

# 비희토류 전동기의 효율 향상을 위한 Fan-shape type PMSM 설계 및 성능 분석

## Design of Fan-shape Type PMSM for Improving Efficiency of Non-rare Earth Motor

조수영\* · 안한웅\* · 함상환\*\* · 진창성\*\*\* · 이성구\*\*\*\* · 이주†  
 (Sooyoung Cho · Hanwoong Ahn · Sang-Hwan Ham · Chang-Sung Jin · Sung Gu Lee · Ju Lee)

**Abstract** - The rare earth output is concentrated in limited number of countries including China. Also the necessity for development of non-rare earth motor is getting signified due to the rapid increase of rare earth price and resource weaponizing policies. Non-rare earth motor is generally designed as spoke type PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) in order to maximize the power density. Such spoke type PMSM has advantage in concentrating the flux but demonstrates lower efficiency compared to permanent magnet using Nd (Neodymium) permanent magnet. Therefore, applications with strong necessity for efficiency need rotor structure having improved efficiency compared to spoke type PMSM. Hence, this study suggested fan-shape type PMSM with somewhat lower power density but maximized efficiency. Fan-shape type PMSM is a rotor shape demonstrating outstanding reduction of iron loss compared to existing spoke type. Thus, this study analyzed the improvement of efficiency and reduction of loss arising from the suggested shape through parameter calculation.

**Key Words** : PMSM(Permanent magnet synchronous motor), Non-rare earth, Fan-shape, Core loss, Efficiency, Rotor shape

### 1. 서론

과거의 철도차량은 유도전동기를 이용하여 V/F 제어를 통해 운행되어 왔다[1]. 하지만 유도기는 PMSM에 비해 상대적으로 낮은 효율과 무거운 중량으로 전동차의 에너지 소비 측면에서 불리하였다. 이로 인해 경전철 및 저상 트램에서는 에너지 소비 저감을 위해 PMSM을 점차 적용시키고 있다. 하지만 PMSM은 대부분 희토류를 사용하기 때문에 환경 파괴 문제 및 자원고갈의 문제점을 지니고 있어, 최근 비희토류를 이용한 고효율밀도의 PMSM이 연구되고 있다. 이러한 비희토류 영구자석은 희토류에 비하여 자속 밀도가 작기 때문에, 자속 집중을 위해 일반적으로 Spoke type의 PMSM을 사용한다. Spoke type의 PMSM은 자속을 집중시킬 수 있는 가장 좋은 형태로 출력밀도 향상 측면에서

매우 큰 장점을 갖는다[2]. 하지만 철도차량의 경우 출력밀도 보다는 효율향상이 더욱 중요하고, 기존 Spoke type의 경우에는 어느 정도 효율향상이 가능하지만 한계가 있다.

본 논문에서 제안하는 Fan-shape type은 그림 1(b)와 같은 구조로써 Inset-type의 착자 방향과는 다르게 그림 1(a)와 같은 Spoke type의 착자 방향과 같게 된다. 또한 이러한 회전자 구조는 기존 Spoke type의 d축 q축 인덕턴스차가 역전되어 돌극성을 띄게 된다. 이러한 차이로 인하여 기존 Spoke type대비 성능특성이 달라진다.

본 논문에서는 기존 Spoke type과 제안된 Fan-shape type 회전자 형상을 적용한 회전자 자기등가회로를 새롭게 구성하고 기초설계를 실시한다. 기초설계가 끝난 후에는 각 권선법 별 회

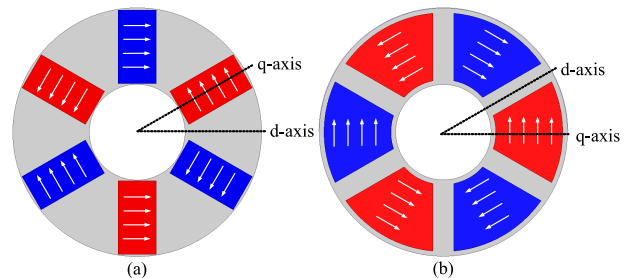


그림 1 착자 방향 ; (a) Spoke type (b) Fan-shape type  
 Fig. 1 Magnetization direction of the (a) Spoke type (b) Fan-shape type

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea

E-mail : julee@hanyang.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea

\*\* Dept. of Electrical and Railway Engineering, Kyungil University, Korea

\*\*\* Defense Robot Team, Defense Business Unit, Hanwha Techwin

\*\*\*\* Dept. of ICT Creative Design, Graduate school, Busan University of Foreign Studies

Received : November 10, 2015; Accepted : January 18, 2016

전자 형상별로 4개의 모델을 도출하고, 이를 분석하여 최종 고효율이 가능한 모델을 제시한다.

## 2. Spoke type 및 Fan-shape type의 회전자 자기등가회로 구축을 통한 기초설계

회전자의 자기 등가회로를 풀면 공극 자속 밀도를 구할 수 있고, 이를 이용하여 원하는 출력 토크를 내는 모델을 만들 수 있다. 그림 2(a)는 SPMSM(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)의 자기등가회로이고, 이를 바탕으로 하여 Spoke type의 자기등가회로는 그림 2(b)와 같이 나타낼 수 있다. Spoke type의 자기등가회로를 풀기 위해 누설 계수( $k_{ls}$ )와 릴럭턴스 계수( $k_r$ )를 도입하여 간소화한 회로는 그림 3과 같다[3, 4, 5].

그림 3을 이용하여 구한 공극 자속 밀도는 식 (1)과 같고, 기본과 공극자속 밀도는 식 (2)와 같다.

$$B_g = \frac{\phi_g}{A_g} = \frac{2k_{ls}}{A_g + \frac{4k_r g \mu_r}{A_m + \frac{k_l}{T_m}}} \left( B_r - \frac{B_{sat} T_{rib}}{W_m} \right) \quad (1)$$

$$\widehat{B}_{g1} = \frac{4}{\pi} B_g \sin \frac{p(\theta_p - \theta_m)}{2} \quad (2)$$

여기서  $\phi_g$ 는 공극자속,  $A_g$ 는 공극 면적,  $A_m$ 은 자석 면적,  $g$ 는 유효공극 길이,  $T_{rib}$ 은 립 폭,  $W_m$ 은 자석의 폭이다.

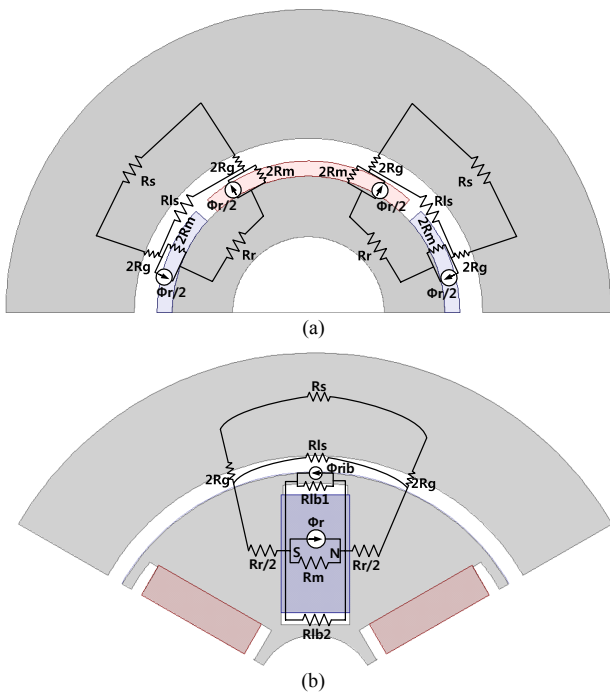


그림 2 자기등가회로 (a) SPMSM (b) Spoke type PMSM  
Fig. 2 Magnetic equivalent circuit (a) SPMSM (b) Spoke type PMSM

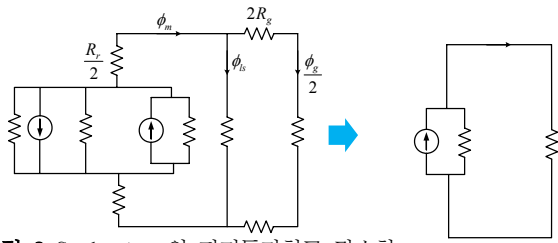


그림 3 Spoke type의 자기등가회로 간소화  
Fig. 3 Simplifications of the magnetic equivalent circuit of the spoke type PMSM

기본과 공극자속 밀도를 이용하여 출력 토크는 식 (3)과 같이 구해진다.

$$T = \left( \frac{\pi}{4} k_w \widehat{B}_{g1} ac \cos \beta \right) D_g^2 L_{stk} + \left( \frac{\pi}{16} \frac{1}{p} k_w^2 ac^2 G_{a1} \sin 2\beta \right) D_g^3 L_{stk} \quad (3) \\ = T_m + T_r [Nm]$$

여기서  $k_w$ 은 권선계수,  $ac$ 는 비전기장하,  $D_g$ 는 공극 직경,  $L_{stk}$ 는 적층 길이,  $\beta$ 는 전류 위상각이다.

Fan-shape type의 경우는 그림 4와 같이 자기등가회로를 구성할 수 있다. 단지 Spoke type의 자기등가회로에서 자석 두께 값을 변경하여, 식 (2)와 식 (3)의 값을 구한다.

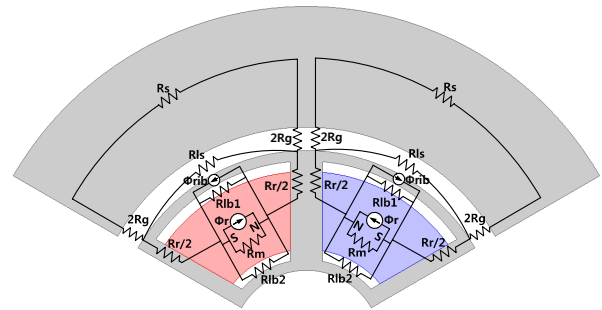


그림 4 Fan-shape type PMSM의 자기등가회로  
Fig. 4 Magnetic equivalent circuit of the Fan-shape type PMSM

또한, 고정자의 경우에는 치 집중권과 분포권 2가지 권선법을 이용하여 설계하였다.

## 3. 제안된 4가지 모델의 전자기 해석 결과

고정자 설계는 2종류로 설계를 하여 비교 분석을 하였다. 권선 계수( $k_w$ )는 54슬롯의 분포권의 경우 0.945이며 9슬롯의 치 집중권의 경우 0.866이다. 이 두 가지의 권선계수는 각각 다른 값을 지니지만 동일 기자력 조건을 만들어주기 위해 상당 직렬 턴 수와 인가전류를 동일하게 주었다. 회전자는 2장에서 도출된 기초

설계모델에서 상세설계를 수행하였다. 또한 Spoke type은 영구자석 사용량을 최대로 가져가면 출력밀도를 극대화 할 수 있기 때문에, 안전율이 만족되는 조건 하에서 영구자석이 가질 수 있는 최대 가로×세로 길이를 기준으로 영구자석 크기를 결정하여 설계하였다. 그리고 Fan-shape type은 최대토크를 낼 수 있는 철심의 크기를 기준으로 설계하였다.

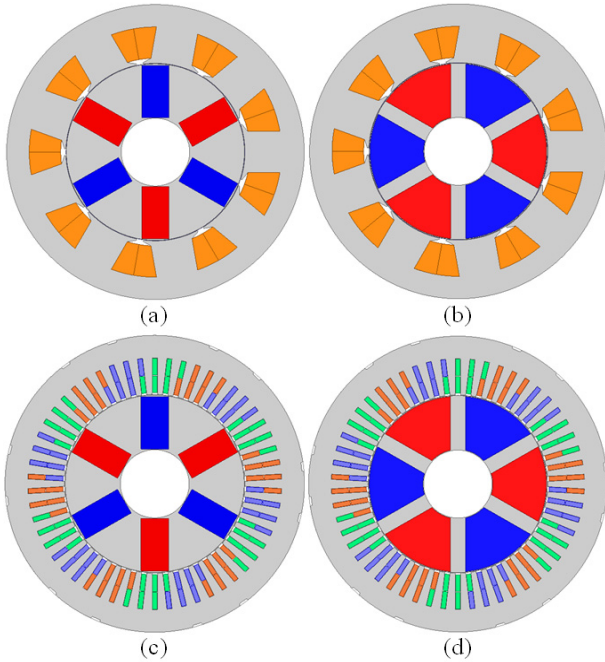


그림 5 (a) 집중권을 가지는 6극 9슬롯 Spoke type PMSM  
 (b) 집중권을 가지는 6극 9슬롯 Fan-shape type PMSM  
 (c) 분포권을 가지는 6극 54슬롯 Spoke type PMSM  
 (d) 분포권을 가지는 6극 54슬롯 Fan-shape type PMSM

Fig. 5 Base Model  
 (a) 6P9S spoke type PMSM with tooth concentrated winding  
 (b) 6P9S fan-shape type PMSM with tooth concentrated winding  
 (c) 6P54S spoke type PMSM with distributed winding  
 (d) 6P54S fan-shape type PMSM with distributed winding

상세설계를 진행한 결과 그림 5와 같은 4가지 모델이 도출되었고, 4가지 모델에 대한 성능 비교는 표 1과 같다.

표 1을 통해 제안된 Fan-shape type의 회전자 구조에서 철심이 크게 저감되고 효율 또한 향상됨을 알 수 있다. 또한 치 집중권의 경우에는 효율이 더욱 향상되는데, 이는 동일 기자력 대비 권선저항이 줄어들게 되기 때문이다. 따라서 가장 효율이 높은 전동기 타입은 치 집중권으로 구성된 6극 9슬롯 Fan-shape type의 전동기가 가장 효율이 높음을 알 수 있다.

표 1 4가지 모델의 FEM 해석 결과 (2,400[rpm])

Table 1 FEM results of 4 model at 2,400[rpm]

I <sub>max</sub> =220 [A]	Model (a)	Model (b)	Model (c)	Model (d)
Torque_avg [Nm]	550.38	453.67	552.87	486.87
Resistance [Ω] (20℃)	0.03	0.03	0.04	0.04
Copper loss [W]	2178	2178	2904	2094
Core loss [W]	1960.4	1095.8	2032.9	1276.2
Efficiency [%]	97.10	97.21	96.57	96.70

#### 4. 파라미터 계산을 통한 손실저감 원인 분석

4가지 모델의 파라미터 분석을 위해 무부하시와 부하시의 쇄교자속을 FEM(Finite Element Method)을 통해 구하였다. 또한 쇄교자속과 전류위상각을 이용하여 d축 인덕턴스( $L_d$ )와 q축 인덕턴스( $L_q$ )를 계산하였다. 위 과정을 통해 쇄교자속 ( $\psi_a, \psi_q$ ), d축 인덕턴스( $L_d$ ), q축 인덕턴스( $L_q$ ), 마그네틱 토크( $T_m$ ) 및 릴럭턴스 토크( $T_r$ )는 표 2와 같다.

표 2 4가지 모델의 파라미터 (2,400[rpm])

Table 2 Parameter of 4 model at 2,400[rpm]

I <sub>max</sub> =220 [A]	Model (a)	Model (b)	Model (c)	Model (d)
Noload flux linkage $\psi_a$ [Wb]	0.40	0.44	0.41	0.46
Load flux linkage $\psi_q$ [Wb]	0.86	0.63	0.75	0.57
d-axis inductance $L_d$ [mH]	2.67	1.99	1.99	1.93
q-axis inductance $L_q$ [mH]	4.83	1.42	4.14	0.91
Magnetic Torque $T_m$ [Nm]	319.29	425.94	326.01	452.64
Reluctance Torque $T_r$ [Nm]	224.03	30.89	222.47	37.82

표 2를 토대로 하여 보면 Spoke type의 경우 d축 인덕턴스가 q축의 인덕턴스보다 작은 역돌극성을 지닌다는 것을 알 수 있고, Fan-shape type의 경우에는 d축 인덕턴스가 q축 인덕턴스보다 큰 돌극성을 지닌다는 것을 알 수 있다. 하지만 Fan-shape type의 경우 d, q축 사이의 인덕턴스 차가 크지 않기 때문에 릴럭턴스 토크가 작다. 손실적인 측면을 알아보기 위해서는 부하시 쇄교자속을 살펴 봐야 한다. 그 이유는 식 (4)와 식 (5)로 표현된 철손 성분인 히스테리시스손실과 와전류손실은 자속밀도의 제곱

에 비례하고, 쇄교자속의 크기는 자속밀도의 크기와 비례하기 때문이다. 따라서 부하시의 쇄교자속을 살펴보면 Fan-shape type 이 작음을 알 수 있다.

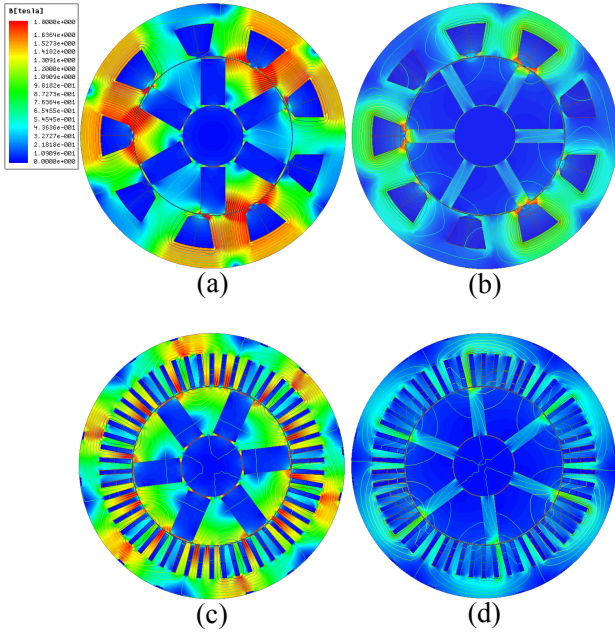


그림 6 고정자에 의한 자속선과 자속밀도

- (a) 집중권을 가지는 6극 9슬롯 Spoke type PMSM
- (b) 집중권을 가지는 6극 9슬롯 Fan-shape type PMSM
- (c) 분포권을 가지는 6극 54슬롯 Spoke type PMSM
- (d) 분포권을 가지는 6극 54슬롯 Fan-shape type PMSM

Fig. 6 Flux line and Flux density of the stator

- (a) 6P9S spoke type PMSM with tooth concentrated winding
- (b) 6P9S fan-shape type PMSM with tooth concentrated winding
- (c) 6P54S spoke type PMSM with distributed winding
- (d) 6P54S fan-shape type PMSM with distributed winding

$$P_h = k_h f B_m^n \quad [W/m^3] \quad (4)$$

$$P_e = k_e f^2 B_m^2 \quad [W/m^3] \quad (5)$$

여기서  $n$ 은 Steinmetz's constant 상수로써 1.5 ~ 2 사이의 값이다.

그림 6은 고정자에 의해 생긴 자속의 영향을 알아보기 위하여 회전자에 영구자석을 제거 후 FEM 해석한 그림이다. 고정자에 의한 자속밀도와 자속선도를 비교해보게 되면 Fan-shape type의 경우 투자율이 낮은 영구자석의 크기가 크고 투자율이 높은 회전자 철심의 면적이 작기 때문에 고정자에서 발생하는 자속이 회전자에 쇄교하는 양이 적다. 하지만 Spoke type의 경우에는 철심

면적이 상대적으로 크기 때문에 쇄교자속을 더 크게 발생시킬 수 있다.

표 3은 고정자와 회전자의 철손 비중을 나타낸 표이다. 표 3을 통해 4가지 모델은 모두 회전자에서의 철손보다 고정자에서의 철손이 더욱 크게 발생됨을 알 수 있다. 또한 Fan-shape type의 경우 Spoke type에 비하여 철손이 크게 감소되는 것을 알 수 있다. 따라서 Fan-shape type으로 설계 된다면 철손이 감소되어 효율을 향상시킬 수 있다.

표 3 4가지 모델의 철손 (2,400[rpm])

Table 3 Core loss of 4 model at 2,400[rpm]

$I_{max}=220$ [A]	Model (a)	Model (b)	Model (c)	Model (d)
Core loss [W] (Stator&Rotor)	1960.4	1095.8	2032.9	1276.2
Core loss [W] (Only stator)	1591.4	1030.9	1837.6	1216.2

## 5. 결 론

이 논문은 회전자 등가회로를 이용하여 기초설계를 수행하였고, 제안된 Fan-shape type PMSM을 통해 고정자 및 회전자의 철손저감을 달성했다. 또한 고정자가 치 집중권일 경우에는 적은 동손가지기 때문에, Fan-shape type PMSM모델에 집중권으로 권선을 설계한다면 효율 극대화를 이룰 수 있다. 또한, 대형기에 비하여 소형기에서는 출력차이가 좀 더 작고 원심력에 의한 자석의 비산우려가 적기 때문에 소형기에 Fan-shape type PMSM을 적용할 경우 출력을 만족할 뿐만 아니라 효율 극대화가 기대된다.

## 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업으로서, 관계 부처에 감사드립니다. (No.NRF-2014R1A1A1003334)

## References

- [1] John L. Oldenkamp, Steven C. Peak, "Selection and Design of an Inverter-Driven Induction Motor for a Traction Drive System," IEEE Trans. Industry Applications, vol.IA-21, no. 1, January-February, 1985.
- [2] Hyung-Wook Kim, Kyung-Tea Kim, Yung-Sik Jo, Jin Hur, "Optimization Methods of Torque Density for Developing the Neodymium Free SPOKE-Type BLDC

Motor,” IEEE Trans. Magnetics, vol. 49, no. 5, pp. 2173-2176, May 2013.

- [3] Dr. Duane Hanselman, “Brushless Motors: Magnetic Design, Performance, and Control,” E-Man Press LLC, 3rd ed., pp. 63-114, July 2, 2012.
- [4] Hamza W. Derbas, Joshua M. Williams, Andreas C. Koenig, Steven D. Pekarek, “A Comparison of Nodal- and Mesh-Based Magnetic Equivalent Circuit Models,” IEEE Trans. Energy Conv., vol. 24, no. 2, pp. 388-396, June 2009.
- [5] Abdul Rehman Tariq, Carlos E. Nino-Baron, Elias G. Strangas, “Iron and Magnet Losses and Torque Calculation of Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Using Magnetic Equivalent Circuit,” IEEE Trans. Magnetics., vol. 46, no. 12, pp. 4073-4080, December 2010.

저 자 소 개



**조 수 영 (Sooyoung Cho)**

1991년 5월 17일생. 2013년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2013년~현재 한양대학교 전기공학과 석박사통합과정.

Tel : 02-2220-0349  
E-mail : jsy0593@naver.com



**안 한 웅 (Hanwoong Ahn)**

1986년 6월 21일생. 2010년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2010년~현재 동대학원 석박사통합과정.

Tel : 02-2220-0349  
E-mail : zemlja@naver.com



**함 상 환 (Sang-Hwan Ham)**

1980년 4월 7일생. 2006년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2011~2013년 순천제일대학교 전기자동차과 조교수. 2013년~현재 경일대학교 전기철도공학부 조교수.

Tel : (053) 600-5526  
E-mail : shham@kiu.kr



**진 창 성 (Chang-Sung Jin)**

1974년 10월 26일생. 2001년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003~2007년 대우전자. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2011~2015년 삼성테크윈 R&D 제어기술 그룹. 2015~현재 한화테크윈 방산 사업본부 국방 로봇팀.

E-mail : kazamaji@naver.com



**이 성 구 (Sung Gu Lee)**

1980년 04월 23일생. 2003년 한양대학교 전자전기공학부 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2009년~2016년 삼성전자 책임연구원. 2016년~현재 부산외국어대학교 ICT 창의융합학과 대학원 조교수.

E-mail : firewirelee@naver.com



**이 주 (Ju Lee)**

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대학교 전기생체공학부 교수.

Tel : 02-2220-0342  
E-mail : julee@hanyang.ac.kr