

극 저속시 전기제동을 위한 축소 모형 추진시스템 개발

김영춘¹, 조문택^{2*}, 주해종³

¹공주대학교 기계자동차학부, ²대원대학교 전기전자계열, ³동국대학교 산학협력선도대학

The Development of Miniature Propelling System for Electric Brake at Extreme Low Speed

Young-Choon Kim¹, Moon-Taek Cho^{2*} and Hae-Jong Joo³

¹Division of Mechanical Automotive Engineering, Kongju National University

²Division of Electrical & Electronic Engineering, Daewon University College

³LINC, DongKuk University

요 약 본 논문에서는 정지시까지 전기제동을 하는 축소모형 추진시스템을 설계하고 제작하여 실험하였으며, 정지순간 제동토크의 제어방법을 제안하였다.

또한, 레졸바를 사용한 회전자의 위치와 속도를 추정하는 관측기에 의하여 극저속에서 속도를 검출하는 방법을 개발하였으며, 또한 정지순간 제동 토크의 감소와 동시에 공기 브레이크의 동작을 개시하여 블렌딩 제동을 사용하는 방법과 비교하여, 정지시까지 전기제동만을 사용하는 향상된 제동방법을 제안하였다.

Abstract In this paper, how to stop a moment to experiment with stop function, electric brake type scale model propulsion system is designed and fabricated by control of the braking torque is proposed. Scale model system for motor-driven, inertial load, the structure of the load for the motor and the inverter system was constructed with two sets of converters, the actual range of the rotational speed of the vehicle DDM experiments to be able to.

In Additional, observer to estimate the rotor position and speed of using resolver, and the pole at low speed, speed detection methods have been developed. As a result of this study, first, stop the moment Second, the reduction of braking torque, and how to initiate the operation of the air brake blending by using the braking, improve braking methods that only use the electric brake to stop brought.

Key Words : Electric brake, Propulsion system, Resolver

1. 서론

차세대 전동차에는 차량의 성능향상을 위하여 여러 분야의 기술개발이 요구되고 있다. 추진 제어장치에도 에너지의 효율성, 첨단성 등이 요구되며, 승차감을 증대시키는 방안이 강구되고 있다.[1,2]

축소형의 견인시스템은 각 전동기를 개별로 제어하는 ICIM방식으로 구축하며, 영구자석형의 동기전동기를 사용하여 관성부하에 대한 실험방식으로 구성하였다. 또한

전동차의 승차감 향상 및 에너지의 효율적 이용 등을 위해 벡터제어를 적용하였고, 전기제동으로 정지하기 위한 극저속의 속도검출과 전동기를 제어하는 방법을 연구하였다.

본 논문은 저속에서의 전동기 제어를 위한 완전 전기제동 시스템을 제안하였다. 점착력 향상은 견인전동기를 일괄 제어하는 방법보다 각 전동기를 개별로 제어하는 ICIM방식이 유효하며, 실험실의 조건상 영구자석형의 동기전동기를 사용한 개별 제어방법의 축소모형 견인시스

*Corresponding Author : Moon-Taek Cho (Daewon University College)

Tel: +82-43-649-3213 email: mtcho@mail.daewon.ac.kr

Received November 27, 2012 Revised (1st December 18, 2012, 2nd December 31, 2012) Accepted February 6, 2013

템을 구축하여 실험을 하였다. 축소모형 견인시스템은 관성부하를 갖는 장치로 설계 제작을 하였고, 전동차의 정차까지 전기제동을 하기 위해 극저속에서 전동기를 제어하여 실험적 결과를 도출하였다.

전력변환기는 컨버터-인버터 시스템을 사용하였으며, 회생전력을 흡수하고 정전압을 유지하도록 컨버터(교류계통 연계형)를 사용하였으며, 전동기 구동 인버터에 의한 개별구동 제어방법으로 완전 전기제동을 하였다. 전력변환기를 구동하는 제어기는 전동기 제어전용으로 개발되어진 DSP 마이크로컨트롤러를 사용하였고, 컨버터와 인버터를 1개의 제어기로 사용한 일체형 전력변환기를 개발하여, 축소모형에 대한 반복적인 실험을 통해 전기제동의 적용으로 얻을 수 있는 효과를 제시하였다.

2. 제동을 위한 PMSM의 전류제어

기존의 제동은 6~7[km/H] 이하의 영역에서 전기 브레이크에서 공기 브레이크로 전환하여 정차하는 방식을 일반적으로 사용하고 있다. 이런 방식으로 인해 브레이크 전환의 전후에 요동과 소음의 발생요인이 되고 있다.

전기제동에 의하여 전동기를 정지시킬 때, 극저속에서 속도측정과 정지시점의 토크 제어는 중요한 기능이다. 특히 속도측정의 정밀성은 전동기를 부드럽게 정지시키는데 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 레졸바를 사용하여 회전자자의 위치와 속도를 측정하였으며, 정지 토크의 발생보다 극저속에서 속도에 비례하는 제동 토크를 발생시킴으로써 정지 후 주행방지 등의 기능을 갖도록 하였다.

PMSM의 전압방정식은 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L_s i_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega L_s i_{sd} + \omega \Psi_M \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서, 전동기에 흐르는 전류는 저항과 리액턴스의 양단전압을 제어하면 목적하는 크기의 전류가 되도록 할 수 있으므로, 정상상태에서 식 (1)로부터 미분항이 없는 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_s \\ \omega L_s & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_M \end{bmatrix} \quad (2)$$

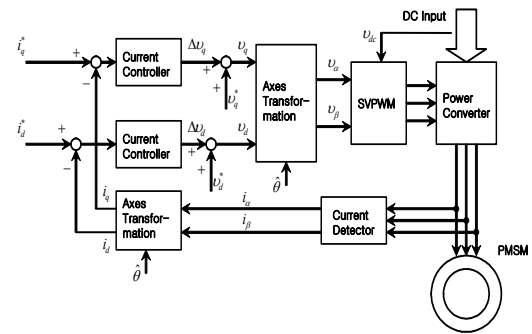
회로에 전류제어기로 PI 제어기를 사용하면, 식 (3)이

된다.

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_s \\ \omega L_s & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd}^* \\ i_{sq}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_M \end{bmatrix} + \left(\frac{k_i}{s} + k_p \right) \begin{bmatrix} i_{sd}^* - i_{sd} \\ i_{sq}^* - i_{sq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

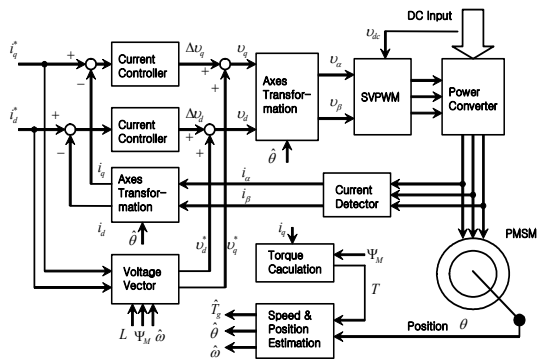
식 (3)에 의하여 전류제어기를 갖는 PMSM의 제어회로는 Fig. 1과 같이 구성할 수 있다.

Fig. 1은 전동기의 회전자 위치에 의한 좌표변환으로 전류의 검출과 전동기의 전압제어가 이루어지며, Fig. 1의 제어를 완성하려면 회전자자의 위치를 검출하는 기능이 추가되어야 한다. Fig. 2는 레졸바에 의한 위치와 속도 추정기를 사용한 제어회로이다.



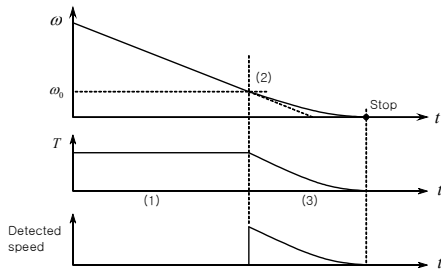
[Fig. 1] Currnt Control of PMSM

전기제동에 의하여 전동기를 정지시킬 때 극 저속에서 속도측정과 정지시점의 토크 제어는 속도에 비례하는 제동 토크를 발생하도록 제어함으로써 정지시까지 전기제동을 할 수 있다.



[Fig. 2] Currnt Control of PMSM with Observer

전동기를 정지시키기 위해서는 ① 정지 후의 회전을 방지 ② 제동 토크가 0이 되는 점에서 공기 브레이크 작동 ③ 구배 구간에서 제동 토크를 발생하는 조건을 두며 이 경우 ②의 공기 브레이크 기능과 합해진 제동력으로 정지시키는 것으로 하였다.



[Fig. 3] Braking Sequence

위 조건에 대하여 정지하는 순간, 전동기는 속도에 비례하는 식 (4)의 제동 토크를 발생하므로 식 (4)와 Fig. 3의 (1)구간의 제동 토크와 같은 점인 ω_0 가 존재한다. 따라서 구간 (3)에서 감속하는 속도 ω 는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$T = k \omega \quad (4)$$

$$\omega = \omega_0 e^{-\frac{k}{J}t} \quad (5)$$

Fig. 3의 (2)점에서 토크의 제어모드를 전환하여 전동기를 제어하여야 한다. 토크 제어의 전환점은 감속을 위한 회생제동의 크기와 식 (4)에 의한 토크가 같은 점이 되므로, 식 (4)의 k 는 토크의 전환점을 정하는 상수가 된다.

실제의 경우 작용하는 공기 브레이크의 동작은 응답에 지연이 있기 때문에 전동차에 응용할 때 토크를 감소하는 시점에서 공기제동을 개시시키고 제동 토크의 감소기울기의 조절에 의하여 만족하는 승차감을 얻을 수 있는 상태를 실험적으로 찾아야 한다.

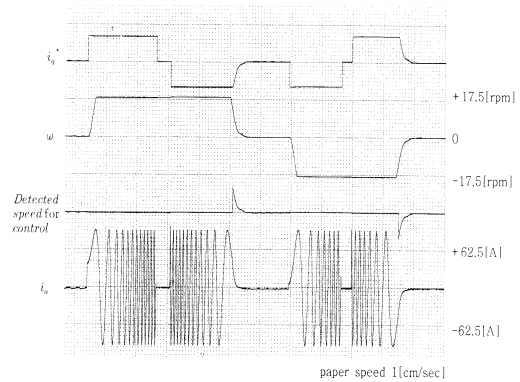
전동기는 식 (4)와 같이 속도에 비례하는 토크를 발생하므로 전동기가 정지하면 더 이상의 움직임이 없으며, 공기제동으로 정지력을 갖도록 하고 전력변환기의 회생을 오프하면 제동이 완료된다.

3. PMSM의 제동실험

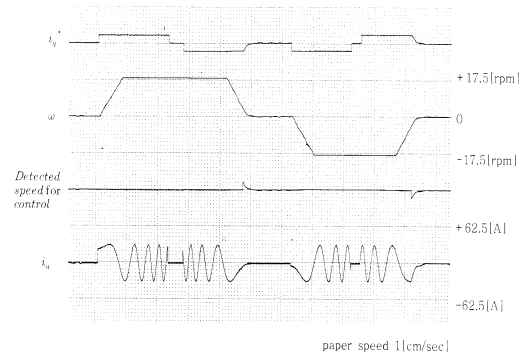
Fig. 4는 전동기를 정역운전하면서 회생제동을 할 때 토크의 감소를 개시하는 속도를 검지하여, 속도에 비례

하는 토크로 전동기를 정지시키는 파형이다.

Fig. 4에서 i_q^* 는 토크에 대한 전류의 설정값이고, ω 는 속도검출기에서 추정한 속도를 저속범위로 확대한 파형으로 측정을 위하여 정역방향에 대하여 17.5[rpm]으로 기록으로 제한하였다. Fig. 4의 세 번째 파형은 속도에 비례하는 토크로 전동기를 제어하기 위하여 검지된 속도로 ω 와 같은 배율로 측정하였다. i_a 는 전동기의 선전류 파형이다.



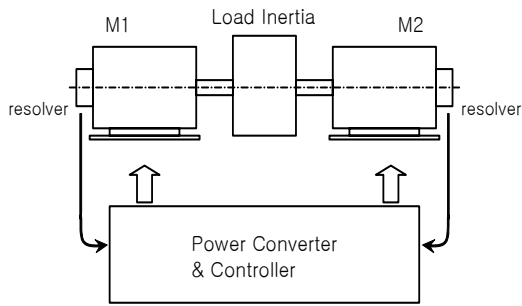
[Fig. 4] Braking of Motor



[Fig. 5] Waveform when Braking Power being Low

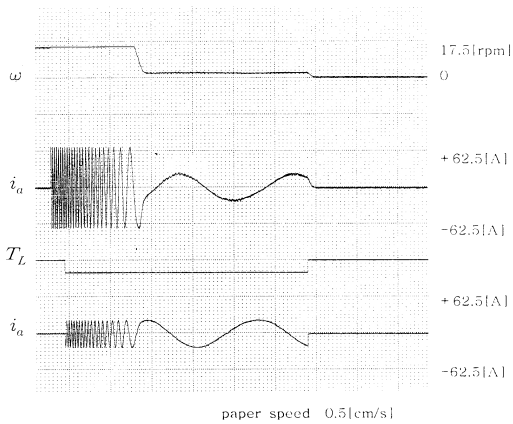
Fig. 5는 제동력을 낮추었을 때, 측정된 것으로 제동 토크는 3[rpm]부근에서 전환되고 있으며, 극저속에서의 속도 검지와 이에 의한 토크의 제어가 원활함을 볼 수 있었다. 실제 차량에 적용에 있어서는 토크의 제어를 전환하는 속도는 승차감을 고려하여 실험적으로 도출하여야 하며, 식 (4)에서 k 값을 변화시키면 된다.

선로에 구배가 있는 경우 견인전동기가 부담해야 하는 토크는 속도에 관계없이 구배에 비례하는 부하 토크를 갖는다. 이에 대한 실험을 하기 위하여 Fig. 6의 장치를 사용하였다.



[Fig. 6] Load Torque Test Equipment of Motor

Fig. 6에서 M1은 구동용 전동기, M2는 부하 토크를 발생하며, 전력변환기도 구동용과 부하 토크를 발생하는 장치를 별도로 두었다. Fig. 6과 같이 M1과 M2의 중간에는 전동기의 가속도가 실제로 근사하도록 계산되어 제작한 회전관성 부하를 설치하였으며, 속도 검출기는 레졸바를 사용하여 극저속의 속도검출이 가능하도록 제작하였다.



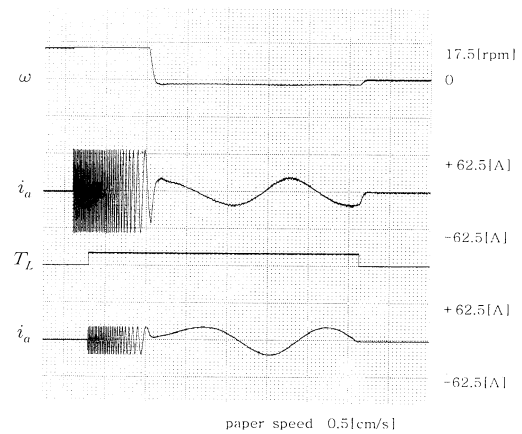
[Fig. 7] Waveform at the Time of Impressed Load Torque of Driving Direction

Fig. 7에서 ω 는 17.5[rpm]으로 표시를 제한한 속도파형이고, T_L 은 스텝 가변한 부하 토크의 설정값, i_a 는 부하 토크를 발생하는 전동기의 전류 파형이다.

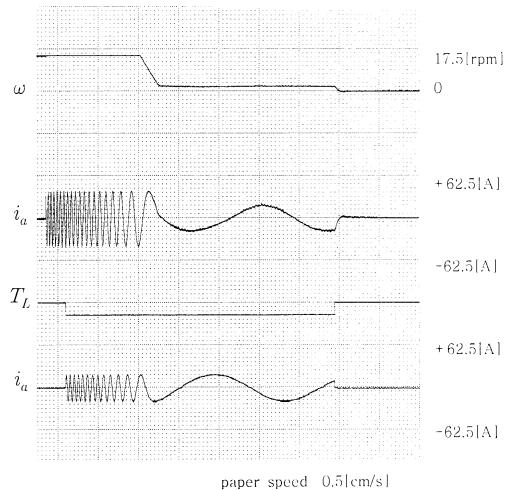
Fig. 8은 제동 중에 있는 전동기에 회전방향으로 부하 토크를 스텝 인가한 경우이다. 회전속도가 감소하는 상태에서 멈추지 않고 대략 2[rpm]정도의 속도로 회전하고 있다. 구동 전동기와 부하전동기에 흐르는 전류를 비교하면 같은 크기의 전류 파형이 보이며, 이것으로 두 대의 전동기가 같은 토크를 발생하여 평형을유지하는 상태로 운전됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 역방향의 부하 토크를 스텝 인가한 경우로, 부하 토크에 의하여 반대 방향으로 회전을 하고 있는 것을 보여준다.

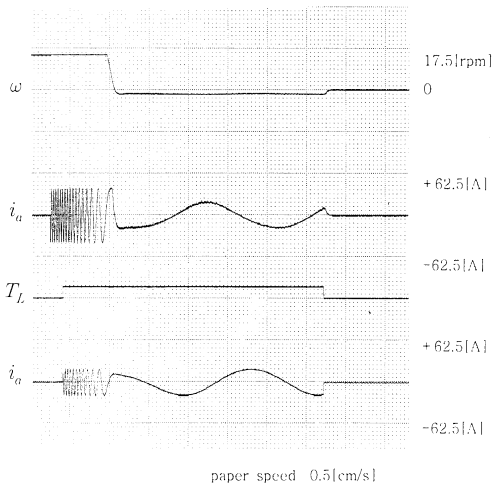
Fig. 9와 Fig. 10은 제동 토크가 적은 경우구동방향, 역방향의 부하 토크가 인가된 경우의 파형으로 제동 토크를 작게 한 경우 ω 의 감속 부분을 보면 감속도가 작아졌음을 알 수 있다. 또한 속도에 비례하는 토크를 발생하는 운전 상태와 부하 토크를 없앴 때 정지하는 상태는 Fig. 7과 Fig. 8의 경우와 같음을 확인 할 수 있다.



[Fig. 8] Waveform at the time of Impressed Load Torque in The Reverse Direction



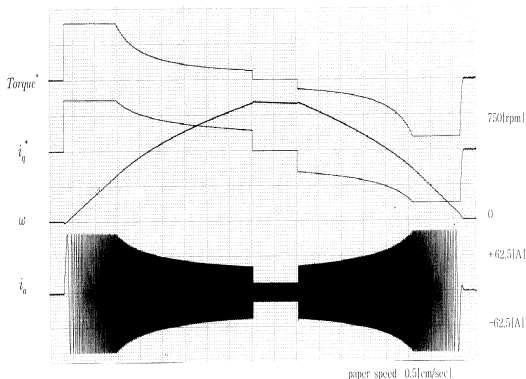
[Fig. 9] Waveform at The Time of Impressed Load Torque in The Driving Direction when the Braking Torque is Small



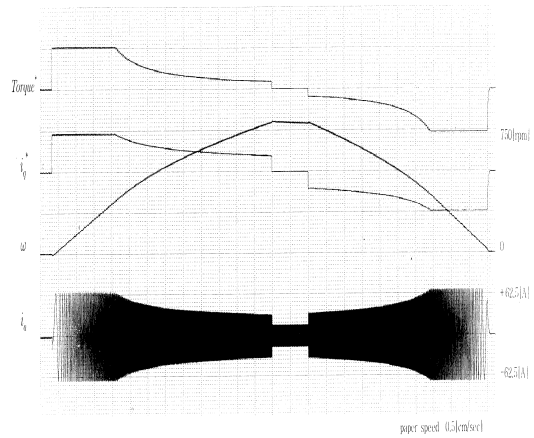
[Fig. 10] Waveform at The Time of Impressed Load Torque in The Reverse Direction when the Braking Torque is Small

4. 전동기 구동 실험

전동기를 구동하고 회생제동으로 정지하는 운전을 하였다. Fig. 11에서 특성운전을 시작하는 속도는 360[rpm]으로 하여 800[rpm]부근에서 토오르크를 0으로 하였다. 회생제동을 시작하고 정지의 순간에는 속도에 비례하는 토오르크로 제동하였다. Fig. 11과 Fig. 12에서 토오르크의 설정은 스텝 변화를 주었으며, 정지의 순간은 부드럽게 운전하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 토오르크를 작게 했을 때 측정한 파형이다.



[Fig. 11] Driving Experiment on the Inertial Load



[Fig. 12] Driving Experiment on the Inertial Load (Variable Torque)

5. 결론

본 논문에서는 정지시까지 전기제동을 하는 축소모형 추진시스템을 설계하고 제작하여 실험하였으며, 정지순간 제동토크의 제어방법을 제안하였다.

축소모형 시스템은 「구동용전동기-관성부하- 부하용 전동기」의 구조와 2세트의 「컨버터-인버터 시스템」으로 구축하였고, 실제 DDM차량의 회전속도 범위에 대하여 실험할 수 있도록 하였다.

또한, 레졸바를 사용한 회전자의 위치와 속도를 추정하는 관측기에 의하여 극저속에서 속도를 검출하는 방법을 개발하였으며, 또한 정지순간 제동 토크의 감소와 동시에 공기 브레이크의 동작을 개시하여 블렌딩 제동을 사용하는 방법과 비교하여, 정지시까지 전기제동만을 사용하는 향상된 제동방법을 제안하였다.

References

- [1] S. Sone, T. Koseki, T. Suzuki, H. Iida, K. Hisatomi, A. Kaga, "Studies and Issues on Realization of Pure Electric Brake of Electric Train", The 38th Symposium on Cybernetics applied to Railway Systems, No. 523, December 2001.
- [2] T. Sano, "Speed-Sensorless Control System for Railway Traction" Asia Electric Magazine Vol.109, pp.14-23, 2003-11
<<http://www.toyodenki.co.jp/html/giho/giho109/s10931.pdf>>

- [3] Reza Hoseinnezhad, Peter Harding, "A Novel Hybrid Angle Tracking Observer for Resolver to Digital Conversion.", 44th IEEE Conference on Decision & Control, and the European Control Conference, pp7020-7025, December 2005.
- [4] Texas Instruments, "TMS320F240 DSP Solution for Obtaining Resolver Angular Position and Speed.", Application Report SPRA605, February 2000.
- [5] L. Kovudhikulrungsri, T. Koseki, "Control of an Induction Motor for Pure Electric Brakes", I.E.E. Japan 2001 Japan Industry Applications Society Conference (JISAC2001), Vol. 3, pp. 1297-1302, August 2001.

주 해 종(Hae-Jong Joo)

[정회원]



- 2008년 6월 : (美)Cumberland University (교육학박사)
- 2010년 2월 : 명지대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 2005년 2월 : 대원대학 멀티미디어과 조교수
- 2010년 1월 ~ 현재 : 동국대학교 산학협력중심대학 교수

<관심분야>

데이터엔지니어링, IT융합기술, 유비쿼터스비즈니스

김 영 춘(Young-Choon Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 대전공업대학교 전기공학과 (공학사)
- 1989년 8월 : 명지대학교 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 명지대학교 전기공학과(공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차 부교수

<관심분야>

전기자동차전력변환, 전장제어, 하이브리드자동차

조 문 택(Moong-Taek Cho)

[정회원]



- 1988년 2월 : 명지대학교 전기공학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 명지대학교 전기공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 명지대학교 전기공학과(공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 대원대학교 전기전자계열 부교수

<관심분야>

신재생에너지, 시뮬레이션