가시광통신 시스템에서 2색 LED를 이용한 잡음광의 영향 감소

이성호⁺

Reducing the Effects of Noise Light in a Visible Light Communication System Using Two Color LEDs

Seong-Ho Lee⁺

Abstract

In this paper, we reduced the optical noise interference in a visible light communication system using two color LEDs. In the transmitter, the original and the inverted signals of the transmitted data modulated a red LED and a blue LED, respectively. In the receiver, a differential detector which is composed of two photodetectors and an optical red filter detected the mixed signal radiated from the two LEDs. In an environment that the optical noise from a fluorescent lamp exists, the signal-to-noise ratio in this system was improved by about 20dB compared to that in the conventional system which uses a single LED and a single photodetector.

Keywords : Visible light communication, LED, Two color LEDs, Optical noise, Differential detector

1. 서 론

가시광통신(VLC; visible light communication)은 가시광의 빛을 발생하는 광원을 변조함으로써 한 개의 광원으로 조명과 통신을 겸할 수 있도록 시스템을 구현하는 기술이다[1,2]. VLC에서 사용하는 광원은 조명과 통신의 특성을 동시에 가져야 하기 때문에 가시광선 대역의 빛을 발생함과 동시에 빠른 속도로 변조할 수 있는 기능을 가져야 한다. 조명용 발광다이오드(LED; light-emitting diode)는 이러한 VLC에 적합한 광원으로서 제작 및 활용기술이 빠르게 발전하고 있다. LED는 반도체의 PN 접합에서 자연방출을 이용하여 빛을 생성하는 소자로서 크기가 작고 가벼우며, 기계적인 충격에 강하고 수명이 길어 기존의 조명시설을 점차 대체해 가고 있는 추세이다.

조명용 LED를 사용하여 VLC 시스템을 구성할 때 형광등이나

백열등과 같은 기존의 조명시설이 설치되어 있는 환경에서는 이러한 조명시설로부터 유입되는 잡음광 때문에 수신부에서 간섭이 발생하여 전송에 영향을 주는 경우가 자주 발생한다. 수신되는 잡음광의 세기가 신호광에 비하여 상대적으로 미약한 경우에는 신호광의 세기를 증가시켜서 잡음광의 영향을 쉽게 없앨 수 있지만, 잡음광의 세기가 강하여 그 영향을 무시할 수 없는 환경에서는 잡음광의 간섭을 줄일 수 있는 방안도 함께 고려하여 VLC시스템을 구성하여야 한다.

LED의 신호광과 주변의 잡음광의 파장이 서로 차이가 많이 나는 경우에는 수신부에 광필터를 부착하여 잡음광을 쉽게 차단할 수 있으며[3,4], 신호광에 편파특성이 있는 경우에는 편광기를 사용하여 비교적 용이하게 잡음광을 소거할 수 있다[5]. 그러나 VLC에서와 같이 조명용 LED의 발광파장은 형광등이나 백열등과 같이 가시광선에 해당하며 특정한 편파방향이 없어 광필터나 편광기를 사용하여 잡음광의 간섭을 방지하기가 쉽지 않다. 이러한 경우에는 잡음주파수보다 훨씬 높은 캐리어 주파수를 사용한 반송파 변조방식을 사용할 수 있다. 백열등의 경우에는 잡음광의 RF주파수가 전력선 주파수 60 Hz의 2배에 해당하는 120 Hz 성분이 대부분이기 때문에 이에 비하여 훨씬 높은 주파수인 수백 kHz까지 반송파 변조함으로써 120 Hz의 잡음을 비교적 쉽게 분리하여 차단할 수 있다. 그러나 형광등의 경우에는 안정기(electronic ballast)로부터 발생하는 잡음 때문에 잡음광의 RF주파수가 백열등보다 훨씬 높은 수백 kHz

서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 (Department of Electronic & IT Media Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

⁺Corresponding Author : shlee@seoultech.ac.kr

(Received : Sep. 17, 2012, Revised : Oct. 22, 2012, Accepted : Nov. 1, 2012)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

까지 분포하는 경우가 대부분이다. 현재 시중에 많이 판매되고 있는 조명용 고출력 LED는 제품에 따라 차이가 있지만 변조가능한 대역폭이 수백 kHz정도인 경우가 많아 형광등의 잡음주파수보다 훨씬 높은 주파수를 사용하여 반송파 변조를 하기에 어려운 경우가 많다.

이러한 점을 개선하기 위하여 본 논문에서는 기저대역(base-band)에서 두 가지 색의 LED를 사용하여 잡음광의 영향을 쉽게 감소하는 구조를 새로이 제안하고 실험하였다. 이 구조는 송신부에서 보내고자 하는 원신호(original signal)와 이의 반전신호(inverted signal)를 사용하여 각각 Red-LED와 Blue-LED를 변조하여 신호광을 전송하고, 수신부에서 2개의 광검출기와 1개의 Red광필터로 구성되는 차동검출기(differential detector)를 사용하여 잡음광의 간섭을 줄이고 신호광을 검출하는 방식이다. 실험에서는 1개의 LED를 사용하는 방식에 비하여 2색의 LED를 사용함으로써 약 20 dB의 신호대잡음비의 개선효과가 있었다.

이러한 구조는 잡음광의 영향을 많이 받는 환경에서 잡음에 강한 가시광통신 시스템을 구축하는 데에 쉽게 활용할 수 있다. 본 논문의 제2절에서는 2색의 LED를 사용하여 잡음을 감소하는 원리에 대하여 알아보고, 제3절에서 실험을 소개하는 순서로 진행하였다.

2. 원리

두 가지 색의 LED를 이용한 가시광통신 시스템의 구성도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1. The VLC system using two LEDs.

송신부에서는 전송데이터의 원신호를 사용하여 LED1(Red)를 변조하고, 이와 동시에 Inverter를 통하여 반전된 신호를 사용하여 LED2(Blue)를 변조함으로써 2가지 색의 신호광이 혼합되어 자유 공간으로 방사된다. 송신부 앞에는 백열등이나 형광 등과 같은 기존의 조명시설로부터 발생하는 잡음광원이 설치되어 있다. 이 상태에서는 수신부가 설치된 공간에 2색의 신호광과 잡음광이 혼합된 상태로 존재한다.

수신부는 2개의 광검출기와 1개의 광필터, 그리고 1개의 차동증폭기로 구성되는 차동검출기가 설치되어 있다. 수신부의 Photo-detector1(PD1) 앞에는 광필터가 설치되어 있고 Photo-detector2(PD2) 앞에는 광필터가 없다. PD1 앞에 설치된 광필터

는 Red-filter로서 적색의 가시광선과 이보다 긴 파장에 해당하는 적외선은 모두 통과하지만 이보다 짧은 파장인 청색의 가시광선은 차단하는 특성을 가지고 있다. 따라서 PD1은 Red신호광과 잡음광이 혼합된 신호를 수신하지만 Blue신호광은 차단한다. 반면에 PD2에는 광필터가 없기 때문에 잡음광과 Red 그리고 Blue 신호광이 모두 혼합된 상태로 수신된다. 차동증폭기의 (+)와 (-)입력단에는 각각 PD1과 PD2의 검출전압을 인가하여 차동증폭한 후에 수신부에 전달된다. 이러한 관계를 수식적으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$\nu_1 = \rho_1 (C_{11} P_1 + C_{12} P_2) R_L + \rho_{1N} C_{1N} P_N R_L \quad (1a)$$

$$\nu_2 = \rho_2 (C_{21} P_1 + C_{22} P_2) R_L + \rho_{2N} C_{2N} P_N R_L \quad (1b)$$

$$\nu_{out} = G (\nu_1 - \nu_2) \quad (1c)$$

여기에서 ν_1 과 ν_2 는 각각 PD1과 PD2의 검출전압을 나타내며, ρ_1 과 ρ_2 는 각각 신호광에 대한 PD1과 PD2의 응답도를 나타낸다. C_{11} 과 C_{12} 는 각각 LED1과 LED2로부터 PD1으로의 광결합계수를 나타내며, C_{21} 과 C_{22} 는 각각 LED1과 LED2로부터 PD2로의 광결합계수를 나타낸다. P_1 과 P_2 는 각각 LED1(Red)와 LED2(Blue)의 출력광 전력이며, P_N 는 잡음광 전력을 나타낸다. ρ_{1N} 과 ρ_{2N} 은 각각 잡음광에 대한 PD1과 PD2의 응답도를 나타내며, C_{1N} 과 C_{2N} 은 각각 잡음광원으로부터 PD1과 PD2로의 광결합계수를 나타낸다. R_L 은 PD1과 PD2의 부하저항으로서 동일한 값을 가진다. ν_{out} 은 차동증폭기의 출력전압이며, G 는 차동증폭기의 전압이득을 나타낸다.

수신부의 PD1과 PD2가 동일한 종류의 광검출기인 경우, 신호광에 대한 응답도가 거의 동일하여 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_s$ 로 나타낼 수 있으며, 잡음광에 대한 응답도를 $\rho_{1N} = \rho_{2N} = \rho_N$ 으로 나타낼 수 있다. 송신부에서 LED1과 LED2에 서로 반전된 신호를 사용하여 변조하는 경우에 $P_2 = -P_1$ 이 되며, 수신부의 PD1 앞에는 Red 이상의 긴 파장만 통과하는 Red-filter가 부착되어 있어서 Blue 신호가 차단되므로 $C_{12} \approx 0$ 이다. 2개의 LED 사이의 거리가 송수신부 사이의 거리에 비하여 현저히 작고, 또한 2개의 PD 사이의 거리도 송수신부 사이의 거리에 비하여 현저히 작은 경우에는 $C_{11} \approx C_{21} \approx C_{22}$ 로서 거의 동일한 값을 가지며, 이 값을 상수 C_s 로 나타낼 수 있다.

잡음광원인 형광등이나 백열등의 광스펙트럼은 가시광 대역으로부터 적외선 대역에 이르기까지 넓은 대역에 걸쳐 광스펙트럼이 분포하므로[4], PD1 앞에 설치된 Red-filter에 의하여 잡음광의 청색 부분이 일부 소거되어도 PD1에서 검출되는 잡음파형이 광필터가 없는 PD2에서 검출되는 잡음파형과 거의 동일함을 별도의 실험을 통하여 확인하였다. 또한 잡음광원으로부터 수신부까지의 거리에 비하여 2개의 PD사이의 거리가 매우 작은 경우에는 $C_{1N} \approx C_{2N}$ 이 되며 이 값을 C_N 으로 나타낼 수 있다. 이러한 관계를 대입하여 식 (1)을 다시 정리하면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nu_1 = \rho_s C_s P_1 R_L + \rho_N C_N P_N R_L \quad (2a)$$

$$\nu_2 = \rho_N C_N P_N R_L \quad (2b)$$

$$\nu_{out} = G (\nu_1 - \nu_2) \cong G \rho_s C_s P_1 R_L \quad (2c)$$

식(2c)에서 보는 바와 같이 수신부의 차동증폭기에서 잡음광 P_N 에 비례한 잡음전압은 소거되고, 신호광 P_1 만에 비례한 출력전압을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3. 실험

두 가지 색의 LED를 사용하여 잡음감소 효과를 실험적으로 확인 해보기 위하여 앞의 Fig. 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 송신데이터의 발생장치로는 Atmel사의 마이크로컨트롤러 Atmega32를 사용하였다. 송신데이터의 전기적 신호를 광신호로 변환하기 위하여 마이크로컨트롤러의 UART 단자를 통하여 9.6 kbps로 출력된 신호를 사용하여 2개의 LED를 변조하였다. 실험에 사용한 2개의 LED는 모두 1W 급의 조명용 LED이며, Helio사의 Red-LED와 Blue-LED를 사용하였다. Red-LED의 발광 중심파장은 630 nm 이고, Blue-LED의 발광 중심파장은 470 nm이었다. UART단자에서 출력되는 송신데이터를 사용하여 곧바로 Red-LED를 변조하였으며, 이와 동시에 Inverter를 사용하여 송신데이터를 반전시킨 후 Blue-LED를 변조하였다. 두 LED 사이의 거리는 약 3cm 정도가 되도록 근접하여 설치하였다. 이 상태에서 원신호로 변조되는 Red 광신호와 반전된 신호로 변조되는 Blue 광신호는 자유공간에서 혼합되어 수신부 쪽으로 방사되었다.

송신부로부터 약 2 m의 거리에 수신부를 설치하였다. 수신부에 사용한 2개의 광검출기 PD1과 PD2는 모두 Opto-sensor사의 OST-1KLA 포토트랜지스터이며, 부하저항 100 Ω 에서 약 50 kHz의 수신대역폭을 가진다. PD1과 PD2사이의 거리는 약 3 cm 정도가 되도록 근접하여 설치하였다. 이 거리는 송신부와 수신부사이의 거리 2 m에 비하여 매우 작은 상태이므로 PD1과 PD2가 설치된 위치에서 신호광의 세기는 거의 동일하다. 잡음광원으로는 100 W 형광등을 송신부의 LED 옆에 설치하여 잡음광이 수신부에 심하게 간섭을 주는 환경에서 실험하였다. 수신부의 PD1 앞에 부착한 광필터는 Kodak사의 No.25 Red 필터로서 580 nm 이하의 짧은 파장을 차단하는 특성을 가지고 있다. 따라서 630 nm의 Red 신호광은 통과하여도 470 nm의 Blue 신호광은 차단하는 특성을 가지고 있다. 수신부에 설치한 차동증폭기는 Hitachi사의 연산증폭기 HA11741을 사용하여 제작한 것이다.

송신부로부터 문자열 "VLC Test"를 2 ms 간격을 두고 반복하여 전송하였을 때, 오실로스코프를 사용하여 관측한 송신부의 변조파형과 수신부의 검출파형은 Fig. 2와 같다.

Fig. 2(a)는 LED1(Red)의 변조신호이며, Fig. 2(b)는 LED2(Blue)의 변조신호를 나타낸다. 두 신호의 High 와 Low 상태가 서로 반전되어 2개의 LED를 구동하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 2(c)는 수신부의 PD1에서 검출한 전압파형을 나타낸다. PD1앞에는 Red-filter가 부착되어 있어서 LED1(Red)의 신호광과 형광등의 잡음광이 혼합된 파형이 검출되며, LED2(Blue)의 신호광은 차단된다. 따

라서 PD1의 검출전압인 Fig. 2(c)는 앞의 수식(2a)에 나타난 전압 v_1 에 해당한다.

Fig. 2. The waveforms observed on an oscilloscope ; (a) The signal to LED1 (Red), (b) The signal to LED2 (Blue), (c) The detection voltage of PD1, (d) The detection voltage of PD2.

Fig. 2(d)는 수신부의 PD2에서 검출된 전압파형이며, 여기에는 광필터가 없으므로 Red와 Blue의 2가지 신호광과 형광등의 잡음광이 모두 혼합되어 검출되는 상태이다. 송신부에서 LED1(Red)와 LED2(Blue)의 신호광이 서로 반전되어 출력되므로, 수신부의 PD2에서는 Red와 Blue가 혼합되어 디지털 데이터의 신호파형이 상쇄되어 사라지고 형광등의 잡음파형만 검출되고 있다. 따라서 PD2의 검출전압인 Fig. 2(d)는 앞의 수식(2b)에 나타난 전압 v_2 에 해당한다.

앞의 수식(2c)에서와 같이 PD1의 전압 v_1 으로부터 PD2의 전압 v_2 를 빼주게 되면 잡음광으로부터 발생한 잡음전압이 사라지고 신호전압만 출력된다. 이와 같은 과정을 실험적으로 구현하기 위하여 차동증폭기의 (+)입력단과 (-)입력단에 각각 PD1의 전압 v_1 과 PD2의 전압 v_2 를 인가하여 차동증폭하였다. 수신부에서 차동증폭기를 통과하면서 송신데이터가 복구되는 과정을 오실로스코프로 관측한 결과는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3. The waveforms observed on an oscilloscope ; (a) The detection voltage of PD1, (b) The output of a differential amplifier, (c) The recovered signal.

Fig. 3(a)는 앞의 그림 Fig. 2(c)와 같이 PD1에서 검출된 전압파형으로서 잡음광과 LED1(Red)의 신호광이 혼합된 상태를 나타낸다. 여기에서 검출되는 잡음의 형태는 120 Hz의 전력선으로부터 발생하는 잡음과 50-60 kHz의 형광등 안정기로부터 발생하는 고주파 잡음이 불규칙하게 섞여있다. 여러 개의 형광등이나 백열등으로

부터의 잡음광이 유입되는 경우에도 이들 조망시설 모두가 60 Hz의 전력선에 공통으로 연결되어 있어 60 Hz의 2배 주파수인 120 Hz의 동일한 주파수를 가진 사인파 형태의 간섭신호 여러 개가 전력선에 동기된 상태로 중첩되어 검출된다. 그 결과 전체 혼합된 잡음파형은 또 다시 120 Hz의 사인파에 근접하게 되며 잡음광원의 수가 증가할수록 잡음전압의 진폭이 증가하고, 그 형태는 Fig. 3(a)과 유사하다.

Fig. 3(b)는 PD1과 PD2의 검출전압을 각각 차동증폭기의 (+)와 (-)입력단에 가한 후 출력단에서 관측한 파형을 나타낸다. 이 상태에서는 120 Hz의 강한 잡음광과 고주파 잡음의 세기가 현저히 감소하고, 송신부에서 LED1(Red)를 변조한 신호전압이 상대적으로 강하게 검출되는 상태임을 볼 수 있다.

Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)를 비교하면 1개의 LED와 1개의 PD를 사용하는 기존의 전송방식에 비하여 2색의 LED를 사용한 차동검출 방식에서 개선된 신호대잡음비를 계산할 수 있다.

먼저 단일의 LED를 사용하여 전송하는 구조에 해당하는 Fig. 3(a)에서 보면 신호전압의 피크간 진폭이 약 $V_{S,pp} \approx 0.2$ V이고 rms 진폭은 $V_{S,rms} \approx 0.11$ V로 측정되었으며, 잡음전압의 피크간 진폭은 약 $V_{N,pp} \approx 0.36$ V이고 rms 진폭은 $V_{N,rms} \approx 0.28$ V로 측정되었다. 이 상태에서 rms 신호전압($V_{S,rms}$)과 rms 잡음전압($V_{N,rms}$)을 사용하여 신호대잡음비를 계산하면 다음 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} SNR_1 &= 20 \log (V_{S,rms} / V_{N,rms}) \\ &= 20 \log (0.11 / 0.28) \approx -8.1(\text{dB}) \end{aligned} \quad (3)$$

반면에 2색의 LED와 차동검출방식을 사용한 Fig. 3(b)에서 보면 신호전압의 피크간 진폭은 $V_{S,pp} \approx 6$ V이고 rms 진폭은 $V_{S,rms} \approx 3.36$ V로 측정되었으며, 잡음전압의 피크간 진폭은 약 $V_{N,pp} \approx 1$ V이고 rms 진폭은 $V_{N,rms} \approx 0.79$ V로 측정되었다. 미약하게 아직 남아있는 잡음성분의 원인은 수신부의 PD1에서 Red광필터를 사용함으로써 청색의 가시광대역이 차단된 상태에서 수신된 잡음광과 PD2에서 광필터를 사용하지 않고 곧바로 수신한 잡음광의 파형에 미약한 차이가 존재하기 때문이다. 이 상태에서 rms 신호전압($V_{S,rms}$)과 잡음전압($V_{N,rms}$)을 사용하여 신호대잡음비를 계산하면 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} SNR_{diff} &= 20 \log (V_{S,rms} / V_{N,rms}) \\ &= 20 \log (3.36 / 0.79) \approx 12.6(\text{dB}) \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 한 개의 LED와 한 개의 PD를 사용한 전송구조에 비하여 2색의 LED를 사용하고 차동검출한 전송구조에서 개선되는 신호대잡음비는

$$\begin{aligned} \Delta SNR &= SNR_{diff} - SNR_1 \\ &= 12.6 - (-8.1) = 20.7(\text{dB}) \end{aligned} \quad (5)$$

이었다.

Fig. 3(c)는 Fig. 3(b)의 전압을 사용하여 0 V이하와 5 V이상을

클리핑하여 최종 복구한 파형이다. 이 파형은 송신부에서 LED1(Red)을 변조하여 전송한 Fig. 2(a)의 데이터와 동일한 상태이다. 이와 같이 강한 잡음광이 존재하는 환경에서 가시광통신 시스템을 구축하는 경우에 두 가지 색의 LED를 이용하면 잡음광의 간섭을 줄이고 신호대잡음비가 개선됨을 실험적으로 확인하였다. Fig. 4는 실험에서 사용한 LED의 구동회로와 광검출기회로의 외관을 나타낸다.

Fig. 4. The circuits used in experiments ; (a) LED circuits, (b) PD circuits.

Fig. 4(a)는 송신부에 설치한 LED1(Red)와 LED2(Blue)의 구동 회로이며, Fig. 4(b)는 수신부에 설치한 2개의 포토트랜지스터 PD1과 PD2, 그리고 PD1 앞에 부착한 Red-filter의 외관을 나타낸다.

4. 결론

본 논문에서는 가시광통신의 송신부에서 2가지 색의 LED를 사용하여 서로 반전된 신호로 변조하여 전송하고, 수신부에서 2개의 광검출기와 1개의 광필터를 사용하여 차동검출함으로써 잡음광의 간섭을 줄이는 구조를 새로이 제안하고 실험적으로 확인하였다. 먼저 간단한 수식을 통하여 잡음광의 간섭이 줄어드는 원리를 소개하였으며, 이어서 실험을 통하여 잡음 감소효과를 확인하였다.

실험에서는 한 개의 LED를 사용하는 전송구조에 비하여 두 개의 LED를 사용한 경우에 잡음광의 영향을 감소함으로써 신호대잡음비가 약 20 dB 개선되었다.

이와 같은 구조는 주변의 잡음광의 영향이 심한 환경에서 비교적 간단하게 잡음광의 간섭을 줄일 수 있어 잡음광에 강한 가시광통신 시스템을 구축하는 데에 쉽게 활용할 수 있다. 예를 들어 자동차의 측면 조망 LED를 이용한 무선인식장치[2]와 같은 비접촉식 센서 시스템을 구현하는 경우 LED의 반송파 변조를 사용하지 않고 2색의 LED를 기저대역 변조함으로써 간단하고 쉽게 잡음광의 간섭을 소거하는 데에 활용할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 50, No. 1, pp. 100-107, 2004.
- [2] S.-H. Lee, "Visible light identification system using optoelectronic feedback of a lighting LED", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 20, No. 3, pp. 193-198, 2011.
- [3] A. M. Street, P. N. Stavrinou, D. C. O'Brien, and D. J. Edwards, "Indoor optical wireless systems-a review", *Opt. Quantum Electron.*, Vol. 29, pp. 349-378, 1997.
- [4] J. M. Kahn and J. R. Barry, "Wireless infrared communications", *Proc. IEEE*, Vol. 85, No.2, pp. 265-298, 1997.
- [5] S.-H. Lee, "Reducing the effects of ambient noise light in an indoor optical wireless system using polarizers", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 40, No. 3, pp. 228-231, Feb. 5, 2004.
- [6] D.-H. Hwang and S.-H. Lee, "Reducing the effects of noise light using inter-bit noise detection in a visible light identification system", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 20, No. 6, pp. 412-419, 2011.

이 성 호 (Seong-Ho Lee)

- 1980년 2월 한국항공대학교 전자공학과 (공학사)
- 1989년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)
- 1993년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 교수
- 주요 관심분야 : 광통신, VLC, 센서, RFID, 안테나