

# 손실 패턴에 따른 고속 스위치드 릴럭턴스 전동기의 SMC 분말을 이용한 효율 개선

## Strategic Utilization of Soft Magnetic Composite in a High-Speed Switched Reluctance Machine Depending on a Loss Pattern

이 치 우\*  
(Cheewoo Lee)

**Abstract** - Soft magnetic composite (SMC) material has recently received a significant attention in the area of high-speed machines because of its unique properties such as good design flexibility and low eddy current loss. However, SMC's electromagnetic property is poor compared to silicon steel in terms of saturation, relative permeability, and hysteresis loss. This paper presents a technique for utilization of SMC in two strategic designs of a switched reluctance machine (SRM) depending on a loss pattern. To investigate the effect of SMC's merits and demerits, the stator material is changed from laminated steel to SMC.

**Key Words** : Soft magnetic composite, Switched reluctance machine, Three dimensional structure, Core loss

### 1. 서 론

최근 고속 회전기 시스템은 소형화, 비용 절감 및 고효율 특성을 꾀할 수 있는 장점이 있어 가전제품 및 산업용으로 많은 관심을 받는 분야 중 하나이다. 기존 고속 회전기 시스템의 동력원으로 구조적으로 견고하고 유지보수가 쉬운 유도전동기가 많이 사용되어 왔으나 운전 시 입력되는 고주파수로 인한 동손과 철손 증가로 효율저감 문제를 개선하는데 많은 어려움이 있다. 이를 대체하기 위한 동력원으로 직류전동기와 영구자석 교류전동기 등이 있으나 고속에서 브러시 사용의 어려움과 영구자석의 소자현상 및 기계적 파괴 등이 문제시 되고 있다. 반면, 영구자석과 권선이 없는 회전자를 가지는 스위치드 릴럭턴스 전동기는 간단하고 견고한 구조를 가지며 다양한 상 조합과 극 조합이 가능한 장점 때문에 고속 회전기의 동력원으로서 많은 연구가 진행되고 있다[1].

전동기의 철손은 동작 주파수에 비례하는 히스테리시스 손실과 동작 주파수 자속에 비례하는 와전류 손실이 있다. 고속 운전 시 와전류 손실이 모터 손실에서 차지하는 비중이 급격히 증가하므로 효율 향상을 위해서는 와전류 손실 저감이 반드시 동반되어야 한다. 일반적으로 와전류 손실을 줄이기 위해 얇은 전기 강판을 적층하여 전기 저항을 증가시키는 방법을 사용하고 있으나 이는 재료비 상승을 초래하고 전기 강판의 타발 작업성을 떨어뜨린다. 뿐만 아니라 시장에서 상용중인 가장 얇은 전기 강판을 이미 사용한 경우 더 이상의 대안이 없으므로 고속에서 고효율 운

전이 가능한 근본적인 아이디어 도출이 절실한 상황이다. 이러한 시대적 흐름 때문에 SMC(Soft Magnetic Composite) 분말을 접목한 연구가 최근 들어 많은 관심을 받고 있다 [2-3].

고속 전동기의 효율 개선을 위한 재료로서 많은 관심을 받고 있는 SMC 분말은 자체적으로 등방성을 띠며, 절연 코팅이 되어 있는 철 분말들로 구성되어 있어 기존 전기 강판 대비 높은 전기 저항으로 와전류 손실을 저감할 수 있다. 또한, 분말을 압분하여 형상을 만들기 때문에 자유로운 3차원 설계가 가능하고 제조 시 재료 소비의 절감과 재활용이 가능한 장점이 있어 다양한 연구가 진행 중이다. 특히 원가 경쟁력과 에너지 효율 향상이라는 두 가지 문제점을 해결해야 하는 가전 분야에서는 더욱 SMC 분말 이용에 관심이 높다. 그러나 전기 강판 대비 낮은 비투자율, 기계적 강도, 저주파 대역에서 높은 철손 등의 단점을 가지고 있어 SMC 분말의 장점과 단점 사이의 균형을 고려한 설계가 필요하다.

본 논문에서는 고속에서 동작 주파수가 낮아 철손에 유리한 2상 4/2 스위치드 릴럭턴스 전동기를 채택하여 연구를 진행하였다. 기존 전기강판에서 철손과 동손의 손실 분포가 다른 두 고속 4/2 스위치드 릴럭턴스 전동기를 이용하여 SMC 분말 사용 시 손실 변화 비교를 통해 SMC 분말을 이용한 전동기 설계 방법의 기준을 제시하고자 한다.

### 2. 전기강판과 SMC 코어의 손실 특성 비교

#### 2.1 서로 다른 손실 분포를 가지는 4/2 SRM

본 논문에서 SMC 특성 분석을 위해 사용되는 두 고속 SRM

\* Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Korea.

E-mail: cwlee1014@pusan.ac.kr

Received : January 9, 2017; Accepted : January 25, 2017

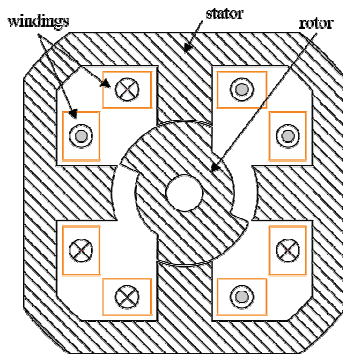


그림 1 두 SRM의 전자계 구조 단면

Fig. 1 Cross sections of two SRMs

표 1 두 SRM의 효율 특성 비교

Table 1 Estimated specification of Two SRMs

section	unit	value	
version	-	case I	case II
코어 재질	-	silicon steel (35PN440)	
고정자 외경	mm	70	50
적층길이	mm	25	12
정격 속도	r/min	70,000	78,000
정격 출력	W	1,000	300
동 손	W	40.2	29.0
히스테리시스 손실	W	15.96	6.32
와전류 손실	W	60.10	22.84
기계 손	W	20.0	20.0
효율	%	88.6	79.7

은 4개의 고정자 자극과 2개의 회전자 자극을 가지는 동일한 구조의 2상 4/2 SRM으로써 정격 속도 70,000 r/min에서 정격 출력 1kW와 정격 속도 78,000 r/min에서 정격 출력 300W를 가진다. 그림 1에서는 두 전동기의 전자계 구조를 보여주며 표 1에서 두 SRM의 예측된 사양을 보여준다.

두 SRM 모두 와전류 손실이 히스테리시스 손실보다 약 4배 큰 것을 알 수 있다. 출력 1,000[W]의 경우 손실 분포가 철손이 동손보다 약 36[W] 큰 반면, 출력 300[W]의 경우 동손과 철손 분포가 거의 동일한 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 손실 분포가 서로 다른 두 SRM에 설계 변경 없이 SMC 분말 코어로 변경하였을 때 동손과 철손 분포 변화 분석을 통해 효율 향상 가능 여부를 판단 후 SMC 분말의 장점인 자유로운 3차원 설계 적용 유무를 판단 하고자 한다.

## 2.2 전기강판과 SMC 분말 코어의 재질 특성

그림 2는 전기강판에 사용된 포스코사의 35PN440 코어와 SMC 분말 코어의 자계 세기와 자속밀도의 관계와 비투자율의 관계를 서로 비교하여 보여준다.

그림 2로부터 SMC 분말 코어는 낮은 비투자율 특성 때문에 1.0[T]의 자속밀도를 내기 위해서는 전기강판보다 10배 이상의

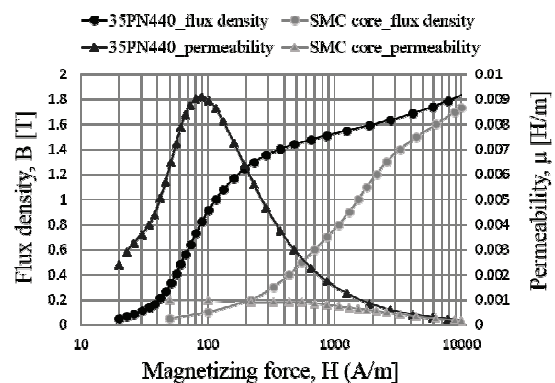


그림 2 35PN440과 SMC 분말 코어의 자속밀도와 상대 비투자율의 비교

Fig. 2 Comparison of flux density and permeability in each material

표 2 주파수별 철손 계수의 비교

Table 2 Comparison of core loss coefficient in terms of frequency

section		value	
철손 계수		$K_h$	$K_e$
200-800 Hz	35PN440	225.54	0.4787
	SMC	465.15	0.1857
4,000-5,000 Hz	35PN440	578.21	0.3570
	SMC	598.39	0.0736

자계세기가 필요한 것을 알 수 있다. 전동기 코어의 철손 계산을 위해서는 히스테리시스와 와전류 손실의 계수를 알아야 한다. 식 (1)은 일반적으로 사용되는 전동기의 철손 수식을 나타낸다.

$$W_c = W_H + W_E = (K_h B_m^2 f + K_e (B_m f)^2) \cdot m \quad (1)$$

여기서  $K_h$ 와  $K_e$ 는 히스테리시스 손실 계수와 와전류 손실 계수를,  $B_m$ 은 철심 내부의 최대 자속밀도,  $f$ 는 자속밀도의 주파수를,  $m$ 은 철판의 질량을 각각 나타낸다.

SMC 분말과 전기강판의 철손 특성 비교를 위해 200-800Hz의 저주파수 영역과 두 SRM의 정격속도인 4000-5000Hz에서 철손 계수를 계산하여 그 결과를 표 2에서 보여준다. 저주파 영역에서는 SMC 분말의 높은 히스테리시스 손실 특성 때문에 SMC 분말을 이용한 철손 저감이 어려운 것을 알 수 있다. 반면 두 SRM의 동작 주파수는 각각 4,667Hz와 5,200Hz 이므로 SMC를 이용한 철손 저감을 기대할 수 있다.

## 2.2 SMC 분말 코어의 사용에 따른 철손 특성 변화

SMC 분말 코어는 SMC 분말을 가압 성형하여 제작되기 때문에 자유로운 3차원 설계가 가능한 장점이 있으나 그 강도가 기존 전기 강판보다 떨어진다. 따라서, 본 논문에서는 두 SRM의

구조 변경 없이 기계적 부하와 직접 연결되는 회전자의 재질은 기존 전기강판으로 유지하고 고정자 재질만 SMC 분말 코어로 변경 하여 특성 변화를 분석하였다. 동일 출력에서 재질과 상관 없이 철심 내부의 최대 자속밀도와 자속밀도의 주파수, 철심의 질량은 동일하다고 가정하면, 고정자를 SMC 분말로 변경 시 히스테리시스 손실과 와전류 손실의 변화는 식 (1)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{W_{H,SMC}}{W_{H,steel}} = \frac{K_{h,smc} B_{m,smc}^2 f_{smc} m_{smc}}{K_{h,steel} B_{m,steel}^2 f_{steel} m_{steel}} = \frac{K_{h,smc}}{K_{h,steel}} = \alpha_h \quad (2)$$

$$\frac{W_{E,SMC}}{W_{E,steel}} = \frac{K_{e,smc} B_{m,smc}^2 f_{smc}^2 m_{smc}}{K_{e,steel} B_{m,steel}^2 f_{steel}^2 m_{steel}} = \frac{K_{e,smc}}{K_{e,steel}} = \alpha_e \quad (3)$$

표 2와 식 (2), (3)으로부터 히스테리시스 손실 비  $\alpha_h$ 는 1.03 이고 와전류 손실 비  $\alpha_e$ 는 0.206로 각각 계산할 수 있다. 따라서, 고정자 재질을 전기 강판에서 SMC 분말로 변경하면 히스테리시스 손실 특성은 동등 수준을 유지하고 와전류 손실 특성이 약 80% 감소하여 철손 저감이 가능 한 것을 알 수 있다.

#### 2.4 SMC 분말 코어의 사용에 따른 동손 특성 변화

구조 변경 없이 SMC 분말로 고정자 재질만 변경하였기 때문에 두 SRM의 권선 저항의 변화는 없으며 동손 특성 변화는 최대 자속밀도  $B_m$  으로부터 예측이 가능하다. 동일 출력에서  $B_m$  의 크기는 동일하므로

$$\frac{B_{m,SMC}}{B_{m,steel}} = \frac{\mu_{smc} I_{smc} N/l}{\mu_{steel} I_{steel} N/l} = \frac{\mu_{smc} I_{smc}}{\mu_{steel} I_{steel}} = 1.0 \quad (4)$$

$$I_{smc} = \frac{\mu_{steel}}{\mu_{smc}} I_{steel} = \beta_\mu I_{steel} \quad (5)$$

여기서  $\beta_\mu$ 는 전기 강판에서 SMC 분말로 재질 변경에 대한 투자율 비이다.

그림 2의 데이터를 식 (5)에 적용하여  $\beta_\mu$ 를 계산할 수 있다. 정격 출력 1,000[W]의 경우 자속밀도  $B_m$ 이 1.85[T]로 설계 되어 있으므로 투자율 비  $\beta_\mu$ 는 1.08이 되며, 정격 출력 300[W]의 경우  $B_m$ 이 1.8[T]로 설계되어 투자율 비  $\beta_\mu$ 는 1.13이 된다. 결과로부터 기존 전기 강판을 SMC 분말로 변경 시 SMC 분말의 단점인 낮은 투자율 특성 때문에 동일 출력을 내기 위해서 상 전류 크기가 각각 8%와 13%가 증가되어야 하는 것을 알 수 있다. 이는 전동기의 동손을 상승시키므로 SMC 분말을 사용 시 동손 저감 방법이 고려되어야 한다.

#### 2.5 효율 특성 비교

고정자 코어 재질을 전기강판에서 SMC 분말로 변경에 따른

표 3 SMC 분말적용에 따른 두 SRM의 효율 변화 예측

Table 3 Calculated efficiency by  $\alpha_h$ ,  $\alpha_e$  and  $\beta_\mu$

section		unit	value			
version			case I		case II	
재질 정보	고정자	-	35PN 440	SMC	35PN 440	SMC
	회전자	-	35PN 440	35PN 440	35PN 440	35PN 440
동 손		W	40.2	46.9	29.0	37.0
		%	3.4	4.0	7.5	9.7
고정자 철손	히스테리시스 손실	W	12.4	12.8	5.2	5.4
		%	1.0	1.1	1.3	1.4
	와전류 손실	W	38.8	8.0	17.1	3.5
		%	3.3	0.7	4.4	0.9
회전자 철손		W	24.9	24.9	6.8	6.8
		%	2.1	2.1	1.8	1.8
기계손		W	20.0	20.0	20.0	20.0
		%	1.7	1.7	5.2	2.3
효 율		%	88.6	90.4	79.7	80.9

동손과 철손 특성으로부터 동일 출력에서의 두 SRM의 효율 변화 예측이 가능하며 그 결과를 표 3에서 보여준다.

Case I의 정격 출력 1,000[W]의 경우 SMC 분말 고정자 사용으로 동손이 0.6% 상승하지만 고정자에서 2.5%의 철손 저감으로 약 1.8%의 효율 상승을 기대할 수 있다. 반면, Case II의 정격 출력 300[W]의 경우 고정자에서 3.4%의 철손 저감이 발생하지만 2.2%의 동손이 증가하여 약 1.2%의 효율 상승을 기대할 수 있다. 이는 동손 보다 철손 특성이 약 3%큰 Case I의 경우 동손 증가율이 작은 반면, 동손과 철손 특성이 상이한 Case II의 경우 동손 증가율이 철손 저감율과 비슷하기 때문에 효율 상승 폭이 작기 때문이다. 따라서, SMC 분말 고정자를 이용한 Case II의 효율 상승을 위해서는 동손 특성 저감을 위한 설계 변경이 필요하다.

### 3. SMC 분말을 이용한 3차원 구조 고정자 설계

Case II의 동손 특성 저감을 위해 3차원 설계가 가능한 SMC의 장점을 이용하여 고정자 구조를 변경하였으며 그 구조를 그림 3에서 보여준다.

동손 특성을 개선하기 위한 방법으로 권선 저항의 감소와 릴럭턴스 개선을 통한 방법을 이용하였다. 권선 저항을 줄이기 위해 고정자 외경 크기와 자속 통로의 단면적을 유지한 채 고정자 요크 부분의 높이를 적층 길이 방향으로 증가시켜 권선 공간을 약 3% 개선을 하였다. 전류 저감을 위한 방법으로 회전자와 고정자 폴 끝단의 오버행은 요크와 같은 높이로 주어 공극 릴럭턴스 개선을 하였다. 고정자 폴 끝단의 돌출로 권선 고정을 위한 별도의 구조물이 필요하지 않으므로 점적율을 올릴 수 있는 이점이 있다. 표 4에서는 기존 2차원 설계에서 3차원 설계로 변경된 구조의 상세 치수를 보여준다.

표 4 3차원 구조로의 설계 변경

Table 4 Design modification for 3-D structure

symbol	dimension	unit	2-D structure	3-D structure
$l_y$	고정자 요크 길이	mm	-	25.0
$l_{sp}$	고정자 극 길이	mm	12.0	12.0
$l_{st}$	고정자 치 길이	mm	-	25.0
$l_r$	회전자 극 길이	mm	12.0	25.0
$w_{rp}$	회전자 극 너비	mm	6.9	6.90
$w_{st}$	고정자 치 너비	mm	-	1.5
$w_{sp}$	고정자 극 너비	mm	9.0	9.0
$w_y$	고정자 요크 너비	mm	-	2.3
$A_c$	슬롯 넓이	mm <sup>2</sup>	34.5	35.5

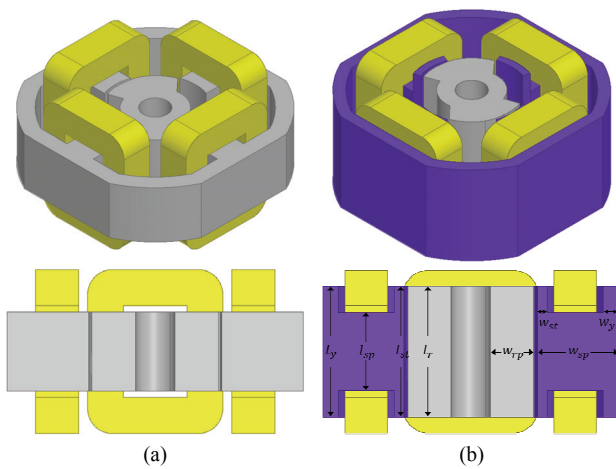


그림 3 4/2 SRM의 SMC 코어 유무에 따른 2D와 3D 구조

Fig. 3 Configuration of two-phase 4/2 SRMs, (a) in case of laminated stator core, (b) in case of SMC stator core.

#### 4. 동 특성 해석 결과

표 5는 두 SRM의 각각의 정격 출력에서의 동특성 시뮬레이션 결과를 요약하여 보여준다. 설계 변경 없이 고정자 코어를 전기강판에서 SMC 분말로 변경 한 경우 전기강판과 SMC 분말의 철손 변화 비  $a_h$ ,  $a_c$ 와 투자율 변화 비  $\beta_\mu$ 를 이용한 예측 효율과 유사한 값이 나오는 것을 확인할 수 있다. Case I의 경우 계산과 동일한 효율이 나오며 Case II의 경우 출력 차이에 따른 오차 때문에 0.3%의 효율 오차가 나는 것을 알 수 있다. 결과로부터 철손 변화 비와 투자율 변화 비를 이용하면 전동기의 설계 변경 없이 재질만 SMC 분말로 적용할 때 효율 변화를 쉽게 예측 가능한 것을 알 수 있다. 또한, 예측된 효율 비교로부터 더 높은 효율 상승이 필요한 경우 SMC 분말의 3차원 설계를 이용하여 SMC 분말의 낮은 투자율에 의한 동손 저감 특성을 개선할 수 있는 것을 확인하였다. Case II의 사례로부터 SMC 분말 고정자 코어의 3차원 설계는 재질 변경만한 설계와 달리 동손과 철손

표 5 SMC 분말과 3차원 구조 유무에 따른 효율 비교

Table 5 Performance comparison in terms of using material and 3D structure

section		unit	value				
version		-	case I		case II		
코어 구조		-	2D	2D	2D	2D	2D
코어 재질	고정자	-	35PN 440	SMC	35PN 440	SMC	SMC
	회전자	-	35PN 440	35PN 440	35PN 440	35PN 440	35PN 440
정격 속도		r/min	70,000		78,000		
평균 토크		Nm	0.144	0.145	0.038	0.037	0.038
출력		W	1054.1	1060.0	307.1	300.6	307.1
상 전류		A,rms	4.099	4.484	10.864	12.370	11.596
상 저항		ohm	1.197	1.197	0.123	0.123	0.095
동손		W	40.2	48.1	29.0	37.6	25.6
고정자 철손	히스테리시스 손실	%	3.4	4.1	7.5	10.1	7.0
		W	12.4	12.6	5.2	5.1	6.2
	와전류 손실	%	1.0	1.1	1.3	1.4	1.7
		W	38.8	7.4	17.1	3.1	3.7
회전자 철손	W		24.9	25.0	6.8	6.5	5.4
	%		2.1	2.1	1.8	1.7	1.4
기계손	W		20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
	%		1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
효율		%	88.6	90.4	79.7	80.6	83.5

모두 저감 효과가 있었으며 각각 0.5%, 3.5%의 저감이 발생하여 약 3.8%의 효율 상승이 된다.

#### 5. 결 론

본 논문은 손실 분포가 서로 다른 2가지 타입의 2상 4/2 SRM에 SMC 분말 코어가 미치는 효율 변화에 대한 연구를 진행하였다. SMC 분말의 효과를 분석하기 위해서 고정자의 설계 변경 없이 전기강판에서 SMC 분말 코어로의 변경을 하였다. 손실 특성의 변화를 SMC 분말과 전기강판과의 철손 계수와 투자율 비를 사용 하여 계산하였으며, 해석 결과와 일치하는 것을 확인하였다. 결과로부터 동손 보다 철손이 큰 경우 SMC 분말 고정자 코어 사용만으로 약 1.8%의 효율 상승이 있었으며, 동손과 철손의 크기가 유사한 경우 약 0.9%의 미미한 효율 증가만 일어났다. 동손과 철손 크기가 동일한 경우 SMC 분말의 3차원 고정자를 사용하여 동손과 철손 모두 저감할 수 있으며 3.8%의 높은 효율 상승이 발생하는 것을 확인하였다. 결론적으로 본 논문은 SMC 분말을 이용한 효율 개선을 목적으로 할 때, 전기강판에서 SMC 분말로 재질 변화만으로 충분한 것인지 아니면 손실 패턴에 따라 3차원 설계 변경이 필요한지를 판단하기 위한 기준을 제안하였다.

### 감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

### References

- [1] G. Eason, B. Noble, and I. N. Sneddon, "On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions," Phil. Trans. Roy. Soc. London, vol. A247, pp. 529-551, Apr. 1955.
- [2] J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp. 68-73.
- [3] I. S. Jacobs and C. P. Bean, "Fine particles, thin films and exchange anisotropy," in Magnetism, vol. III, G. T. Rado and H. Suhl, Eds. New York: Academic, 1963, pp. 271-350.
- [4] T. L. Gilbert, Formulation, Foundations and Applications of the Phenomenological Theory of Ferromagnetism, Ph.D. dissertation, Illinois Inst. Tech., Chicago, IL, 1956, unpublished.
- [5] D. P. Arnold, "Review of microscale magnetic power generation," submitted for publication.
- [6] S. O. Demokritov and V. E. Demidov, "Micro-Brillouin light scattering spectroscopy of magnetic nanostructures," IEEE Trans. Magn., to be published.
- [7] C. J. Kaufman, Rocky Mountain Research Laboratories, Boulder, CO, private communication, 2004.
- [8] Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, "Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface," IEEE Transl. J. Magn. Jpn., vol. 2, pp. 740-741, August 1987 [Dig. 9th Annual Conf. Magn. Jpn., p. 301, 1982].
- [9] M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.

### 저 자 소 개



#### 이 치 우 (Cheewoo Lee)

1972년 10월 14일생. 1996년 부산대 전기공학과 졸업. 1998년 동대학 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년 Virginia Tech 전기공학과 대학원 졸업(박사). 1998~2003년 LG Electronics 선임연구원. 2010년 1월~2010년 5월 Ramu Inc(USA) senior engineer. 2010년 7월~2011년 2월 삼성전기 중앙연구소 책임연구원. 2011년 3월~2014년 2월 경성대학교 조교수. 2014년 ~현재 부산대학교 전기공학과 부교수.

Tel : 051-510-7377

E-mail : cwlee1014@pusan.ac.kr