

간접 조명 환경 실내 가시광 통신의 채널 모델

이 정 훈*

VLC Channel Model Considering Indirect Light

Jung-hoon Lee*

요 약

본 논문에서는 간접 조명 환경에서 가시광(VLC : Visible Light Communication) 통신을 위한 채널 특성을 모델링하였다. 간접 조명은 직사 조도가 없이 모든 광속이 천정 및 벽을 반사한 후에 실내 바닥 면에 고르게 도달하는 방식이며, 광원에서 출발한 광 입자(Photon)는 간접경로(NLOS : None Line of Sight)를 통하여 수신부(PD, Photodiode)에 도달한다. 실내 간접 조명 환경으로서 가로(6m), 세로(4m), 높이(2.2m) 크기의 방(room)을 가정하였으며, 4개의 LED(Light Emitting Diode) 간접 조명을 2m 높이에 위치하여 벽과 천정을 향하여 빛을 비추도록 하였다. 바닥으로부터 50cm 위에 위치한 PD에서 수신 전력의 크기와 지연 수신된 신호를 통하여 채널 특성을 추출하였다. 도출된 채널은 BPSK 기반 통신 시뮬레이션을 통해서 그 유효성을 입증하였다.

Key Words : Indirectness Light, Channel, VLC, LED, Delay profile

ABSTRACT

In this paper, channel modeling of VLC(Visible Light Communication) was investigated under indirect lighting circumstance which was the way that all photons started from LED(Light Emitting Diode) were reached on the floor with NLOS paths. I supposed width(6m), depth(4m), height(2.2m) cube room circumstance for VLC communication channel and supposed that 4 LEDs were located at 2m height, which emitted photons at the direction of wall and ceiling. Channel characteristics, which were power attenuation and delayed receiving of light signal, were abstracted from receivers(PDs) which were located at 0.5m above from floor. The availability of channel was verified via BPSK based communication simulation.

I. 서 론

LED 조명원은 개당 단가가 형광등이나 백열 조명원에 비해서 높지만, 긴 수명과 낮은 전력 사용으로 인하여 장기적인 관점에서 다른 조명원에 비해 훨씬 경제적이라는 평가를 받고 있다^[1]. 이러한 LED 조명원의 고효율, 친환경 특성으로 인하여 기존의 조명원

이 LED 조명원으로 교체되고 있으며, 최근 원자력 발전소 폐지 이슈^[2] 및 저탄소 청정에너지 사용 정책^[3]에 맞물려 LED의 보급은 더욱 가속화 될 것으로 전망된다.

LED는 다이오드 반도체 소자의 하나로서, 전자-정공의 결합할 때 발생하는 빛이 조명으로 사용된다. 다이오드의 순방향 바이어스 상태에서 구형과 전류를

* 주저자 : 서울과학기술대학교, dwarfxx@gmail.com, 정회원
논문번호 : KICS2013-06-245, 접수일자 : 2013년 6월 14일, 최종논문접수일자 : 2013년 8월 8일

제공하면 구형과 빛 파형이 생기고, 정현파를 제공하면 정현파 빛이 발생한다^[4]. 이러한 빛의 변화를 이용하면 조명과 동시에 데이터 정보를 전송할 수 있는데, 이것을 조명-IT 기술이라 일컫는다. 빛의 파형이 변하더라도 사람의 눈으로는 감지할 수 없기 때문에, 기존의 자원을 이용한 경제적이고, 효율적인 통신 기술이라 할 수 있다.

통신을 수행하기 위해서는 정보의 통로가 되는 채널에 대한 특성 조사가 필수적이다. 그 동안 실내 환경에서 조명원이 피사체를 바로 비추는 직접 조명의 경우 어느 정도 통신 채널 연구가 진행되었으나, 벽이나 천정에 빛을 비추어 그 반사되는 조명을 이용하는 간접 조명의 경우에는 거의 통신 채널 연구가 진행되지 않았다. 간접조명은 조도 분포가 동일한 특성으로 인하여 눈부심이 적어 최근 많이 사용되고 있으며, 통신 채널의 측면에서 송신부(LED)와 수신부(PD) 사이에 직접파(LOS)가 존재하지 않고 간접파(NLOS)만 존재하는 열악한 환경이기 때문에 채널에 대한 연구의 필요성이 요구되는 상황이다.

본 논문에서는 직육면체 실내를 가정하고, 송신부 LED가 천정과 벽을 향해서 조명하고 수신부(PD)는 책상 높이를 고려한 일정 높이 위치 환경에서 통신 채널 모델을 도출하고자 한다. 또한 채널 모델을 이용한 통신 성능 분석을 통하여 해당 모델이 유용한지 판단할 예정이다.

논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 실내 직육면체 환경에서의 통신 채널 특성에 대해서 연구하고, III장에서는 간접조명 기반 통신 채널을 모델링하며, IV장에서는 도출된 채널을 기반으로 통신 모의실험을 수행하여 비트오율(BER) 측정할 것이고, V장에서 결론으로서 마무리할 예정이다.

II. 실내 직육면체 환경에서의 통신 채널 특성

실내에서의 가시광 통신 환경은 실외의 빛의 영향을 거의 받지 않을 수 있기 때문에 최적의 공간이라 할 수 있으며, 사람들이 주거 또는 생활하는 공간은 대부분 육면체의 모양이라 할 수 있다. 인간의 삶을 풍요롭게 하는 감성 조명의 일환으로 간접조명 기법도 많이 사용되고 있다. 간접조명은 피사체에 직접 빛을 비추는 것이 아니라, 벽 또는 천정에 빛을 비춰서 그 반사되는 빛으로서 조명하는 것을 말한다. 빛이 한번 이상 반사되기 때문에 조도가 균일하다는 특징이 있고, 이에 따라 눈부심과 그늘짐이 없다는 특징이 있다.

가시광 통신은 송신 모듈에서 전기적인 신호처리 과정을 거친 데이터가 LED에서 광 신호로 바뀌으로써 시작된다. 이후 LED를 출발한 광 입자(Photon)는 실내에서 직선 운동을 하며 일주하다가 수신부(PD)에 도달하여 광 신호가 전기 신호로 변경됨으로써, 수신 모듈에서 복호 과정을 함으로써 통신이 완료된다. 광 입자가 실내에서 이동하는 과정의 특징이 가시광 통신 채널 모델이다. 벽, 천정 또는 바닥에 도달하여 반사되는 광입자는 방향이 바뀌고 그 에너지가 줄어들며, 일주하는 거리에 의해서도 거리 제공에 비례하는 정도로 에너지가 줄어든다. 또한 광입자들이 방의 구석구석을 돌아다니다 포토다이오드에 수신되기 때문에 시간 차이를 가지고 도달하는 특성이 있다.

간접조명은 직접 조명과 달리 기본적으로 벽에 반사되는 빛을 사용하는 것이기 때문에 수신부에서 강한 에너지를 갖는 직접파의 특성이 없으며, 감쇠된 에너지를 갖는 반사파만으로 구성된 특성을 갖는다. 송신부를 $L(t)$, 수신부를 $R(t)$, 채널을 $h(t)$, 컨벌루션 수식을 * 그리고 잡음을 n 이라 표현하면 식(1)과 같은 관계식이 도출된다.

$$R(t) = eL(t)*h(t) + n \quad (1)$$

여기서 채널 $h(t)$ 는 반사파만을 가지며, j 번째 감쇠 변수를 e_j , 시간 지연을 τ_j 라 표현하면 식(2)와 같이 도출된다.

$$h(t) = \sum_{j=1}^z e_j \delta(t - \tau_j) \quad (2)$$

다중 경로에 의한 지연 확산은 평균 초과 지연 (Mean Excess Delay, $\bar{\tau}$), rms 지연확산(σ_τ), 평균 제곱지연(Mean Square Delay, $\bar{\tau}^2$) 으로 표현되며 각각의 수식적 표현은 (3)-(5)와 같다. 평균 초과 지연은 다중 경로의 신호 전력과 지연 시간을 곱해서 평균을 취한 값이며, rms 지연확산은 신호가 얼마나 퍼져 있는지를 알려주는 지표이다. 선택적 주파수 페이딩의 영향을 받지 않는 코히어런스 대역폭은 식(6)과 같이 계산하며, 50% 주파수 상관성을 가정하면 α 는 5, 90% 상관성을 가정하면 α 는 50이다.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_j e_j^2 \tau_j}{\sum_j e_j^2} = \frac{\sum_j P(\tau_j) \tau_j}{\sum_j P(\tau_j)} \quad (3)$$

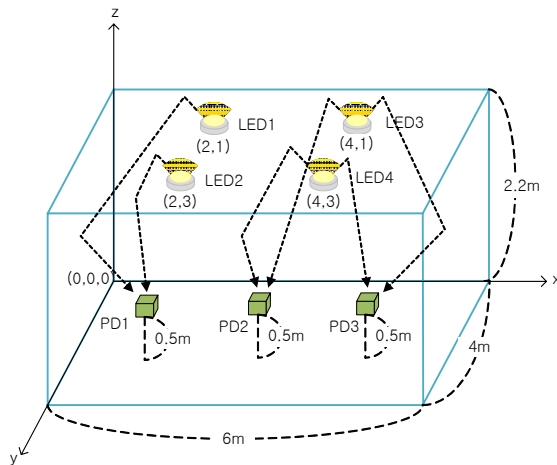
$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2} \quad (4)$$

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_j e_j^2 \tau_j^2}{\sum_j e_j^2} = \frac{\sum_j P(\tau_j) \tau_j^2}{\sum_j P(\tau_j)} \quad (5)$$

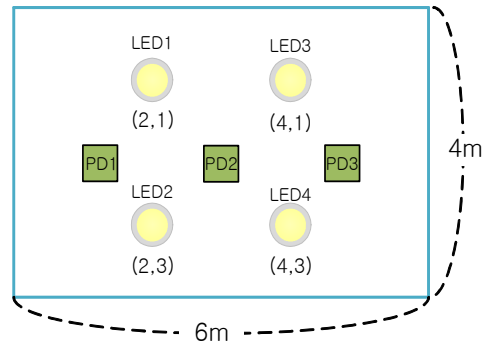
$$B_c = \frac{1}{\alpha \sigma_\tau} \quad (6)$$

III. 간접 조명 기반 통신 채널 모델링

본 논문에서는 그림 1과 같은 가로(6m), 세로(4m), 높이(2.2m)의 실내 환경을 가정하였다. LED는 천정에서 높이가 20cm 떨어진 중앙 부분에 4개를 위치시켜서 천정을 향하여 빛을 비추는 간접 조명이 되도록 구성하였다. 포토다이오드는 바닥에서 50cm 높은 35개의 지점을 선정하여 수신 특성을 모의 실험하였으며, 자세한 파라미터는 표1에 나타내었다. LED를 출발한 광 입자(photon)는 1mm 해상도 격자로 구분된 천정 지점을 향해서 출발하고, 천정에 반사되어 벽 또는 바닥으로 일주한다. 실내 환경에서 직선운동을 하는 광입자는 포토다이오드에 도달하면 전류신호로 변경되어 전기적인 특성으로 전환되어 통신신호로 사용되며, 포토다이오드에 도달하지 않은 빛은 실내에서 감쇠되어 소멸된다. PD의 FOV는 70도로 정하였으며, LED에서 방사되는 빛은 중앙에서 멀어질수록 코사인 함수 형태로 크기가 감소되는 것으로 가정하였다^[5].



(a) 입체도
(a) solid figure



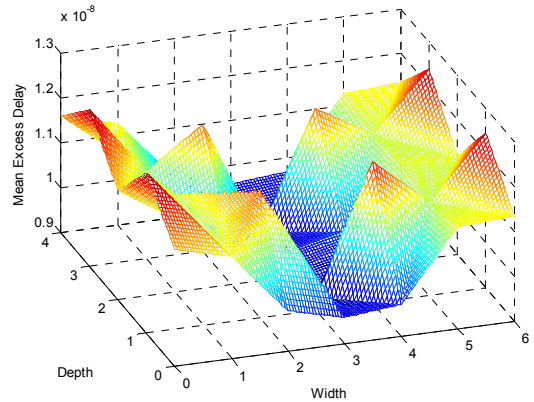
(b) 평면도
(b) plane figure

그림 1. 실내 간접조명 통신 모의실험 환경
Fig. 1. Simulation circumstance for visible communication using indirect light

C++언어로 시뮬레이션한 결과 위치에 따른 수신 신호 크기(Strength), rms 지연 확산(rms Delay Spread), 평균 초과 지연(Mean Excess Delay)은 그림 2의 (a)-(c)와 같다. 결과 그림에서 나타난 바와 같이 수신 신호 크기는 LED가 위치한 실내의 중앙 부분에서 컸으며, 실내의 모서리 쪽으로 갈수록 그 크기가 작아졌다. 가장 큰 지점은 (3,1)지점으로서 수신 신호 크기가 1.33768e-7이었고, 가장 작은 지점은 (6,0)지점으로서 크기가 2.44077e-8이었다. 평균 초과 지연은 이와는 반대로 중앙 부분에서 크기가 작았으며 실내 모서리 쪽으로 갈수록 그 크기가 커졌는데, 이것은 중앙 부분이 크기가 큰 신호가 비교적 작은 지연시간으로 수신되기 때문이고, 실내의 모서리 부분은 이와 반대의 현상이 발생했기 때문이다. 가장 작은 지점은 (3,3)으로서 크기가 9.25118e-8이었고, 가장 큰 지점은 (0,1)으로서 크기가 1.25621e-8이었다. rms 지연 확산은 신호의 퍼짐의 정도인데, 실내의 중앙에서 모서리 부분으로 갈수록 그 크기가 감소하였다. 이것은 중앙부는 광신호가 많은 반사파 형태로 지연되어 수신되지만, 모서리 부분에서는 그렇지 못한 결과이다. 가장 큰 지점은 (3,1)로서 크기가 3.99351e-12이었고, 가장 작은 지점은 (6,0)으로서 크기가 1.34472e-12이었다. 50% 주파수 상관성을 갖는 코히어런스 대역폭은 rms를 1.34473e-12 값을 사용하면 2.97Ghz로서, 해당 주파수 이상의 대역폭을 사용하지 않으면 등화기 없이 복조할 수 있다. 위치별 데이터는 표 2에 나타내었다.

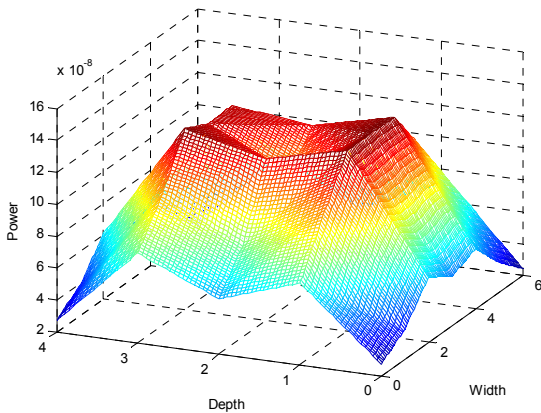
표 1. 실내 가시광 통신 채널 모의실험 변수
Table 1. Channel simulation parameter for indoor visible light communication

Parameters	Values
Size of space	가로:6m, 세로:4m, 높이:2.2m
LED out power	8 Watt
LED position	(x, y, 2m) x : 2, 4 / y : 1, 3
PD position	(x, y, 0.5m) x : 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 y : 0, 1, 2, 3, 4
PD size	1 cm ²
Field of View	70°
Wall reflective coefficient	0.82

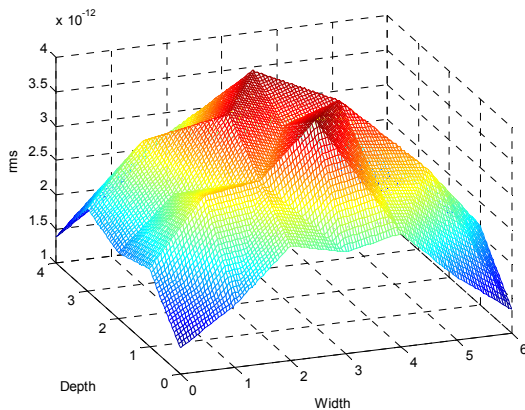


(c) 위치별 평균 초과 지연
(c) Mean excess delay for each position

그림 2. 50cm 높이에서의 측정 값
Fig. 2. Numeric value of measuring on 50cm height



(a) 위치별 수신 신호 크기
(a) Received signal strength for each position



(b) 위치별 rms 지연 확산
(b) rms delay spread for each position

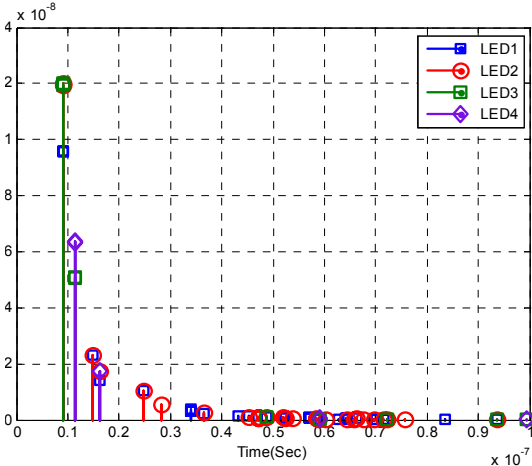
특정 위치에서의 채널 임펄스 응답은 그림 3과 같다. 3-(a)는 수신 신호 크기가 큰 가로, 세로 (2,1)에서의 임펄스 응답이며, 총 4개의 LED로부터 광신호를 받는다. LED2로부터 9.183333E-09 초부터 1.201694E-08 와트 크기의 신호를 수신하기 시작하여 LED4로부터 9.947820E-08 초까지 5.716928E-12 와트 크기의 신호까지 수신한다. 이 경우 수신 평균 전력은 1.333E-07와트였고, 평균 초과 지연은 1.182E-08, rms 지연 확산은 3.219E-12, 코히어런스 대역폭은 6.214E+09Hz였다. 모서리 부분인 위치 (6,2)의 채널 임펄스 응답은 그림 3-(b)와 같았으며, LED4로부터 9.766741E-09 초에 9.990041E-09 와트 크기 신호를 수신하기 시작하여 LED3로부터 1.032556E-07초까지 4.089258e-012와트의 신호를 수신한다. 이 경우 수신 평균전력은 4.860E-08 와트였고, 평균 초과 지연은 1.118E-08, rms 지연 확산은 1.901E-12, 코히어런스 대역폭은 1.052E+10Hz 였다. 두 위치에서의 채널 모델은 수식으로 나타내면 (7)과 같다.

$$h(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (7)$$

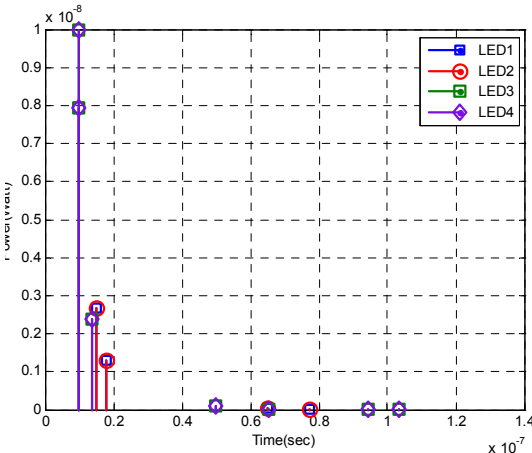
위치	a	b	c	d	e	f	g
(2,1)	1.6e+038	-3.042e+031	2.356e+04	-9.491e+016	2.095e+009	-24.07	1.143e-007
(6,2)	2.057e+036	-7.617e+029	1.117e+023	-8.237e+015	3.185e+008	-6.062	4.435e-008

본 절에서는 실내 간접조명 가시광 통신의 채널 특

성을 신호세기, rms 지연 확산, 평균 초과 지연, 코히어런스 대역폭으로 구분하여 위치별 특성을 수치로 추출하였으며, 신호가 센 곳과 약한 곳을 대표적인 위치로 선정하여 채널 모델링을 수치화하였다.



(a) PD(2,1) 위치
(a) PD(2,1) position



(b) PD(6,2) 위치
(b) PD(6,2) position

그림 3. 가시광 통신 채널 임펄스 응답
Fig. 3. Impulse response of VLC channel

IV. 도출 채널 모델 기반 BER 성능 분석

3절에서 도출한 간접 조명 가시광 통신 채널의 특성은 위치에 따라서 수신 신호 크기, rms 지연 확산, 평균 초과 지연, 코히어런스 대역폭 등이 차이를 보이지만, 본 절에서는 신호 세기에 기반한 특성을 바탕으로 통신 성능 분석을 진행하였다. 간접 조명의 특성상 은은하게 빛이 퍼지기 때문에 통신 채널의 관점에서

는 음영지역이 많이 존재하며, 최대 신호 에너지 수신 지점과(3,1), 최소 신호 에너지 수신 지역의 에너지 차이 비율은 80%까지 달한다. 표 3에 (3,1) 위치를 기준으로 대표 지점을 선정하여 수신 신호 에너지 크기와 코히어런스 BW를 나타내었다.

표 3. 최대 수신 신호 크기 위치(3,1) 대비 다른 위치의 수신 신호 크기 및 코히어런스 BW
Table 3. Signal strength and coherence BW comparing with maximum valued position(3,1)

	위치	상대적 신호크기(W)	코히어런스 BW(Hz)
1	(3, 1)	100	5.008E+09
2	(2, 2)	90.618	5.283E+09
3	(5, 1)	79.606	6.421E+09
4	(5, 3)	71.412	6.682E+09
5	(5, 2)	57.721	7.351E+09
6	(6, 1)	52.71	9.279E+09
7	(0, 2)	40.77	1.019E+09
8	(5, 4)	28.964	1.039E+10
9	(6, 0)	18.246	1.487E+10

BPSK 변조를 이용하여 각 지점에서의 BER 성능 분석을 수행하였으며, 그 결과는 그림 4와 같았다. 단, 통신의 대역폭은 가장 작은 코히어런스 BW인 5Ghz 보다 작은 것으로 가정했다.

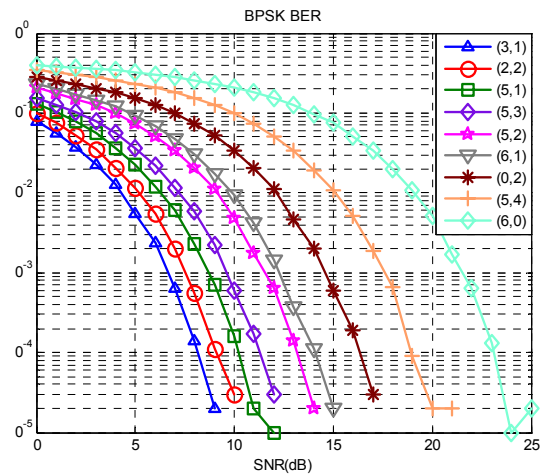


그림 4. 위치에 따른 BPSK BER 성능분석
Fig. 4. BPSK BER performance for each position

채널 특성에서 도출한 바와 같이 수신에너지 크기가 가장 센 (3,1) 위치에서 BER 성능이 가장 좋게 나

표 2. 가시광 통신 채널 모의실험 결과
Table 2. Simulation result for VLC channel

	Cor.	STR	MED	RMS	CB
1	0,0	2.738E-08	1.159E-08	1.389E-12	1.44E+10
2	1,0	3.874E-08	1.127E-08	1.925E-12	1.039E+10
3	2,0	6.069E-08	9.896E-09	2.677E-12	7.471E+09
4	3,0	5.092E-08	9.587E-09	2.486E-12	8.046E+09
5	4,0	5.772E-08	9.707E-09	2.655E-12	7.534E+09
6	5,0	3.874E-08	1.127E-08	1.925E-12	1.039E+10
7	6,0	2.441E-08	1.135E-08	1.345E-12	1.487E+10
8	0,1	7.124E-08	1.256E-08	2.142E-12	9.335E+09
9	1,1	1.041E-07	1.102E-08	3.102E-12	6.447E+09
10	2,1	1.333E-07	1.182E-08	3.219E-12	6.214E+09
11	3,1	1.338E-07	9.282E-09	3.994E-12	5.008E+09
12	4,1	1.332E-07	1.215E-08	3.194E-12	6.262E+09
13	5,1	1.065E-07	1.107E-08	3.115E-12	6.421E+09
14	6,1	7.051E-08	1.245E-08	2.155E-12	9.279E+09
15	0,2	5.454E-08	1.144E-08	1.963E-12	1.019E+09
16	1,2	7.721E-08	1.118E-08	2.721E-12	7.351E+09
17	2,2	1.212E-07	9.858E-09	3.785E-12	5.283E+09
18	3,2	1.018E-07	9.587E-09	3.515E-12	5.689E+09
19	4,2	1.212E-07	9.858E-09	3.786E-12	5.283E+09
20	5,2	7.721E-08	1.118E-08	2.721E-12	7.351E+09
21	6,2	4.860E-08	1.118E-08	1.901E-12	1.052E+10
22	0,3	7.633E-08	1.248E-08	2.210E-12	9.050E+09
23	1,3	1.011E-07	1.094E-08	3.083E-12	6.487E+09
24	2,3	1.333E-07	1.182E-08	3.219E-12	6.214E+09
25	3,3	1.258E-07	9.251E-09	3.915E-12	5.109E+09
26	4,3	1.269E-07	1.184E-08	3.146E-12	6.357E+09
27	5,3	9.553E-08	1.111E-08	2.993E-12	6.682E+09
28	6,3	7.458E-08	1.239E-08	2.199E-12	9.097E+09
29	0,4	2.738E-08	1.159E-08	1.389E-12	1.440E+10
30	1,4	3.874E-08	1.127E-08	1.925E-12	1.039E+10
31	2,4	6.070E-08	9.896E-09	2.677E-12	7.470E+09
32	3,4	5.092E-08	9.587E-09	2.486E-12	8.046E+09
33	4,4	5.772E-08	9.706E-09	2.655E-12	7.533E+09
34	5,4	3.874E-08	1.127E-08	1.925E-12	1.039E+10
35	6,4	2.441E-08	1.135E-08	1.345E-12	1.487E+10

Cor.: 위치좌표
STR : Strength
MED : Mean Excess Delay
RMS : RMS 지연 확산
CB : Coherence BW

왔으며, 표 3의 아래쪽에 위치한 지점으로 갈수록 BER 특성이 나쁘게 나와서 채널 특성의 유용성이 입증되었다.

V. 결 론

본 논문에서는 실내 간접 조명 환경에서 가시광 통신 채널의 특성을 모델링하였다. 가로, 세로, 높이 6*4*2.2 미터 크기의 실내에서 4개의 LED가 천정 및 벽을 향해 빛을 비추는 환경이었으며, 수신부는 바닥에서 50cm 높이에 위치해 있음을 가정하였다. LED가 실내 중앙에 위치했기 때문에, 수신부 또한 중앙부에서 수신 광 에너지의 크기가 가장 컸으며, 평균 지연 시간도 가장 작았다. 통신의 대역폭이 채널의 가장 작은 코히어런스 대역폭인 5GHz보다 작은 값을 가정하고, BPSK 변조를 사용하여 각 지점에서의 BER 특성을 모의 실험하였다. 빛 에너지의 감소에 의해서 영향을 받는 BER 특성을 결과로 확인함으로써 채널의 유용성을 입증하였으며, 본 논문은 향후 간접 조명 기반의 연구에 초석이 될 것으로 기대된다.

References

- [1] U.S. Department of Energy, *Solid-State Lighting: Brilliant Solutions for America's Energy Future*, Retrieved June, 10, 2013, from http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_brochure_june2011.pdf
- [2] J. Han and Y. Lee, "Energy scenarios and the politics of expertise in Korea," *J. Sci. Technol. Studies*, vol. 12, no. 2, pp. 107-144, June 2012.
- [3] S. Choi, "Energy scenario in Korea and professional politics," *J. Korea E-Trade Researcher*, vol. 8, no. 1, pp. 147-173, Feb. 2010.
- [4] S. Han, "A study on policy implication of green growth in Korea," *Proc. Korean Inst. Illuminating Elect. Installation Engine*, vol. 17, no. 2, pp. 39-49, Apr. 2003.
- [5] Seoul Semiconductor Co., Ltd., *AX32X1 specification (pp13)*, Retrieved Aug., 2, 2013, from [http://www.seoulsemicon.com/_upload/Goods_Spec/AX32X1\(0\).pdf](http://www.seoulsemicon.com/_upload/Goods_Spec/AX32X1(0).pdf).

이 정 훈 (Jung-hoon Lee)



1999년 2월 성균관대학교 전기
전자 및 컴퓨터공학과 졸업
2001년 2월 성균관대학교 전기
전자 및 컴퓨터공학과 석사
2012년 2월 서울과학기술대학
교 IT 정책대학원 박사
<관심분야> 디지털통신, 무선

통신, LED통신