

유한요소법을 이용한 선형유도전동기의 횡방향 모서리 효과 분석

論 文

57-12-9

The Analysis of Transverse Edge Effect of Linear Induction Motor by using Finite Element Method

李 聖 九* · 裴 在 男* · 李 衡 雨** · 朴 懷 濬** · 權 三 榮** · 李 柱†

(Sung-Gu Lee · Jae-Nam Bae · Hyung-Woo Lee · Hyun-June Park · Sam-Young Kwon · Ju Lee)

Abstract - In this paper, the construction of secondary reaction plate is analyzed by 3-D Finite Element Method (3-D FEM) to consider the influence of its variation on the transverse edge effect of LIM. The effective 3-D analysis model for considering the transverse edge effect caused by the finite widths of the primary and the secondary is proposed. The simple method measuring the transverse edge effect by using the patterns of currents induced in the secondary reaction plate is also proposed. With this effective analysis method, various models of secondary reaction plate with overhang and cap has been analyzed to consider the relationship between the construction of secondary reaction plate and the transverse edge effect of LIM.

Key Words : SLIM, Transverse Edge Effect, FEM, Secondary Reaction Plate

1. 서 론

선형유도전동기를 사용한 경전철 시스템은 궤과 레일 사이의 마찰력이 아닌 선형유도전동기의 1차측과 2차측 사이에서 발생하는 추력을 가지고 추진력을 얻는 시스템이다. 이런 연유로 선형유도전동기를 사용한 시스템은 별도의 동력전달장치가 필요하지 않아 진동, 소음 측면에서 우수하며, 상대적으로 큰 추진력을 얻을 수 있기 때문에 등판능력, 가속 및 제동 등과 같은 여러 성능 면에서 우수한 특성을 나타낸다. 하지만 선형유도전동기는 구조상 1차 측 길이방향 이 유한하여 입, 출구단에서 발생하는 자속의 불균형으로 인한 종방향 단부효과가 발생할 뿐만 아니라 1차 측 이동자에 의해 유기되는 2차측 와전류 성분 중 추력을 발생시키지 못하는 성분으로 인해 유효 공극 길이의 증가와 자속의 왜곡 등을 유발시키는 횡방향 모서리 효과가 발생한다. 이와 같은 종방향 단부효과 및 횡방향 모서리 효과들은 선형유도전동기의 성능에 중요한 영향을 미치며 선형유도전동기의 정확한 특성 해석을 위해서는 필수적으로 고려해주어야 한다 [1]-[3].

선형유도전동기에서 발생하는 종방향 단부효과에 대해서는 기존의 여러 논문들에서 다루어 왔으나, 횡방향 모서리 효과는 이의 해석을 위해 3차원 해석이 필요하다는 제약조건 때문에 아직까지 많은 연구가 이루어지지 않았다. 기존의 몇몇 논문들에서 해석적인 방법을 통해 이와 같은 3차원

해석을 수행하여 횡방향 단부효과를 고려하였으나 해석적인 방법이 갖는 근본적인 한계로 인하여 이의 결과를 신뢰하기 힘들다[4]. 이에 본 논문은 전자계 수치해석기법 중 가장 대표적인 유한요소법을 이용한 3차원 유한요소해석으로 선형유도전동기의 횡방향 모서리 효과 분석하는 방법을 제안하고 이를 이용하여 2차 측 도체의 형상이 횡방향 모서리 효과에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 선형 유도전동기의 횡방향 모서리 효과

선형유도전동기의 1차측과 2차측의 상대 운동에 의해 2차측 리액션 플레이트 상에는 그림 1(a)과 같은 고리 모양의 와전류들이 유도된다. 1차측 이동자가 x방향으로 진행하고 1차측에 의한 이동자계가 y성분만을 가지고 있다고 가정하면 2차측 리액션 플레이트에 유도되는 와전류는 그림 1(a)에서와 같이 z방향 성분과 x방향 성분만을 가지게 된다.

그림 1(b)는 1차측 위쪽에서 위와 같은 현상을 바라봤을 때의 와전류의 경로를 나타내고 있다. 그림 1(b)에 회색으로 표시된 부분은 1차측 코어와 2차측 리액션 플레이트가 겹치는 영역으로 본 논문에서는 이를 코어 영역이라고 명명한다. 이 코어 영역에서의 2차측 와전류의 z방향 성분과 이동자계의 y방향 성분이 상호작용하여 추력이 발생한다. 만약 코어 영역에서의 와전류가 z방향 성분 외에 x방향 성분을 가지게 되면 y방향 성분의 이동자계와의 상호작용을 통해 편심력을 발생시킬 뿐만 아니라 자속을 왜곡시키고 2차측 리액션 플레이트의 등가 저항을 증가시키는 등의 성능 저감을 발생시킨다. 이와 같은 현상을 선형유도전동기의 횡방향 모서리 효과라 하며 선형유도전동기의 성능 특성 해석 시 이에 대한 고려가 필수적으로 이루어져야 한다.

* 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 博士課程

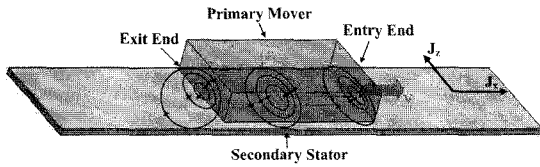
** 正 會 員 : 韓國鐵道技術研究院

† 교신저자, 正會員 : 漢陽大 工大 代表學科 助教授 · 工博

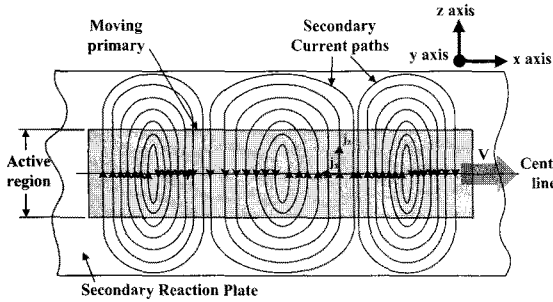
E-mail : julee@hanyang.ac.kr

接受日字 : 2008年 6月 23日

最終完了 : 2008年 11月 11日



(a) 측면도



(b) 상면도

그림 1 선형유도전동기에서의 횡방향 모서리 효과

Fig. 1 The transverse edge effect of LIM

그림 1(b)에서도 나타나 있듯이 선형유도전동기에서 발생하는 횡방향 모서리 단부효과를 고려하기 위해서는 코어 영역 상의 와전류의 분포를 정확하게 계산할 수 있어야 한다. 이는 곧 y방향의 자속과 이로 인해 유도되는 x, z 방향의 와전류 모델링이 가능한 3차원 해석이 필요함을 의미한다.

2.1 선형유도전동기의 사양

본 논문에서는 도표 1에 표시된 사양의 선형유도전동기를 이용하여 횡방향 효과를 고려하기 위한 유한요소해석을 수행하였다.

표 1 선형유도전동기 사양

Table 1 The spec of LIM

항목	단위	값
Rated Thrust	kN	18.4
Rated speed	m/s	8.333
Number of poles	-	8
Number of phase	-	3
Pole pitch	mm	252
Slot pitch	mm	21
Height of primary core	mm	56
Width of primary core	mm	250
Tooth width	mm	13.5
Slot depth	mm	44
Physical air gap	mm	9
Thickness of secondary reaction plate	mm	5
Material of secondary reaction plate	-	aluminum

그림 2는 표 1에 나타나 있는 선형유도전동기의 유한요소 해석을 위한 3차원 모델을 나타내고 있다.

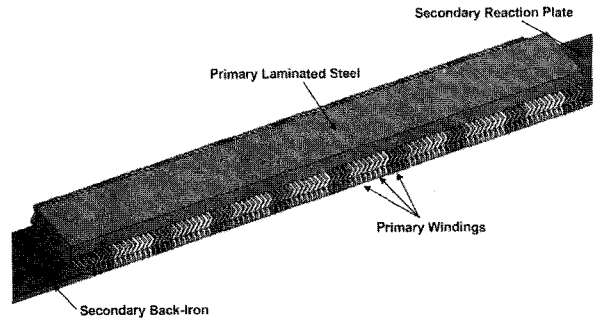


그림 2 선형 유도 전동기의 3차원 전체 모델

Fig. 2 The three dimensional full model of LIM

2.2 횡방향 모서리 효과의 해석을 위한 3차원 모델

선형유도전동기의 횡방향 모서리 효과의 고려를 위한 3차원 해석에는 횡방향으로의 불연속을 표현할 수 있는 3차원 해석 모델이 필수적이다. 그림 2는 3차원 유한요소해석을 위해 8극 전체를 고려한 모델로써 1차축의 입, 출구단과 같은 종축으로의 불연속과 더불어 횡축으로의 불연속을 동시에 나타내고 있어 이의 해석을 통해 횡방향 모서리 효과와 종방향 단부 효과를 모두 고려할 수 있다. 하지만 현재의 컴퓨터 자원으로서는 이와 같은 모델의 3차원 유한요소해석은 불가능한 상황이다. 현재의 기술력을 토대로 3차원 유한요소 해석을 수행하기 위해서는 해석모델의 크기를 줄일 필요가 있다.

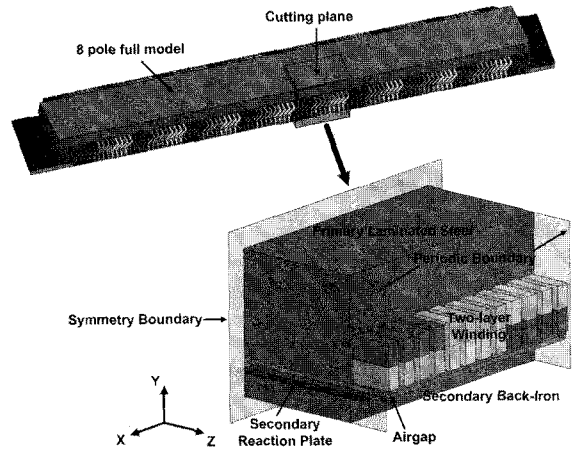


그림 3 선형 유도 전동기의 3차원 한 극 모델

Fig. 3 The three dimensional one pole model of LIM

그림 3은 그림 2의 전체 모델 중에서 1극 분에 해당하는 모델을 모델링하는 방법을 나타내고 있다. 본 논문에서는 그림 3에 나타나 있는 모델을 이용하여 선형유도전동기에서 발생하는 횡방향 모서리 효과를 해석하고 계산하였다. 이 모델은 8극 전체 모델을 주기조건과 xy평면에 대한 대칭성을 이용하여 1극 반 모델로 크기를 줄여 모델링한 것이다. 하지만 이 모델은 그림 3에 표시된 것과 같이 1극 모델의

중축 양 끝단에 적용된 주기조건으로 인해 중축 상의 불연속을 표현할 수 없어 중축 단부 효과는 고려할 수 없고 오직 횡방향 모서리 효과만을 고려할 수 있다. 본 논문에서는 선형유도전동기에서 발생하는 종방향 단부효과가 횡방향 모서리 효과에 미치는 영향이 미비하다고 가정하고 위의 1극 모델을 해석에 사용하였다. 또한 1차측 권선의 엔드턴에 의한 누설자속은 크기가 작아 전체 시스템에 미치는 영향을 무시할 수 있다고 가정하고 모델링 시 엔드턴은 무시하였다. 최종적으로 그림 3에 나타난 엔드턴을 무시한 1극 반 모델이 본 논문에서 3차원 유한요소해석을 위해 사용된 해석모델이다.

2.3 횡방향 모서리 효과의 계산 방법

2차측 리액션 플레이트 상의 와전류 분포를 통하여 횡방향 모서리 효과를 계산할 수 있다. 그림 4는 3차원 유한요소 해석을 통해 계산한 2차측 리액션 플레이트에서의 와전류의 분포이다. 그림 4에 나타나 있듯이 2차측 리액션 플레이트에 유도되는 와전류는 코어 영역 한 가운데에서는 오직 z방향 성분만을 가지고 중심에서 멀어질수록 z방향 성분이 감소하고 x방향 성분이 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이는 횡방향 효과로 인한 것으로서 2차측 리액션 플레이트의 코어 영역에서의 z방향 성분의 감쇠정도가 곧 횡방향 모서리 효과의 정도를 나타내는 지표로 활용될 수 있음을 의미한다. 이에 본 논문에서는 2차측 리액션 플레이트 상에 유도되는 와전류의 z성분의 감쇠정도를 횡방향 효과의 척도로 산정하고 이를 간단하게 계산하는 방법을 제안하였다.

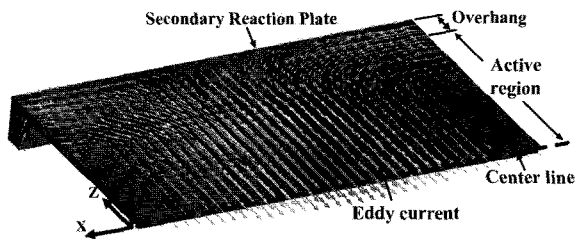


그림 4 2차측 리액션 플레이트에서의 와전류 분포
Fig. 4 The distribution of eddy current on the secondary reaction plate

그림 4의 2차측 리액션 플레이트 코어 영역의 한 가운데를 시작으로 하여 z축을 따라 코어 영역의 끝으로 진행함에 따라 각 지점을 지나가는 와전류의 z방향 성분의 값을 계산하였다. 이 때 코어 영역의 중심은 0으로 두고 코어 영역의 가운데에서부터 한쪽 끝까지의 거리를 1의 값으로 정규화하였다. 또한 코어 영역 한 가운데에서의 와전류의 z방향 성분의 값을 기준으로 나머지 지점에서의 와전류의 z방향 성분 값들을 정규화 하여 계산하였다. 즉 코어 영역의 한 가운데를 지나는 와전류의 z성분의 값을 1로 하여 다른 지점에서의 와전류의 z성분의 상대적인 값을 계산하였다. 그림 5에 이와 같은 방법으로 구한 그래프를 나타내었다. 이 그래프에서 알 수 있듯이 와전류의 z방향 성분은 코어 영역 한 가운데에서 최대이며 코어 영역 중심으로부터 z축을 따라

멀어질수록 횡방향 모서리 효과에 의해 그 값이 작아지게 된다. 이 감쇠정도가 곧 횡방향 모서리 효과의 정량적인 척도이므로 본 논문에서는 이 그래프에 나타난 정규화된 와전류의 z성분의 값들의 평균인 $I_{z,mean}$ 을 통해 횡방향 모서리 효과를 정량적으로 계산하였다. 식 (1)에 이를 계산하는 공식을 나타내었다. i 는 코어 영역의 한 가운데에서부터 코어 영역의 끝까지를 분할한 인덱스, k 는 전체 인덱스의 개수, L_i 는 각 i 지점에서 x축을 평행하게 그어진 직선, i_z 는 와전류의 z방향 성분을 각각 의미한다.

$$I_{z,mean} = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k \left\{ \int_{L_i} i_z dx \right\} \quad (1)$$

이 정규화된 와전류의 z성분의 평균값을 나타내는 $I_{z,mean}$ 이 1에 가까운 값을 갖을수록 횡방향 모서리 효과는 미비하고 0에 가까울수록 횡방향 모서리 효과가 커지게 된다.

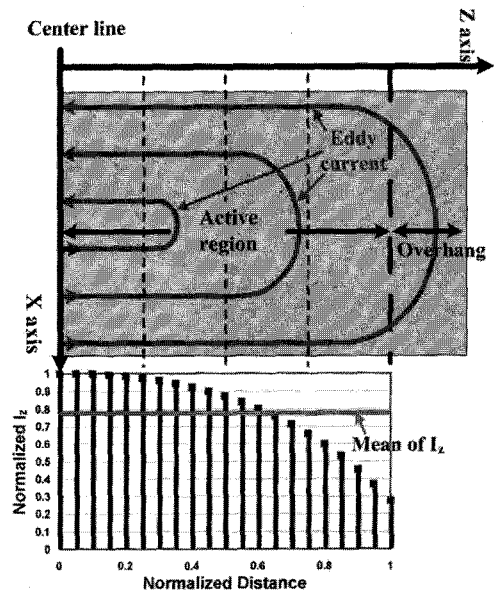


그림 5 z성분 와전류의 정규화
Fig. 5 Normalization of z-component of eddy current

2.4 다양한 2차측 리액션 플레이트의 형상

선형유도전동기에서 발생하는 횡방향 모서리 효과는 2차측 리액션 플레이트의 형상에 직접적인 영향을 받게 된다. 일반적으로 선형유도전동기는 횡방향 모서리 효과를 줄이기 위해 적절한 길이의 오버행과 갭 구조를 가진 2차측 리액션 플레이트가 사용된다. 오버행과 갭 구조와 같은 2차측 리액션 플레이트의 형상이 선형유도전동기의 횡방향 모서리 현상에 미치는 영향을 살펴보기 위해 본 논문에서는 그림 6과 같은 12개의 모델을 선정하였으며 본 논문에서 제안한 3차원 유한요소해석을 이용한 횡방향 모서리 효과 계산 방법을 이용하여 해석을 진행하였다. 각 모델들은 모두 동일한 1차측을 가지면서 오직 2차측 리액션 플레이트의 형상에만 차이가 존재한다. 각 모델들의 2차측 리액션 플레이트의 형상

들은 오버행이 없는 기본 모델부터 다양한 길이의 오버행과 캡 구조의 조합들로 이루어져 있으며 그림 6에 이를 나타내고 있다.

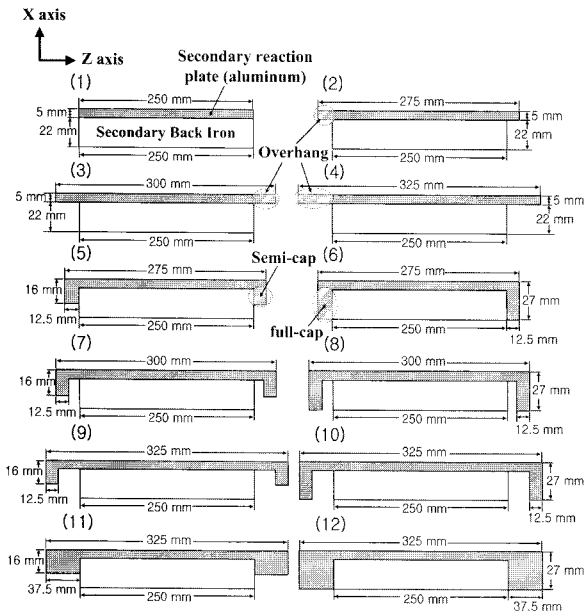
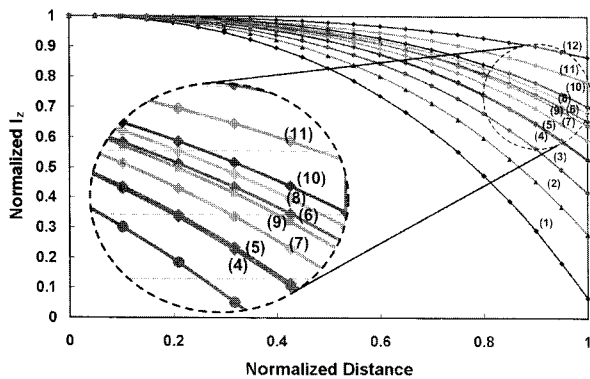


그림 6 여러 가지 형상의 2차측 리액션 플레이트
Fig. 6 Various construction of secondary reaction plate

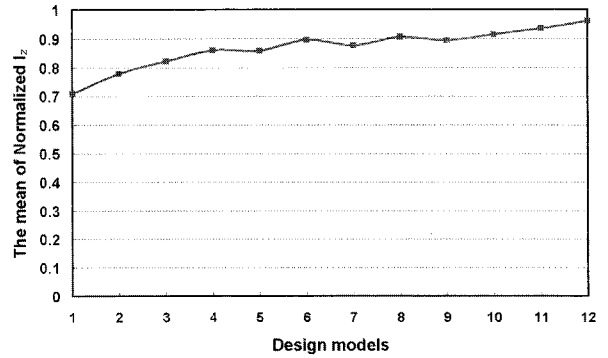
3. 3차원 해석 결과

2차측 리액션 플레이트의 형상이 다른 12개의 모델들에서 발생하는 횡방향 모서리 효과를 3차원 유한요소해석으로 해석한 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7의 (a)는 각 모델들의 거리에 따른 와전류의 z성분의 값들을 나타내고 있으며 (b)는 (a)로부터 계산한 각 모델들의 $I_{z,ave}$ 을 표시하였다.

이 결과들로부터 오버행이 없는 1번 모델에서 횡방향 모서리 효과가 가장 크게 나타나고 더 큰 오버행과 캡 구조를 가질수록 횡방향 모서리 효과가 저감되는 경향을 보임을 확인할 수 있었다. 또한 오버행과 캡 구조에 따른 횡방향 모서리 효과의 저감 정도는 비선형적인 특성을 보임을 확인하였다.



(a) 각 모델 별 정규화된 I_z



(b) 각 모델 별 $I_{z,ave}$

그림 7 모델에 따른 횡방향 모서리 효과
Fig. 7 Transverse edge effect due to models

4. 결론

본 논문에서는 3차원 유한요소해석을 통해 구한 2차측 리액션 플레이트 상에서의 와전류의 분포로부터 횡방향 모서리 효과를 계산할 수 있는 간단한 방법을 제안하였다. 기존의 해석적인 방법이 단순한 형상이나 특정한 형상을 갖는 선형유도전동기의 횡방향 모서리 효과만을 고려할 수 있는 것에 반해 본 논문에서 제안한 방법은 어떤 복잡한 형상을 갖는 경우에도 횡방향 효과를 보다 정확하게 고려할 수 있는 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Jawad Faiz, and H. Jafari, "Accurate Modeling of Single-Sided Linear Induction Motor Considers End Effect and Equivalent Thickness," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 36, No. 5, pp. 3785-3790, September 2000.
- [2] F.N. Najm, "A Survey of Power Estimation Techniques in VLSI Circuits," IEEE Trans. on VLSI Systems, pp. 446-455, Dec. 1994.
- [3] 박찬배, 이형우, 한경희, 이병송, 권삼영, 박현준, "램돌이 자속의 영향을 고려한 철도차량용 선형유도전동기의 추력 특성 연구," 한국철도학회, 2007.
- [4] Tadashi Yamaguchi, Yoshihiro Kawase, Makoto Yoshida, Youichi Saito and Yasuharu Ohdachi, "3-D Finite Element Analysis of a Linear Induction Motor," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 37, No. 5, pp. 3668-3671, September 2001.

저 자 소 개



이 성 구 (李 聖 九)

1980년 4월 23일생. 2003년 한양대 전기 전자공학부 졸업. 2005년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 동 대학원 전기공학 박사과정

Tel : 02-2220-0349

Fax : 02-2295-9711

E-mail : firewirelee80@hotmail.com



박 현 준 (朴 煥 濬)

1957년 6월 24일 생. 1981년 홍익대 전기 공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 2003년 동 대학원 전기정보 제어공학과 졸업 (공학박). 1996년 장영 실상 수상. 1997~ 현재 한국철도기술연구원 수석연구원.

Tel : 031-460-5401

E-mail : hjpark@krri.re.kr



배 재 남 (裵 在 男)

1981년 11월 21일생. 2004년 한양대 전기 전자공학부 졸업. 2006년 한양대 전기공학과 졸업(석사). 2007년 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-2220-0349

E-mail : baejn81@hanyang.ac.kr



권 삼 영 (權 三 榮)

1962년 8월 22일생. 1984년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1997년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~ 현재 한국철도기술연구원(책임연구원).

Tel : 031-460-5425

E-mail : sykwon@krri.re.kr



이 형 우 (李 衡 雨)

1998년 한양대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 미국 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(공학박). 2004년 미국 Cornell Univ. 이론응용역학과 객원 연구원. 2005년 한양대학교 BK사업단 계약교수. 2006년~ 현재 한국철도기술연구원 선임연구원.

Tel : 031-460-5426

Fax : 031-460-5459

E-mail : krhwlee@krri.re.kr



이 주 (李 柱)

1963년 8월 30일 생. 1986년 한양대 전기 공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1988년~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(공학박). 1997년 한국철도기술연구원 선임 연구원. 1997~ 현재 한양대 공대 전기제어생체 공학부 부교수

Tel : 02-2220-0342

E-mail : julee@hanyang.ac.kr