

LightTools를 이용한 실내 조명 기반 가시광 통신 환경 분석

Analysis of Indoor Visible Light Communication Environment based on LightTools

이 지 환* · 김 현 철** · 정 성 윤†
(Ji-Hwan Lee · Hyeol-Cheol Kim · Sung-Yoon Jung)

Abstract - In this paper, we analyze indoor visible light communication environment based on LightTools. If the environments for VLC are too various, it is not easy to analyze the VLC environment using mathematical techniques. To overcome this problem, we use LightTools program for the analysis of various VLC environment.

We use the SINR(Signal-to-Interference and Noise Ratio) as a performance measure and compared it with the theoretical values. From simulation results, we notice that the theoretical and the LightTools results show similar tendency with a certain margin. Therefore, it will be possible to utilize the proposed scheme in analyzing lots of variable VLC environments.

Key Words : Visible Light Communication(VLC), Signal-to-interference-noise ratio(SINR), LightTools

1. 서 론

현재 위치 측위 시스템으로는 Global Positioning System(GPS)이 가장 활발히 사용되고 있다. 하지만 GPS는 실외에서 위성을 기반으로 측위 정보를 얻으므로 실내 측위로 활용하기에는 부적절하다. 따라서 최근 실내측위를 위해 GPS의 대안으로 가시광 통신을 이용한 실내 측위 시스템이 주목받고 있다[1,2]. 그 결과, 가시광 통신을 이용한 위치 측위시스템의 활용 가능성을 타진하기 위해 학계에서는 가시광 통신의 신호해석 연구가 활발히 진행되고 있다[3-10]. 하지만 기존 연구에서는 수식을 기반으로 환경 분석을 진행하였는데 매년 다른 환경에서 이론값을 새로 구하여야 하고, 환경이 복잡할 시 분석이 용이하지 않으며 실제 해석결과와의 오차를 알 수 없다는 문제점이 있다.

이러한 문제점을 극복하기 위해 본 논문에서는 빛의 추적과 설계가 가능한 LightTools Software Tool을 이용하여 실내 가시광통신 환경 분석에 이용하고자 한다. LightTools는 조명 광학 설계 및 분석 프로그램으로서 시제품을 만들기 전에 미리 시제품의 특성을 파악할 수 있는 광학 전용 설계 시뮬레이션이며 최근 이를 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다[11].

시뮬레이션 프로그램을 이용하면 다양한 환경구성이 용이하고, 수신기를 통해 조도, 에너지 등을 측정할 수 있기 때문에 수신

받은 에너지를 바탕으로 신호의 세기와 간섭 측정이 가능하다. 따라서 본 논문에서는 이러한 측정치를 활용, 가시광 통신 환경 분석을 위한 성능척도로 신호 대 간섭 및 잡음비(SINR, Signal-to-Interference and Noise Ratio)을 이용하여 실내 상황에서의 환경 분석을 하고자 한다. 또한, LightTools를 이용하여 구한 SINR 결과 값과 수식을 이용했을 때의 이론값을 비교하고, 어느 정도의 보정이 요구되는지 분석하여 모의실험 결과값에 대한 신뢰성을 얻을 수 있도록 하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 각각 LightTools와 수식을 이용하여 가시광 통신 환경 분석을 위한 모델링 과정을 보여주고, 3장에서는 이에 대한 모의실험 결과를 보여주고, 분석하였다. 그리고 4장에서 결론을 맺는다.

2. 본 론

2.1 LightTools를 기반으로 한 환경 분석 모델링

LightTools는 조명 광학 설계에 주로 이용되는 프로그램 도구로서 조명 시스템에 대한 광원 모델링, 반사판 모델링, 렌즈 등 각종 광 기구에 대한 빛의 전파, 이미지 등에 대한 모델링을 할 수 있으며 수신기를 통해 광 분포, 조도, 휘도, 에너지 등을 측정할 수 있다. 또한, 상호 교환적인 3차원 솔리드 모델링에 의거하여 모든 광학에 정확한 조명 분석이 가능하며, 물리적으로 현실적 방법에 모든 빛의 진행을 표현 할 수 있다. 그러므로 현재 실내외 조명설계, 자동차 lamp 설계, LCD BLU 설계 등 광학이 이용되는 분야에서 널리 사용되고 있다.

본 논문에서는 가시광 무선 통신 환경에서 채널 특성을 계산

† Corresponding Author : Dept. of Electronic Engineering, Yeungnam University, Korea.

E-mail: syjung@ynu.ac.kr

*,**Dept. of Electronic Engineering, Yeungnam University, Korea.

Received : January 06, 2015; Accepted : May 04, 2015

하기 위해 LightTools의 기능 중 ray-tracing 기법을 활용한다. 이러한 ray-tracing 기법을 이용한 가시광 무선 통신 채널 특성 연구에서는 LED의 광원 스펙트럼, 반사면의 모델링, 반사면의 매질에 따른 반사계수, 복수 조명을 고려한 다중 경로 분산 등을 고려해야 한다. 이 모든 것을 고려하면서도 변수의 변경이 용이하며 조명으로 사용하는 광원 소자를 이용한 연구의 시뮬레이션을 위해 앞서 밝힌바와 같이 LightTools 프로그램을 사용하였다.

앞서 언급했던 바와 같이 매번 다른 상황에 대해서 신호를 분석하기란 매우 어려운 일이다. 만약 실내 환경이 기존 분석한 상황과 다르다면 모든 조건을 새로 고려하여 이론값을 구해야 한다. 또는 예를 들어 ITS와 같은 좀 더 복잡한 실외환경에서는 고려해야 할 변수들이 매우 많아지게 된다[8]. 이러한 경우 이론으로만 신호 해석을 할 경우 실제 환경과의 오차가 커지게 된다. 그렇기 때문에 LightTools와 같이 광학이 고려되는 프로그램을 이용한다면 다양한 상황에 대해서 신호해석이 보다 용이해 질 수 있다.

성능 척도인 SINR값을 구하는 방법은 다음과 같이 주어진다.

$$SINR = \frac{\gamma^2 P_r^{Signal}}{\sigma_{total}^2 + \gamma^2 P_r^{Interference}} \quad (1)$$

여기서 γ 는 수신기의 반응성이며, P_r^{Signal} 은 수신신호의 파워, σ_{total}^2 은 noise값, $P_r^{Interference}$ 는 간섭 신호의 파워이다.

수신 신호의 파워(P_r^{Signal})은 다음과 같이 설정한다.

$$P_r^{Signal} = \text{Received signal power of Light Tools} \quad (2)$$

즉, 수신 신호의 파워 값은 신호 송신용 조명만 On 시킨 후 모의실험 하여 수신기에서 수신값을 측정 한 값을 활용한다. 간섭 신호의 파워($P_r^{Interference}$)값은 신호 송신용 조명을 제외한 나머지 조명 LED들을 On 하여 수신기에서 그 값을 측정 한 값으로 한다. 본 논문에서 모의실험은 실내 상황을 고려하고 있으므로 noise 값은 thermal noise 만을 고려한다. LightTools에서는 광원의 설계를 고려하고 있기 때문에 thermal noise가 포함되어 있다.

2.2 이론값을 기반으로 한 환경 분석 모델링

이론적으로 구한 LED 조명의 수신 파워는 다음과 같이 나타내어진다[12,13].

$$P_r^{Signal} = H(0)P_t \quad (3)$$

여기서 P_t 는 전송 파워이며, $H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)dt$ 는 채널 DC gain이다. 만약 반사된 빛의 영향이 없는 LOS 채널일 경우, 채널 DC gain은 식(4)과 같다.

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (4)$$

Lambertian의 차수 m 은 LED의 power angle과 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$m = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos(\Phi_{1/2}))} \quad (5)$$

n 의 굴절률 집광기의 이득은 다음 식 (6)로 주어진다.

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\Psi_c)}, & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi \geq \Psi_c \end{cases} \quad (6)$$

하지만 일반적인 실내상황의 경우 LOS로 들어오는 빛뿐만 아니라 반사된 빛의 영향도 고려해야 한다. 그렇기 때문에 우리는 hybrid DC gain 식 (7)을 고려하여 모의실험을 수행한다.

$$dH_{ref}(0) = \begin{cases} \frac{\rho Ah}{\pi(h^2 + d^2)^{2/3}} T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (7)$$

여기서 A 는 PD의 면적, h 는 송신기와 수신기의 높이차, d 는 송신기와 수신기의 거리이다.

뿐만 아니라, SINR값을 측정함에 있어서 noise 역시 고려해야 하며, noise값은 다음과 같이 고려된다.

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2 \quad (8)$$

여기서, σ_{shot}^2 는 shot noise 값이며, $\sigma_{thermal}^2$ 은 thermal noise 값이다.

식에 사용된 shot noise는 다음과 같이 구해진다.

$$\sigma_{shot}^2 = 2qP_r^{Signal}B + 2q\gamma P_{bg} I_2 B \quad (9)$$

여기서, q 는 전자 전하, γ 은 수신기의 반응성, P_{bg} 는 배경잡음전력, B 는 등가잡음대역폭, I_2 는 잡음대역폭팩터이다.

또한, thermal noise값은 다음과 같이 계산 된다.

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{8\pi k T_A}{G} \eta A I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k T_A \Gamma}{g_m} \eta^2 A^2 I_3 B^3 \quad (10)$$

여기서, k 는 Boltzmann 상수, T_A 는 절대온도, G 는 전압이득, η 는 PD의 고정 정전용량, Γ 는 FET 채널 noise, g_m 는 FET 컨덕턴스, I_3 는 상승 코사인 잡음 대역폭 팩터, A 는 PD의 면적이다.

이를 통해 LightTools를 이용하여 SINR을 구했을 때와 이론

식을 이용하여 SINR을 구했을 때의 값을 비교 할 수 있다.

3. 모의실험 결과

3.1 LightTools를 활용한 모의실험 결과

본 논문에서의 모의실험 환경은 그림 1과 같이 구성하였다. 시뮬레이션 모델의 크기는 가로, 세로, 높이가 각각 $5 \times 5 \times 3m^2$ 이다. 천장에는 총 9개의 LED 조명이 부착되어 있으며, 각 LED의 파워는 보통의 LED 전등 파워 15W이다. LED는 바닥을 향하여 설치되어 있으며, 방사각은 60° 이다.

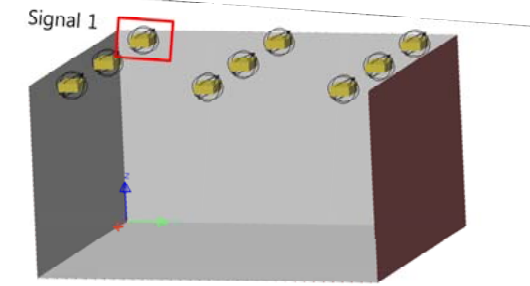
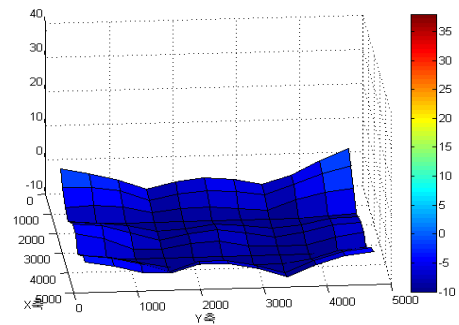


그림 1 LightTools 기반의 모의실험 환경
Fig. 1 Using LightTools Simulation Environment

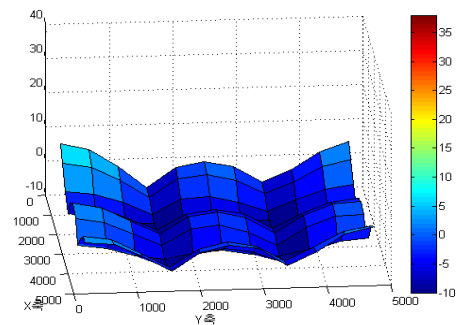
수신기는 바닥에서 10mm 부터 시작하여 300mm 간격으로 z축 방향으로 이동시키며 측정하였다. 수신기는 높이 당 가로, 세로 11곳씩 총 121번의 위치에서 측정하였으며 각 위치에서의 값을 측정 한 후 보간을 통하여 전 영역에 대한 수신 SINR값을 측정하였다. 다음 그림 2는 LightTools를 이용한 모의실험 결과값이다.

총 9개의 조명에 대한 SINR을 동시에 표현하였으며, 각 조명의 SINR 계산 시 나머지 8개의 조명이 간섭조명으로 작용하도록 한 결과를 나타낸다.

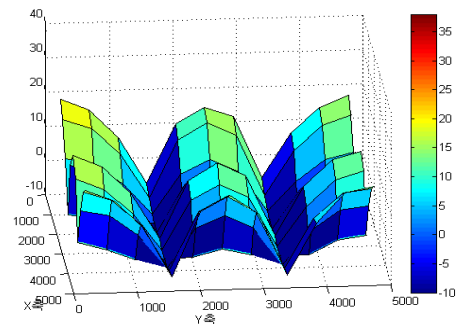
결과에서 알 수 있듯, z축으로 상승 할수록 자기 신호가 간섭보다 더 많이 들어오게 되므로 SINR값이 증가한다. 그 이유는 다른 LED들도 바닥을 향해 설치되어 있지만 간섭신호가 수신기의 FOV 안에 들어올 확률이 작아지게 되어 수신기가 z축으로 상승할수록 거리가 가까워지게 되므로 SINR의 값이 증가하게 되는 것이다. 또한, 다른 LED의 신호가 수신되더라도 자기신호보다 거리도 상대적으로 멀기 때문에 DC gain이 매우 작다. 그로 인해 간섭신호의 수신파워가 작아지게 되며 따라서 최종 SINR의 값은 커지게 된다.



(a) 수신단 높이 : 1500mm



(b) 수신단 높이 : 2100mm



(c) 수신단 높이 : 2700mm

그림 2 LightTools 기반의 SINR 측정 결과
Fig. 2 SINR measurements based on LightTools

3.2 이론값에 기반한 모의실험 결과

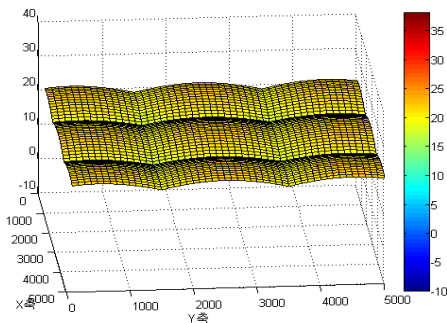
이론값을 구하기 위한 고정 변수는 표 1과 같다.

그림 3은 이론을 이용한 모의실험의 결과 값이다. LightTools와 마찬가지로 z축으로 상승 할수록 SINR이 증가함을 알 수 있다. 그 이유 역시 마찬가지로 z축으로 상승 할수록 송신 LED와의 거리가 가까워지기 때문에 DC gain의 영향으로 자기 신호의 크기가 커지게 된다. 반대로 수신기의 FOV의 한계로 인하여 자기 신호외의 나머지 간섭신호가 수신기의 FOV 안에 들어올 가능성이 낮아지고 상대적인 거리가 멀어 DC gain도 자기신호에 비해 작게 되므로 간섭의 크기는 작아지게 된다.

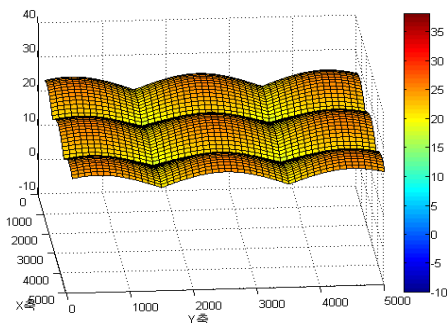
표 1 모의실험 변수

Table 1 Simulation parameters

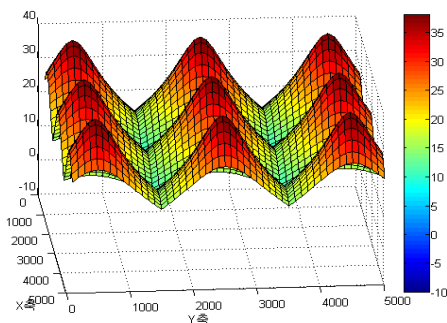
Parameter	Value
절대 온도	300K
전압 이득	10
FET Transconductance	30mS
FET 채널 noise	1.5
PD 고정 정전용량	112pF
잡음 대역폭 팩터	0.562
상승 코사인 잡음 대역폭 팩터	0.868
배경 잡음 전력	16dBm



(a) 수신단 높이 : 1500mm



(b) 수신단 높이 : 2100mm



(c) 수신단 높이 : 2700mm

그림 3 이론값 기반의 SINR 측정 결과

Fig. 3 SINR measurements based on numerical computation

SINR을 비교해 보면 LightTools 결과값이 이론값보다 항상 작은 것을 알 수 있다. LightTools가 이론보다 실제 환경과 유사한 환경을 제공하는 프로그램이므로 좀 더 사실과 가깝기 때문에 이론값보다 항상 값이 작을 수 있다는 점을 알 수 있다. 하지만 전체적인 특성과 결과가 일정한 마진을 가지고 유사하기 때문에 다양한 환경에서의 좀 더 현실적인 가시광 통신 환경 분석에 활용이 예상된다.

4. 결 론

본 논문에서는 이론값 기반의 가시광통신 환경 분석 어려움을 해결하고자 빛의 추적과 설계가 가능한 LightTools 프로그램을 이용하여 동일한 모의실험 환경을 구성하고, 환경 분석 방법을 SINR을 성능척도로 하여 제시하였다.

가시광 통신 관련하여 SINR 또는 SIR을 분석한 논문들은 종종 있어왔지만 기존의 논문들은 모두 수식을 기반으로 분석한 것으로 상황이 달라진다면 분석을 재적용하기 어렵다. 하지만 LightTools 프로그램을 이용하여 모의실험을 한다면 매번 수식을 이용하지 않더라도 환경 분석을 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 LightTools 프로그램은 신호해석을 위한 프로그램이 아니기 때문에 사용되는 LED, ray 분석 등 이론에서 고려되지 않는 변수와 조건들이 많다는 단점도 가지고 있다.

모의실험 결과 z축으로 상승 할수록 즉, 조명과의 거리가 가까워질수록 SINR값이 커지게 되는 걸 알 수 있었으며 이는 조명과 가까울수록 수신신호의 크기는 커지고 수신 받을 수 있는 각도는 한정되어 있기 때문에 간섭신호의 크기는 작아지기 때문이다.

또한, LightTools 결과와 이론값과의 비교를 통해 그 결과가 일정한 마진을 가지고 유사한 경향을 보임을 알 수 있었으므로, 향후 보다 다양하고 복잡한 환경에서의 성능 분석에 본 논문의 방식이 활용 될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(14CTAP-C078772-01)에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

References

- [1] Armstrong, Jean, Y. Ahmet Sekercioglu, and Adrian Neild, "Visible light positioning: a roadmap for international standardization," Communications Magazine, IEEE., pp. 68-73, 2013.
- [2] Yasir, Muhammad, Siu-Wai Ho, and Badri N. Vellambi. "Indoor Positioning System Using Visible Light and Accelerometer." Journal of Lightwave Technology vol. 32, Issue 19, pp. 3306-3316, Oct. 2014.
- [3] Yoo. Jong-Ho, and Sung-Yoon Jung, "Modeling and

analysis of variable PPM for visible light communications,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, pp. 1–6, 2013.

- [4] S. Long, M. A. Khalighi, M. Wolf, S. Bourennane, and Z. Ghassemlooy, “Channel characterization for indoor visible light communications,” Optical Wireless Communications (IWOW), 2014 3rd International Workshop in. IEEE, pp. 75–79, Sep. 2014.
- [5] Do, Trong-Hop and Myungsik Yoo. “Optimization for link Quality and Power Consumption of Visible Light Communication System,” Photonic Network Communications, Issue 3, pp. 99–105, June. 2014.
- [6] Sinichiro Haruyama, “Visible light communication using sustainable LED lights,” ITU Kaleidoscope, 2013 Proceedings of. IEEE, pp.1–6, Apr. 2013.
- [7] J. Grubor, O. C. Jamett, J. W. Walewski, S. Randel and K. D. Langer, “High-speed wireless indoor communication via visible light,” ITG-Fachbericht-Breitbandversorgung in Deutschland-Vielfalt für alle, 2007.
- [8] Lee. S., Kwon. J. K., Jung. S. Y., and Kwon. Y. H., “Evaluation of visible light communication channel delay profiles for automotive applications,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, pp. 1–8, Dec. 2012.
- [9] Hong. G. B., Jang. T. S., Kim. T. H. and Kim. Y. K., “A Study on Analysis of Disturbance in VLC Transceiver Module Based on LED Communication,” The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers vol. 60, Issue 7, pp. 1391–1395, July. 2011.
- [10] Yun. J. H., Hong. G. B., Kim. Y. K., “A Study on Realization and Receiving Characteristic Analysis of Visible Light Wireless Communication System for Power Line Communications Using ATmega16 Microcontroller,” The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers 20.1, pp. 2043–2047, Nov. 2010.
- [11] Hayford, M. J., and S. R. David. “Characterization of illumination systems using LightTools,” Proceedings-SPIE international society for Optical Engineering, pp. 209–220, Sep. 1997.
- [12] T. Komine and M. Nakagawa, “Fundamental analysis for visible light communication system using LED light,” Consumer Electronics, IEEE Transactions On, vol. 50, Issue 1, pp. 100–107, Feb. 2004.
- [13] J. M. Kahn, J. R. Barry, “Wireless Infrared Communication,” Proceedings of IEEE, vol. 85, Issue 2, pp. 265–298, Feb. 1997.

저 자 소 개



이 지 환(Ji-Hwan Lee)

2014년 2월 : 영남대학교 전자공학과 졸업
2014년 3월 : 영남대학교 전자공학과 석사과정



김 현 철(Hyeol-Cheol Kim)

2013년 8월 : 영남대학교 전자공학과 졸업
2013년 9월 : 영남대학교 전자공학과 석사과정



정 성 윤(Sung-Yoon Jung)

2000년 : 고려대학교 전기전자전공공학부 졸업
2000년~2002년 : 한국과학기술원 전자전산학과 석사학위 취득
2002년~2006년 : 한국과학기술원 전자전산학과 박사학위 취득
2006년~2009년 : 삼성전자 통신연구소(현, DMC연구소) 책임연구원
2009년~2014년 : LED-IT 융합산업화연구센터 부센터장(2012) 및 분과장
2009년~현재 : 영남대학교 전자공학과 부교수