

자기부상 운송시스템 추진용 선형 유도 전동기의 설계 파라미터 분석

Design Parameter Analysis of the Induction Motor for Maglev Conveying System

지우영*, 정거철**, 박찬배*, 이형우*†

Woo-Young Ji*, Geo-Chul Jung**, Chan-Bae Park*, Hyung-Woo Lee*†

Abstract In this study, the analysis of design parameters of linear induction motor was conducted. Linear induction motor is propelled by Lorentz force generated by electromagnetic interaction between magnetic flux and current. The primary makes moving magnetic flux and eddy current is induced in the secondary plate. Therefore, performances of the LIM such as thrust force, ripple, efficiency is changed as shape of the primary and the secondary vary. This paper presents the analysis of the effects of design parameters by using Finite Elements Method (FEM). And derive the optimal model that satisfy the required thrust force, low ripple, high efficiency and power factor by using Response Surface Method (RSM).

Keywords : Linear Induction Motor, Maglev, FEA, RSM, CCD

초 록 선형 유도 전동기(Linear Induction Motor, LIM)는 1차측에서 발생시킨 이동 자속과 2차측에 유도된 와전류의 전자기적 상호작용으로 발생하는 로렌츠 힘을 이용하여 추진하는 방식이다. 1차측의 코어와 2차측의 도체판의 형상에 따라 자속의 흐름이 바뀌고 유도되는 와전류 또한 변하기 때문에 LIM의 성능 특성이 달라진다. 본 논문은 LIM의 추력, 추력리플, 효율, 역률을 반응변수로 설정하고 이에 영향을 미치는 주요 설계변수를 설정하였다. 유한요소 법과 반응 표면법을 사용하여 주요 설계 변수에 따른 반응변수 변화를 분석하였고 목적함수 값을 만족하는 최적 모델을 도출하였다.

주요어 : 선형 유도 전동기, 자기부상, 유한요소법, 반응 표면법, 중심합성계획법

1. 서 론

현재 대부분의 운송 시스템은 회전형 모터를 이용한 점착 구동 방식으로, 바퀴과 레일, 기어, 베어링에서 물리적 접촉이 발생하여 마모, 소음, 진동, 분진 등의 여러 문제점을 가진다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 기계적 마찰이 없는 자기부상방식이 상용화되고 있는 추세이다. 자기부상방식의 추진장치로는 구조가 간단하고 비용이 저렴한 선형 유도 전동기가 적합하며 현재 국내의 경우 인천공항의 자기부상열차에 적용되어 있다. 일반적으로 LIM의 1차측은 차량의 하단부분에 부착되고, 2차측은 지상에 선로를 따라 설치되며, 1차측 전기자에서는 이동 자속이 발생하고, 2차측 도체 판에서는 자속에 의해 와전류가 유도된다. LIM은 이동 자속과 유도된 와전류의 전자기적 상호작용으로 발생하는 로렌츠 힘을 이용하여 추진

† 교신저자: 한국교통대학교 철도대학 철도차량시스템공학(krhwlee@ut.ac.kr)

* 한국교통대학교 철도대학 철도차량운전시스템공학과

** 한양대학교 공과대학 전기공학과

하는 방식으로, 1차측과 2차측의 형상 변화가 추력뿐만 아니라 여러 성능에 영향을 끼친다. 따라서 LIM의 형상에 따른 성능 분석이 필요하다.

본 논문은 추력, 추력리플, 효율, 역률을 반응변수로 설정하여 반응변수에 영향을 미치는 주요 설계 파라미터를 선정하였다. 중심합성계획법을 이용하여 설계변수에 따른 실험점을 도출하였고, 전자장 유한요소법을 통해 실험값을 계산하였다. 반응 표면법을 사용하여 설계 변수에 따른 반응변수의 변화를 분석하였고 요구추력, 낮은 추력리플, 높은 역률·효율을 만족하는 최적모델을 도출하였다.

2. 본 론

2.1 LIM 사양

LIM의 설계 변수에 의한 영향을 분석하기 위해 실제 모델 사양을 해석하는 것은 유한요소법에 있어 구조가 복잡해지고 요소의 수가 많아 해석이 매우 난해해진다. 따라서 실 모델 제작 전 축소 모델 분석을 통한 검증 과정을 거친다. Table 1은 축소형 모델의 요구사양과 이를 만족하는 기본모델의 설계 사양이다. 기본모델의 형상은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 Short Primary 형태의 편측식 LIM이다. 1차측은 그림에서와 같이 2층 분포 단절권으로 권선이 감겨 있고, 2차측은 얇은 도체판과 그 아래 철심이 깔려 있는 형태이다. 전체적인 크기는 1차측 길이 340mm, 높이 90mm, 2차측 높이 5mm, 적층 길이 105mm 정도로 축소모델을 설정하였다.

Table 1 Specification of the LIM

Item	Specification
Maximum speed	5 m/s
Acceleration	2.5 m/s ²
Required thrust force	280 N
System weight	200 kg
Mechanical air-gap	1.5 mm
Output voltage	DC 300V
Phase voltage	173V _{peak}
Rated slip	0.3
Lamination length	105mm
Pole number	4
Slot number	29
Slot number per pole per phase	2
Phase resistance	0.14 Ω
Winding method	Double layer short pitch distributed winding

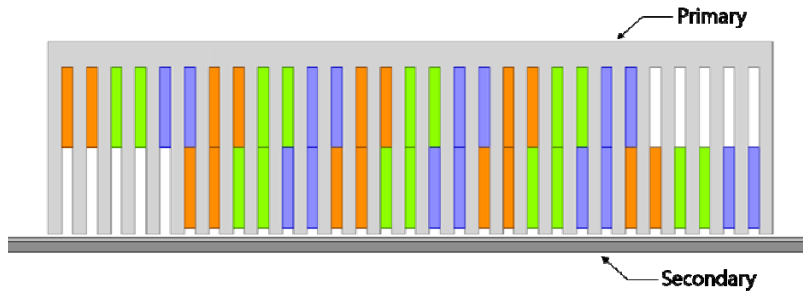


Fig. 1 Basic model of the LIM

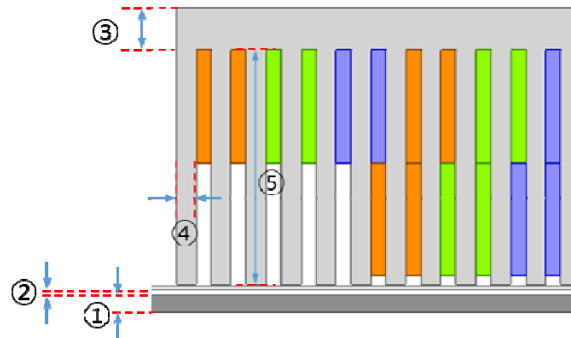


Fig. 2 Major design parameters

2.2 반응 표면법

반응 표면법은 설계변수와 반응변수의 실험적 관계를 수학적 식으로 표현하기 위해 실험이나 시뮬레이션으로부터 얻은 치수 값들로부터 근사적 반응표면모델을 만들어내는 통계적 기법이다. LIM 형상의 설계변수와 그 범위를 설정하면 중심 합성 계획법을 통해 다양한 설계 변수를 갖는 여러 개의 실험점을 얻을 수 있다. 각 실험점에서의 설계 변수에 대한 반응변수, 즉 추력과 효율 등의 실험적 결과를 모두 구하여 반응 표면법을 적용하면 설계변수 범위 내에서 반응변수를 근사적으로 예측할 수 있다. 또한 반응변수에 대한 목적함수를 설정하여 특정 목표 값을 만족하는 설계변수 값을 도출해 낼 수 있다.

2.3 LIM의 설계 파라미터

자기부상 운송시스템 LIM의 형상에 따른 설계변수와 반응변수를 모두 고려하는 것은 불가능하기 때문에 적절한 설계변수와 반응변수 설정이 중요하다. Table 2에 나타난 것과 같이 추력, 추력리플, 효율·역률을 반응변수로 두었으며 최대화, 최소화를 목적함수로 두었고, 주요 설계변수는 Fig. 2와 같이 5개를 선정하였다. 2차측의 백요크는 도체판 아래에서 자속의 경로 역할을 하고 도체판에서는 자속에 의해 와전류가 유도된다. 요크의 너비와 치의 너비, 길이는 1차측 코어의 형상으로 자속의 경로를 결정하는 주요 변수이다. 설계변수의 범위는 기본 모델을 기준으로 자속포화, 설계적 허용 범위 등을 고려하여 선정하였다.

Table 2 Object function and range of design variable

Objective function	Thrust Force [N]	Minimize
	Thrust Ripple [%]	Minimize
	Efficiency*Power Factor	Maximize
Design variables	① Back yoke thickness	3-7 [mm]
	② Reaction plate height	1-3 [mm]
	③ Yoke width	10-14 [mm]
	④ Teeth width	5.5-7.5 [mm]
	⑤ Teeth height	76-84 [mm]

Table 3 Experimental values of thrust, Ripple, power factor & efficiency

	Design variable [mm]					Objective function		
	①	②	③	④	⑤	Thrust [N]	Ripple [%]	Power factor efficiency
1	4	1.5	11	6	82	269.039	14.1742	15.992
2	6	1.5	11	6	78	278.383	14.4794	16.331
3	4	2.5	11	6	78	304.682	13.1253	15.271
4	6	2.5	11	6	82	293.354	13.4717	14.928
5	4	1.5	13	6	78	277.966	13.3407	16.714
6	6	1.5	13	6	82	269.934	13.6923	16.441
7	4	2.5	13	6	82	293.702	13.2280	15.263
8	6	2.5	13	6	78	305914	13.2431	16.216
9	4	1.5	11	7	78	316.656	14.6045	17.028
10	6	1.5	11	7	82	308.206	14.5748	16.747
11	4	2.5	11	7	82	336.421	14.0439	15.538
12	6	2.5	11	7	78	349.635	13.7666	15.917
13	4	1.5	13	7	82	307.556	14.8098	17.346
14	6	1.5	13	7	78	317.872	14.4611	17.711
15	4	2.5	13	7	78	349.424	13.8127	16.397
16	6	2.5	13	7	82	337.073	13.9883	16.073
17	3	2	12	6.5	80	308.238	13.8125	16.401
18	7	2	12	6.5	80	314.836	13.7384	16.458
19	5	1	12	6.5	80	246.680	14.0712	16.317
20	5	3	12	6.5	80	319.154	13.3769	14.827
21	5	2	10	6.5	80	314.240	13.5897	15.721
22	5	2	14	6.5	80	314.628	13.8088	16.712
23	5	2	12	5.5	80	273.027	12.9930	15.265
24	5	2	12	7.5	80	356.312	14.4797	17.391
25	5	2	12	6.5	76	325.556	13.3800	16.778
26	5	2	12	6.5	84	303.811	13.8298	16.097
27	5	2	12	6.5	80	314.555	14.0422	16.445

2.4 반응 표면법에 의한 분석

최적 모델 도출을 위해 Table 3을 토대로 Table 4와 같이 반응변수의 상한, 하한, 목표 값을 목적함수로 설정하였고, 특히 효율·역률을 향상시키기 위해 가중치를 더하였다. 반응 표면법의 반응 최적화를 이용한 최적 설계 값은 Fig. 3과 같다. 그림과 같이 각 변수가 반응함수에 미치는 영향을 분석하였으며, 가중치를 고려한 목적함수 값을 만족하는 최적 설계 변수를 도출하였다. Fig. 3에서 설정된 최적 설계변수를 가지는 모델을 해석한 결과 예측값과의 오차가 1% 이내인 것을 확인하였다. 기본모델은 설계변수 범위의 중간 값으로 설계하였고 최적모델과 기본 모델을 비교한 해석 결과를 Table 5에 정리하였다. 추력 리플은 5.1% 정도 악화되었으나 실제 0.67%p 밖에 차이가 나지 않고 리플의 크기가 낮은 값을 가지기 때문에 악화에 따른 영향은 거의 없다고 볼 수 있다. 토크는 3.7% 정도 향상되었고, 효율·역률은 12.8% 정도로, 2.058%p 향상되었다. 최적 모델과 기본 모델은 불과 몇mm의 차이밖에 나지 않지만 성능에 있어 유의미한 변화를 확인하였다.

Table 4 Response optimization setting

Objective function	Object	Lower	target	upper	Weight	Importance
Thrust [N]	Maximize	280	281		1	1
Ripple [%]	Minimize		13	14	1	1
Power factor efficiency	Maximize	17	18.5		10	10

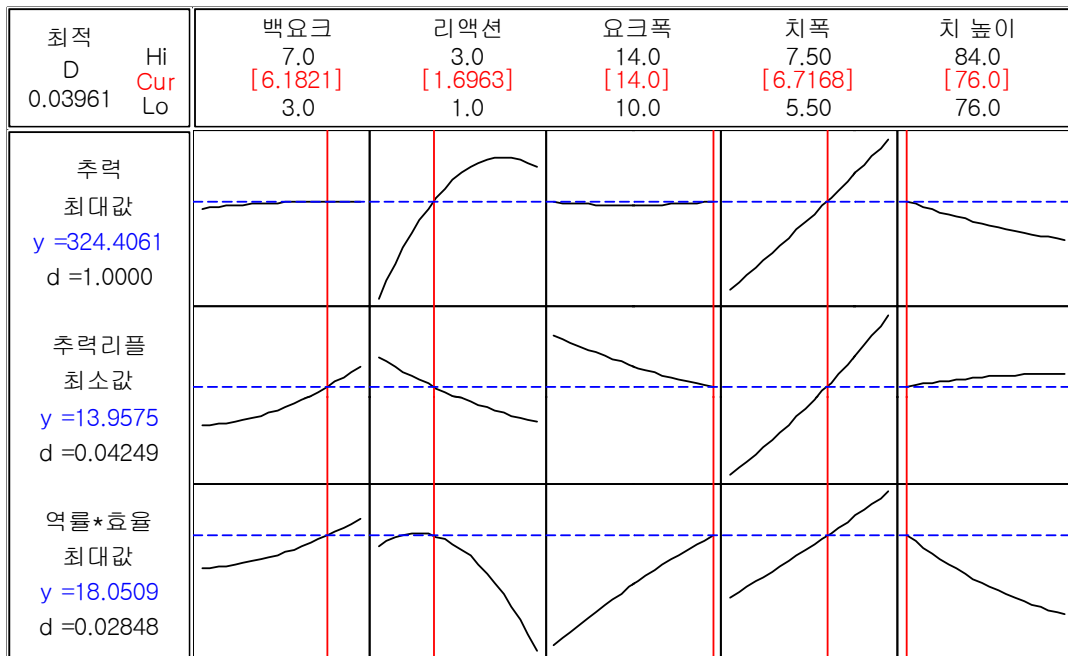


Fig. 3 Design parameters and of optimal model

Table 5 Results of basic and optimal model

Objective function	Thrust [N]	Ripple [%]	Power factor efficiency
Basic model	312.9	13.22	16.122
Optimal model	324.4	13.89	18.18
Rate of increase [%]	3.7	5.1	12.8

3. 결론

본 연구를 통해 자기부상 운송시스템 추진용 LIM의 형상에 따른 성능 특성의 변화를 분석하였다. 주요 설계변수를 백요크 너비, 2차측 도체판의 높이, 치 너비, 치 높이, 요크 너비로 설정하였고 반응변수를 추력, 추력리플, 효율·역률로 설정하였다. 반응 표면법과 유한요소법을 통해 설계변수가 반응변수에 미치는 영향을 분석하였고, 목적함수를 만족하는 최적 모델을 도출하였다. 최적 모델과 기본 모델의 비교분석을 통해 약간의 형상 변화로 성능 특성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 향후 축소 모델이 아닌 자기부상 열차에 적용 가능한 LIM의 요구사항 분석을 통해 실제모델에 대한 최적 설계 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2016년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2016R1A2B4009675)을 받아 수행된 논문임

참고문헌

- [1] G.C. Jung (2013) A Design study on the torque reduction of 210kW-class interior Permanent Magnet Synchronous Motor for railway vehicles, *The Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conference*, pp. 283-285.
- [2] H.W. Lee, B.S. Lee (2010) A Study on Deduction and Characteristic Analysis of Magnetic Equivalent Circuit Parameters of a Rotary-typed Small-scaled LIM for a railway Transit, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(4), pp. 404-411
- [3] C.B. Park, B.S. Lee, J. Lee (2010) Dynamic Characteristics Analysis Considering the Effect of the Vortexes of Flux in a LIM for Railway Propulsion System, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(3), pp. 437-442.