

사용자 위치 기반의 VLC 채널 모델 도출에 관한 연구

정회원 이 정 훈*, 종신회원 차 재 상*°

A Study of VLC Channel Modeling using user Location Environment

Jung-hoon Lee* *Regular Member*, Jae-sang Cha*° *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 실내 환경에서 LED(Light Emitting Diode)를 이용한 가시광 통신(VLC : Visible Light Communication) 채널의 특성을 모델링 및 분석하였다. LED에서 방사된 광 입자(Photon)의 일부는 직접(LOS : Line Of Sight) 또는 반사(NLOS : None Line Of Sight)의 경로를 거쳐서 PD(PhotoDiode)에 도달하며, 이것은 수신 부에서 시간 지연(delay profile)과 감쇠(attenuation)를 가진 다중 수신 신호 특성을 나타낸다. 가로, 세로, 높이의 크기가 20*8*2.3m로 가정된 실내 환경에서 2개의 LED와 3개의 PD를 사용하여, 각 PD에서 직접파, 반사파에 의한 채널 특성을 컴퓨터 모의실험하고 분석하였다. 채널 모델별 특성은 BPSK 기반의 통신 모의실험을 통하여 그 유용성을 입증하였다.

Key Words : Channel, VLC, LED, Delay profile, BPSK

ABSTRACT

In this paper, channel modeling and analysis of wireless visible light communication(VLC) were studied in indoor circumstance. Photons emitted from LED straightly moved and navigated within indoor, after that a part of photons reached on PD via LOS(Line Of Sight) or NLOS(None Line Of Sight). These received signals had characteristics of delay profile and attenuation, which was multiple-path fading. In this paper, computer simulation of VLC channel was executed under the condition that two LEDs were used for transmitter and three PDs were located at different positions of the 20*8*2.3m sized indoor. BER performance simulation was executed based on the characteristics of each VLC channel.

I. 서 론

최근 저탄소 친환경 정책에 따라 기존에 설치된 조명이 LED로 전환되고 있는 추세이다. LED는 다이오드로서 기본적으로 반도체의 특성을 갖기 때문에, 그 세기(intensity)나 빠른 속도의 점멸(on and off)의 조절이 용이하며, 이 성질로 인해서 조명과 데이터 통신 서비스를 한번에 제공할 수 있는 융합(convergence)에 대한 연구들^[1-4]이 진행되고 있다.

실내에서의 가시광 통신은 주로 협소한 공간에서

이루어지는 것이 대부분이므로 LED에서 전파된 광입자는 실내에서 직접파(LOS) 또는 반사파(NLOS)의 형태로 수신기의 PD에 수신된다. 이러한 다중 수신 신호들(Multiple Received Signals)은 수신부에서 간섭을 야기시키기 때문에, 가시광 통신 시스템의 수신 성능을 열화 시키는 주된 요인 중에 하나가 된다. 최근 2000년대 중반 이후에 녹색 친환경 LED소자의 급속한 보급과 더불어 LED를 이용하는 무선 통신 기술인 가시광 통신 기술에 대한 연구들^[1-4]만이 활발하게 진행 되어오고 있지만, 가시광 통신의 성능 평가의 지

* 서울과학기술대학교 매체공학과 dwarfxx@gmail.com, chajaesang@seoultech.ac.kr), (° : 교신저자)

논문번호 : KICS2011-09-414, 접수일자 : 2011년 9월 27일, 최종논문접수일자 : 2011년 10월 21일

표가 되는 가시광 통신의 실내 공간상의 전송 채널의 모델링에 대한 연구는 극히 부진한 것이 현실이라고 할 수 있다. 따라서 실내 공간에서 가시광 통신의 성능을 다양한 전송 채널 환경을 고려하여 객관적으로 모의실험을 통해 평가하기 위해서는 이를 위한 기반 요인인 가시광 통신 채널의 모델 도출에 대한 연구 성과들이 무엇보다 절실히 요구된다고 할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 가시광 통신이 많이 적용되고 있는 LED 조명 광 기반의 실내의 전송 환경을 실내 공간의 육면체 특성을 반영한 격자 구조로 가정하고, 격자 구조 내에 존재하는 조명의 배치나 형태의 다양성을 반영하여 크게 세 가지 유형으로 이를 분류한 뒤, 전송 시에 발생하는 직접파와 반사파의 특성과 FOV(field of view) 및 송수신기 사이의 공간배치를 매개 변수로 하여, 채널 모델을 도출하기 위한 모의실험을 행하고자 한다.

또한, 본 논문에서 도출되는 채널모델이 완성될 경우에는 채널 모델별 환경에 따라서, 실내 가시광 통신 시스템이 가지는 성능의 변화 특성을 BPSK 기반의 실내 가시광 통신 시스템의 성능 분석을 통해 검토해 봄으로써, 가시광 통신 채널 모델의 유용성을 확인해 보고자 한다.

본 논문의 순서는 다음과 같이 구성하였다. I장의 서론에 이어 II장에서는 사용자 위치 기반의 가시광 통신 채널의 모델링을 하고, III장에서는 컴퓨터 시뮬레이터를 이용하여 직접파, 반사파에 의한 채널 특성을 추출한다. IV장에서는 III장에서 추출한 채널 모델별 BPSK 기반의 통신 성능을 확인하고, V장에서 결론을 내리고 본 논문의 끝을 맺는다.

II. 실내 무선 가시광 통신 채널의 수신 환경

본 논문에서는 실내 무선 가시광 통신을 위한 공간으로서 20*8*2.3m 크기의 빈 공간을 가정한다. 천정에는 두 개의 VLC 송신 기능을 가지는 LED 조명원이 있으며, LED 조명원에서 방사된 일부의 광입자는 직선 운동을 하다가 VLC의 수신부인 PD에 도달한다. 직접파의 경우 거리에 의한 감쇠 요소에만 영향을 받지만, 반사파의 경우에는 벽에서 전반사 되는 감쇠의 영향까지 받는다. LED 조명원에서 출발한 광입자가 채널 환경을 거치고 수신부의 PD에 도달하는 신호는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$r(t) = R \cdot s(t) * h(t) + n \quad (1)$$

여기서 $r(t)$ 는 PD에서 수신된 신호가 전류(A)로 전환된 것이며, $s(t)$ 는 LED에서 방사한 신호, n 은 잡음(noise)이고, $h(t)$ 는 채널의 전달 함수이다. R 은 광-전기(optic to electric) 전환 계수를 나타낸다. 위에서 살펴본 바와 같이 실내 환경에서는 직접파와 반사파의 영향을 모두 받기 때문에 $h(t)$ 는 식 (2)와 같이 표현되며, 결과적으로 LED 조명원에서 방사한 신호는 감쇠된 크기(A_i)를 가진 지연(d_i)된 신호의 합으로 표현된다.

$$\begin{aligned} h(t) &= h_{LOS}(t) + h_{NLOS}(t) \\ &= \sum_{i=1}^n A_i \cdot \delta(t - d_i) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 지연된 신호 d_i 에 수신된 전력의 크기 A_i 를 가중을 주어 해당 채널의 특성을 평균 초과 지연(MED : Mean Excess Delay)으로 특성화 할 수 있으며, 이는 식 (3)과 같다. 또한 채널의 지연 확산이 MED 대비 퍼져있는 정도인 표준편차를 식 (4)의 RMS (Root Mean Square) 지연 확산으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{d} = \frac{\sum_i A_i^2 d_i}{\sum_i A_i^2} = \frac{\sum_i P(d_i) d_i}{\sum_i P(d_i)} \quad (3)$$

$$\sigma_d = \sqrt{d^2 (\bar{d})^2} \quad (4)$$

여기서, d_i 는 i 번째 지연되어 수신된 채널의 지연 시간이고, A_i 는 d_i 에서의 채널 크기, $P(d_i)$ 는 d_i 에서의 전력이다. 본 논문에서는 PD에서 수신된 유효한 신호를 최대 수신 신호크기 대비 -20dB 크기를 갖는 반사파 신호까지로 정하였으며, 이 값이 수신 신호 크기의 하한 수준이다.

III. 사용자 위치를 고려한 무선 가시광 채널 모델링

그림 1의 (a)는 본 논문에서 채널 모델을 위해 가정한 송수신 환경의 구성도를 나타내며, LED에서 방출된 광입자는 육면체에서 천정을 제외한 면을 1mm 단위로 분할한 격자를 향해서 직선 운동하며, 실내에서 전반사하여 움직이다가 PD에 도달하게 되면 수신신

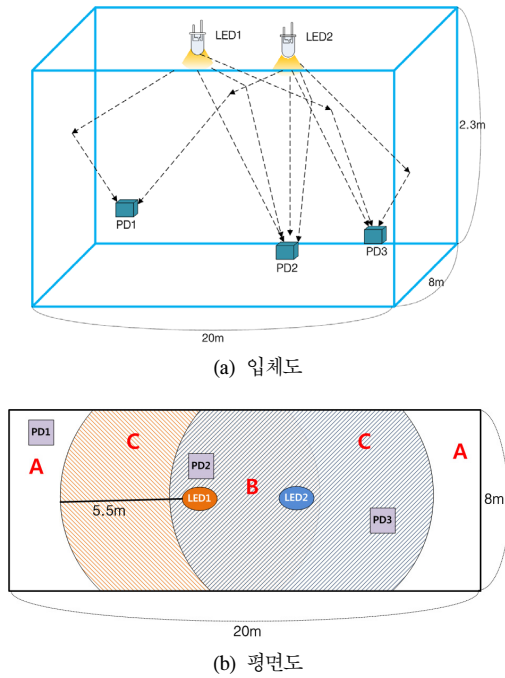


그림 1. 실내 VLC 송수신 환경의 예

호로써 인정된다. 여기서 FOV는 70° 이고, 실내 공간의 크기와 LED의 위치를 고려하면, 각 LED로부터 직접파를 수신하는 영역은 실험 환경을 수직으로 바라본 평면도에서 LED를 중심으로 약 5.5m의 원에 해당하는 부분이다. 그림 1의 (b)에서는 상세한 구성 환경을 표현하였는데, 송수신을 하기 위한 공간은 이하와 같은 세 가지의 유형(Region A, Region B, Region C)으로 분류하였다.

- Region A : 각 LED로부터 5.5m 이상 떨어져 있으며, 직접파는 수신은 불가하고 반사파만 수신 가능한 지역.
- Region B : 두 LED로부터 직, 간접파를 수신할 수 있는 영역.
- Region C : LED1 또는 LED2 중 하나의 LED로부터 직, 간접파를 수신하고, 나머지 LED로부터 간접파 만을 수신하는 영역.

PD는 3개가 있으며 Region A, B, C에 PD1, PD2, PD3가 각각 위치한다. 상기 Region은 사용자가 움직이는 환경 하에서 전송 품질에 영향을 줄 수 있는 대표적인 위치 영역을 토대로 크게 구분 하였으며, 이는 사용자에게 미치는 조명원의 입사량의 차이와 직결되므로 본 채널 모델은 이들 세 가지 영역을 직접파와

간접파의 수신 패턴을 토대로 VLC의 채널 모델을 도출하고자 한다.

본 논문에서는 실험 공간에서 각 PD에 수신되는 신호의 특성을 토대로 실측 환경을 고려한 모의실험을 행하였으며, 자세한 모의실험 변수는 표 1에 나타내었다.

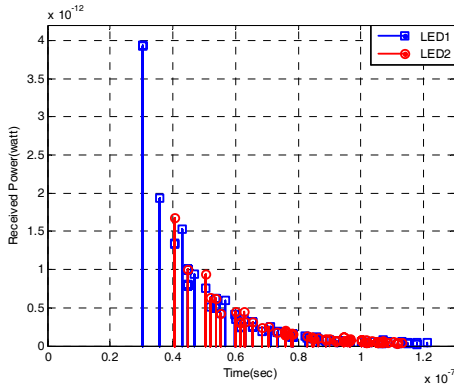
표 1. VLC 채널 모의실험 파라미터

Parameters	Values
Size of space	W(Width) : 20m D(Depth) : 8m H(Height) : 2.3m
LED out power	1 Watt
LED position	LED1 : W(8m), D(4m), H(2.3m) LED2 : W(12m), D(4m), H(2.3m)
PD position	PD1 : W(2m), D(2m), H(0.3m) PD2 : W(8m), D(3m), H(0.3m) PD3 : W(14m), D(5m), H(0.3m)
PD size	1 cm^2
Field of View	70°
Wall reflective coefficient	0.8

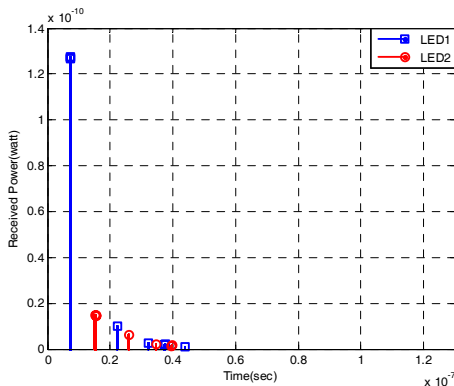
그림 2는 PD1, 2, 3에서의 수신 특성으로서, 임펄스 응답을 나타낸다. 그림 2의 (a)에 나타난 바와 같이, PD1에서는 LED1, 2로부터의 직접파가 없기 때문에 반사파의 시간 지연으로 인해서 30ns부터 신호가 수신되고 있으며, 그 최대 수신 전력이 $2.92e-14W$ 로서 매우 낮은 수준이다. 또한 최대 수신 신호 대비 20dB 낮은 크기의 신호까지 유효한 것으로 구분하면, 약 120ns까지 신호가 지연되어 수신된다. 그림 2의 (b)는 PD2에서의 임펄스 응답을 나타낸 것으로서, PD2에서는 LED1, 2의 직접파 수신에 모두 되는 곳이기 때문에, 7.45ns부터 $1.27e-10W$ 의 최대 크기를 갖는 신호가 수신되고 있으며, -20dB 이내 크기의 반사파가 45ns까지 수신되고 있다.

그림 2의 (c)에 나타난 바와 같이, PD3는 LED2에서만 직접파를 받는 것으로서 10ns부터 $5.28e-11W$ 의 최대 크기의 신호를 수신 하지만, LED1로부터 반사파만 받기 때문에 총 수신 전력은 PD2 보다는 작다. 그리고 최대 크기 대비 -20dB 이내의 크기를 갖는 신호가 약 60ns까지 수신된다.

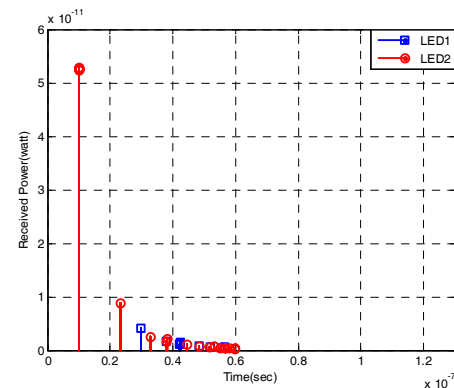
그림 2의 (c)에 나타난 바와 같이, PD3는 LED2에



(a) PD1



(b) PD2



(c) PD3

그림 2. 실내 VLC의 임펄스 응답

서만 직접파를 받는 것으로서 10ns부터 5.28e-11W의 최대 크기의 신호를 수신 하지만, LED1로 부터 반사 파만 받기 때문에 총 수신 전력은 PD2 보다는 작다. 그리고 최대 크기 대비 -20dB 이내의 크기를 갖는 신

호가 약 60ns까지 수신된다.

PD1, 2, 3에서 수신된 신호는 모두 지수 함수로 감소되는 유사한 패턴을 가지므로, 각 채널 모델은 식 (5)와 같이 근사화 시켜 표현될 수 있다.

$$f(t) = \sum_{i=0}^5 a_i \cdot t^i \quad (5)$$

여기서 a_i 는 각 PD에서의 신호 수신 특성을 나타내는 다항식의 계수이며, 식 (5)와 모의실험 결과를 토대로 각 PD별 채널 모델의 표현이 가능한데, 그 계수를 표현하면 표 2와 같다.

표 2에서 각 채널 모델 CM1, CM2, CM3는 사용자의 위치에 따른 수신기의 PD가 PD1, PD2, PD3인 경우에 대하여 모의실험을 통하여 도출한 채널 모델 값이라고 할 수 있으며, 이 채널 모델들은 각 사용자 위치 기반의 채널 특성인 신호 지연 및 신호 감쇠의 특성을 잘 나타내고 있다.

한편, 모의실험에서 측정된 결과를 바탕으로 PD1, 2, 3에서 수신된 신호의 MED와 RMS 지연 확산, 수신 신호의 전력을 표 3에 나타내었다.

수신 전력의 크기는 PD2가 두 개의 LED로부터 직접파를 받을 수 있는 곳에 위치했으므로 1.75e-08W로 가장 컸고, 반면에 반사파만을 수신하는 PD1에서의 수신 전력 크기가 1.98e-10W로 가장 작았다.

표 2. VLC 채널 특성 근사식 계수

a_i	CM 1	CM 2	CM 3
a_0	3.781e-011	6.356e-010	1.721e-010
a_1	-0.002343	-0.1171	-0.01877
a_2	5.85e+004	8.539e+006	8.629e+005
a_3	-7.243e+011	-3.026e+014	-2.052e+013
a_4	4.418e+018	5.196e+021	2.493e+020
a_5	-1.059e+025	-3.464e+028	-1.227e+027

표 3. VLC 채널 특성

PD	MED(sec)	RMS 지연확산(sec)	수신 전력(W)
1	4.9092e-8	1.6907e-8	1.98e-10
2	8.6402e-9	3.7161e-9	1.75e-08
3	1.0904e-8	4.6500e-9	6.65e-09

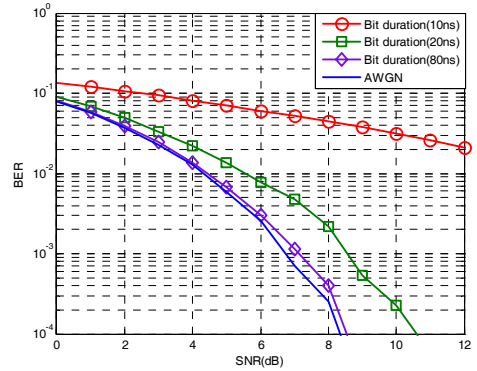
MED는 수신 신호의 지연 정도와 그때의 신호 크기에 연관되는데, LED와 PD의 거리가 가장 먼 PD1에서 49ns의 가장 큰 값을 가졌고, 두 개의 LED로부터 직접파를 갖는 PD2가 가장 작은 값인 8.64ns 이었다. 지연 수신된 신호의 표준 편차에 해당하는 RMS 수신 지연은 그림 2의 그래프에서 보는 바와 같이 다수의 반사파가 수신된 PD1에서 16.9ns로서 가장 컸으며, 신호가 밀도 있게 수신된 PD2에서 가장 작은 값인 3.71ns 이었다.

IV. 제안한 채널 모델별 BER 성능 분석

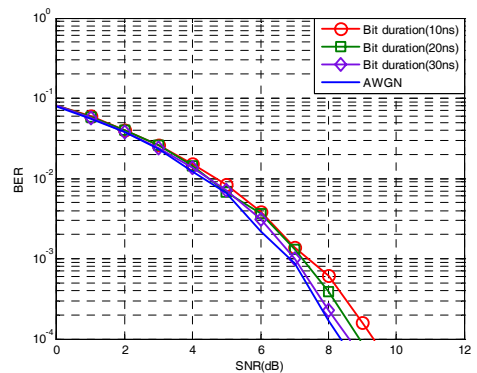
본 논문에서는 제안한 채널 모델의 유용성을 확인하고자, BPSK 기반의 가시광 통신 시스템을 예로 들어 본 논문에서 모델링한 채널 모델을 적용하여 성능 모의실험을 수행하였다. 본 논문에서 제시한 세 개의 채널 모델이 각각 다른 패턴의 지연 확산을 갖고 있기 때문에, 모의 측정된 지연 시간 이내에서 전송 신호 비트 구간(bit duration)을 10~80ns까지 10ns의 단위로 변경을 하며 모의실험을 진행하였으며, 모의실험시 사용한 세부 파라미터는 표 4와 같다.

그림 3에서는 각각의 PD에서 LED 송신 비트 구간(bit duration)에 따른 무선 가시광 통신 BER 성능을 나타냈다. PD1에서는 30ns부터 120ns까지 지수 감소 포락선의 형태를 가진 반사파가 연속적으로 수신하기 때문에 이에 의한 영향이 매우 컸다. 10ns으로 전송 비트 구간을 설정했을 경우 복호가 되지 않고 오류 흐름(error flow) 현상이 있었고, 80ns으로 설정해야 반사파가 없는 AWGN 환경의 BER 성능과 유사한 성능을 보였다. PD2에서는 7.45ns에 LED1의 직접파, 16ns에 LED2의 직접파를 수신한 이후 45ns까지 반사파가 수신되는 작은 신호 지연 구간을 갖는다. 이에 따라 우수한 BER 성능을 보였으며, 30ns의 비트 구간 일 때, AWGN만 존재하는 BER과 유사한 성능을 보였다. PD3의 경우에는 수신되는 신호의 패턴이 PD2 보다는 산재해 있어서, 비트 구간의 변화에 따른 BER 성능 개선이 뚜렷하게 개선되는 경향이 보였다. 40ns를 송신 비트 구간으로 설정할 경우, 반사파가 없는 AWGN 환경하의 성능과 유사한 성능을 보였다.

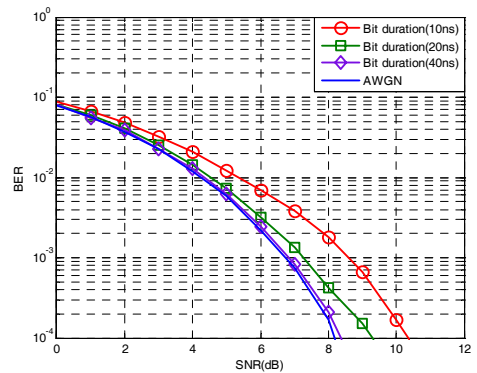
그림 3을 종합적으로 볼 때, PD에서 수신되는 직, 간접파의 패턴의 복잡도에 따라 송신 비트 구간 증가에 따른 성능 개선이 확연히 나타났다. 간접파에 의한 영향을 받지 않기 위해서는 송신 비트 구간이 PD1의 경우 80ns이고, PD2는 30ns이며, PD3는 40ns인데, 이 결과는 RMS 지연 확산의 수치에 비례한 값이



(a) PD1



(b) PD2



(c) PD3

그림 3. VLC의 BER 성능

였다.

III장에서 채널 모델 특성인 MED 및 RMS 지연 확산이 PD2가 제일 우수했는데, IV장에서의 BER 성능에서도 PD2가 가장 좋게 나와서 본 논문에서 제시한 채널 모델이 유용함을 입증하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 실내 환경에서 LED를 이용한 가시광 통신(VLC) 채널의 특성을 모델링하고, 모의실험을 통하여 특성을 추출하고 분석하였다. LED, PD의 위치 및 FOV로 인하여 본 논문에서 제안한 채널 모델에 따라서 직접파, 간접파로 인한 특성이 다양하게 나타났다. 이로 인하여 해당 PD에서 각기 다른 수신 전력, MED, RMS 지연 확산 값을 보였으며, 이것은 수신부에서 통신 복호 성능에 많은 영향을 미쳤다. 본 논문에서는 전송 비트 구간을 변수로 BPSK 기반의 통신 모의실험을 통하여 제안된 채널 모델의 유용성을 입증하였다. 이는 향후 실내 환경의 가시광 통신을 적용을 위한 좋은 참고가 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Tanaka, S. Haruyama and M. Nakagawa, "Wireless optical transmission with the white colored LED for the wireless home links", *Proc. of the 11th Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2000)*, London, US, pp.1325-1329, 2000.
- [2] J. Grubor, S. C. J. Lee, K.-D. Langer, T. Koonen, and J. W. Walewski, "Wireless high-speed data transmission with phosphorescent whitelight LEDs", in *Proc. Post Deadline Session Eur. Conf. Opt. Commun.(ECOC 2007)*, Berlin, Germany, 2007, pp.1 - 2, [06.11].
- [3] R. Windisch, et al., "Large-signal-modulation of high-efficiency light-emitting diodes for optical communication", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol.36, No.12, pp.1445-1453, 2000.
- [4] J. Grubor, et al., "High-speed wireless indoor communication via visible light," *ITG Fachbericht*, Vol.198, pp.203-208, 2007.
- [5] RAPPAPORT, T. S. *Wireless Comm.: Principles and Practice*. 2nd ed. Prentice Hall, 2002.

이 정 훈 (Jung-hoon Lee)

정회원



1999년 2월 성균관대학교 전기 전자 및 컴퓨터공학과 졸업
2001년 2월 성균관대학교 전기 전자 및 컴퓨터공학과 석사
2007년~현재 서울과학기술대학교 IT 정책대학원 박사과정
<관심분야> 디지털통신, 무선 통신, LED통신.

차 재 상 (Jae-sang Cha)

종신회원



2000년 일본 東北(Tohoku)대학교 전자공학과(공학박사)
2002년~2002년 한국전자통신연구원(ETRI) 무선방송 기술 연구소 선임연구원
2002년~2005년 서경대학교 정보통신공학과 전임강사

2008년 미국 Florida University, Visiting Professor
2005년~현재 서울과학기술대학교 매체공학과 교수
<관심분야> LED-ID, 조명IT융합신기술, LBS, ITS, UWB, 무선홈네트워크, DMB 및 디지털 방송 등