

# 유도전동기 효율향상을 위한 알루미늄 및 동 다이캐스팅 적용 시의 동작특성 및 효율 비교연구

논 문
61-1-11

## The Study of Efficiency and Characteristics Comparison between Aluminum and Copper Die Casting Induction Motor for Improving Efficiency

한 필 완\* · 이 주†  
(Pil-Wan Han · Ju Lee)

**Abstract** - Copper die casting motor (CDM) has a better design flexibility than aluminium die casting motor (ADM) because of the higher conductivity of copper. However, CDM has an economic and manufacturing weak point due to high copper price and high melting temperature compared to ADM. This paper describes a comparison of the design parameters, specifications, performances and material cost between CDM and ADM of 5.5kW\_6P.

**Key Words** : High efficiency, Cost, Copper, Aluminum, Induction motor, Size

### 1. 서 론

전동기의 효율은 재료, 생산기술, 설계적인 기법 등에 의해 향상시킬 수 있다. 그 중 첫 번째로 전기강판으로 이루어진 코어와 구리, 알루미늄 등의 전기도체와 같은 재료의 체적을 증가시키는 방법이 있으며, 두 번째로 저 철손의 전기강판, 동 다이캐스팅 회전자적용 등의 손실을 줄이는 재료를 적용하는 방법이 있다. 세 번째로 고정자 슬롯에 삽입되는 도체(구리)의 밀도를 의미하는 슬롯 점적율(slot fill factor)을 향상시키는 제조기술 향상이 있으며, 네 번째로 목표효율에 맞추어 전동기를 최적설계하는 방법이 있다[1].

알루미늄에 비해 약 60%정도 높은 도전율을 가진 구리를 이용하여 유도전동기의 회전자 알루미늄을 대체할 경우 전동기 효율이 크게 향상될 수 있다. 하지만, 동 다이캐스팅 회전자 제조는 알루미늄 대비 높은 구리가격, 높은 용융점(구리 : 1,083℃, 알루미늄 : 660℃)으로 인한 금형의 내구성 단축 등 극복해야할 문제점을 가지고 있다[2,3]. 이러한 동 다이캐스팅 유도전동기의 단점에도 불구하고, 전 세계적으로 고효율 전동기 효율기준이 지속적으로 강화되고 있어, 앞으로 동 다이캐스팅 유도전동기가 프리미엄 및 슈퍼프리미엄과 같은 차세대 고효율 전동기 개발을 위한 기술로 채택될 가능성도 크다고 할 수 있다[4, 5].

본 논문에서는 점차 강화되고 있는 고효율 전동기 효율기준에 맞추어 5.5kW\_6극 프리미엄급 효율의 동 다이캐스팅 전동기와 이 보다 체적을 증가시켜 프리미엄급 효율 성능을

내도록 설계된 알루미늄 다이캐스팅 전동기의 설계변수, 성능 및 경제성 등 전동기 고효율화 설계에 고려되어야 할 항목들에 대해 비교하였으며, 특성 시험을 통해 효율을 포함한 성능 및 손실에 대한 해석결과에 대해 검증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 유도전동기 설계 변수

식 (1)의  $D^2L$  설계식은 출력상수( $C_0$ )를 매개변수로 전동기 출력( $P_n$ ), 동기회전속도( $n_s$ ) 회전자 체적과의 상관관계를 나타낸다. 식 (2)에서 나타난 바와 같이 출력상수( $C_0$ )는 공극자속밀도( $B_g$ )와 표면전류밀도( $K_1$ )으로 표현되므로 때문에  $D^2L$  설계식은 모터 내부의 자속밀도와 전류밀도를 설계에 반영시키지는 못한다[6]. 이러한  $D^2L$  설계식을 보완하기 위해 아래 식 (3), (4)의 고정자의 치 및 요크의 설계 변수가 추가 되었다.  $G_t$ 는 치 자속밀도( $Bt$ )에 대한 공극자속밀도의 비율이며, 이것은 고정자 슬롯피치에 대한 치폭의 비율과 동일하다.  $G_c$ 는 고정자 요크자속밀도에 대한 공극자속밀도의 비율이며, 고정자 내경에 대한 고정자 요크의 비율로 나타낼 수 있다. 표 1은 설계변수들에 대한 정보이다.

$$D_{is}^2 L = \frac{1}{C_0} \frac{60}{n_s} \frac{P_n}{\eta \cos \phi} \quad (1)$$

$$C_0 = \alpha K_{w1} \pi^2 K_1 B_g \quad (2)$$

$$G_t = \frac{B_g}{B_t K_{fe}} = \frac{t}{(\pi D_{is} / S_1)} \quad (3)$$

$$G_c = \frac{2}{P} \frac{B_g}{B_c K_{fe}} = \frac{2d_c}{D_{is}} \quad (4)$$

\* 정 회 원 : 한국전기연구원 전동력연구센터 선임연구원  
한양대학교 전기공학과 박사과정

† 교신저자, 시니어회원 : 한양대학교 전기공학과 정교수  
E-mail : julee@hanyang.ac.kr

접수일자 : 2011년 11월 9일

최종완료 : 2011년 11월 28일

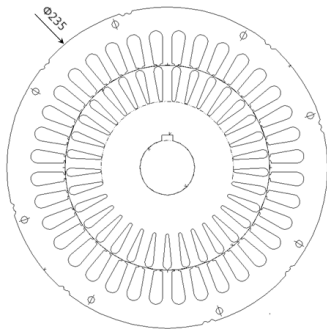
표 1 설계변수기호

Table 1 Description of design variables

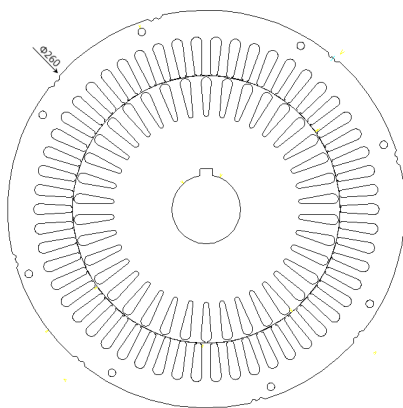
기호	변수명	기호	변수명
B <sub>t</sub>	치 자속밀도	d <sub>c</sub>	고정자 요크 두께
B <sub>c</sub>	요크자속밀도	k <sub>fe</sub>	코어 점적율
D <sub>is</sub>	고정자내경	S <sub>1</sub>	고정자 슬롯수
t	고장자 치폭	P	극수

2.2 유도전동기 설계

본 논문에서는 사이즈가 서로 다른 5.5kW\_6극용 코어 두 가지를 사용하였다. Core I은 고효율 전동기용 코어로서 알루미늄 다이캐스팅 회전자를 적용하여 고효율 기준 (89.5%)을 달성 가능하였으며, 본 연구에서 동 다이캐스팅 회전자를 적용하여 프리미엄급 효율 기준(91.0%)까지 효율이 향상되었다. Core II는 동 다이캐스팅 회전자를 적용하지 않고 알루미늄 다이캐스팅 회전자를 적용하여 프리미엄급 효율을 달성하기 위해 설계된 코어이다. 고효율 기준 및 프리미엄급 효율 기준은 KS C 4202 (일반 저압 3상 유도 전동기) 규격에 따른 것이다. 그림 1은 코어 I, II의 도면이며, 표 2는 Core I, II의 주요 설계 파라미터 값을 나타낸다. Core II는 전동기의 체적을 증가시켜 출력상수, 공극자속밀도, 전류밀도와 같은 설계변수 값이 Core I에 비해 감소한 것을 볼 수 있다.



(a) Core I (외경 235mm)



(b) Core II (외경 260mm)

그림 1 고정자 및 회전자 코어

Fig. 1 Stator and rotor core

표 2 코어 설계변수 비교

Table 2 Comparison of core design variables

변수	단위	Core I	Core II
고정자 외경 (D <sub>os</sub> )	[mm]	235	260
고정자 내경 (D <sub>is</sub> )	[mm]	150	175
적층 (L)	[mm]	160	160
출력상수 (C0)	[103×J/m <sup>3</sup> ]	105	75
공극자속밀도 (B <sub>g</sub> )	T	0.76	0.70
λ (L/τP)	-	2.04	1.75
전류밀도 (J)	[A/mm <sup>2</sup> ]	3.51	2.75
G <sub>t</sub>	-	0.51	0.56
G <sub>c</sub>	-	0.23	0.19

2.3 유도전동기 등가회로이론

전동기 특성해석은 유도전동기 등가회로법을 이용하였다. 일반적으로 사용되는 그림 2의 등가회로를 적용하였다. 등가회로 파라미터는 고정자 저항(R<sub>s</sub>), 고정자 누설리액턴스(X<sub>s</sub>), 자화리액턴스(X<sub>m</sub>), 철손저항(R<sub>fe</sub>), 회전자 저항(R<sub>r</sub>), 회전자 누설리액턴스(X<sub>r</sub>)로 이루어진다. 전동기 설계사양으로부터 등가회로 파라미터 계산이 가능하며, 이를 이용하여 식 (5), (6)과 같이 전동기 특성 계산이 이루어지며 특성해석은 문헌의 내용을 인용하여 개발된 프로그램을 사용하였다[7, 8]. 식 (5)와 (6)은 전동기 특성치 중 슬립에 따른 고정자 전류 및 토크특성에 대한 계산식이다. 식 (7)은 전동기 효율 계산식이며, P<sub>1</sub>은 입력전력, P<sub>0</sub>는 기계적 출력, P<sub>c1</sub>은 고정자 동손, P<sub>c2</sub>는 회전자 동손, P<sub>i</sub>는 철손, P<sub>m</sub>은 기계손, P<sub>s</sub>는 표류부하손이다[9].

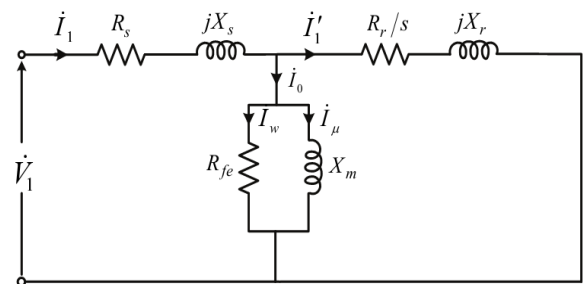


그림 2 다상유도전동기 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuit of polyphase induction motor

$$I_1 = V_1 \frac{1}{(R_s + jX_s) + \frac{R_r/s + jX_r}{R_r/s + jX_r + jX_m}} \quad (5)$$

$$T = \frac{3p_1}{w_1} \frac{V_1^2 \frac{R_r}{s}}{\left[ R_s + \left( 1 + \frac{X_s}{X_m} \right) \cdot \frac{R_r}{s} \right] + \left[ X_s + \left( 1 + \frac{X_s}{X_m} \right) \cdot X_r \right]} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{P_0}{P_1} = \frac{P_0}{P_0 + (P_{c1} + P_{c2} + P_i + P_m + P_s)} \quad (7)$$

### 2.4 등가회로 특성해석 및 재료비 분석

표 3은 등가회로법을 이용한 특성 및 파라미터 해석결과이다. Core I\_ADM은 core I을 이용하여 알루미늄 다이캐스팅 회전자를 적용한 전동기이며, Core I\_CDM은 Core I을 이용하여 동 다이캐스팅 회전자를 적용한 것이며, Core II\_ADM은 core II를 이용하여 알루미늄 다이캐스팅을 적용한 전동기이다. Core I\_CDM과 Core II\_ADM은 동등수준의 효율로 설계된 것을 볼 수 있으며, 동 다이캐스팅 회전자로 인해 회전자 저항( $R_r$ )은 Core I\_ADM의 60%수준이다. 그림 3은 설계된 시작품의 재료비를 비교분석한 것이다. 고효율 전동기로 설계된 core I\_ADM은 재료비가 가장 낮으며, 동일 코어에 동 다이캐스팅 회전자를 적용하여 프리미엄급으로 효율이 향상된 core I\_CDM은 구리를 사용한 회전자 도체의 재료비가 크게 증가되었지만, 동등 효율 수준으로 설계된 core II\_ADM에 비해서는 총 재료비가 8%정도 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 core II\_ADM 전동기의 체적 증가로 인해 프레임, 베어링, 샤프트의 재료비 증가에 따른 것이다. 그림 4와 같이 코어 I을 적용하여 알루미늄 다이캐스팅 및 동 다이캐스팅 회전자를 제작하였으며, Core II는 알루미늄 다이캐스팅 회전자 시작품을 제작하였다.

표 3 등가회로 해석 결과

Table 3 Analysis results of equivalent circuit

Parameter 및 성능	단위	Core I_ADM	Core I_CDM	Core II_ADM
정격출력	kW	5.5		
정격전압/주파수	V/Hz	380/60		
효율	%	90.6	91.4	91.4
역율	%	76.7	76.6	74.6
정격상전류	A	12	11.9	12.3
고정자 저항 at 25°C	Ω	0.436	0.436	0.334
회전자 저항 at 25°C	Ω	0.330	0.191	0.221
고정자 누설인덕턴스	mH	5.236	5.236	2.976
회전자 누설인덕턴스	mH	7.549	7.549	4.413
여자 인덕턴스	mH	92.692	95.345	76.554

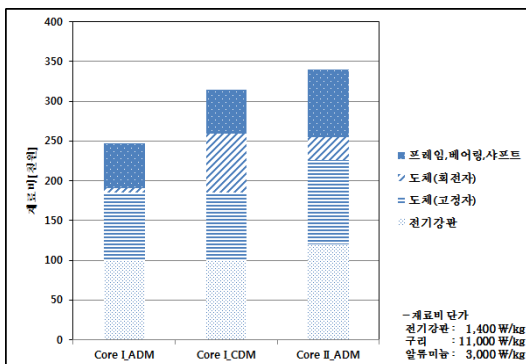


그림 3 재료비 비교분석

Fig. 3 Comparison of material cost

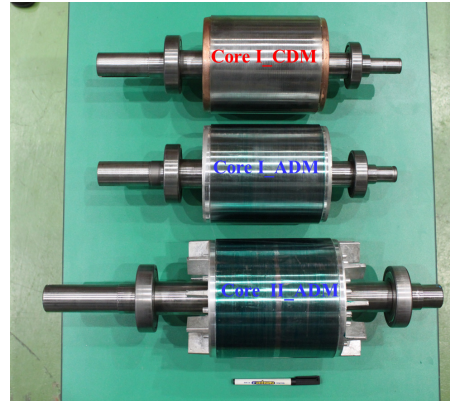


그림 4 회전자 다이캐스팅 시작품

Fig. 4 Prototype of rotor die casting

### 2.5 특성시험

특성시험은 현재 국내 고효율 유도전동기 공인 시험규격인 KSC IEC 60034-2-1에 따라 이루어졌다[9,10]. 다이내모 시스템을 이용한 실부하법으로 시험을 진행하였으며, 손실분리법에 의해 표류부하손을 얻었다. 표 4는 정격출력(100%부하)에서의 전동기 효율 및 손실의 해석, 시험비교결과이다. 해석의 경우 고정자 동손 및 철손은 등가회로 해석을 통해 얻었으며, 표류부하손은 정격출력의 0.9%로 산정하였다.

그림 5 및 6은 시작품에 대한 효율 및 손실의 시험결과이다. 동 다이캐스팅 회전자를 적용한 Core I\_CDM이 전 부하 영역에서 효율이 가장 높게 나타났으며, 알루미늄 회전자 적용한 프리미엄급(효율>91.0%) 전동기로 설계된 core II\_ADM은 100%부하 이하에서는 CDM에 비해 효율이 점차 떨어지는 것으로 나타났다. 이것은 그림 5(a)의 손실분석에서 볼 수 있듯이 75%이하의 부하율에서 Core II\_ADM의 고정자 동손이 나머지 두 모델에 비해 상대적으로 높기 때문이다. 그림 5(b)에서는 Core I\_CDM의 회전자 동손이 ADM에 비해 전 부하 영역에서 50%이상 감소한 것을 볼 수 있다. 그림 5(c)에서는 체적이 증가된 Core II\_ADM의 철손이 높게 측정되었다. 그림 5(d)는 부하에 따른 표류부하손 측정결과이다.

표 4 해석 및 시험결과 [정격출력]

Table 4 Analysis and test results at rated output power

Model		효율 [%]	철손 [W]	동손 [W]		풍손&마찰손 [W]	표류부하손 [W]	온도상승 (권선)
				고정자	회전자			
Core I-ADM	해석	90.5	143	225	122	33	50	42
	시험	90.2	111	233	153	42	62	
Core I-CDM	해석	91.4	143	222	69	33	50	40
	시험	91.7	115	229	69	30	59	
Core II-ADM	해석	91.4	170	177	74	52	50	28
	시험	91.5	145	200	82	38	50	

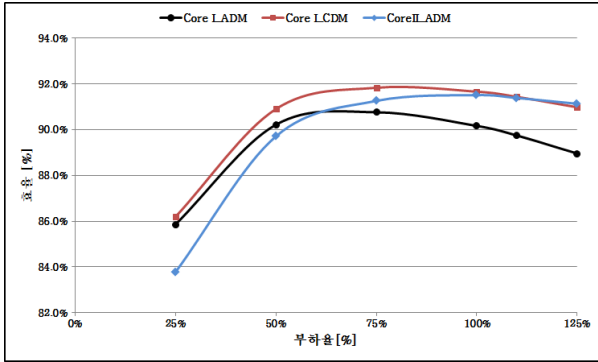
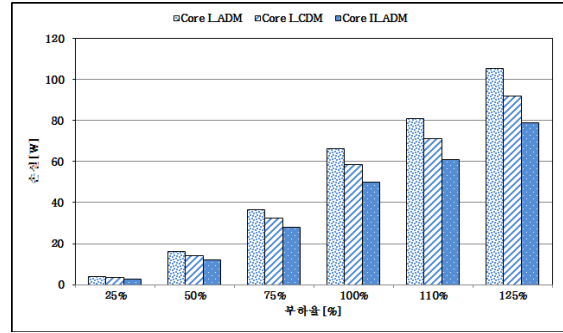
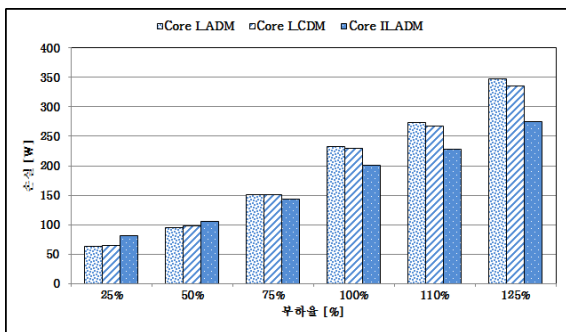


그림 5 부하율에 따른 효율 시험결과  
Fig. 5 Efficiency test results according to load factor

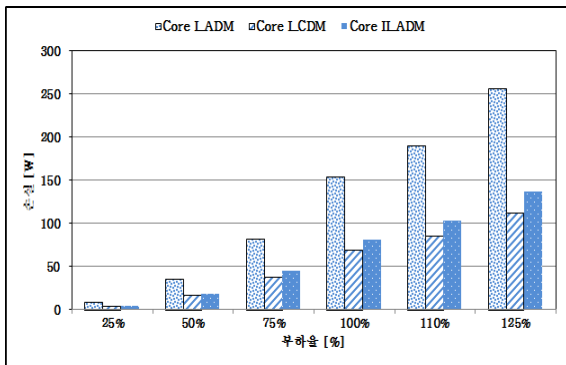


(d) 표류부하손

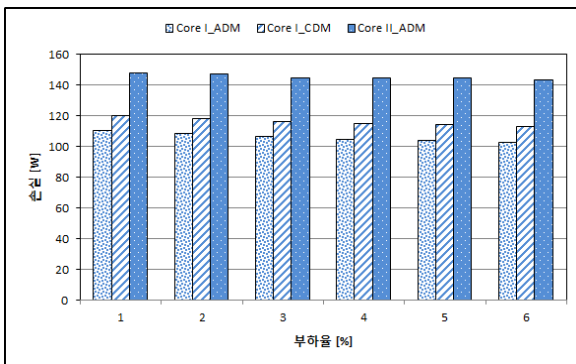
그림 6 부하율에 따른 손실 시험결과  
Fig. 6 Test results of Losses according to load factor



(a) 고정자 동손



(b) 회전자 동손



(c) 철손

### 3. 결 론

본 논문에서는 5.5kW\_6극의 고효율 전동기(기준 효율 : 89,5%) 코어에 동 다이캐스팅 회전자를 적용하여 프리미엄급 효율(기준효율 : 91.%)을 달성한 전동기(CDM)와 사이즈를 증가시켜 코어를 재설계하여 프리미엄급 효율을 달성한 알루미늄 다이캐스팅 전동기(ADM)의 설계 변수, 시험특성치 및 경제성(재료비)을 비교하였다. 동 다이캐스팅 전동기는 동일 사양의 알루미늄 다이캐스팅의 전동기 대비 효율이 정격부하에서 1.5% 향상된 시험결과를 얻었으며, 동 다이캐스팅 기술을 적용하여 설계변경 없이 고효율전동기를 프리미엄급 전동기로 전환이 가능함을 확인하였다. 체적을 증가시켜 재설계한 알루미늄 다이캐스팅 전동기도 정격부하에서 동 다이캐스팅 전동기와 동등 수준의 프리미엄급 효율 시험결과를 얻었으나, 75%이하의 부하에서는 동 다이캐스팅 전동기에 비해 효율이 떨어지는 현상을 보였다. 75%이상 100%부하영역이 전동기 주요 동작점인 것을 감안하면, 설계시 보완이 필요한 부분이다.

재료비 검토결과 체적이 작은 동 다이캐스팅 전동기가 알루미늄 다이캐스팅 전동기 대비 유리한 것으로 나타났으나, 동 다이캐스팅 급형의 수명이 알루미늄 다이캐스팅 급형의 10~20%수준임을 감안하면 제조원가 측면에서 유리하다고 보기 어려우며, 동 다이캐스팅 전동기의 보급을 위해서는 구리가격의 안정화와 더불어 상용화를 위한 다이캐스팅 급형 기술의 발전이 필수적이라고 할 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] J. Haataja, J. Pyrhonen, "Improving three phase induction motor efficiency in Europe", Power Eng. J., vol.12, no. 2, pp. 81-86, April. 1998
- [2] S. Lie, C. Die Pietro, "Copper die-cast rotor efficiency improvement and economic consideration", IEEE Tran. Energy conversion, vol.10, no.3, pp. 419-424, Sept. 1995.
- [3] J. Malinowski, J. McCormick, K. Dunn "Advances in construction techniques of AC induction motors:

Preparation for super-premium efficiency levels”  
IEEE Tran. on Industry Applications, vol. 40, no. 6,  
pp.1665-1670, Nov. 2004.

- [4] A. Boglietti, A. Cavagnino, L. Ferraris, and M. Lazzari, “Energy-Efficient Motors”, IEEE Industrial Magazine, Dec. 2008
- [5] M. Deivasahayam, “Energy Conservation through Efficiency Improvement in Squirrel Cage Induction Motors by Using Copper Die Cast,” International Conference of energy efficiency in motor driven systems (eemods’05), Vol. I, pp. 92-101, September 2005, Heidelberg, Germany.
- [6] V. B. Honsinger, “Sizing equations for electrical machinery,” IEEE Trans. on Magnetics, vol. EC-2, no. 1, pp. 116-121, March, 1987.
- [6] I. Boldea and S. A. Nasar, “The induction machine handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002
- [7] C. G. Veinott, “Theory and design of small induction motors. New York; McRraw-Hill, 1959.
- [8] IEEE Std. 112, “IEEE Standard Test Procedure for Poly phase Induction Motors and Generators,” 2004.
- [9] IEC 60034-2-1, “Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles” 2007

**감사의 글**

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2009201010001A)

**저 자 소 개**



**한 필 완 (韓 必 完)**

1975년 9월 15일 생. 1998년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~2005년 LG전자 DA사업본부 선임연구원. 2005년 10월~현재 한국전기연구원 전동력연구센터 선임연구원, 2008년~2010년 한양대학교 공대 전기공학과 박사 수료  
Tel : 055-280-1428  
E-mail : pwhan@keri.re.kr



**이 주 (李 柱)**

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~2009년 한양대 공대 전기제어생체공학부 부교수. 2009년~현재 한양대 공대 전기제어생체공학부 정교수.  
Tel : 02-2220-0342  
E-mail : julee@hanyang.ac.kr