

# 자기부상열차 추진용 리니어모터 효율향상 설계연구

## A Study on Design of Linear Motor for Maglev for High Efficiency

김 윤 현\* · 김 기 찬†  
(Youn-Hyun Kim · Ki-Chan Kim)

**Abstract** - In this paper, effective design method of linear induction motor(LIM) for Maglev is proposed in order to maximize system efficiency of Maglev. For the high system efficiency of Maglev, it is important to minimize weight of traction motor. Light weight design by changing materials of core and winding is conducted without changing volume of LIM. For the silicon steel core of primary part for magnetic flux path, iron-cobalt alloy steel with high magnetic saturation characteristic compared to silicon steel is suggested. Moreover, aluminium winding with light weight instead of copper winding is wounded in the widen slot area due to the high magnetic saturation level. For the verification of performance of proposed model, the characteristics are analyzed by using finite element method(FEM).

**Key Words** : Maglev, Linear induction motor, Light weight, Cobalt steel, High efficiency

### 1. 서 론

자기부상열차는 바퀴가 없이 레일과 차체 사이에 간극을 일정하게 유지하여 저소음, 저진동, 저분진의 장점을 가지면서 운행한다. 특히 바퀴가 없이 운행되므로 차량의 저장화가 가능하고, 바퀴의 접촉력 제어가 아닌 직접 추력을 레일에 전달하기 때문에 터널의 소형화 및 급구배, 저 회전곡률반경 등 노선 설계에 큰 자유도가 생긴다[1-3]. 이러한 이유로 한국기계연구원에서 1989년 자기부상열차를 개발 착수한 후, 1998년 UTM-01모델 및 2005년 UTM-02 모델을 개발하였고 2006년부터 한국기계연구원, 현대로템(주), 한국철도시설공단의 실용화 사업으로 2016년 현재 인천 영종도 노선에서 상용화를 성공하였다[4].

자기부상용 추진시스템으로는 제작, 비용, 성능면으로 차상 1차 편축식 선형유도전동기가 적당하다. 또한 선형유도전동기의 1차측 무게는 차량의 하중, 즉 차량 부하와 관계되므로 모터에서 발생하는 추력능력이 동일하다면 모터가 가벼울수록 차량 가속속 성능이 개선되고 운전비용은 적어진다. 따라서 선형유도전동기뿐만 아니라 차량시스템 전체의 경량화가 필수적이다. 또한 최근 도심의 교통난 해소를 목적으로 운행 유지면에서 경제적인 경전철에 이러한 선형유도전동기가 도입되고 있는데 차량의 경량화가 차량의 중요한 제약조건으로 고려되고 있다[5].

일반적으로 선형유도전동기는 유도전동기의 원리와 같으므로

설계 시 등가회로를 사용하여 제어 파라미터를 도출한다. 그러나 선형유도전동기는 기계적으로 공극이 크고, 입구단과 출구단이 존재하기 때문에 단부효과에 의한 누설 자속 영향이 크므로 단순히 등가회로에 의한 수학적 계산이 쉽지가 않고, 포화에 따른 특성을 정확한 고려를 하기가 용이하지 않다[6-9]. 따라서 유한요소법을 사용하여 누설자속분과 포화를 정확히 고려 할 수 있는 수치해석적 방법이 유용하다[10].

본 논문에서는 차량의 경량화를 통한 시스템 효율을 향상시키기 위해 선형유도전동기의 1차측 전기감관과 1차측 권선 재질의 변경에 의한 경량화 방법을 제안하고 설계를 수행하였다. 본 논문은 설계측면에서의 경량화 방법에 대한 방법론을 제시하는 논문으로 선형유도전동기를 설계하고 전자장 해석을 통해 경량화 이전의 선형유도전동기와 제안한 시스템의 여러 가지 기본 특성을 비교하고 경량화 달성 관점에서 속도에 따른 추력/질량 비를 산출하여 비교하였다. 또한 단부효과로 인해 공극의 자속밀도 분포가 왜곡되는 현상을 속도에 따라 규명하고, 횡방향 효과 및 단부효과를 고려한 본 모델의 특성해석을 수행하였다.

### 2. 선형유도전동기 전자장 해석 모델

그림 1에 본 논문의 경량화 설계과정을 설명하기 위하여 경량화 이전의 구동용 선형 유도 전동기 모델의 유한요소법 해석 모델과 각 설계 변수의 치수를 나타낸다. 차량에는 3상의 전기자 분포 권선이 감겨있는 1차측이 부착되고 레일에는 알루미늄과 철로 구성되어 유도기전력에 의한 전기자 반작용을 통한 추력을 발생시키는 2차측 레일이 구성된다. 각동선의 권선이 슬롯에 인입되어야 하므로 개방슬롯으로 설계되어야 하고 부상갭에 따른 1차측과 2차측 사이의 큰 공극이 존재한다.

† Corresponding Author : Department of Electrical Engineering,  
Hanbat National University, Korea  
E-mail : kckim@hanbat.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Kiee Univerity, Korea

Received : November 24, 2015; Accepted : March 17, 2016

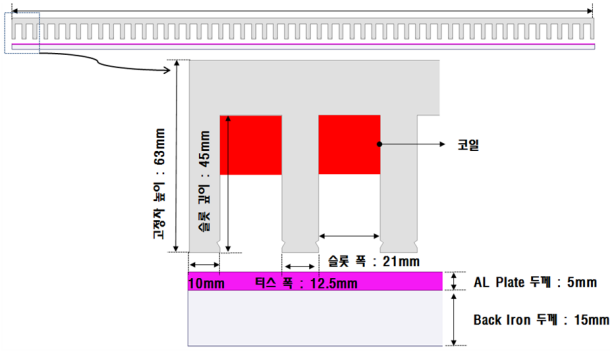


그림 1 경량화 설계 이전의 기본형 선형유도전동기의 해석모델  
 Fig. 1 Analysis model of base linear induction motor before light weight design

### 3. 시스템 효율향상을 위한 선형유도전동기의 경량 설계

#### 3.1 선형유도전동기의 1차측 경량화 설계 기법

경량화 정도를 비교하기 위해서 1차측 외형 치수(체적) 및 추력이 기본형과 제안된 경량형이 동일하다는 전제조건 하에 1차측 중량 저감 설계를 제시한다. 일반적으로 기본형과 같은 선형유도전동기가 동일한 중량 저감 설계에 따른 동일한 추력특성을 가지려면 기본형과 경량형의 공극 자속밀도  $B_g$ 와 슬롯내의 권선의 압페어턴  $At$ 이 동일하여야 한다. 1차측 규소강판 코어를 줄이게 되면 규소강판의 자속포화가 극심해져 자속의 누설이 발생되어 공극 자속을 줄이게 되며, 구리 재질의 권선 사용량을 줄이게 되면 전류밀도 증가로 효율 저감, 권선 턴수를 줄이게 되면 여자리액턴스 감소로 출력 감소 현상이 발생된다. 중량 저감을 위해 가장 효과적인 방법은 권선을 동바에서 저중량의 알루미늄바로 대체하는 것인데, 알루미늄바의 저항률이 동바보다 매우 높기 때문에 권선의 압페어턴  $At$ 를 같게 하기 위하여 약 1.6배 정도의 슬롯면적이 필요하다. 이러한 경우 자속 통로인 규소강판의 단면적이 줄어들게 되고 치와 요크의 포화특성으로 공극자속밀도를 동일하게 공급할 수 없기 때문에 추력 성능 및 효율 특성이 매우 낮아진다. 결국, 경량화를 위해 코어로서의 규소강판 재질변경이 요구된다. 그러나 일반적으로 사용되는 규소강판 종류들은 손실이 적은 고급강판일수록 포화자속밀도 값은 오히려 낮아지는 현상이 발생하고, 포화자속밀도가 2[T] 이상으로 유지될 수 없어 재질변경 효과를 크게 기대할 수 없다.

그림 2에 일본 카와사키사의 규소강판 시리즈 특성을 나타낸다. 50RM600 제품번호의 50은 0.5mm 강판 두께를 나타내며, 600은 50Hz, 1.5T의 조건에서 6.00W/kg의 철손이 발생된다는 것을 의미한다.

#### 3.2 전기강판 재질 및 코어설계

규소강판보다 우수한 포화자속밀도와 투자율 특성을 가진 재질은 주로 코발트강(Iron-Cobalt, Fe2Co) 합금에서 얻어질 수 있다[11].

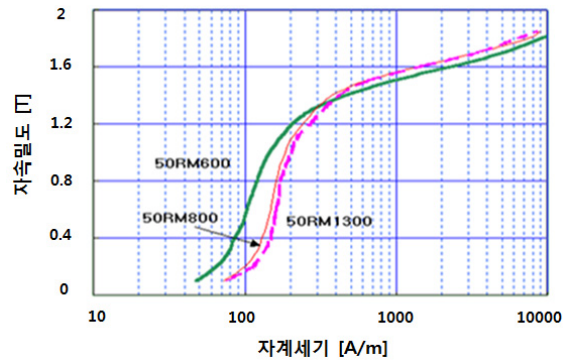


그림 2 규소강판 종류에 따른 자속밀도-자계세기 특성  
 Fig. 2 B-H characteristics of silicon steels

코발트강의 특성은 철에 함유되어 있는 코발트 비율에 따라 각각의 전자적 특성이 그림 3과 같이 달라진다. 그림 3에서 알 수 있듯이 코발트 함유율이 50% 부근에서 자계의 강도에 따라 일반적으로 높은 자속밀도 값을 가짐을 알 수 있으며 포화자속밀도도 2.4 [T] 이상으로 규소강판보다 약 20% 이상 증가된다. 또한 그림 4에는 50% 코발트강과 2종류의 규소강판에 대해 자속밀도에 따른 비투자율 특성 곡선을 나타내었다. 여기에서 50% 코발트강의 철손은 규소강판 시리즈 범위내에 포함되어 있고, 특히 높은 자속밀도 범위에서 큰 비투자율을 가짐을 알 수 있다.

표 1에는 각각 규소강판과 50% 코발트강의 특성값을 나타내었는데, 50% 코발트강이 비중은 크나 우수한 특성으로 철손량을 더 줄일 수 있으므로 경량화 요구에 만족된다. 결론적으로 규소강판을 50% 코발트강으로 대체하면 전기강판으로 구성된 치폭과 요크 폭을 줄일 수 있고 넓어진 슬롯 면적을 유지할 수 있다. 또한 줄

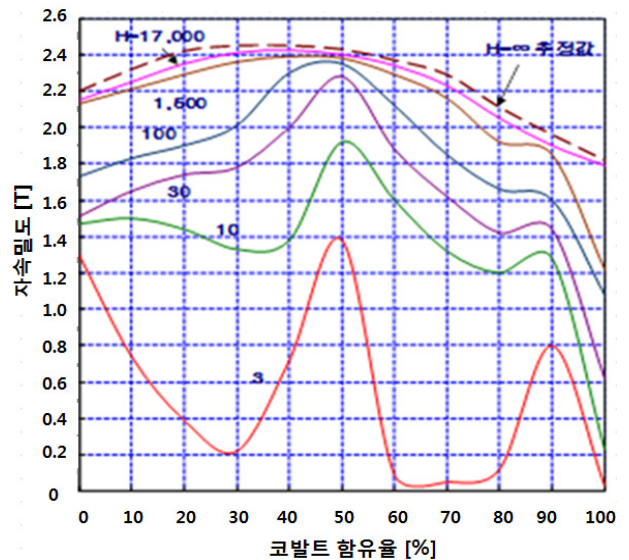


그림 3 코발트강의 코발트 함유량에 따른 자속밀도 분포  
 Fig. 3 Magnetic flux density due to cobalt component of iron-cobalt alloy steel

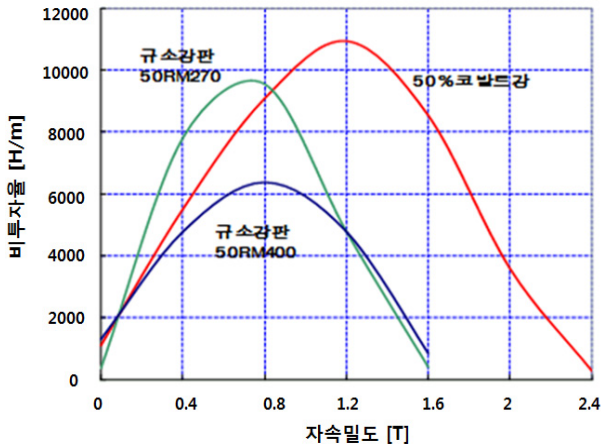


그림 4 규소강판과 50% 코발트강의 비투자율 비교  
 Fig. 4 Relative permeability of silicon steels and 50% iron-cobalt alloy steel

표 1 규소강판과 50%코발트강의 대표적 파라미터 비교  
 Table 1 comparison of specification between silicon steel and 50% iron-cobalt alloy steel

물성	포화자속밀도 B [T]	비투자율(최대) $\mu_r$ [H/m]	비중 [kg/m <sup>3</sup> ]
규소강판	2.0	7000~9500	7650
50% 코발트강	2.4	11000	8150

어든 철심면적만으로도 충분히 공극자속밀도를 유지할 수 있다.

### 3.3 시스템 경량화를 위한 권선 설계

전제조건에 따라 기자력을 동일하게 유지하기 위하여 1차권선 저항값과 권선 turn수를 기본형과 같게 한다. 일반적으로 사용하는 동바는 전기전도도가 우수한 반면 비중은 크고, 알루미늄바는 동바와 반대 특성을 가지나 비중의 변화율이 더 높다. 이러한 특성값을 표 2에 나타내었다. 따라서 전기강판의 변경으로 넓어진 슬롯에 알루미늄 바의 단면적을 크게하여 저항값 및 권선 turn 수를 유지할 수 있고, 상대적으로 무게도 줄일 수 있다.

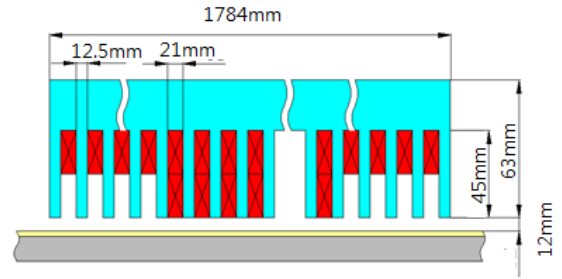
표 2 권선으로 사용되는 구리와 알루미늄 재질상수 비교  
 Table 2 Comparison of material constants between copper and aluminum

물성	체적저항률 $\rho$ [ $\Omega \cdot m$ ]	비중 [kg/m <sup>3</sup> ]
동 (Cu)	$1.69 \times 10^{-8}$	8930
알루미늄 (Al)	$2.83 \times 10^{-8}$	2690

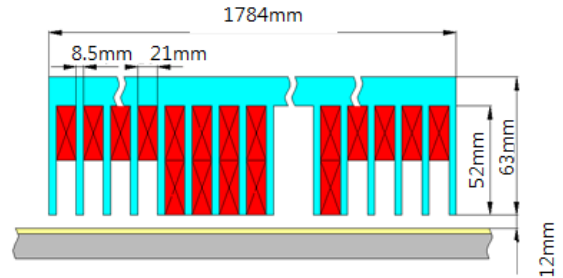
## 4. 선형유도전동기 특성해석

### 4.1 선형유도전동기의 경량화 설계 결과

동일한 추력특성을 발생하는 동바와 규소강판을 사용한 기본형 모델과 알루미늄바와 50% 코발트강을 사용한 경량형 설계 모델을 각각 그림 5에 표시하였다. 표 3에는 두 모델의 공통 스펙을 첨부하였다. 전자장 특성해석을 통하여 이들 두 모델의 전기적 정격특성이 서로 일치함을 확인하였다.



(a) 기본형 LIM



(b) 경량화 LIM

그림 5 기본형 선형유도전동기와 제안된 선형유도전동기의 설계 결과

Fig. 5 Design results of base LIM and proposed LIM

표 3 규소강판과 50%코발트강의 대표적 파라미터 비교  
 Table 3 comparison of specification between silicon steel and 50% iron-cobalt alloy steel

구분	단위	값
극 수	-	8극
냉각방식	-	자연 냉각식
절연종별	-	H Class
슬롯 수	Slot	56
정격	Kw	47.2
N	3775	
	m/s	12.5
	Vrms	275
	A	304
	2.4	8150

4.2 특성 해석 결과

표 4에는 기본형과 경량형의 경량화 결과를 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 총 35%의 경량 효과를 얻을 수 있고 차량 1량에 2대의 LIM이 취부되므로 약 108kg 정도가 감소될 수 있다. 즉, 차량 부하가 줄어드는 효과로 승객 정원을 올릴 수 있고, 같은 승객 수가 탑승하였을 때는 가감속 성능을 더 올릴 수 있다. 그림 6에 차량 속도에 따른 추력/질량 특성을 비교하였고, 그림 7에는 이들 모델의 슬립에 따른 특성을 나타내었다. 전체적인 그래프를 보면 효율과 추력의 최대점이 슬립이 커졌음을 알 수 있다. 이러한 슬립특성 곡선은 그림 8과 같이 유한요소법을 이용한 전자기 해석을 통하여 도출하였다.

권선을 변경하였을 때는 전기강판 변경시 보다 더 큰 경량효과를 얻을 수 있고 비용상도 유리하므로 현재 상용화된 제품은 대부분 이 경우에 해당된다. 그러나 대차에 필요한 모터 설치 공간이 한정되어 있고 경량효과를 얻고자 하는 경우는 전기강판 변경이 필요하게 된다.

선형유도전동기는 진행 방향으로의 양쪽 단부가 1차측의 이동 자계의 왜곡을 발생시켜 속도에 따른 공극자속밀도 분포를 변화시킨다. 단부 효과는 저 슬립 영역에서 체동력으로 작용하고 모터의 추력, 효율, 역률 등 전반적 특성들에 영향을 준다. 차량 추진시스템용 LIM에서 나타나는 단부효과로 인하여 공극자속밀도 파형이 왜곡되는 현상을 차량 이동속도에 따라 그림 9에 나타내었다. 그림에서 보듯이 속도가 증가함에 따라 단부효과 영향으로 정현파 공극자속밀도 파형의 왜곡현상이 커지므로 최대한 이러한 영향을 줄여 설계를 하여야 한다.

표 4 선형유도전동기 경량화 결과

Table 4 Comparison results of weight

구 분		무게 [kg]	비 고
전기강판	기본형	110	100%
	경량형	81	73.63%
권 선	기본형	193	100%
	경량형	114	59.06%

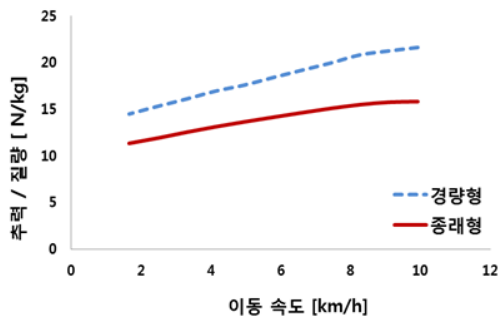
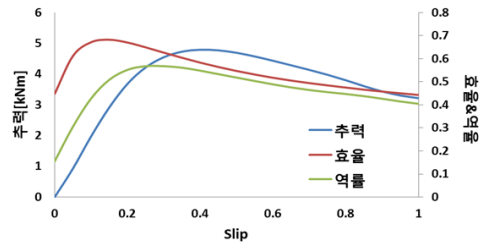
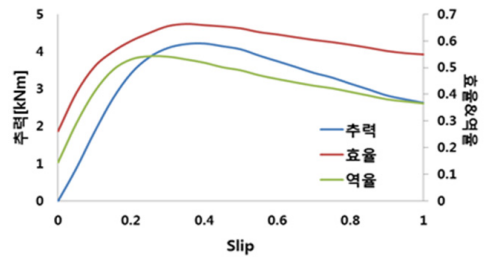


그림 6 이동속도에 따른 추력/질량 특성 비교  
Fig. 6 Comparison on thrust force/weight characteristic according to driving speed

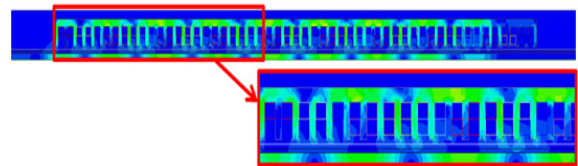


(a) 기본형 LIM

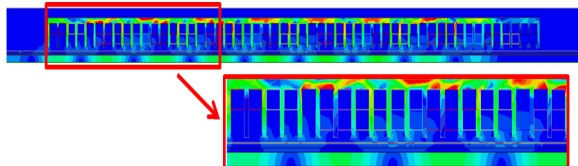


(b) 경량화 LIM

그림 7 기본형 LIM과 경량형 LIM의 슬립에 따른 특성곡선  
Fig. 7 Characteristic curve of base LIM and light weight LIM according to slip



(a) 기본형 LIM



(b) 경량화 LIM

그림 8 경량화에 따른 자속밀도 및 자속선도 분석  
Fig. 8 Analysis of magnetic flux density distribution and magnetic flux line according to models

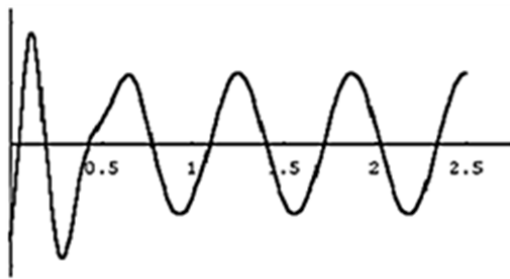
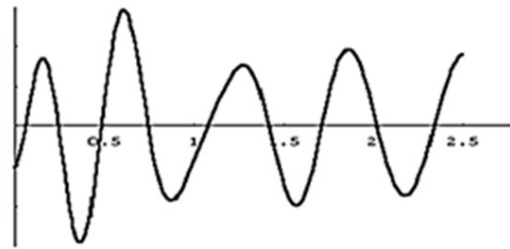
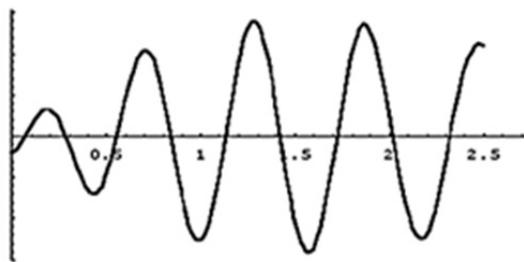
(a) 차량 이동속도  $v=20\text{km/h}$ (b) 차량 이동속도  $v=30\text{km/h}$ (c) 차량 이동속도  $v=40\text{km/h}$ (d) 차량 이동속도  $v=60\text{km/h}$ 

그림 9 단부효과로 인한 공극자속밀도 파형

Fig. 9 Air-gap magnetic flux density waveforms due to end effect

## 5. 결 론

자기부상 열차의 구동시스템의 효율을 향상시키기 위하여 차량 부하로도 작용하는 선형유도전동기의 1차측 무계를 경량화하는 설

계 방법을 본 논문에서 제시하였다. 구조강판보다 포화자속밀도가 높은 코발트 강을 전자강판으로 사용하여 치단면을 줄여 자기장하를 유지시키고, 넓어진 슬롯에 구리 권선 대신 알루미늄 권선을 선정하여 전기장하를 유지하였다. 대차 취부 측면에서 외형 치수가 제한되어 있으므로 본 논문에서 제안된 설계방법은 자기부상열차의 경량화 및 고추력화 설계 관점에서 타당하다.

## 감사의 글

이 논문은 2014년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

## References

- [1] Hyung-Woo Lee, Ki-Chan Kim, and Ju Lee, "Review of Maglev Train Technologies," IEEE Trans, Magn., vol. 42, no. 7, pp. 1917-1928, 2007.
- [2] Guobin Lin, and H. S. Han, "Development and Commercialization of Urban Maglev in China", Railway Journal, vol. 17, no. 6, pp. 18-21, Dec. 2014.
- [3] H. W. Cho, J. S. Bang, H. S. Han, H. K. Sung, D. S. Kim, and B. H. Kim, "Status of Advanced Technologies and Domestic Researches for Development of Korean Next Generation Maglev," Transaction of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 57, no. 10, pp. 1767-1776, 2008.
- [4] Center for Urban Maglev Project Team, "Urban Maglev for Metropolitan," KIEE conference, 19-16, 2014.7.
- [5] A. H. Lee, D. Y. Lee, Y. S. Cho, and S. Kwon, "Understanding of Light Rail Transit," Railway Journal, vol. 5, no. 4, pp. 45-58, 2002.
- [6] Dong Li, "A New Approach to Evaluate Influence of Transverse Edge Effect of a Single-Sided HTS Linear Induction Motor," IEEE Trans. Magnetics, Vol. 51, No. 3 8200404, 2015.
- [7] Sakae Yamamura, Theory of Induction Motors, University of Tokyo Press, 1977.
- [8] H. W. Lim, B. Chae, M. H. Choi, K. Y. Lee, G. B. Cho, and H. L. Baek, "The Stabilized Speed Control Modeling of Single-side Linear Induction Motor Considering End-effect," Trans. of Korean Institute of Power Electronics, vol. 11, no. 3, pp. 266-273, Jun. 2006.
- [9] S. A. Nasar, I. Boldea, Linear Motion Electric Machinery, Jhon Wiley & Sons, 1976.
- [10] Selcuk, A.H. and Kurum, H. "Investigation of End Effects in Linear Induction Motors by Using the

Finite-Element Method,” IEEE Trans. on Mag. pp. 1791-1795, Jul. 2008.

[11] Richard M. Bozorth, Ferromagnetism, IEEE PRESS, 1991.

---

## 저 자 소 개



### 김 윤 현 (Youn-Hyun Kim)

1964년 3월 13일생, 1987년 한양대 전기공학과 졸업, 1989년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1989~1999년 LG 산전연구소 책임연구원, 1999년~2002 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 한밭대학교 전기공학과 교수

Tel : (042) 821-1099,

Fax : (042) 821-1088,

E-mail : yhyunk@hanbat.ac.kr



### 김 기 찬 (Ki-Chan Kim)

1972년 8월 8일생, 1996년 한양대 전기공학과 졸업, 1998년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998~2005년 현대중공업 기계전기연구소 선임연구원, 2005년~2008년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 한밭대학교 전기공학과 부교수

Tel : (042) 821-1090,

Fax : (042) 821-1088,

E-mail : kckim@hanbat.ac.kr