

초고속튜브열차 추진/부상용 LSM의 설계 기법 및 특성 분석 연구

A study on a design method and characteristic analysis of a LSM for a propulsion/levitation of the high-speed tube train

박찬배* 이형우** 이병송** 김남포** 박현준**
Chan-Bae Park Hyung-Woo Lee Byung-Song Lee Nam-Po Kim Hyunjune Park

ABSTRACT

Since it started the researches on a maglev train on 1960, Germany and Japan arrived to putting to practical use level and accomplished most tests from their test-line. Korea is in progress the preparation for a practical use of low-speed maglev train in 110 [km/h] class and Korea Railroad Research Institute(KRRI) is in progress of a research about core technology of maglev system for high-speed tube train of 700 [km/h] class. In this paper, authors suggest an effective design method of Linear Synchronous Motor(LSM) for high-speed tube train of 700 [km/h] class which has a wound type electro-magnet. Then, authors calculate a variety of properties by changing speed of the LSM model which is designed by a method based on some theoretical equations. Then, authors verify the validity of the method based on some theoretical equations through a verification of property values by Finite Element Method(FEM) analysis method. Finally, in order to design a shape of pole-shoe part of LSM electro-magnet which is hard to design with a basic design method, authors analyze a transition of property values by changing a pole-shoe width and current of the electro-magnet through an analytical method by FEM.

1. 서론

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. 기존 철도시스템에서 널리 사용되고 있는 차륜에 의한 점착구동방식은 급가속 및 고속주행을 위한 추진력을 얻기 위해 바퀴와 선로사이의 커다란 마찰력을 필요로 하며, 마찰력의 증대를 위하여 차량의 무게를 증대시켜야 한다. 이에 반해, 자기부상철도는 전자석을 이용하여 바퀴를 대체하고 안내 선로에서 부상하여 어떠한 접촉도 없이 전자기적으로 추진력을 발생한다[4].

자기부상열차는 1960년대부터 연구개발이 이루어진 이래, 독일과 일본의 경우는 실용화 수준에 도달하였으며, 시험선로에서의 대부분의 시험이 이루어졌다. 독일의 Transrapid는 2003년 12월, 중국 상하이에 상용노선을 건설하여 세계 유일의 상용시스템이 되었으며, 몇몇 프로젝트들(일본, 독일, 미국 등)이 정부승인을 기다리고 있다[3]. 그림 1은 선형동기전동기(Linear Synchronous Motor, LSM) 추진을 적용하여 이미 개발이 완료된 일본과 중국의 초고속 자기부상열차를 보여준다. 한국은 110[km/h]급 중저속 자기부상열차 실용화 준비를 진행 중이며, 한국철도기술연구원은 700[km/h] 급 초고속 튜브열차용 자기부상시스템의 기초기술을 연구 중이다.

* 한국철도기술연구원, 주행추진연구실, 정희원
E-mail : cbpark@krii.re.kr
TEL : (031)460-5427 FAX : (031)460-5299
** 한국철도기술연구원, 정희원

일반적으로 중저속 자기부상철도의 경우, 추진용으로 선형유도전동기(LIM)를 사용하고 있으나, 집전장치의 어려움 및 단부효과 등으로 인하여 약 300[km/h] 이하에서 사용되고 있다. 초고속 자기부상철도의 경우, 선형유도전동기보다 고효율, 고풍력의 특성을 가지는 선형동기전동기가 더 적합하다[1],[2]. 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. 본 연구에서는 권선형 계자를 가지는 700[km/h]급 초고속 튜브열차 추진/부상용 선형동기전동기의 효과적인 설계법을 제시하고, 이론식에 근거한 방법을 통하여 설계된 LSM 모델의 속도에 따른 다양한 특성값을 도출하였다. 또한 FEM 해석을 통한 특성값 검증을 통하여 이론식에 근거한 방법의 유효성을 검증하였다. 마지막으로 기본적인 설계법에서 다루기 힘든 LSM의 계자 슈 부분의 형상 설계를 위해서, FEM을 이용한 해석적 방법을 통하여 LSM 계자의 폴슈 폭 및 계자 전류의 변화에 따른 다양한 특성값의 추이를 살펴보았다.



(a) 일본의 초전도반발식 자기부상열차



(b) 독일의 상전도흡인식 자기부상열차

그림 1. LSM 추진을 적용한 초고속 자기부상열차

2. 추진/부상용 권선형 계자를 갖는 LSM 기본 설계법 제시 및 특성 파라미터 도출

본 연구에서는 700km/h급 초고속 튜브열차 추진/부상용 LSM을 설계하기에 앞서서, 튜브 내에서의 속도에 따른 주행저항 특성 및 700km/h 주행 시 요구되는 견인력 특성을 도출하였다. 본 설계에서 고려하고 있는 초고속 튜브열차의 경우 3량 1편성 기준으로 차량 총중량은 188.5[ton]이다. 일반적으로, 추진부상용 LSM의 경우, 마찰력은 없으나, 공기역학 저항, 자기적 저항, 선형 발전에 의한 저항을 고려하여 주행저항을 계산하여야 한다. 본 연구에서는, 공기역학 저항의 계산 시, 아진공 상태의 터널에서의 공기저항률을 Open Space에서의 공기저항률의 50%(0.5) 값을 적용하였다. 그림 1은 700km/h급 초고속 튜브열차의 주행속도에 따른 주행저항 및 요구 견인력 곡선을 보여준다. 그림 1에서 보는바와 같이, LSM의 정격속도는 300[km/h]이며, 요구되는 기동견인력은 $T_E = 163.4[kN]$ 이고, 특성 구간의 종단속도(Max speed : 700[km/h])에서의 요구 견인력은 70[kN]이다.

초고속 튜브열차 추진/부상용 LSM의 700km/h 주행 시 요구되는 견인력 특성을 도출한 후, LSM의 기본 설계를 수행하였다. 본 연구에서는 권선형 계자를 가지는 LSM에 있어서, 장하분해를 이용하는 일반적인 설계법과 달리, 정격 시 LSM의 기준 공극자속을 이용하는 새로운 설계법을 제시하였다. 또한 설계된 LSM 모델의 특성계산식을 이용한 동기리액턴스 도출 시, 정격속도에서 뿐만 아니라 최고속도에서의 값도 계산하였다. 그림 2는 700km/h 급 초고속 튜브열차 추진/부상용 LSM 설계 순서도를 보여준다. 그림 3. 700km/h 급 초고속 튜브열차 추진/부상용 LSM 설계 도면을 보여준다. 도표 1은 700km/h 급 초고속 튜브열차 추진/부상용 LSM 설계 사양을 보여준다. 도표 2는 LSM의 특성 계산을 위한 동기

리액턴스 도출 결과를 보여준다.

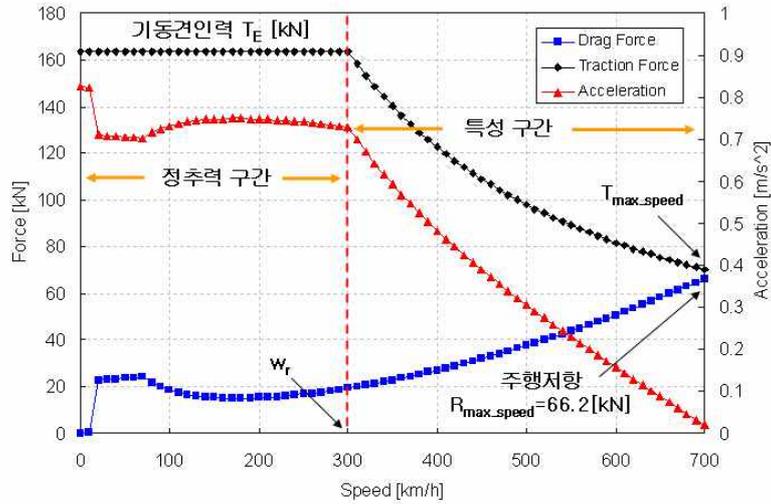


그림 2. 700km/h급 초고속 튜브열차의 주행속도에 따른 주행저항 및 요구 견인력 곡선

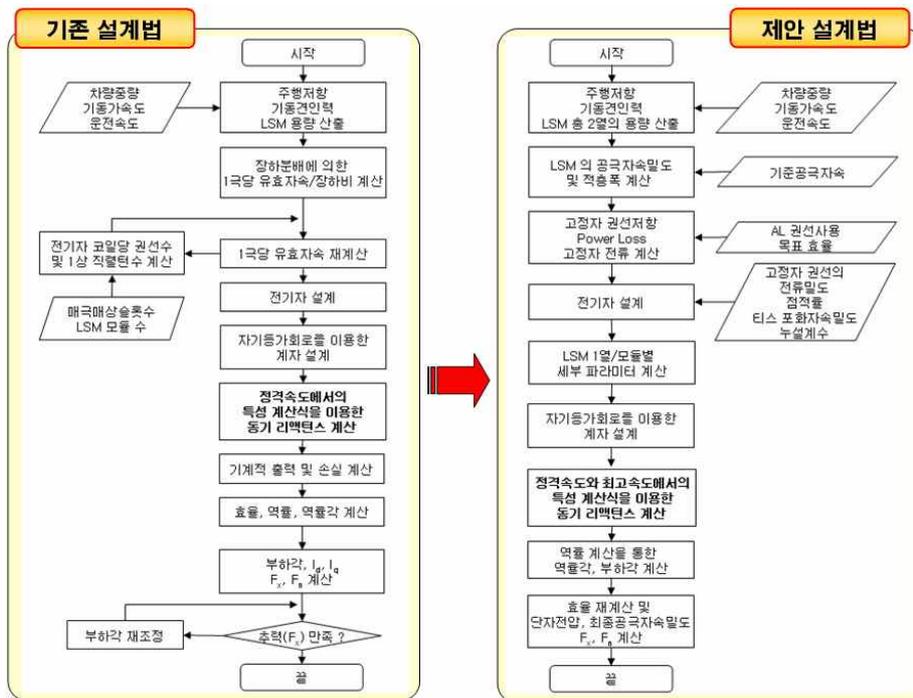


그림 3. 700km/h 급 초고속 튜브열차 추진/부상용 LSM 설계법

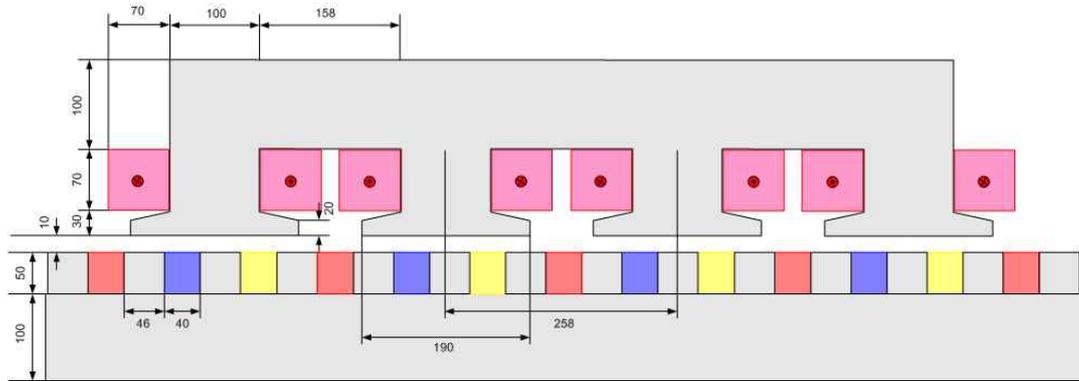


그림 4. 700km/h 급 초고속 튜브열차 추진/부상용 LSM 설계 도면

도표 1. 700km/h 급 초고속 튜브열차 추진/부상용 LSM 설계 사양

항 목	값	단위	
정격 용량 / LSM 1열	6.81	MW	
기동 추력 / 최고속도 추력	81.7 / 35	kN	
주파수 (300km/h / 700km/h)	161.5 / 376.8	Hz	
입력 상 전압 (300km/h / 700km/h)	4857 / 6157	V	
입력 전류 (300km/h / 700km/h)	1583 / 758	A	
공극	10	mm	
극 간격	258	mm	
섹션 길이	1200	m	
극 수	200		
계자	티스 폭	100	mm
	요크 폭	100	mm
	코어 적층폭	220	mm
	슬롯 깊이	100	mm
	코일 턴수	200	turns
	코일 전류	25	A
고정자	매극매상 슬롯수	1	
	상당 직렬 턴수	100	turns
	요크 두께	100	mm
	치 폭	46	mm
	슬롯 깊이	50	mm
	슬롯 폭	50	mm

도표 2. LSM의 특성 계산을 위한 동기리액턴스 도출 결과

항 목	표기	값		단위
		300 km/h	700 km/h	
고정자 권선저항	R_l	0.16		Ω
d축 자화리액턴스	X_{dm}	0.8110	0.3476	Ω
q축 자화리액턴스	X_{qm}	0.3285	0.1408	Ω
전기자 누설리액턴스	X_l	3.6055	1.5453	Ω
공극 누설리액턴스	X_g	2.7826	1.1926	Ω
d축 동기리액턴스	X_d	7.1991	3.0856	Ω
q축 동기리액턴스	X_q	6.7166	2.8788	Ω

3. 추진/부상용 권선형 계자를 가지는 LSM의 해석적 방법에 의한 특성 분석

3.1 권선형 계자를 가지는 LSM의 특성식을 이용한 분석

초고속 자기부상열차에 적용되는 추진/부상용 권선형 계자를 가지는 LSM의 해석적 방법에 의한 특성 파라미터의 분석을 위하여 dq-dq 모델에 근거한 특성식을 이용하였다. 부하각의 변화에 따른 단자전압 V_1 과 q축의 유도기전력 E_f 에 의한 전기자 전류 I_a 및 d, q축 전류 I_{ad} , I_{aq} 를 식(1), (2)를 이용하여 계산하였다. LSM의 입력전력 P_{input} 및 입력전력에 대하여 전기자 동손 ΔP_{1w} 를 뺀 기계적 출력 P_{ele} 를 식(3), (4)를 이용하여 계산하였으며, LSM의 자기적 추력과 권선형 계자에 의한 돌극성으로 인해 발생되는 릴럭턴스 추력으로 나뉘어지는 LSM의 추력 F_x 를 식(5)를 이용하여 계산하였다[5].

$$I_{ad} = \frac{V_1(X_q \cos \delta - R_1 \sin \delta) - E_f X_q}{X_d X_q + R_1^2}, \quad I_{aq} = \frac{V_1(R_1 \cos \delta + X_d \sin \delta) - E_f R_1}{X_d X_q + R_1^2} \quad (1)$$

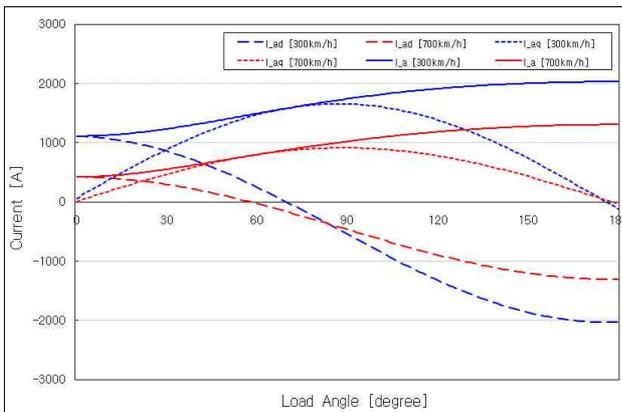
$$I_a = \frac{V_1}{X_d X_q + R_1^2} (\sqrt{[(X_q \cos \delta - R_1 \sin \delta) - E_f X_q]^2} + \sqrt{[(R_1 \cos \delta + X_d \sin \delta) - E_f R_1]^2}) \quad (2)$$

$$P_{input} = m_1 V_1 I_a \cos \phi = m_1 V_1 (I_{aq} \cos \delta - I_{ad} \sin \delta) \quad (3)$$

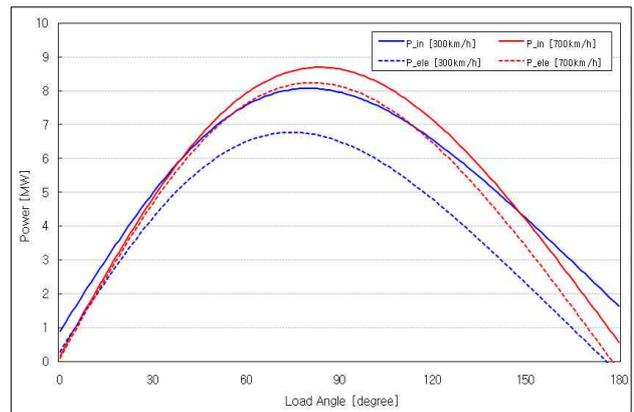
$$P_{ele} = P_{input} - \Delta P_{1w} = m_1 [I_{aq} E_f + I_{ad} I_{aq} (X_d - X_q)] \quad (4)$$

$$F_x = \frac{m_1}{v_s} \left[\frac{V_1 E_f}{X_d} \sin \delta + \frac{V_1^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right] \quad (5)$$

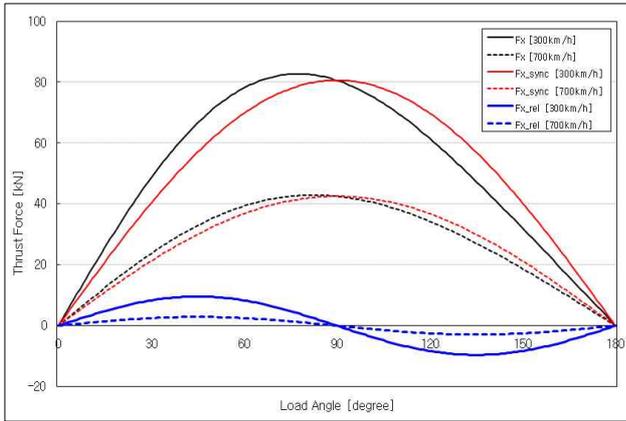
여기서, δ 는 부하각, m_1 은 LSM의 Phase number, ϕ 는 역률각, v_s 는 동기속도이다. 일반적인 LSM과 달리 자기부상용 권선형 계자를 가지는 LSM의 경우, 약계자 제어를 사용하지 않는다. 따라서 여자전류 성분(I_{ad})을 작게 하고, 토크발생 성분(I_{aq})이 커지도록 내부상차각(γ_o)을 작은 값으로 유지하는 것이 중요하다. 그림 5는 부하각의 변화에 따른 권선형 계자를 가지는 LSM의 정격속도인 300[km/h]와 최고 속도인 700[km/h]에서의 전부하 시 전기자 전류, 입/출력, 역률, 효율, 추진력 특성을 보여준다.



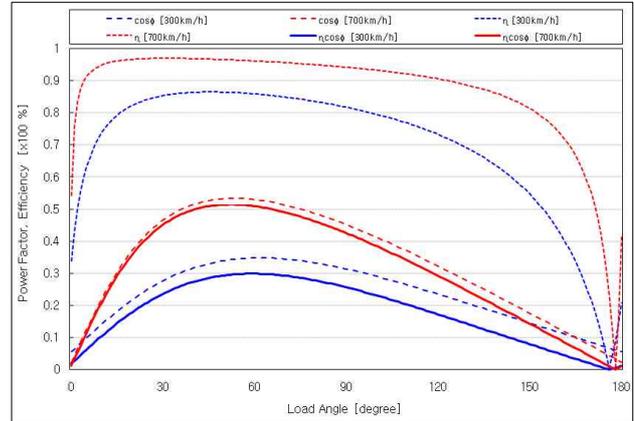
(a) LSM의 전기자 전류 특성



(b) LSM의 입·출력 특성



(a) LSM의 추진력 특성

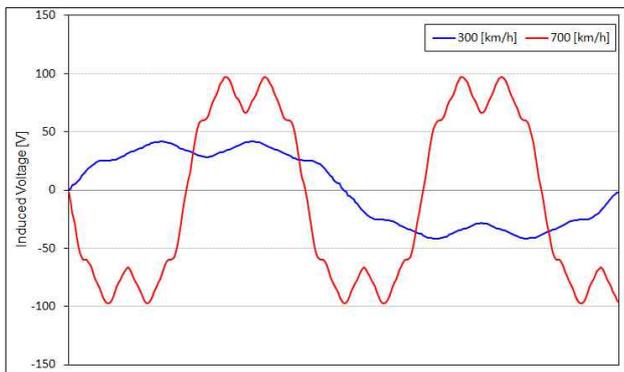


(b) LSM의 역률, 효율 특성

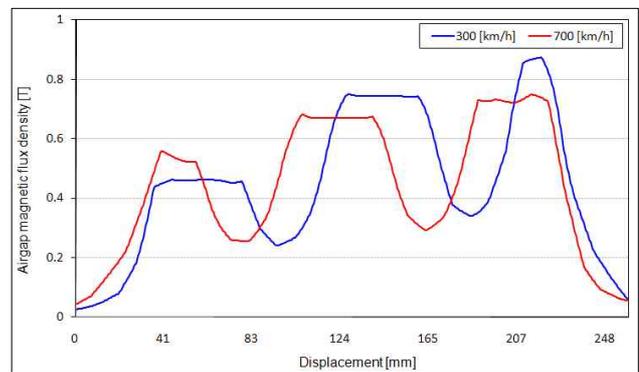
그림 5. 부하각 변화에 따른 LSM의 전부하에서의 특성 파라미터 분석

3.2 권선형 계자를 가지는 LSM의 수치해석적 방법에 의한 특성 검증

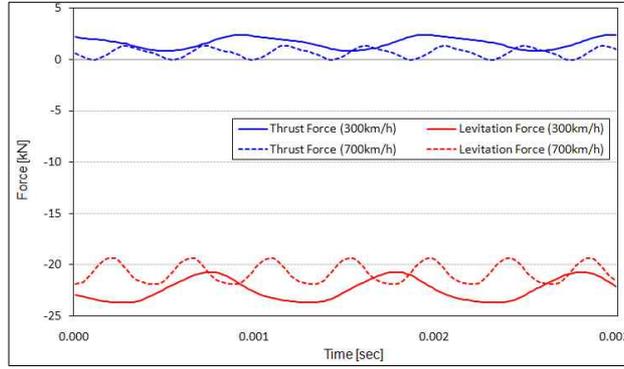
권선형 계자를 가지는 LSM의 해석적 방법에 의해 도출된 특성 파라미터의 검증을 위하여 FEM에 의한 수치해석적 방법을 사용하였으며, 상용 전자기해석 Tool(Maxwell 2D)을 이용하여 특성 파라미터의 검증을 수행하였다. 그림 6은 권선형 계자를 가지는 LSM의 정격속도인 300[km/h]와 최고속도인 700[km/h]에서의 무부하 유기기전력, 추진력/부상력, 공극자속밀도 그래프를 보여준다. 그림 7은 권선형 계자를 가지는 LSM의 300[km/h]와 700[km/h]에서의 자속밀도의 분포도를 보여준다. 그림 7 (a), (b)에서 보는 바와 같이, 300[km/h] 정격속도 영역과 700[km/h] 최대속도 영역에서의 운전 중 계자 코어에서의 발생 자속이 약 1.4 [T] 정도로 자속포화 현상이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 본 연구의 권선형 계자를 가지는 LSM의 각 특성 파라미터 검증을 위한 수치해석 결과의 정량적 수치를 도표 3에 정리하였다. 수치해석적 방법에 의한 LSM의 특성 해석 결과 수학적 특성식에 의한 설계모델의 무부하 유기기전력, 공극자속밀도, 추력값과 최대 5.7 [%]이내의 오차를 보임을 본 연구를 통하여 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제시한 설계법 및 특성식을 이용한 LSM의 특성 파라미터 도출법이 초고속트브열차 추진/부상용 권선형 계자를 가지는 LSM 실 모델을 개발하는데 적용할 수 있음을 검증할 수 있었다.



(a) LSM의 무부하 유기기전력 특성

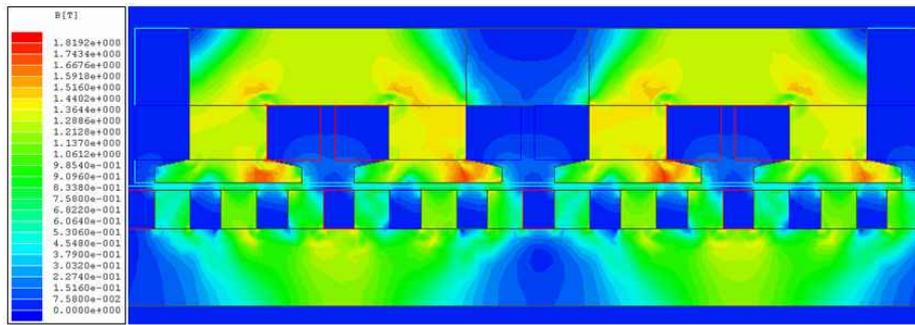


(b) LSM의 공극자속밀도 특성

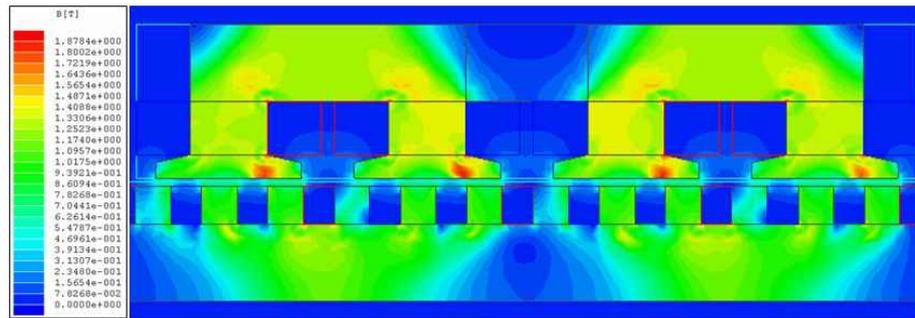


(c) LSM의 추력과 부상력 특성

그림 6. 권선형 계자를 가지는 LSM의 무부하 유기기전력, 추진력/부상력, 공극자속밀도 특성 곡선



(a) 300[km/h] 에서의 LSM 설계 모델의 자속밀도 분포도



(b) 700[km/h] 에서의 LSM 설계 모델의 자속밀도 분포도

그림 7. LSM 설계 모델의 자속밀도 분포도

도표 3. 권선형 계자를 가지는 LSM 특성 파라미터 해석 결과

속 도	항 목	FEM 해석 조건	FEM 해석 결과	설계값
300km/h	무부하 유기기전력	계자 Turn수 200 계자전류 25 [A]	1,507[V] (5.7% 초과)	1,426[V]
	공극자속밀도	고정자 전류 1583[A] 부하각 70[°]	0.511 [T] (2.2% 초과)	0.5 [T]
	총 Thrust Force		165.6[kN] (1.35% 초과)	163.4[kN] 이상
	극당 Levitation Force		5.60[kN]	-
700km/h	무부하 유기기전력	계자 Turn수 200 계자전류 25 [A]	3,517[V] (5.7% 초과)	3,327[V]
	공극자속밀도		0.499 [T] (0.2% 부족)	0.5 [T]
	총 Thrust Force	고정자 전류 758[A]	69.73[kN] (5.3% 초과)	66.2[kN] 이상
	극당 Levitation Force	부하각 55.89[°]	5.17[kN]	-

4. 결론

본 연구에서는 권선형 계자를 가지는 700[km/h]급 초고속 튜브열차 추진/부상용 선형동기전동기의 효과적인 설계법을 제시하였으며, 이론식에 근거한 방법을 통하여 설계된 권선형 계자를 가지는 LSM 모델의 해석적 방법에 의한 특성 파라미터의 분석을 위하여 dq-dq 모델에 근거한 특성식을 이용하였으며, 다양한 특성값을 도출하였다. 또한 권선형 계자를 가지는 LSM의 해석적 방법에 의해 도출된 특성 파라미터의 검증에 위하여 FEM에 의한 수치해석적 방법을 사용하였으며, 상용 전자기해석 Tool(Maxwell 2D)을 이용하여 특성 파라미터의 검증을 수행하였다. 수치해석적 방법에 의한 LSM의 특성 해석 결과 수학적 특성식에 의한 설계모델의 무부하 유기기전력, 공극자속밀도, 추력값과 최대 5.7 [%]이내의 오차를 보임을 본 연구를 통하여 확인할 수 있었으며, 본 연구에서 제시한 설계법 및 특성식을 이용한 LSM의 특성 파라미터 도출법이 초고속튜브열차 추진/부상용 권선형 계자를 가지는 LSM 실 모델을 개발하는데 적용할 수 있음을 검증할 수 있었다.

참고문헌

1. I. Boldea and S. A. Nasar(2001), Linear motion electromagnetic devices, New York: Taylor & Francis, pp.103-143.
2. Jacek F. Gieras and Zbigniew J. Piech(2000), Linear synchronous motors : transportation and automation systems, Boca Raton: CRC Press LLC, pp.85-121.
3. 이형우, 이영훈, 이창영, 권혁빈, 강부병, 한영재(2008), “초고속 자기부상철도의 추진시스템 기술”, 한국철도학회지, Vol.11, No.3, pp.12-16.
4. 박찬배, 이형우, 이병송, 김남포(2009), “700km/h급 초고속 자기부상열차의 추진/부상용 선형동기전동기의 기본설계 및 특성 분석 연구”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집
5. Liu Wanming, Yao, Jinbin, Zu Baofeng(2006), "Study of optimal design speed of high-speed maglev project," 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Dresden.