

<https://doi.org/10.7236/IIIBC.2017.17.1.213>

IIIBC 2017-1-28

발전소에서 활선 고전력 케이블의 운전 부하전류에 따른 도체 및 피복표면의 온도 분석

Examination of Conductor and Sheath Temperatures Dependent on the Load Currents through High-Power Live Cables at a Power Station

엄기홍*

Kee-Hong Um*

요약 발전소에서 전기를 생산 및 공급하기 위하여 고전압 전력 시스템이 동작하고 있다. 고전압 시스템은 저전압 시스템과 비교하여 구조가 복잡하고, 규모가 크고, 가격이 비쌌 뿐만 아니라, 사고 발생시 저압 시스템을 포함하는 대부분의 설비들에 정전사고가 발생하여 막대한 경제적 손실을 초래한다. 설계부터 시공 및 관리를 더욱 철저히 해야 한다. 설치환경 및 사용 조건 부하량 등에 따라 차이가 있겠지만, 증설과정, 부적절한 설계 등으로 인하여 케이블의 단면적이 부족할 경우가 발생하며, 운전 전류에 의하여 초과된 허용온도는 케이블의 열화 상태를 초래한다. 우리는 케이블의 사고를 체계적으로 감시 및 예방하기 위한 측정 장비를 개발, 한국서부발전 주식회사(Korean Western Power Co. Ltd.)에 설치하여 활선 케이블을 진단하였다. 이 논문에서 우리는 케이블의 부하전류를 측정하고, 측정된 부하전류에 의한 온도 특성을 예측 연구한 결과를 제시한다. 이 온도 값을 해석하여 케이블의 열화에 미치는 영향을 예측할 수 있다.

Abstract High-voltage power systems operate in order to generate and transmit electric power at power stations. Compared to low-power systems, high-power systems are complex in structure, large-scale, and expensive. When high-power cable accidents occur, most facilities are incapacitated—including low-power systems—causing huge economic losses. Great care must therefore be taken in designing, installing and managing power systems. Although dependent on installation circumstances and usage conditions, in some cases the cross-sectional areas of cables fall short of the critical area due to the expansion of and improper design and installation of power facilities. In this situation, the exceeded ampacity (allowable current) above the critical value caused by the operating current initiates the deterioration processes of power cables. In order to systematically monitor power cables operating at power stations, we have developed the first device of its kind in Korea. In this paper, we present the analyzed characteristics of expected temperatures of cables based on the load current of high-voltage cables operating at Korean Western Power Co. Ltd. We can predict the lifetime of cables by analyzing the temperature obtained from our device.

Key Words : XLPE cable, High-voltage cable, Ampacity, Thermal resistance, Temperature sensor (TS), Cable sheath

*정회원, 한세대학교 IT학부(교신저자, 주저자)
접수일자 : 2016년 11월 14일, 수정완료 : 2016년 12월 18일
게재확정일자 : 2017년 2월 3일

Received: 14 November, 2016 / Revised: 18 December, 2016 /

Accepted: 3 February, 2017

*Corresponding Author: um@hansei.ac.kr

Dept. of Information Technology, Hansei University, Korea

I. 서 론

최근 우리나라의 1 년간 평균 전력소모량은 8,092 kWh 로서 1980년의 전력소모량에 비교하여 9배 만큼 증가한 바와 같이 전력 수요의 증가로 인하여 전력을 공급하기 위한 여건이 계속 악화되고 있는 추세이다^[1]. 전력 공급을 안정되게 하기 위해서는 발전소의 관련장비 들은 신뢰성 있게 동작해야 한다. 우리는 이 논문에서 화력 발전소의 터빈 발전기 부하 측에서 동작하고 있는 XLPE cable에서 발생하는 온도에 대하여 연구한 결과를 제시한다. 케이블 도체에 전류가 흐르면 도체, 절연체, 금속차폐층 등에서 열이 발생한다. 이때 발생하는 도체손 및 유전체손에 의한 열은 외부의 주변 공간으로 이동하게 된다. 발생한 열은 케이블의 기계적 및 전기적인 특성을 변화시킨다. 온도증가에 의하여 재료의 분자들은 운동에너지가 증가하고 분자 구조 내부의 화학반응을 일으키고, 재료의 분자 구조를 변형시켜서 노화를 가져온다^[2]. 이러한 반응이 진행되면, 케이블의 열화가 진행되어 결국 사고가 발생한다. 케이블의 손상 속도는 아레니우스 방정식에 의하여 구할 수 있다.

II. 전력 Cable 의 허용전류 계산 검토

케이블에 전류가 흐르면 줄(Joule)의 법칙에 의하여 열이 발생하여 온도가 상승하게 되는데, 이 온도를 부하 전류에 의한 온도 상승값이라 한다. 발열과 방열이 평형이 되는 순간까지는 케이블에 영향을 주지 않지만, 과부하가 걸리거나 케이블 시스템이 비정상적으로 동작할 경우에는 발열값이 더 크게 되어 정전에 의한 화재가 발생한다. 발생하는 열은

$$P=I^2 R \text{ (W)} \quad (1)$$

로 주어 진다. 식 (1)에서

P =발열(W), R = 접촉저항(Ω), I = 부하 전류(A) 이다^[3]. 도선에 전류를 흐르게 하면 전기저항 때문에 발열해서 전선재료가 약화되거나, 케이블의 피복 재료가 변질되어 절연 성능이 열화(劣化)할 우려가 있으므로 안전전류를 지켜야 한다. 그러나, 단면적이 같다고 할지라도 나선(裸線)이나 피복선이나에 따라 허용전류가 달라진다. 발전소에서 동작 중인 고전압 6.6 kV 케이블은 도체의 전기적인 분리를 유지하기 위하여 XLPE 절연체를 사용하고 있다. XLPE 절연체의 허용온도는 상시에 90℃

이다. 그림 1 은 케이블 도체에서 발생한 열이 케이블 외부로 방사하는 현상을 나타낸다. 케이블 내부에서 발생한 열은 절연체, 피복, 토양 등을 통과하며 발산되는데 열이 발산하는 정도의 재료에 따라 각각 다르게 된다. 이때 열이 전달되는 정도를 열저항(thermal resistance)이라는 개념으로 표현한다. 즉 열저항이 크다는 것은 열이 잘 빠져나가지 않는다는 말이다.

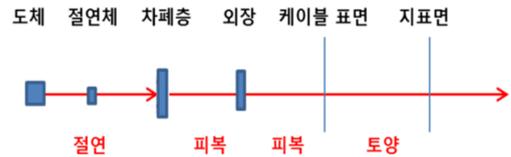


그림 1. 케이블 도체에서 열이 방사하는 형태

Fig. 1. Temperature sensors installed at cables

국제전기표준회의(International Electrotechnical Commission) IEC 60287-1-3-2009 에 의한 “케이블의 연속적인 허용전류 계산”은 케이블의 허용전류를 결정하기 위하여 사용하는 절치와 방정식을 정의하는 국제표준이다^[4]. 전류가 흐르는 케이블 도체에 의하여 도체, 절연체, 금속차폐층 등에서 열이 발생한다. 이 열은 케이블 내부에서 밖으로 빠져나가며 전체적으로 안정된 균형 즉 열평형상태(thermal equilibrium) 을 이루게 된다. 이때 절연체가 그 특성을 유지할 수 있는 온도 이하가 되는 전류를 허용전류 (current carrying capacity, ampacity, current-rating, allowable current)라고 한다. 단위는 암페어(A)이다. 즉, 케이블 도체의 단면적에 대하여 안전하게 흐르는 전류이므로 한도를 안전전류라고도 한다^[5,6]. 허용전류는 상시허용전류 및 과도시 허용전류로 구분된다. 상시 허용전류는 케이블 수명기간 중 그 전류를 계속 흘려도 케이블에 이상이 없는 전류를 말하며 과도시 허용전류는 단시간 동안 필요에 의하여 상시 허용전류보다 많이 흘렸을 경우 케이블에 이상이 없는 전류를 말한다. 정상상태란 케이블 도체에 흐르는 전류가 최대 허용치로 무한히 흐르는 경우를 말한다. 정상상태에서는 100%부하율을 가정하여 열용량에 의한 온도 특성을 고려하지 않고 그림 2와 같이 전기회로에서 콘덴서와 유사한 작용을 하는 열용량에 의한 과도 특성을 고려하지 않고 열저항만으로 이루어진 모델을 사용한다^[7].

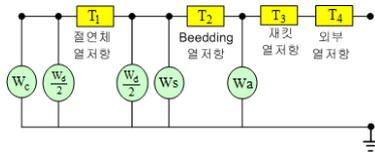


그림 2. 정상상태에서 동작하는 지중송전 케이블의 열모델
 Fig. 2. Thermal model of underground cable operating in steady state

여기서,

W_c = 도체의 발열량 (W/m), W_d = 유전체 손실 (W/m)

W_s = 시스 손실 (W/m), W_a = 아머 손실 (W/m)

$T_1 \sim T_4$ = 케이블 각 층의 열저항 (K·m/W)

이다. 정상상태에서 동작하고 있는 케이블의 열모델은 100% 부하율을 가정하기 때문에 지중 송전 케이블이 무한 시간 동안 최악의 조건을 가정하여 흘릴 수 있는 최대 전류 계산 시에 사용한다. 이 경우 케이블의 상시허용 전류는 IEC 60287 에 의하여 다음 식 으로 계산한다^[8,9].

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d [0.5 T_1 + n(T_1 + T_3 + T_4)]}{R[T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_2 + T_4)]}} \quad (2)$$

식 (2)에서

$\Delta\theta$ = 도체온도의 상승분 (T-20)

R = 최고허용온도에서의 도체의 교류저항 (Ω /m)

W_d = 유전체 손실 (W/m)

T_1 = 도체-금속차폐층간의 열저항 (K·m/W)

T_2 = 금속차폐층-외장 사이의 열저항 (K·m/W)

T_3 = 케이블 최외층의 열저항 (K·m/W)

T_4 = 토양열저항 (K·m/W)

n = 한 케이블 내의 도체 수(같은 전류가 흐르는 도체 수)

λ_1 = 도체 열손실에 대한 차폐층 열손실의 비율

λ_2 = 도체 열손실에 대한 외장층 열손실의 비율을 각각 나타낸다.

III. 활선 6.9kV Cable 온도 측정장치

그림3 은 한국서부발전(주)에서 동작 중에 있는 케이블의 피복(jacket) 표면온도를 측정하기 위하여 우리가 제작하여 설치한 온도센서 (temperature sensor, TS)의

실제 모양을 나타낸다^[10]. 온도센서는 온도의 변화에 응답하는 센서로 온도변화를 감지하여 온도 관리를 자동화 하는데 이용된다. 온도센서는 열을 감지하여 전기신호를 내는 센서로 일반적으로 접촉식과 비접촉식으로 나누어진다. 접촉식은 실제 측정 대상에 직접 접촉시켜서 온도 값을 측정하는 방식이며 비접촉식은 물체로부터 방사되는 열선을 측정하는 방법이다. 우리는 후자의 비접촉식 온도센서를 채택하였다. 온도센서는 온도가 높아지면 저항값이 감소하는 부저항온도 계수의 특성이 있는 전자회로용 소자로, 열용량이 작아서 미세한 온도 변화에도 급격한 저항 변화가 생기므로 온도 제어용 센서로 많이 이용된다.

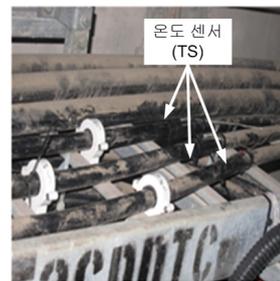


그림 3. 케이블에 설치한 온도센서

Fig. 3. Temperature sensors installed at cables

IV. 부하전류 및 주위온도에 따른

도체온도 및 피복표면온도 예측검토

우리가 한국서부발전(주)에서 연구 대상으로 선택한 케이블들은 6.6kV CV 100SQ, 1C이다. 이 논문에서는 이러한 케이블들의 전류를 예측 및 실측하였다. 6.6kV CV 100SQ, 1C 케이블의 경우 다음의 특성을 가짐을 확인하였다.

- (1) S=2D 포설과 트레이 포설과 주위온도40 ° C 조건에서 사용할 수 있는 최대 허용전류는 약350A 정도이다.
- (2) S=D포설조건과 주위온도30 ° C 조건에서도 최대 허용전류는 약 330A 정도 이다.
- (3) 다른 포설 및 사용조건이 변경되고 안전율을 고려한 최대 약조건이라고 하여도 200A 이상 사용하는 데는 문제가 없을 것이다.
- (4) 한국서부발전(주)의 연구대상 케이블에서는 현재 사용하고 있는 최대 운전부하전류는 60A 정도이다.

따라서, 케이블에 흐르는 운전 부하전류는 10A ~ 100A 에서 사용하는 조건으로, 케이블이 포설된 주위온도는 10°C ~ 40°C 조건으로 부하전류 및 주위온도 변화에 따른 케이블 도체온도와 케이블 피복표면온도를 예측하여 보았다. 표 1에 예측된 결과이다. 표1 은 주위온도 $T_a = 40^\circ\text{C}$ 에서의 부하전류 및 주위온도에 따른 케이블 도체온도와 피복표면 온도를 식(2)을 사용하여 예측한 결과이다.

표 1. 주위온도 $T_a = 40^\circ\text{C}$ 에서의 케이블 피복표면온도
Table 1. Temperatures of cable sheath at the ambient temperature of $T_a = 40^\circ\text{C}$

부하 전류 (A)	10	20	30	40	50
도체 온도 (T_C)	40.13	40.4	40.77	41.24	41.78
표면 온도 (T_S)	40.11	40.33	40.64	41.03	41.48
온도차 1($T_C - T_S$)	0.02	0.07	0.13	0.21	0.3
온도차 2($T_S - T_a$)	0.11	0.33	0.64	1.03	1.48

부하 전류 (A)	60	70	80	90	100
도체 온도 (T_C)	42.42	43.11	43.89	44.73	45.65
표면 온도 (T_S)	42.01	42.58	43.23	43.93	44.69
온도차 1($T_C - T_S$)	0.41	0.53	0.66	0.8	0.96
온도차 2($T_S - T_a$)	2.01	2.58	3.23	3.93	4.69

표2 는 주위온도 $T_a = 30^\circ\text{C}$ 에서의 부하전류 및 주위온도에 따른 케이블 도체온도와 피복표면온도를 식(2)을 사용하여 예측한 결과이다.

표 2. 주위온도 $T_a = 30^\circ\text{C}$ 에서의 케이블 피복표면온도
Table 2. Temperatures of cable sheath at the ambient temperature of $T_a = 30^\circ\text{C}$

부하 전류 (A)	10	20	30	40	50
도체 온도 (T_C)	30.13	30.39	40.77	41.24	41.78
표면 온도 (T_S)	40.11	40.33	40.64	41.03	41.48
온도차 1($T_C - T_S$)	0.02	0.07	0.13	0.21	0.3
온도차 2($T_S - T_a$)	0.11	0.33	0.64	1.03	1.48

부하 전류 (A)	60	70	80	90	100
도체 온도 (T_C)	32.34	33.02	33.77	34.59	35.48
표면 온도 (T_S)	31.94	32.51	33.13	33.81	34.55
온도차 1($T_C - T_S$)	0.4	0.51	0.64	0.78	0.93
온도차 2($T_S - T_a$)	1.94	2.51	3.13	3.81	4.55

표3은 주위온도 $T_a = 20^\circ\text{C}$ 에서의 부하전류 및 주위온도에 따른 케이블 도체온도와 피복표면온도를 식(2)을 사용하여 예측한 결과이다.

표 3. 주위온도 $T_a = 20^\circ\text{C}$ 에서의 케이블 피복표면온도
Table 3. Temperatures of cable sheath at the ambient temperature of $T_a = 20^\circ\text{C}$

부하전류	10A	20A	30A	40A	50A
도체 온도 (T_C)	20.12	20.38	20.73	21.16	21.68
표면 온도 (T_S)	20.1	20.32	20.61	20.96	21.39
온도차 1($T_C - T_S$)	0.02	0.06	0.12	0.2	0.29
온도차 2($T_S - T_a$)	0.1	0.32	0.61	0.96	1.39

부하전류	60A	70A	80A	90A	100A
도체 온도 (T_C)	22.27	22.93	23.66	24.45	25.31
표면 온도 (T_S)	21.88	22.43	23.04	23.69	24.41
온도차 1($T_C - T_S$)	0.39	0.5	0.62	0.76	0.9
온도차 2($T_S - T_a$)	1.88	2.43	3.04	3.69	4.41

표4 는 주위온도 $T_a = 10^\circ\text{C}$ 에서의 부하전류 및 주위온도에 따른 케이블 도체온도와 피복표면온도를 식(2)을 사용하여 예측한 결과이다.

표 4. 주위온도 $T_a = 10^\circ\text{C}$ 에서의 케이블 피복표면온도
Table 4. Temperatures of cable sheath at the ambient temperature of $T_a = 10^\circ\text{C}$

부하전류	10A	20A	30A	40A	50A
도체 온도 (T_C)	10.12	10.36	10.7	11.13	11.62
표면 온도 (T_S)	10.1	10.3	10.58	10.94	11.35
온도차 1($T_C - T_S$)	0.02	0.06	0.12	0.19	0.27
온도차 2($T_S - T_a$)	0.1	0.3	0.58	0.94	1.35

부하전류	60A	70A	80A	90A	100A
도체 온도 (T_C)	12.2	12.84	13.54	14.31	15.14
표면 온도 (T_S)	11.83	12.36	12.94	13.58	14.27
온도차 1($T_C - T_S$)	0.37	0.48	0.6	0.73	0.87
온도차 2($T_S - T_a$)	1.83	2.36	2.94	3.58	4.27

상기의 표 1-4 의 data를 보면 연구대상의 6.6kV CV 100SQ, 1C에 대하여 다음 사실을 확인할 수 있다.

- (1) 흐르는 최대 운전부하전류 60A의 값에서 케이블 피복표면온도는 $11.83^\circ\text{C} \sim 42.01^\circ\text{C}$ 이다.
- (2) 케이블 도체온도는 $12.2^\circ\text{C} \sim 42.42^\circ\text{C}$ 이다.
- (3) 또한 주위온도에 대한 케이블 피복표면온도는 주위온도보다 $1.83^\circ\text{C} \sim 2.01^\circ\text{C}$ 상승한다.
- (4) 케이블 도체온도는 케이블 피복표면온도보다 $0.37^\circ\text{C} \sim 0.41^\circ\text{C}$ 상승하고 있다.
- (5) 즉, 6kV CV 100SQ, 단심케이블이 트레이에 포설된 조건에서 60A의 운전 부하전류가 흐르면 예측되는 최대값의 케이블 도체온도는 주위온도 + 2.45°C 이다.

1. Cable 도체의 온도

그림 4는 주위온도 40℃, 30℃, 20℃, 10℃의 CASE별로 부하전류가 10A부터 100A까지 10A씩 증가시킬 때 부하전류 및 주위온도에 따른 케이블 도체온도의 예측치 그래프이다.

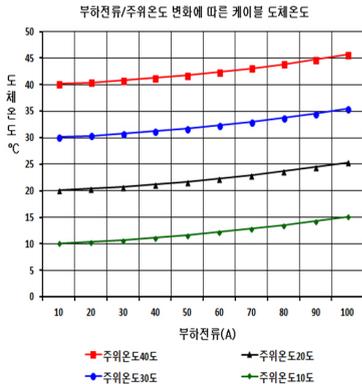


그림 4. 부하전류/주위온도 변화에 따른 케이블 도체온도
 Fig. 4. Temperatures of cable conductor vs. load currents and ambient temperatures

그림에 의하면, 주위온도 40℃에서 부하전류를 100A 사용하더라도 케이블 도체온도는 약46℃이고 XLPE 절연체의 허용온도 90℃의 약1/2정도이다. 그리고 현재 실제 사용되고 있는 최대 부하전류인 60A를 적용하면 도체온도는 약42℃ 정도이고, IEC에서 표준으로 사용하는 주위온도30℃에서 부하전류 60A인 경우에는 예상되는 케이블 피복온도는 약32℃이고 XLPE절연체의 허용온도90℃의 약1/3정도이므로, 부하전류에 의해 발생하는 온도에 의한 열열화는 무시할 수 있을 것으로 추정된다.

2. Cable 피복 표면의 온도

주위온도 40℃, 30℃, 20℃, 10℃의 CASE별로 부하전류가 10A부터 100A까지 10A씩 증가시킬 때 부하전류 및 주위온도에 따른 케이블 피복표면온도의 추정치는 그림5와 같다.

그림에서 주위온도 40℃에서 부하전류를 100A사용하더라도 케이블 피복표면온도는 약44℃이고, 현재 실제 사용되고 있는 최대 부하전류인 60A를 적용하면 케이블 피복온도는 약42℃정도밖에 안되고, IEC에서 표준으로 사용하는 주위온도30℃에서 부하전류60A인 경우에는 예상되는 도체온도는 약32℃이고 CV케이블의 외피 피복이 비닐재질의 허용온도60℃의 약1/2정도이므로, 부하전류

에 의해 발생하는 온도에 의해 케이블 외피층의 열열화도 무시할 수 있을 것으로 추정된다.

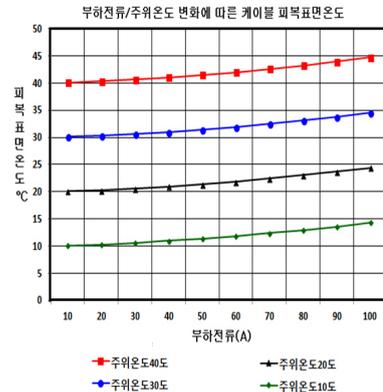


그림 5. 부하전류/주위온도 변화에 따른 케이블 피복표면온도
 Fig. 5. Temperatures of sheath surfaces vs. load currents and ambient temperatures

V. 결 론

우리는 발전소에서 운전 중인 케이블의 사고를 체계적으로 감시 및 예방하기 위하여 측정 장비를 개발하였다. 이 논문에서 한국서부발전 주식회사(Korean Western Power Co. Ltd.)에 설치하여 운영 중에 있는 케이블의 허용 전류에 의한 온도 특성을 연구한 결과를 제시하였다. 이 온도값을 해석하여 케이블의 열화에 미치는 영향을 예측할 수 있었으며, 그 결과 실제 연구대상 케이블에 흐르는 운전부하전류는 허용전류보다 매우 작게 흐르고 있어, 운전부하전류에 의해 발생하는 온도로 인한 케이블의 XLPE 재질의 절연체와 PVC재질의 외피층의 열열화도 무시할 수 있을 것으로 추정하였다.

References

- [1] J. S. Kim, K. H. Kim, J. S. Lee, "The Study on the Variable Orifice Spray of the Steam Power Plant Desuperheater," Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society(JKAIS), Vol. 14, No. 1, pp. 63-68, 2013.
- [2] J. H. Yun, S. H. Lim, "Effect of conductor temperature rise generated by load current on the

- cable life," Summer Conference KIEE, pp.1445-1447, July.21-23, 2003.
- [3] Y. K. Park, "Design and Application on the System of Load Current and Temperature Measurement for Degradation Monitoring in Power Cable," Masters Dissertation, Department of Information and Communication, Wonkwang University, 2014.
- [4] Electrical Installation Guide According to IEC eogkswjsrlguqghl, 2009
- [5] <http://www.cablesizer.com/iec/>
- [6] Y. W. Kang, M. J. Kim, T. I. Jang, J. W. Park, H. S. Park, J. W. Kang, "A Review Method of Calculation Results on Cable Ampacity using the Transformation to Electric Equivalent Circuit from Cable Thermal Circuit," KIEE, vol.65, no. 5, pp. 738-744, Apr. 2016.
- [7] S. H. Nam, S. K. Lee, J. Y. Hong, J. N. Kim, S. H. Jeong, "A Dynamic Rating System for Power Cables (I) - Real time CTM (Conductor Temperature Monitoring)," Trans. KIEE, Vol. 52A, No.7, July, 2003.
- [8] https://www.anixter.com/en_us/resources/literature/wire-wisdom/wire-and-cable-ampacity-ratings.html
- [9] IEC 60287-1-1, 2nd Ed. "Electric cables-/Calculation of the current rating-/Part 1-1 :current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses General", pp20-21, 2006-12
- [10] K. H. Um, K. W. Lee, "A Study on Lifetime Evaluation of High-power Cables Based on Temperature Changes," The Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol.15, no. 2, pp. 273-278, Apr. 2015.

저자 소개

엄기홍(정회원)



학력

- BS : 한양대학교 전자공학과
- MS : Dept. of Electrical & Computer Engineering, Polytechnic Institute of Engineering, NYU (New York University), New York, USA
- Ph.D : Dept. of Electrical & Computer Engineering, New Jersey Institute of Technology (NJIT), New Jersey, USA

경력

- TA, RA, and Lecturer at NJIT (New Jersey, USA)
 - Researcher at RS Microwave Company Inc. (New Jersey, USA)
 - Researcher at Physics Department, Princeton University (New Jersey, USA)
 - Adjunct Professor at NJIT (New Jersey, USA)
 - 강남대, 상명대, 한양대 강사
 - 현재 : 한세대학교 IT 학부 교수
- <주관심분야 : 안테나, 마이크로파, 전기전자재료>