

# 보조극 변화에 따른 전기자 분산배치 영구자석형 리니어 동기 모터의 코깅력 저감에 관한 연구

이규명\* · 김용재\*\*

A Study on the reduction of cogging force of stationary discontinuous armature Permanent Magnet Linear Synchronous Motor by change in Auxiliary pole

Kyu-myung Lee\* · Yong-jae Kim\*\*

요 약

최근 반송장치 시스템의 구동원으로 전기자 분산배치를 이용한 영구자석 리니어 동기 모터가 사용되고 있다. 하지만, 전기자 분산배치를 이용한 영구자석 리니어 동기 모터는 구조상 필연적으로 단부가 존재하게 된다. 이러한 이유로 전기자의 철심과 가동자의 영구자석 사이에 단부 코깅력이 발생한다. 본 논문은 유한요소법을 이용한 2차원 수치해석을 통해 단부 코깅력을 고찰하였다. 또한, 단부 코깅력을 최소화하기 위해 가동자에 보조극을 설치한 형상을 제안하였다.

ABSTRACT

The stationary discontinuous armatures that are used in permanent magnet linear synchronous motors (PM-LSMs) have been proposed as a driving source for transportation systems. However, the stationary discontinuous armature PM-LSM contains the outlet edges which always exist as a result of the discontinuous arrangement of the armature. For this reason, the outlet edge cogging force generated between the armature's core and the mover's permanent magnet. This paper contemplated the outlet cogging force according to 2-D numerical analysis by FEM. We installed the auxiliary pole for in order to minimize the outlet cogging force.

키워드

permanent magnet linear synchronous motor, auxiliary pole, outlet edge cogging force, stationary discontinuous armature. 2D numerical analysis.

## 1. 서론

최근 고속, 저소음, 보수 점검 용이성등, FA (Factory Automation)분야의 요구사항에 맞추어 반송장치의 구동원으로 영구자석형 리니어 동기 모터가 적용되고 있다[1]. 그러나 추진자계를 발생시키는 전기자를 반송경로 전장에 설치해야 하기 때문에 반송경로

가 길어지면 길어질수록 초기 코스트가 상승하는 문제점이 발생한다. 이러한 초기 코스트 상승의 문제점을 해결하기 위해 분산배치 방식의 전기자가 제시되고 있다. 그림 1에 전기자 분산배치 방식의 영구자석 리니어 동기모터를 나타낸다. 분산배치 방식의 전기자는 구조상 필연적으로 단부가 존재하고, 단부에 의해 코깅력이 발생하게 된다. 이러한 코깅력은 기기의 소

\* 조선대학교 전기공학과(bboy2778@naver.com)  
접수일자 : 2010. 10. 01

\*\* 교신저자 : 조선대학교 전기공학과(kimyj21@chosun.ac.kr)  
심사(수정)일자 : 2010. 11. 01

게재확정일자 : 2010. 12. 10

음과 진동을 발생시키는 문제점을 가지고 있다.[2,3] 영구자석형 리니어동기모터의 코강력을 저감하기 위한 방법으로는 영구자석의 폭 조정, 영구자석의 스루, 슬롯폭 조정 또는 치폭조정, 반폐슬롯 및 보조구 설치 등 많은 연구가 진행되고 있다.[4,5,6] 단부 코강력은 영구자석 끝단과 전기자의 치에서 발생하는 힘이다. 우리는 보조극을 이용하여 영구자석 끝단을 변형시켜 단부 코강력을 저감 시키고자 한다. 본 논문은 단부에서 발생하는 코강력을 저감시키기 위하여 영구자석 리니어 동기모터의 가동자에 보조극을 설치하고 유한요소법을 이용한 2차원 수치해석을 통해 단부 코강력 값을 취득한다. 기본 모델의 단부 코강력과 보조극의 길이, 높이를 조절한 제안 모델의 단부 코강력을 비교하고 단부 코강력이 최소가 되는 보조극의 형태를 해석을 통해 산출한다.

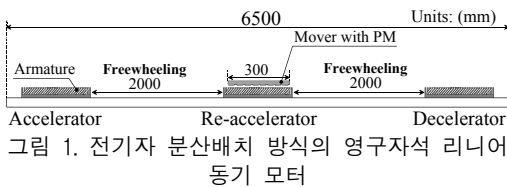


그림 1. 전기자 분산배치 방식의 영구자석 리니어 동기 모터  
Fig. 1 Permanent magnet linear synchronous motor with stationary discontinuous armature

표 1. 영구자석 리니어 동기 모터의 사양  
Table 1. Specifications of permanent magnet linear synchronous motor

	Parameter	Unit
Mover (PM)	pole	4[pole]
	Permanent magnet height	3[mm]
	Permanent magnet length	25[mm]
	Pole pitch	30[mm]
Armature	Coil turn number	100[turns]
	Slot pitch	10[mm]
	Teeth width	5[mm]
Air gap length		5[mm]

## II. 전기자 분산배치 영구자석 리니어 동기 모터

### 2.1. 전기자 분산배치 영구자석 리니어 동기모터의 사양

표 1에 전기자 분산배치 영구자석 리니어 동기 모터의 사양을 나타낸다. 전기자 분산배치 영구자석 리니어 동기 모터의 가동자는 총길이 135[mm]로, Nd-Fe-B 타입 영구자석 4극을 자로강판에 배치하였다. 영구자석 길이는 25[mm], 극 간격은 30[mm]이다. 또한, 전기자의 길이는 175[mm]이고 권선법은 분포권으로서 한상당 코일수는 100[turns]이다. 슬롯 간격은 10[mm]이며 17슬롯으로 구성한다.

### 2.2. 단부에서 발생하는 힘

그림 1과 같이 전기자를 분산배치 하는 경우 구조상 반드시 단부가 존재한다. 이러한 단부에 의해 가동자가 전기자에 진입 및 반출 할 때 코강력이 발생한다. 전기자 불연속 배치 영구자석 리니어 동기 모터는 가동자가 전기자 설치부와 비설치부의 경계를 통과할 때에, 전기자 측 철심과 가동자 영구자석 사이에서 발생하는 흡인력이 크게 변동한다. 그림 2에 단부에서 발생하는 힘이 가동자에 미치는 영향에 대하여 나타낸다. 가동자가 전기자에 진입하는 진입부에서 발생하는 흡인력은 가동자의 진행 방향과 같은 방향의 힘으로서, 즉 가동자를 전기자 측으로 끌어들이는 힘으로 작용하여 가동자를 가속시킨다. 또한, 가동자가 전기자를 벗어나는 반출부에서 발생하는 흡인력은 가동자의 진행 방향과 역방향의 힘으로서, 즉 가동자를 전기자 측에 되돌리는 힘으로 작용하여 가동자를 감속시킨다. 그러므로 이러한 단부 코강력을 감소시켜야 한다.

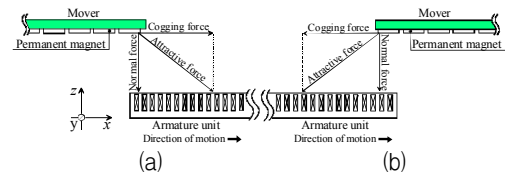


그림 2. 전기자의 단부가 가동자에 미치는 영향  
Fig. 2 Forces exerted in the mover at the outlet edge: (a) entry interval (entrance end) and (b) ejection interval (exit end).

### III. 유한요소법을 이용한 2차원 수치해석

### 3.1. 기본모델

각 단부에서 발생하는 코깅력은 전자계 해석 소프트웨어 JMAG-Studio를 이용한 해석 결과를 가지고 검토를 행하였다. 그림 3에 기본 모델을 나타낸다. 전기자와 가동자의 공극을 5[mm]로 하고, 전기자와 가동자가 대향하고 있지 않은 상태에서 가동자를 전기자측에 진입시켜, 가동자가 전기자를 완전하게 벗어나는 구간까지 해석을 수행하였다. 이 때의 요소수는 61200, 절점수는 31314이며, 1Step당 0.5[mm] 이동하도록 설정 하였다. 그림 4에 기본 모델의 단부 코깅력 파형을 나타낸다. 가동자가 전기자에 진입하는 부분에서 발생하는 최대 단부 코깅력은 12.59[N]이고, 가동자와 전기자가 완전하게 대향하고 있는 부분에서 발생하는 최대 단부 코깅력은 0.55[N], 가동자가 전기자를 벗어나는 부분에서 발생하는 최대 단부 코깅력은 12.73[N]이 발생 하였다. 또한, 가동자와 전기자가 완전하게 대향하고 있는 부분에서 발생한 단부 코깅력은 일정한 주기를 가지고 있으며 그 크기가 작다. 하지만, 가동자가 전기자를 진입하는 진입부, 가동자가 전기자를 벗어나는 반출부 부분에서 발생하는 단부 코깅력은 일정한 주기를 가지고 있지 않으며 그 크기가 큼을 확인 할 수 있다.

### 3.2. 제안모델

그림 5에 제안 모델을 나타낸다. 단부 코깅력을 저감하기 위하여 가동자에 설치한 보조극을 조절하여 단부에서 발생하는 코깅력의 검토를 유한요소법을 이용한 2D 수치해석을 통해 수행하였다. 해석범위는 가동자가 전기자를 완전하게 대향하고 있는 구간에서, 가동자가 전기자를 벗어나는 구간까지이다. 기본 모델의 코깅력 값을 기준으로 정하고 보조극의 변수 길이를 조절하여 취득한 단부 코깅력 값을 비교하였다.

#### 3.2.1 가동자 양 끝단에 보조극을 설치한 모델

그림 6에 가동자의 양 끝단에 보조극을 설치한 경우 보조극의 형태를 나타낸다. 각 모델에 설치한 보조극의 X, Y길이는 (a)는 10[mm], 3[mm], (b)는 8[mm], 3[mm] (c)는 6[mm], 3[mm] (d)는 10[mm], 2[mm], (e)는 10[mm] 4[mm]이다. 그림 7에 가동자의

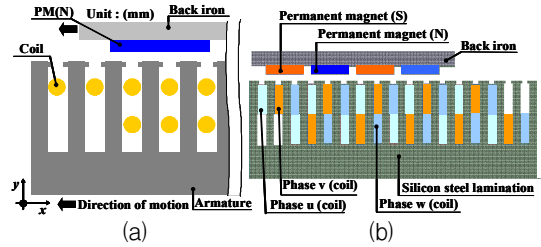


그림 3. 기본 모델

Fig. 3 Basic model: (a) side view of the armature, (b) 2-D numerical analysis basic model

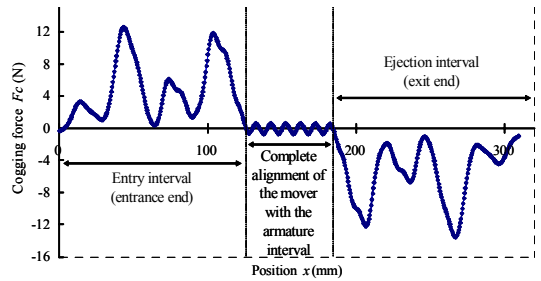


그림 4. 기본 모델의 단부 코깅력 파형

Fig. 4 Outlet edge cogging force waveform of basic model

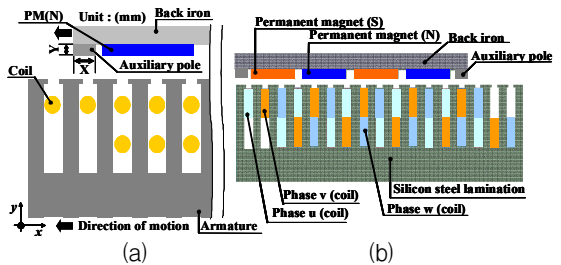


그림 5. 제안모델

Fig. 5 Proposed model: (a) side view of the armature and auxiliary pole, (b) 2-D numerical analysis proposed model

양 끝단에 보조극을 설치한 경우의 단부 코깅력 파형을 나타낸다. 보조극의 형태를 제안한 모델중 단부 코깅력의 크기가 가장 저감된 모델은 제안 모델#1로 최대 단부 코깅력은 10.2[N]이 발생하였다. 또한 제안 모델#2와 제안 모델#3에서 발생하는 단부 코깅력의 크기는 거의 같은 것을 확인 할 수 있으며, 기본 모델의 단부 코깅력 파형과 비교해 보아도 그 값이 크게 변하지 않았다. 다음으로, 영구자석 높이 보다 보조극

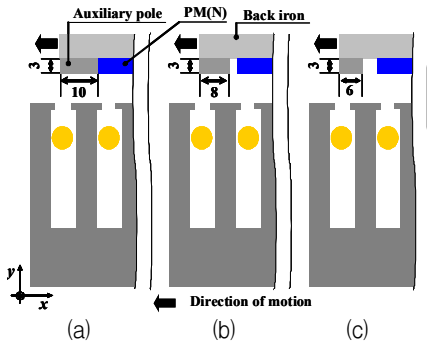


그림 6. 가동자 양 끝단에 설치한 보조극의 형태: (a) 제안 모델#1, (b) 제안 모델#2, (c) 제안 모델#3, (d) 제안 모델#4, (e) 제안 모델#5

Fig. 6 Shape in case of installed of proposed auxiliary pole on the standard of mover's outlet edge: (a) proposed model#1, (b) proposed model#2, (c) proposed model#3, (d) proposed model#4, (e) proposed model#5

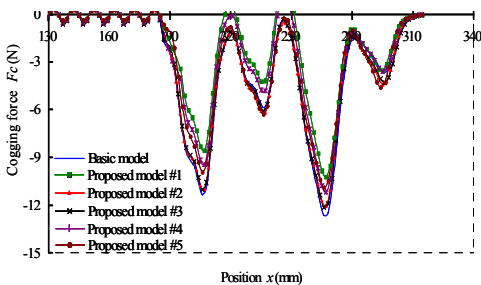


그림 7. 가동자 양 끝단에 보조극을 설치할 경우 단부 코깅력의 파형

Fig. 7 Waveforms of cogging force in case of installed of auxiliary pole on the standard of mover's outlet edge

의 높이를 증감시킨 제안 모델#4와 제안 모델#5에서 발생하는 단부 코깅력의 크기는 기본 모델의 단부 코깅력 보다 감소했지만, 보조극의 높이가 영구자석 높이와 동일한 제안 모델#1 보다 증가됨이 확인 되었다. 이상의 결과로 단부 코깅력을 저감시키기 위하여 가동자 양 끝단에 보조극을 설치한 경우 제안 모델#1이 적합함이 판명되었다.

### 3.2.2 가동자 양 끝단과 영구자석 사이에 보조극을 설치한 모델

그림 8에 가동자의 끝단과 영구자석과 영구자석 사이에 설치한 보조극의 형태를 나타낸다. 가동자의 끝단의 보조극은 단부 코깅력이 가장 저감된 10[mm], 3[mm]로 고정하고 해석을 수행하였다. (a)는 영구자석 사이에 설치한 보조극의 길이를 4[mm], 높이를 3[mm]로 조절하고 가동자의 진행방향을 기준으로 각 영구자석의 끝단에 설치한 경우이며, (b)는 가동자의 진행방향을 기준으로 각 영구자석의 시작단에 설치한 경우이다. 또한, (c)는 보조극의 길이를 4[mm], 높이를 영구자석 높이와 동일한 4[mm]로 조절하고 가동자의 진행방향을 기준으로 각 영구자석의 끝단에 설치한 경우이며, (d)는 가동자의 진행방향을 기준으로 각 영구자석의 시작단에 설치한 경우이다. 그림 9에 가동자의 양 끝단과 영구자석과 영구자석 사이에 보조극을 설치한 경우의 단부 코깅력 파형을 나타낸다. 보조극의 형태를 제안한 모델중 단부 코깅력의 크기가 가장 저감된 모델은 제안 모델#7로 최대 단부 코깅력은 9.1[N] 발생하였다. 제안 모델#6, 제안 모델#8, 제안 모델#9에서 발생하는 단부 코깅력의 크기는 큰 차이가 없었지만, 기본 모델과 비교시 단부 코깅력의 크기가 감소됨이 확인 되었다. 또한, 가동자 양 끝단에 보조극을 설치한 제안 모델과 비교해 보아도 단부 코깅력의 크기가 저감된 것을 알 수 있다. 가동자의 양 끝단과 영구자석과 영구자석 사이에 보조극을 설치한 제안 모델은 전기자와 가동자가 완전하게 대향하고 있는 부분에서 발생하는 코깅력의 크기도 감소한다. 전기자와 가동자가 완전하게 대향하고 있는 부분에서 발생하는 코깅력의 크기가 가장 저감된 모델은 단부 코깅력이 가장 저감된 모델과 동일한 제안 모델#7로 0.08[N]이 발생하였다. 다음으로 영구자석 사이에 설치한 보조극의 높이에 대한 단부 코깅력 크

기의 변화를 고찰한 결과, 영구자석의 높이 보다 영구

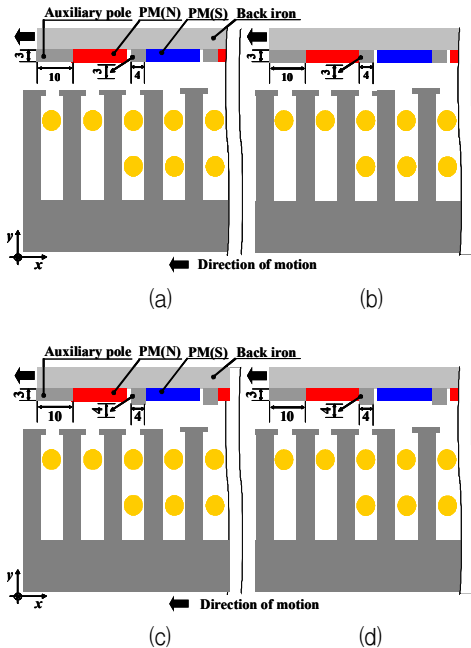


그림 8. 영구자석 사이에 설치한 보조극의 형태: (a) 제안 모델#6, (b) 제안 모델#7, (c) 제안 모델#8, (d) 제안 모델#9

Fig. 8 Shape in case of installed between N pole permanent magnet and S pole permanent magnet of proposed auxiliary pole: (a) proposed model#6, (b) proposed model#7, (c) proposed model#8, (d) proposed model#9

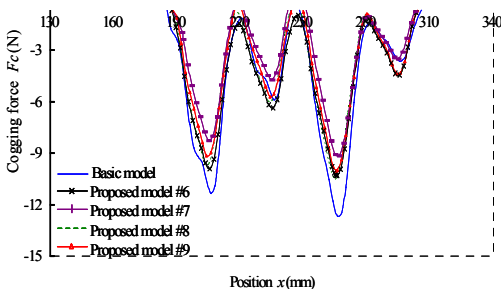


그림 9. 영구자석 사이에 보조극을 설치한 경우 단부 코깅력의 파형  
Fig. 9 Waveforms of cogging force in case of installed between N pole permanent magnet and S pole permanent magnet of auxiliary pole

자석 사이에 설치한 보조극의 높이를 변화시킬 경우 단부 코깅력의 크기는 보조극의 높이가 영구자석 높이와 동일한 모델보다 증가하였다. 또한, 가동자 양 끝단에 설치한 보조극 높이를 조절한 결과와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이상의 결과로 보조극을 설치하여 단부 코깅력을 저감할 경우 가동자 양 끝단에만 보조극을 설치한 모델보다 가동자 양 끝단과 영구자석 사이에 보조극을 설치한 모델의 단부 코깅력 저감에 효과적임을 확인할 수 있다.

### 3.3. 제안단부코깅력에 의하여 발생하는 에너지

우리는 단부에서 발생하는 코깅력에 의한 에너지를 평가하기 위하여, 에너지 변환 방법을 이용하여 분석하였다. 기본모델과 본 논문에서 제시한 제안모델 중 단부 코깅력이 가장 저감된 제안모델#7의 결과를 바탕으로 반출부에서 발생하는 단부 코깅력이 가지고 있는 에너지를 식(1)을 이용하여 산출하였다.

$$W_c = \int_{x_1}^{x_2} F_c(x) dx \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $F_c(x)[N]$ : 단부 코깅력,  $x_1[mm]$ : 가동자가 전기자측을 반출하기 시작하는 위치,  $x_2[mm]$ : 가동자가 전기자측을 완전하게 벗어나는 위치.

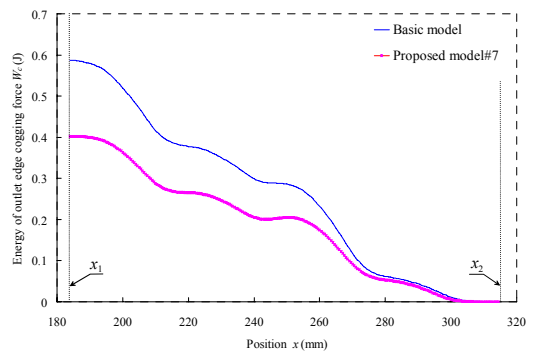


그림 10. 반출부에서 발생하는 단부 코깅력의 에너지  
Fig. 10 Energy of the outlet edge cogging force at the ejection interval.

그림 10에 반출부에서 발생하는 단부 코깅력의 에너지를 나타낸다. 그림 10의 결과로부터, 반출부에서 발생하는 단부 코깅력의 에너지는 기본 모델의 경우

최대 0.59[J] 발생하였지만, 보조극을 설치한 제안모델 #7의 경우 최대 0.40[J] 발생함을 알 수 있다. 가동자에 보조극을 설치하는 것으로 단부 코깅력에 의하여 발생하는 전체 에너지가 0.19[J] 감소되어 기본모델과 비교 시 31.4[%]저감됨이 판명되었다.

#### IV. 결 론

본 논문은 단부 코깅력을 감소시키기 위해 보조극을 제안하였으며 보조극의 형태를 조정함에 따라 발생하는 단부 코깅력 값을 취득하기 위하여 유한요소법을 이용한 2D 수치해석을 통해 단부 코깅력의 해석을 행하였다. 그 결과 기본 모델의 경우 최대 단부 코깅력은 12.73[N] 발생하였으나, 본 논문에서 제시한 제안 모델을 이용한 경우 단부 코깅력은 최대 9.1[N] 발생하여, 기존 모델보다 약 28.51[%]정도 단부 코깅력이 감소됨을 확인 하였다. 또한, 제안된 모델은 전 기자와 가동자가 완전하게 대향하고 있는 상태에서 발생하는 코깅력의 크기도 감소하였다. 기본 모델의 완전대향시 최대 코깅력은 0.55[N] 발생하였으나, 제안 모델의 경우 완전대향시 최대 코깅력은 0.08[N] 발생하여, 기본 모델보다 약 85.45[%]정도 완전 대향시 발생하는 코깅력이 감소됨을 확인 하였다. 또한, 단부 코깅력의 평가 방법으로서 에너지 변환 수법을 이용하여 단부 코깅력이 가지고 있는 에너지의 산출을 행한 결과, 기본 모델에 비해 제안 모델#7의 경우 단부 코깅력이 가지고 있는 에너지가 31.4[%] 저감하여, 본 논문에서 제안 한 수법의 유효성을 확인하였다. 단부 코깅력의 크기를 저감하기 위해 보조극을 설치하는 경우 가동자 양 끝단에 설치한 보조극의 길이는 10[mm], 높이는 3[mm]로 하고, 영구자석과 영구자석 사이에 설치한 보조극의 길이는 4[mm], 높이는 3[mm]로 하여 가동자 진행방향을 기준으로 각 영구자석의 시작단에 설치하는 것이 적합함이 판명 되었다.

#### 감사의 글

본 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0005006)

#### 참고 문헌

- [1] M. Karita, "Present Status of Linear Drives for Industry Applications in Japan", Proc. IEEJ conf. Linear Drives for industry applications, pp 462-467, 2001.
- [2] K. G. Lim, "Detent force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magnetics, pp 1157-1160, 2002.
- [3] L. S. Jung, "Analysis of fforces in a short primary type and a short secondary type permanent magnet linear synchronous motor", IEEE Trans, Energy Convers, pp 1365-1270, 1999.
- [4] T. Yoshimura, "Analysis of the reduction of detent force in a permanent magnet linear synchronous motor," IEEE Trans. on Magnetics, pp 3042-3044, 1995.
- [5] I. S. Jung, "Performance analysis of skewed PM linear synchronous motor according to various design parameters," IEEE Trans. on Magn., pp 3653-3657, 2001.
- [6] T. Ishikawa, "A method of reducing ripple torque in permanent magnet motors without skewing", IEEE IAS Annual Mteeting, pp 42-49, 1997.

#### 저자 소개

#### 이규명(Kyu-myung Lee)



2010년 2월 조선대학교 전기공학과 졸업 (공학사)  
2010년 3월 조선대학교 대학원 전기공학과 입학

※ 관심분야 : 리니어모터 설계 및 수치해석



**김용재(Yong-jae Kim)**

1996년 2월 조선대학교 전기공학과 졸업(공학사)

2003년 3월 일본 무사시공업대학 대학원공학연구과 전기공학졸업(공학석사)

2006년 3월 일본 무사시공업대학 대학원공학연구과 전기공학졸업 졸업(공학박사)

조선대학교 전기공학과 조교수

※ 관심분야 : 각종전기기기설계 및 수치해석