/h Very High Speed Train

박찬배*[†], 이준호*, 이병송*, 김재희*, 정신명*, 이수길*

Chan-Bae Park*[†], Jun-Ho Lee*, Byung-Song Lee*, Jae-Hee Kim*, Shin-Myung Jung*, Su-Kil Lee*

Abstract Recently, an interest in a hybrid system combining only the merits of the conventional wheel-rail system and Maglev propulsion system is growing as an alternative to high-speed maglev train. This hybrid-type system is based on wheel-rail method, but it enables to overcome the speed limitation by adhesion because it is operated by a non-contact method using a linear motor as a propulsion system and reduce the overall construction costs by its compatibility with the conventional railway systems. Therefore, design models of each coreless-typed Linear Synchronous Motor (LSM) with various distributed and concentrated windings for 600 km/h very high speed train maintaining the conventional wheel-rail method is derived, and a comparative analysis on electromagnetic characteristics of each model is finally conducted in this paper.

Keywords : Very high speed train, Linear synchronous motor, Coreless, Superconductivity, Wheel-rail

초 록 최근 세계화가 가속화되면서 이에 따른 고속 교통수단에 대한 요구도 증가되고 있지만, 고속 교통수단의 일환인 500km/h 이상의 초고속 자기부상열차 실용화가 늦어지면서 이에 대한 대안으로 기존의 휠-레일 방식과 자기부상 추진방식의 장점만을 혼합한 하이브리드 철도시스템에 대한 관심이 커지고 있다. 이러한 하이브리드 철도시스템은 휠-레일 방식에 기초하지만, 추진시스템으로 기존의 회전형 전동기가 아닌 선형전동기를 이용하기 때문에, 비접촉구동이 가능하여 기존의 휠-레일 추진방식에 의한 속도한계를 극복할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 휠-레일 지지방식과 선형전동기 추진방식을 가지는 초고속열차용 공심형 LSM(Linear Synchronous Motor)의 다양한 분포/집중 권선방식의 변화에 따른 전자기적 특성 변화를 FEM을 이용하여 분석하였다.

주요어 : 초고속열차, 선형동기전동기, LSM, 공심형, 휠-레일, 권선

1. 서 론

최근 세계화가 가속화되면서 이에 따른 고속 교통수단에 대한 요구도 증가되고 있다. 교통 측면에서 속도는 경쟁력을 갖추기 위한 중요한 요소 중 하나이며, 가까운 미래에 세계 경제의 중심이 될 동북아시아 지역에서는 더욱 중요하다[1]. Fig. 1은 세계 Top 5의 초고속철도 개발 현황을 보여준다[2,3]. Fig. 1에서 보는 바와 같이, 지금까지 개발된 가장 빠른 열차는 일본의 자기부상열차(581km/h)이다. 자기부상열차는 1960년대부터 연구개발이 이루어진 이래, 독일과 일본의 경우는 실용화 수준에 도달하였으며, 시험선로에서의 대부분의

[†] 교신저자: 한국철도기술연구원 고속철도연구본부(cbpark@krrri.re.kr)

* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

시험이 이루어졌다. 독일의 Transrapid는 2003년 12월, 중국 상하이에 430km/h급 상용노선을 건설하여 세계 유일의 상용시스템이 되었으며, 일본이 동경-오사카 라인에 500km/h급 이상의 자기부상열차 실용화 노선을 준비하고 있지만, 막대한 건설비용 문제를 아직 해결하지 못한 상황이다[4,5]. 기술적, 경제적 문제를 포함한 다양한 이유를 근거로 500km/h급 이상의 초고속 자기부상열차에 대한 실용화가 늦어지면서 이에 대한 대안으로 기존의 휠-레일 방식과 자기부상 추진방식의 장점을 혼합한 하이브리드 철도시스템에 대한 관심이 커지고 있다. 이러한 하이브리드 철도시스템은 휠-레일 방식에 기초하지만, 추진시스템으로 기존의 회전형 전동기가 아닌 선형전동기를 이용하기 때문에 비점착구동이 가능하여 기존의 휠-레일 추진방식에 의한 속도한계를 극복할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 휠-레일 지지방식과 선형전동기 추진방식을 가지는 초고속열차용 공심형 LSM(Linear Synchronous Motor)의 다양한 분포/집중 권선방식의 변화에 따른 전자기적 특성 변화를 FEM을 이용하여 분석하였다.

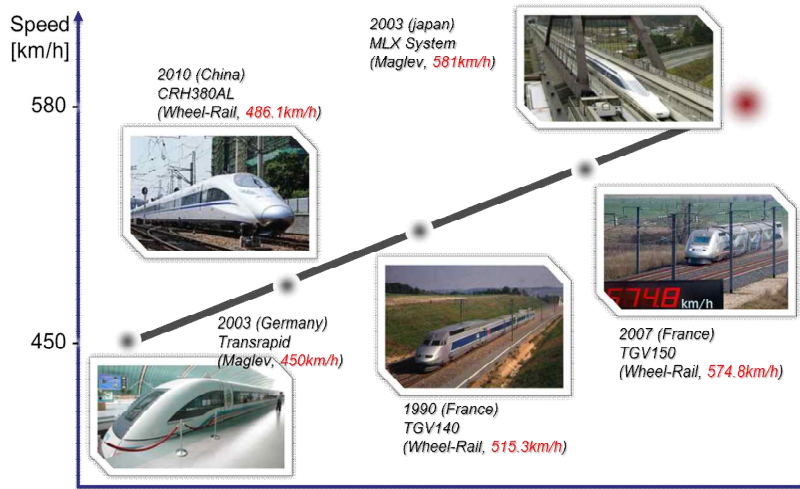


Fig. 1 Top 5 records of high speed train in the world

2. 공심형 LSM의 설계 모델 도출

2.1 공심형 LSM 설계 개념

본 논문에서 다루는 600km/h급 초고속열차의 기본 개념은 다음과 같다. 1)추진시스템은 LSM, 2)가이드웨이 시스템은 휠-레일 방식으로 설정하였다. 추진시스템용 LSM의 경우, 지상의 레일 사이에 LSM의 3상 전기자가 설치되며, 차상에 계자용 전자석이 설치되는 구조를 갖으며, Fig.2에 기본 개념을 나타내었다. 600km/h급 초고속열차 추진용 LSM의 경우, 차상의 전자석을 초전도 전자석으로 고려하고 있기 때문에 지상의 레일 사이에 설치될 LSM의 3상 전기자는 공심형(Coreless) 구조가 적합할 것으로 판단된다[6,7].

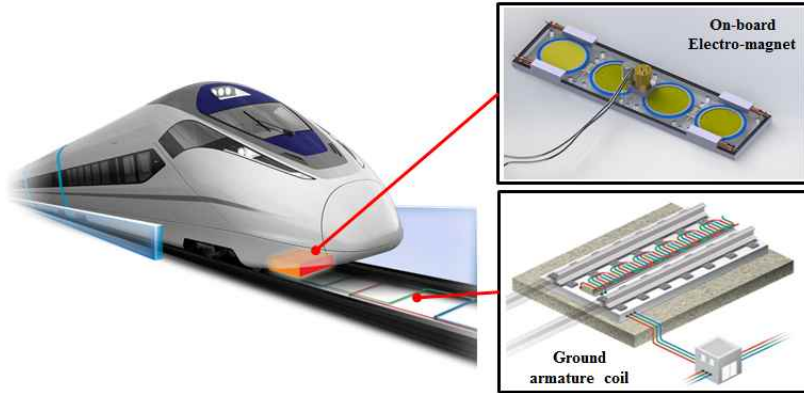


Fig. 2 Concept of the structure of the coreless-typed LSM for 600km/h VHST

2.2 공심형 LSM 설계 모델 도출

본 논문에서는 600km/h급 초고속열차용 공심형 LSM 설계모델 도출을 위한 요구 견인력 곡선을 도출하여 Fig. 3에 정리하였으며, 설계사양은 Table 1에 정리하였다. 공심형 LSM의 설계에 있어서 각 모델의 공통적인 설계 사양은 공심형 LSM의 정격속도와 최고속도는 각각 342/660km/h, 추진 시 요구되는 총 출력은 26MW이며, 기동견인력과 최고속도 견인력은 각각 276/152kN이다. 또한 공심형 LSM의 공극은 70mm이며, 지상 전기자와 차상의 계자 극 피치는 1200mm이다. Fig. 4는 본 논문에서 도출된 공심형 LSM 모델의 FEM 해석을 위한 단면 모델들을 보여준다. Fig. 4에서 보는 바와 같이, (a)는 지상 전기자 3상 코일이 분포권 모델, (B)는 집중권 1 Layer 모델, (c)와 (d)는 집중권 2 Layer 모델이다. 여기서 모든 모델의 지상 전기자 3상 코일은 전절권이며, (a)와 (b)는 지상 전기자 코일 Span이 400mm, (c)는 600mm, (d)는 800mm이다.

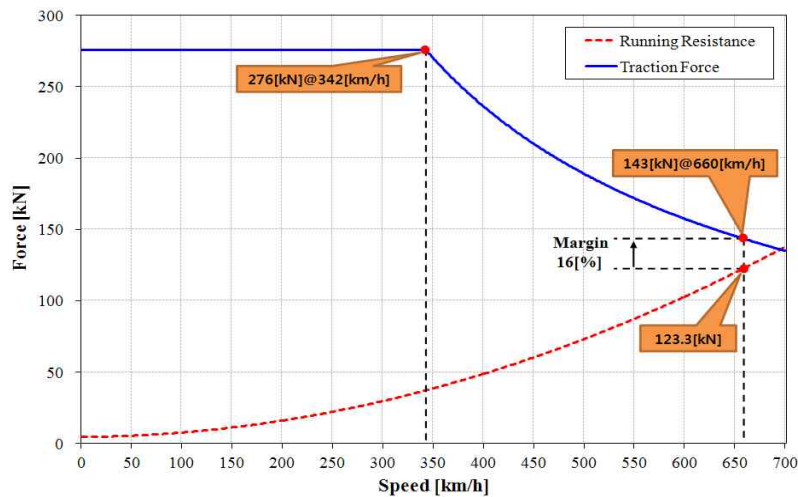


Fig. 3 Required traction force and running resistance curves of 600km/h VHST

Table 1 DESIGN RESULTS OF CORELESS-TYPED LSM FOR 600KM/H VHST

Content	Quantity	Unit	Content	Quantity	Unit
Total Output Power (12 Module)	26.24	MW	Input Current (342/660kmph)	2417 / 1279	A
Thrust Force (342/660kmph)	276 / 143	kN	Airgap / Pole Pitch	0.07 / 1.2	m
Frequency (342/660kmph)	39.6 / 76.4	Hz	Magnet Pole Number per Module	4	poles
Input Phase Voltage (342/660kmph)	15041 / 20386	Vrms	Magnet MMF	800	kAturns

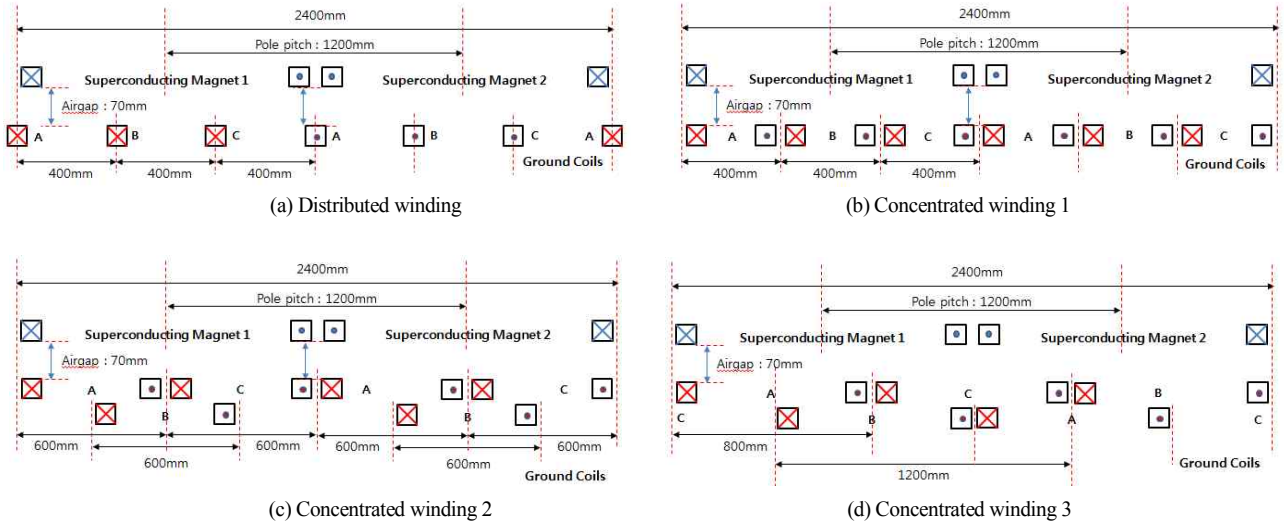


Fig. 4 Winding methods of the ground coil for the coreless-typed LSM

3. 공심형 LSM의 권선방식에 따른 특성 분석

본 논문에서는 600km/h급 초고속열차 추진용으로 설계된 지상 전기자 권선방식에 따른 다양한 공심형 LSM 모델 각각의 전자기적 특성 분석을 위하여 FEM Tool을 이용하였다. Table 2는 부하각 20도에서의 각 공심형 LSM 모델의 전자기적 특성 분석 결과를 보여준다. Table 2에서 보는 바와 같이, 추력 특성은 분포권 모델이 집중권 모델에 비해서 우수함을 알 수 있다. 집중권 모델 중에서 모델2의 경우는 추력이 분포권 모델과 유사하나 추력 리플이 분포권 모델에 비해 상당히 커서 문제가 있을 것으로 판단된다. Fig.5는 집중권 모델2의 정격속도 (342km/h)에서의 발생 추력 및 수직력 특성 곡선을 보여준다. 집중권 모델2의 경우는 3상 지상 전기자 권선의 A, B, C상이 공간적으로 120도의 등간격 위상차가 있는 대칭구조가 아닌 A상과 C상 사이의 위상이 다른 비대칭구조이다. 이 경우 Fig. 5에서 보는 바와 같이, 추력 및 수직력에 고조파가 실려서 리플이 커지는 문제가 발생하게 됨을 확인할 수 있다. Fig. 6는 극당 요구 추력 5.75kN을 만족하는 조건에서의 분포권 모델과 집중권 모델1의 정격속도 (342km/h)에서의 발생 추력 및 수직력 특성 곡선을 보여준다. 또한 극당 요구 추력 5.75kN을 만족하는 조건에서의 분포권 모델과 집중권 모델1의 지상 전기자 3상 코일의 입력 전류 및 발생 추력 특성을 Table 3에 정리하였다. Fig. 6와 Table 3에서 보는 바와 같이, 집중권 모델 1의 추력 리플이 분포권 모델에 비해 3~4배 정도 크며, 동일 추력을 발생시키기 위한 요구 입

력전류도 집중권 모델이 분포권 모델과 비교하여 80% 이상 더 큰 것을 확인할 수 있다. 결국 집중권 모델을 공심형 LSM에 적용하기 위해서는 추가적인 최적화 노력이 필요할 것으로 보인다.

Table 2 Analysis results of electromagnetic characteristics on each coreless LSM model

CONTENTS		Distributed Winding Model	Concentrated Winding Model 1	Concentrated Winding Model 2	Concentrated Winding Model 3
342km/h	Thrust Force [kN/Pole]	3.74	2.58	3.77	2.72
	Thrust Force Ripple [$kN_{ptp}/Pole$]	1.10	3.95	6.57	3.74
	Normal Force [[kN/Pole]	-0.43	0.94	1.53	4.44
	Normal Force Ripple [$kN_{ptp}/Pole$]	1.15	4.04	5.68	3.45
660km/h	Thrust Force [kN/Pole]	1.98	1.39	2.00	1.26
	Thrust Force Ripple [$kN_{ptp}/Pole$]	0.63	2.43	3.68	2.05
	Normal Force [[kN]	-0.39	0.24	0.64	2.13
	Normal Force Ripple [$kN_{ptp}/Pole$]	0.68	2.68	3.50	2.00

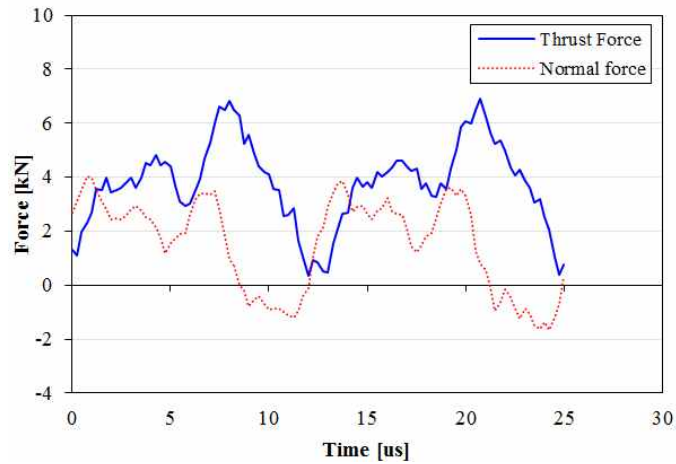


Fig. 5 Force property of the concentrated winding model 2 (@342km/h)

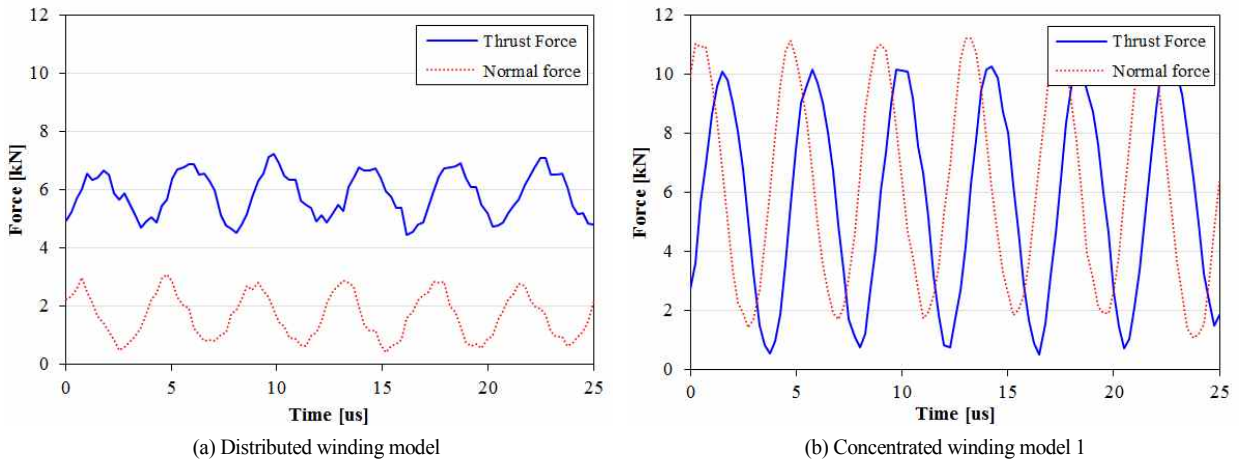


Fig. 6 Force property of the distributed winding model and concentrated winding model 1 (@342km/h, 5.75kN)

Table 3 Ground coil current of each coreless LSM model on the rated load

MODEL		Ground Coil Current [A]	Thrust Force [kN/Pole]
Distributed Winding Model	342km/h	4000	5.83
	660km/h	2040	3.00
Concentrated Winding Model 1	342km/h	7300	5.79
	660km/h	3800	3.03

4. 결 론

기존의 휠-레일 방식에 기초하지만, 추진시스템으로 기존의 회전형 전동기가 아닌 선형전동기를 이용하는 하이브리드 철도시스템의 경우 비접착구동이 가능하여 기존의 휠-레일 추진방식에 의한 속도한계를 극복할 수 있을 것으로 본다. 따라서 본 논문에서는 초고속열차용 추진시스템에 적용될 공심형 LSM의 다양한 분포/집중 권선방식의 변화에 따른 전자기적 특성 변화를 FEM을 이용하여 분석하였다. 추력 특성은 분포권 모델이 집중권 모델에 비해서 우수하였으며, 동일 추력을 발생시키기 위한 요구 입력전류도 집중권 모델이 분포권 모델과 비교하여 80% 이상 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 하지만 집중권 모델의 경우 지상 코일을 모듈화 방식으로 제작이 가능하여 비용과 유지보수면에서 이점이 크기 때문에 집중권 모델을 공심형 LSM에 적용하기 위해서는 추력 특성을 개선할 수 있는 추가적인 최적화 노력이 필요할 것이다.

참고문헌

- [1] C.B. Park, J.H. Lee, B.S. Lee, J.H. Kim, S.K. Lee, S.M. Jung and H.W. Lee (2013) A Study on the Structure of Linear Synchronous Motor for 600km/h Very High Speed Train, *Proceedings-International Symposium on Linear Drives for Industry Applications*.
- [2] Hyung-Woo Lee, Chan-Bae Park, Ju Lee (2011) Improvement of thrust force properties of Linear Synchronous Motor for an ultra-high-speed tube train, *IEEE Transaction on Magnetics*, 47(11), pp.4629-4634.
- [3] C.B. Park, B.S. Lee, and J. Lee (2010) A study on the applicability of the conventional TTX propulsion system on the high-speed propulsion system for a deep-underground GTX, *International Journal of Railway*, 3(2), pp.54-59.
- [4] C.B. Park, H.W. Lee, B.S. Lee, N. P. Kim, and H. J. Park (2010) A study on a design and characteristic analysis of a LSM for a propulsion/levitation of the high-speed tube train, *Proceedings-Conference on the Korean Society for Railway*.
- [5] Roger Kemp, Roderick Smith (2007) Technical issues raised by the proposal to introduce a 500km/h magnetically-levitated transport system in the UK, *Report prepared for the Department for Transport*, pp. 10-13.
- [6] G. Bohn, G. Steinmetz (1984) The electromagnetic levitation and guidance technology of the 'Transrapid' test facility Emsland, *IEEE Transaction on Magnetics*, MAG-20(5), pp.1666-1671.
- [7] T. Fujimoto, M. Aiba, H. Suzuki, T. Umeki and S. Nakamura (2000) Characteristics of electromagnetic force of ground coil for levitation and guidance at the Yamanashi Maglev test line, *QR of RTRI*, 41(2), pp. 63-67.