

1. 서론

일반적으로 가시광 통신기술 (VLC, visible light communication)이란, LED (light emitting diode)를 광원으로 이용한 무선 광통신 기술을 지칭하는 말이다 <그림 1 참조>. 이 용어는 무선통신 공학자들의 입장에서 생성된 용어로서, 기존의 RF 대역을 사용하지 않고, 가시광 대역의 빛을 새로운 전달매체로 사용한 무선통신 기술이기 때문에 가시광 통신이라는 용어를 사용한 것이다. 하지만, 주로 광섬유를 전달매체로 사용하는 광통신 공학자들의 입장에서는 이 기술을 [LED 무선 광통신 기술]이라고 지칭하는 것이 이 기술을 명확히 지칭하는 용어가 될 것으로 판단된다. 이 기술은 2011년에 TED Global Talk 에서 영국의 Harald Haas

통신기술을 접근하는 방식에서 조금 차이를 보이는데, 무선통신에 기반을 둔 연구자들은 전기적인 변조방식을 이용한 성능개선에 집중하고, 광통신에 기반을 둔 연구자들은 광학적인 기법을 이용한 성능개선에 중점을 두고 있다. 또한, 무선 통신에 기반을 둔 연구자들은 표준의 중요성을 더 잘 알고 있기 때문에, 연구의 초점도 표준화 기술에 중점을 두는 연구자들이 많으며, 표준화 작업에도 좀 더 적극적인 행보를 보이고 있다.

이러한 LED 가시광 통신기술의 태동은 LED 소자의 발전 때문으로 보는 것이 적절하다. 기존의 형광등이나 백열등이 고효율, 무(無)수은, 긴 수명을 가지고 있는 LED 조명으로 대체되게 되면서, 이러한 LED 조명의 부가적인 기능에 주목하게 되었다. LED는 형광등이나 백열등과는 달리 반도체 소자로서, 빠른 스위칭

특집 ■ 광통신

무선 가시광 통신 기술

김성만*

교수의 강연으로 인해 LiFi 라는 용어로 한동안 이슈가 되기도 했다 (LiFi 는 기존의 무선랜 기술을 나타내는 용어인 WiFi 의 첫글자에 W 를 대신하여 Light 의 L 을 넣은 것이다) [1]. 본 고에서는 LED 가시광 통신기술이라는 용어로 사용하도록 하겠다.

이러한 LED 가시광 통신기술은 최근에 새롭게 개척된 분야로서, 이 분야를 연구하는 전문가들은 크게 무선통신에 기반을 둔 연구자들과 광통신에 기반을 둔 연구자들로 나눌 수 있다. 이들 두 집단은 LED 가시광

응답특성을 가지고 있다. 이를 이용하여 LED를 200 Hz 이상의 주파수로 변조를 하면 인간의 눈으로는 계속 조명이 켜져 있는 것으로 느껴지만, 실제로는 고속으로 깜빡이고 있으며, 이를 이용하여 통신신호를 전송할 수 있게 된다. 따라서, 이렇게 널리 보급되고 있는 LED 조명기술의 발전이 LED 가시광 통신기술이 주목을 받게 된 최초의 이유라고 할 수 있다. 하지만, 최근에는 이와 같은 최초의 이유에서 벗어나 통신의 성능을 높이기 위하여 조명용 LED가 아닌 통신전용의 LED를

* 경성대학교 전자공학과

무선 가시광 통신 기술

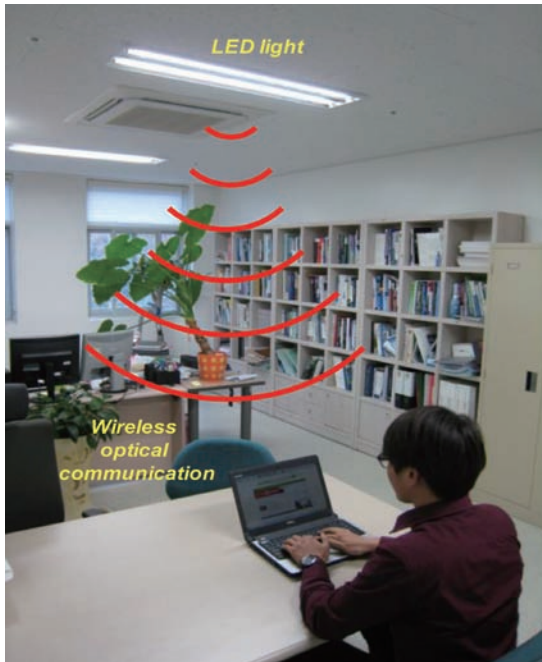


그림 1. LED 가시광 통신기술의 개념도

사용하거나, 레이저를 사용한 무선 광통신 기술 등도 많이 연구되고 있다. 하지만, 본 고에서는 LED를 광원으로 사용한 무선 광통신 기술로 논의를 제한하고자 한다.

2. LED 가시광 통신기술의 장단점

LED 가시광 통신기술은 기존의 무선 통신기술에 비해 아래와 같은 장점을 가지고 있다. 첫째, 가시광 대역은 RF 주파수 대역과는 달리 정부의 규제나 허가를 받을 필요가 없으며, 누구나 무료로 사용할 수 있다. 둘째, 가시광 대역은 주파수로 환산하면 약 400 THz 에 해당하는 엄청난 주파수 대역을 가지고 있어, 향후에 파장분할 다중방식(WDM, wavelength division multiplexing)등을 이용하면 통신성능의 발전 가능성이 무궁무진하다. 셋째, 가시광 빛은 얇은 벽으로도 쉽게 차단이 되므로, 각 방마다 통신보안을 쉽게 유지할 수 있다. 넷째, 가시광 빛은 눈으로 쉽게 볼 수 있으므로, 적어도 통신의 On/Off 상태 정도는 육안으로 쉽게 구별이 가능하다. 다섯째, 전자파 장애를 발생시키지

않아 병원이나 항공기와 같이 전자파 장애에 민감한 특수공간에서의 사용이 가능하다.

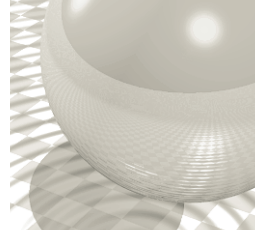
하지만, LED 가시광 통신기술은 아래와 같은 단점도 가지고 있다. 첫째, 빛의 특성상 LOS (line of sight) 경로로만 전송이 가능하다. 즉, 직진의 통신경로상에 장애물이 있거나 손으로 가리면 통신이 두절될 수 있다. 둘째, 태양빛이나 다른 조명에 의해 간섭을 받을 수 있다. 따라서, 이러한 단점을 잘 보완하여 기존의 WiFi 기술보다 월등한 성능을 보이거나, LED 무선 가시광 통신기술의 장점을 잘 부각한 응용분야를 만들어 낸다면, LED 가시광 통신기술이 널리 실용적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

3. LED 가시광 통신기술의 고려사항

가. LED 광원의 저(低)성능

LED 가시광 통신기술의 성능을 제한하는 가장 큰 요인은 LED 소자의 저성능이다. 광통신 공학자들의 입장에서 바라본다면, LED는 레이저에 비해 낮은 주파수 응답을 보이기 때문에 변조할 수 있는 전송속도가 제한된다. 특히, 조명용으로 사용되는 백색 LED의 경우는 통신용도로의 사용을 고려하지 않고 제작되기 때문에 주파수 응답이 통신용 LED에 비해서 더 낮은 값을 보인다. 광통신 공학자들의 입장에서 생각해 본다면, LED의 앞 단에 외부 변조기를 사용하여 성능을 향상시키고 싶은 욕망에 휩싸일 수도 있을 것이다.

조명용으로 널리 사용되는 백색 LED는 크게 두 가지 종류가 있다. 첫째는 RGB LED로서, 이는 적색(red), 녹색(green), 청색(blue)의 세가지 LED를 함께 집적하여 하나의 백색 LED를 구현한 것으로서, 이 LED는 조명용도보다는 디스플레이 용도로 주로 사용되고 있다. 두번째는 청색 LED에 노란색을 발광하는 인광체(phosphor)를 덮어서 백색을 구현한 방식으로, 저렴하게 백색 LED를 구현할 수 있어 가장 널리 사용되는 방식이다. 조명용으로 널리 사용되는 인광체 기반의 백색 LED를 사용하게 되면, 인광체에 의해 발현되는 빛들은 동작속도가 느리기 때문에 전체 LED의



응답속도를 떨어뜨리게 된다. 따라서, 일부 연구자들은 청색 필터를 사용하여 인광체에 의해 발현되는 빛의 스펙트럼을 막고, 순수한 청색 LED의 빛만을 수신하여 LED의 응답속도를 개선하는 방법을 사용하고 있다[2]. 또는, RGB LED를 사용하게 되면 인광체에 의해서 동작속도가 떨어지는 현상을 겪지 않아도 되고, 세 가지 색깔에 각기 다른 통신신호를 전송할 수 있으므로 일종의 3채널 WDM 통신채널을 만들 수 있다. 따라서, 일부 연구자들은 RGB LED를 사용하여 통신성능을 높이는 연구를 진행하기도 하였다[3].

광통신 공학자들의 입장에서 본다면, LED 대신 레이저를 사용하여 가시광 통신의 성능을 손쉽게 향상시키고 싶은 욕망이 드는 것은 당연하다. 따라서, 최근에는 레이저를 사용한 무선 가시광 통신기술을 발표하는 연구자들도 있다 [4]. 물론, 가시광 대역에 수많은 레이저를 WDM 채널로 묶어서 무선 가시광 통신을 구현한다면, 엄청난 용량의 전송용량을 구현할 수 있을 것이다. 하지만, 동조성(coherent)의 빛을 방출하는 레이저를 사용한 경우에는 눈에 해로울 수 있어 조명과 함께 인간이 직접 사용하기에는 다소 무리가 있을 것으로 판단된다. 이러한 기술은 기존의 LED 가시광 통신기술과는 다른 용도로 사용되는 기술로 보아야 할 것이다. 따라서, 본 고에서는 LED를 광원으로 사용한 무선 가시광 통신기술로만 논의를 제한하고자 한다.

나. 빛의 깜박거림 (Flicker) 방지 및 밝기 제어(Dimming)

가시광은 눈으로 보이기 때문에 LED 가시광 통신의 On/Off 를 눈으로 확인할 수 있다는 장점도 있지만, 반대로 눈의 안전이나 피로도를 고려하여야 하는 단점도 가지고 있다. 대표적으로 빛의 깜박거림(flicker)을 방지해야 하는 문제도 가지고 있다. 이는 국제 규격인 IEC 61000-3-3 에 정의되어 있으며, 빛의 강도가 시간에 따라 변화하거나 빛의 스펙트럼 분포가 시간에 따라 변화하는 것을 포함하고 있다[5]. 따라서, 인간이

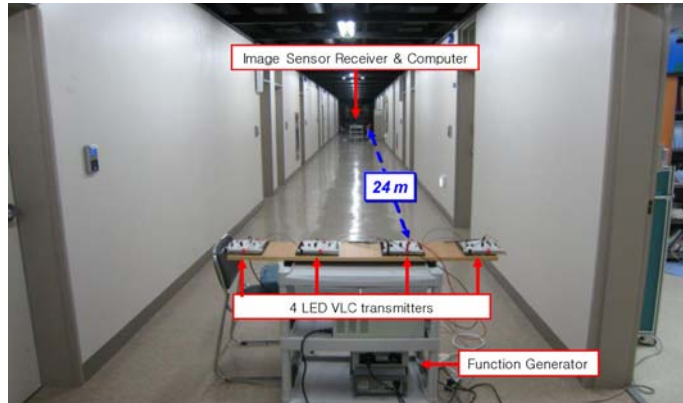


그림 2. 4×4 MIMO LED 가시광 통신 실험사진

느낄 수 있는 주파수 이하로 빛의 강도나 빛의 스펙트럼이 변화하도록 LED를 변조해서는 안될 것이다. IEC 에서 정한 기준은 10 분간의 short-term 시간에서의 변화량과 2 시간 동안의 long-term 변화량을 제한해 놓고 있다. 인간이 느낄 수 있는 깜박거림의 지표는 Flicker Fusion Threshold 로 정의해 놓고 있으며, 대부분의 사람은 75 Hz 보다 높은 주파수의 깜박거림은 대체적으로 인지하지 못하는 것으로 알려져 있다. 하지만, LED 가시광 통신 연구자들은 일반적으로 200 Hz 이상으로 변조하는 것을



그림 3. 광 빔포밍 기술의 개념도

무선 가시광 통신 기술

기준으로 삼고 있다.

하지만, 200 Hz 이상으로 신호를 변조하더라도, OOK (on-off keying) 으로 변조를 할 경우에는 0 과 1 의 데이터 비율조합에 의하여 빛의 세기가 변할 수 있다. 공학적으로 표현하자면, 0 과 1 의 데이터 조합에 따라 200 Hz 이하의 주파수 스펙트럼 성분이 나타날 수 있다. 따라서, 이러한 영향을 막기 위하여 맨체스터 코드 (Manchester Code) 를 사용하거나 Flicker 를 방지할 수 있는 부호화 (line coding) 방법을 사용하여야 할 것이다. LED 가시광 통신의 표준이라고 볼 수 있는 IEEE 802.15.7 에서는 현재 LED 가시광 통신 변조기술로 OOK (on-off keying), VPPM (variable pulse-position modulation), CSK (Color-shift keying) 의 세가지를 정의해 놓고 있으며, 각각의 경우에서 이러한 Flicker의 영향을 방지하기 위하여 부호화 방식이 설계되어 있다[6]. 향후에 개발되는 LED 가시광 통신시스템의 변조기술도 이러한 영향을 고려하여 설계되어야 할 것이다.

또한, LED 조명의 장점 중의 하나인 밝기제어 (Dimming) 기능이 가시광 통신을 수행하고 있는 중에도 동작할 수 있다면 더욱 좋을 것이다. 표준에서 정해놓은 변조방식 중에서 OOK 의 경우에는 신호의 진폭 자체를 변화시켜야 하며, CSK 의 경우에도 광원의 세기를 직접 변화시켜야 한다. 하지만, VPPM 의 경우에는 0 과 1 펄스의 폭을 조정하여 밝기제어를 할 수 있으며, 이것이 수많은 변조기술 중에서 VPPM 변조방식을 LED 가시광 통신의 표준 기술로 채택한 주요한 이유 중의 하나라고 할 수 있겠다.

4. 성능개선 연구

가. 전기적 변조기법을 이용한 성능개선 방법

현재 LED 가시광 통신이 가지고 있는 가장 큰 문제점은 기존의 무선랜 기술인 WiFi 에 비하여 성능이 앞서지 못하고 있다는 점이다. 현재 IEEE 802.15.7 표준에서 설계한 데이터의 최대 전송속도는 96 Mb/s에 불과하다. 이는 60 GHz 대역을 사용한 IEEE 802.11ad 표준의 최대 전송속도인 6.75 Gb/s 에 비해서는 한참

낮은 수준이며[7], 2.4 GHz 대역을 사용한 IEEE 802.11n 의 최대 전송속도인 150 Mb/s (4×4 MIMO (multiple input multiple output)를 사용할 경우에는 600 Mb/s)에도 미치지 못하고 있는 실정이다[8]. 따라서, IEEE 802.15.7 에서 제정한 가시광 통신 표준기술과는 관계없이 여러 연구자들은 다양한 전기적 변조기법을 이용하여 LED 가시광 통신의 성능을 높이고자 많은 노력을 하고 있으며, 대표적인 방법들을 열거하면 다음과 같다.

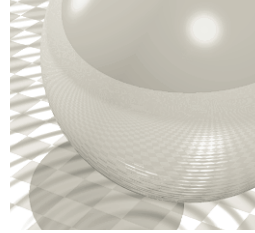
- (1) 등화기법(equalization)을 이용하여 LED의 주파수 대역폭을 넓히는 방법[2]
- (2) QAM(quadrature amplitude modulation) 변조기법을 이용하여 하나의 심볼에 여러 개의 이진 데이터를 전송하는 방법[9]
- (3) OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)을 이용하여 주파수의 효율성을 높이는 방법[9]

현재로서는 대부분의 방법이 이동통신에서 사용되었던 기술을 LED 가시광 통신에 접목하는 수준으로 이루어지고 있다. 하지만, 향후 추가적인 연구를 통해서 LED 가시광 통신에 맞는 새로운 기술이 나올 가능성도 있을 것이다.

나. 광학적 기법을 이용한 성능개선 방법

광통신에 뿌리를 두고 있는 많은 연구자들은 광학적 기법을 이용하여 LED 가시광 통신기술의 성능을 높이고자 하는 노력을 기울이고 있다. 이의 대표적인 방법들을 나열하면 다음과 같다.

- (1) 인광체를 사용한 백색 LED의 주파수 응답속도를 높이기 위해 수신단에 청색 필터를 사용하는 방법[2]
- (2) 여러 개의 LED 광원에 각기 다른 신호를 전송하고, 수신단에서 이미지 센서나 여러 개의 PD array 등을 이용하여 수신하는 일종의 MIMO 기법[10] <그림 2 참조>
- (3) RGB 의 3가지 색상으로 이루어진 LED를



사용하여 R, G, B 에 각기 다른 신호를 전송하는 일종의 WDM 방식 기술[3]

- (4) 각기 다른 편광에 다른 정보를 전송하는 편광 다중화 기법 (PDM, polarization division multiplexing)[11]
- (5) LED 빛을 원하는 목표물에 집광시키는 광 빔포밍(optical beamforming) 기술을 이용하여 신호의 SNR(signal-to-noise ratio)을 높이는 기법[12] <그림 3 참조>

이러한 전기적/광학적 기법들을 종합적으로 사용하여 최근에는 1 Gb/s 가 넘는 전송속도가 보고되고 있다[3]. 향후 WDM 방식을 경제적으로 사용하는 방법이 등장한다면, 전송속도는 크게 증가할 수 있으리라 생각된다.

5. 응용분야

LED 가시광 통신기술을 단순히 실내 통신용으로 사용하고자 하는 전통적인 목표를 넘어서 다양한 분야에서 응용하고자 하는 노력들이 많이 진행되고 있다. 특히, 최근에는 LED가 산업전반에 폭넓게 사용되다 보니, LED가 사용되는 모든 분야에서 가시광 통신기술을 이용하려는 연구가 엄청나게 증가하여 이를 일일이 모두 열거하기도 힘든 실정이다. 예를 들어, LED 가로등, LED 교통 신호등, LED 전광판, 선박용 LED, 차량용 LED, 식물 재배용 LED, 스마트폰 LED, LED TV 등 LED 를 사용하는 모든 기기 및 산업분야에서

표 1. LED 가시광 통신의 실외 응용시 문제점

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 1) 햇빛이라는 원천 간섭광이 존재 2) 눈, 비, 안개, 황사 등과 같은 기상요인에 의해 민감하게 영향을 받음 3) 길가의 각종 광고판, 신호등, 자동차 후방등과 같은 다른 간섭광들이 혼재함 4) 여러 방향에서 동시에 가시광 변조 신호가 들어올 경우 자신이 원하는 송신원을 구별하기가 힘들 5) 여러 장애물들로 인해 LOS 패스가 차단될 수 있음 6) 새똥이나 먼지 등으로 인해 광 송/수신기나 쉽게 더러워 질 수 있음 7) 고의로 방해광을 보내어도 처벌할 법적 규제가 마땅치 않음 |
|--|

LED 가시광 통신기술을 이용하려는 응용연구가 이루어지고 있다고 보면 된다.

그래도 대표적인 분야를 정리해보자면, GPS(global positioning system)를 사용할 수 없는 실내에서 저속의 통신속도로도 응용이 가능한 실내 측위 (indoor positioning) 분야에 대해서는 연구가 많이 진행된 편이다[13]. 또한, 자동차 전/후방 LED 등을 이용한 자동차간의 통신이나 자동차와 인프라간의 통신, LED 교통 신호등과 자동차간의 통신 등 자동차에 관련된 응용분야에서도 연구가 활발히 진행되고 있다[14]. LED 전광판을 이용한 광고 메시지 전송도 대표적인 응용분야 중 하나이다. 하지만, 가시광 통신기술을 실외에 응용했을 때에는 <표 1>과 같은 다수의 문제점이 발생하기 때문에, 이에 대한 고려가 필요할 것으로 생각된다. 따라서, 현재로서는 LED 가시광 통신의 목표를 실내응용으로 집중하여 연구를 진행함이 바람직하다고 필자는 판단하고 있다.

6. 맺음말

최근 필립스 사에서는 LED 조명을 이용한 스마트 조명 시스템인 Hue를 출시하였다[15]. 이는 사용자가 원하는 대로 LED 조명의 색깔과 밝기, 깜빡임 등을 시간과 상황에 따라 조절할 수 있는 스마트 조명 시스템이다. 이러한 스마트 조명 시스템에 LED 가시광 통신기술이 접목된다면, 단순히 조명을 원하는 대로 조절할 수 있을 뿐만 아니라 기존의 WiFi 를 대체할 수 있는 실내 통신 시스템도 함께 통합될 수 있을 것이다.

필자가 LED 가시광 통신 연구를 시작한 수년 전만 해도 LED 가시광 통신기술의 상용화에 대해서는 회의적인 시각이 많았으며, 필자 본인도 상용화에 대한 확신을 가지고 연구를 시작한 것은 아니었다. 물론, 아직도 LED 가시광 통신기술의 미래는 불확실하다. 하지만, 최근 수년간 LED 가시광 통신기술을 연구하는 연구자들의 수가 급속도로 증가하였으며, 사회적인 관심도 크게 증가하였다. 아마도 LED 가시광 통신기술의 성능이 한 단계 더 진보하고, LED 가시광 통신의 단점을 보완해 나간다면, 전자파 장애에 민감한 응용분야에서부터 조금씩 상용화가 가능하리라고 생각된다.

참고문헌

- [1] http://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb
- [2] Hoa Le Minh et al., "100-Mb/s NRZ visible light communications using a postequalized white LED," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 21, no. 15, pp. 1063-1065, Aug. 2009.
- [3] Wang Yuanquan et al., "A high-speed bi-directional visible light communication system based on RGB-LED", China Communications, vol. 11, no. 3, pp. 40-44, March 2014.
- [4] Ching-Hung Chang et al., "A 100-Gb/s multiple-input multiple-output visible laser light communication system", Journal of Lightwave Technology, vol. 32, no. 24, Dec. 2014.
- [5] IEC 61000-3-3, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-3: Limits, International Electrotechnical Commission (IEC), 2013.
- [6] IEEE Std 802.15.7, part 15.7: short-range wireless optical communication using visible light, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2011.
- [7] IEEE Std 802.11ad, Part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications; Amendment 3: enhancements for very high throughput in the 60 GHz band, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2012.
- [8] IEEE Std 802.11n, Part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications; Amendment 5: enhancements for higher throughput, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2009.
- [9] Hany Elgala et al., "Indoor broadcasting via white LEDs and OFDM", IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 55, no. 3, pp. 1127-1134, Aug. 2009.
- [10] Sung-Man Kim et al., "Experimental Demonstration of 4 × 4 MIMO Wireless Visible Light Communication Using a Commercial CCD Image Sensor", Journal of Information and Communication Convergence Engineering, vol. 10, no. 3, pp. 220-224, Sept. 2012.
- [11] C. H. Yeh et al., "Demonstration of 76 Mbit/s real-time phosphor-LED visible light wireless system", OptoElectronics and Communication Conference 2014 (OECC 2014), Melbourne, Australia, pp. 757-759, July 2014.
- [12] Sung-Man Kim et al., "Wireless visible light communication technology using optical beamforming", Optical Engineering, vol. 52, no. 10, paper 106101, Oct. 2013.
- [13] Hyun-Seung Kim et al., "An indoor visible light communication positioning system using a RF carrier allocation technique", Journal of Lightwave Technology, vol. 31, no. 1, pp. 134-144, Jan. 2013
- [14] Jong-Ho Yoo et al., "Demonstration of vehicular visible light communication based on LED headlamp", International Conference on Ubiquitous and Future Networks 2013 (ICUFN 2013), Da Nang, Vietnam, pp. 465-467, July 2013.
- [15] www.meethue.com

약력

김성만



- 2009년 - 현재
경성대학교 전자공학과 교수
- 2006년 - 2009년
삼성전자 정보통신총괄 책임연구원
- 2001년 - 2006년
KAIST 전기 및 전자공학과, 공학박사
- 1999년 - 2001년
KAIST 전기 및 전자공학과, 공학석사
- 1995년 - 1999년
KAIST 전기 및 전자공학과, 공학사
- 주요 연구분야
광통신, LED 가시광통신, 광에너지 전송, 이동통신