

# 가상 가시광 중첩을 이용한 RSSI 기반의 실내 측위법

## RSSI-Based Indoor Localization Method Using Virtually Overlapped Visible Light

김 대 영\* · 이 건 영†  
(Dae Young Kim · Keon Young Yi)

**Abstract** - In this paper, we propose an indoor RSSI (received signal strength indication)-based localization method that uses virtually overlapped visible light with an indoor LED lighting system. In our system, a photodiode (PD) measures the RSSI from LED lamps that blink in one row or column units. Subsequently, the RSSI is used to obtain the horizontal distances between the LED lamps and the receiver with the predetermined characteristics curve, R-D curve, that represents the relation between the RSSI and the horizontal distances. When the controlled LED lamps blink in one row or column units, the R-D curve at the border of the LED lamps is different because of the weak lighting, which results in the position sensing error of the receiver. The deviation of the optical power of each LED also causes the error. To solve these problems, we propose a method that overlaps the visible light through the numerical operation at the receiver side without any modification of the light source side. Our proposed method has been simulated in a room measuring  $1.2 \times 1.2 \times 1.8 \text{ m}^3$  considering the effect of the error on the optical power of the LED. The simulation result shows that the proposed method eliminates the error condition with the R-D curve and achieves an average positioning error of 13.4 mm under the error rate 3% of the optical power.

**Key Words** : RSSI, Virtually Overlapped Visible Light, Indoor Localization, LED

### 1. 서 론

오늘날 백색 LED를 이용한 조명등은 뛰어난 에너지 효율로 인하여 실내 조명장치로 주목을 받고 있다. 뿐만 아니라 LED 구동 신호에 고주파의 디지털 정보를 삽입하여 보내는 가시광 통신도 실용화가 되고 있다. 최근에는 인공위성 신호가 수신되지 않는 실내 공간에서 위치인식을 위한 대체 수단으로 LED 조명을 활용하는 연구가 활발히 이루어지고 있다[1-3].

종래의 위치 인식에 대한 연구를 살펴보면 적외선, RFID, 초음파, WLAN(wireless local area network), 블루투스 기반의 위치 추정 기법들이 있다[4]. 적외선과 RFID 기반의 위치 추정은 많은 센서의 설치가 요구되고, 초음파는 원치 않는 반사 신호에 취약하다[4]. RF 기반의 RFID, WLAN, 블루투스는 전자기에 민감한 공간에서 사용이 제한 될 수 있다[5]. 최근에 종래의 위치 인식 기법들의 단점을 극복하는 LED 조명등과 가시광 통신을 이용한 실내 위치 인식 방법이 주목을 받고 있으며, 이 위치 인식 방법을 위한 측위법으로 AoA (angle of arrival), ToA (time of arrival), TDoA (time difference of arrival), RSSI가 널리 사용되고 있다. AoA는 이미지센서를 이용한 방법으로 기반시설의 설치가

요구되고, ToA는 송신부와 수신부 사이에 완벽한 동기화가 요구되는 단점이 있다[6]. TDoA는 정밀한 delay 제어가 필요하며 phase noise에 취약하다[1]. RSSI 기반의 측위는 각 LED 조명등에 ID를 부여하는 방식을 사용하고 있는데, 많은 수의 LED 조명등으로 확장하는 경우 정보전달 량이 많아 조명구간 손실이 커지는 단점이 있음에도 불구하고 측정 원리가 간단하고 구현이 용이한 이점이 있다[1,7].

본 연구에서는 LED 조명등과 가시광 통신을 이용한 위치 인식의 실용화를 위하여, 넓은 영역에서 측위가 가능하며 위치정보 전달로 인한 조명구간 손실을 최소화하는 행렬 LED 조명등 점멸에 의한 측위 방식을 제안한다. 제안한 방식은 행 또는 열 단위로 LED 조명등을 점멸하고 매 순간마다 켜진 조명등을 광원으로 이용하여 포토다이오드에 수신된 RSSI로부터 광원과 수신부 사이의 수평거리를 얻는 방식이다. 그러나 조명등으로부터 측정되는 RSSI는 LED 소자마다 광출력 편차[8]로 인한 신호세기 편차가 있고, 이는 RSSI와 수평거리의 함수관계(이하 R-D 특성곡선)으로부터 구해지는 수평거리 편차, 즉 측위 오차로 이어진다. 또한, RSSI는 포토다이오드의 FOV(Field of View), LED의 방사각 그리고 조명등의 배치간격에 많은 영향을 받는다. 따라서 위치정보 전달을 위해 하나의 행 또는 열의 LED 조명등이 광원이 되는 경우(이하 조명렬), 수신부가 조명렬로부터 X축 상의 같은 수평거리에 있더라도 Y축 위치가 다르면 각 조명렬로부터 측정되는 RSSI의 값은 다르다. 이런 경우 Y축 위치별로 수없이 많은 R-D 특성곡선을 구하지 않으면 RSSI로부터 정확한 수평거리를 구할 수 없는 문제가 있다. 이 문제를 해결하기 위해 수신부가 조명등이 넓은 천정 전

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University, Korea.

E-mail: keonyi@kw.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University, Korea.

Received : November 12, 2014; Accepted : November 21, 2014

체에 일정한 간격의 격자모양으로 배치된 상태(이하 무한평면 조명)에 위치해 있다고 가정하고, RSSI 정규화를 통해 Y 축 위치와 관계없이 적용 가능한 R-D 특성곡선을 이용한 수평거리 계산법을 제안한다. 제안한 방법에서는 무한평면 조명이 끝나는 외곽지역에서의 조명강도 약화로 인한 문제해소가 가능한 가상 가시광 중첩방식을 이용하며, 이에 대한 세부사항은 본문에서 기술 한다.

결론적으로 본 논문에서 제시한 LED 조명을 이용한 실내 측위법에서는 LED 조명등의 조명구간 손실을 최소화하는 행렬 구동방식의 조명등 제어뿐만 아니라 조명등 특성 차이 및 외곽지역의 조명 변화에 둔감한 R-D 특성곡선을 이용한 가상 가시광 중첩 방식의 RSSI 측위 방법을 제안한다. 또한, 제안한 방법의 효용성을 보여주기 위하여 실험과 연계된 시뮬레이션을 통한 정밀 위치측정 결과를 보여준다.

## 2. RSSI를 위한 가시광 통신의 채널 모델

본 장에서는 이론적 배경으로 RSSI 기반의 측위를 위한 가시광 통신의 채널 모델[9]에 대해 기술하고자 한다.

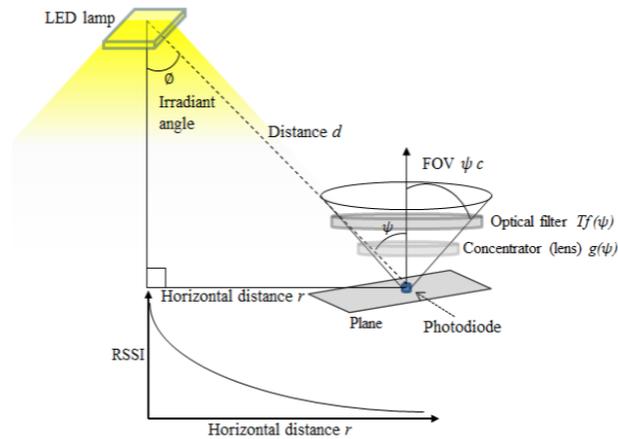


그림 1 RSSI 기반의 측위 방식  
Fig. 1 Positioning method based on RSSI

### 2.1 RSSI 기반의 측위 방식

RSSI 기반의 측위법은 광원으로부터 떨어진 거리에 따라 수신된 광량의 차이를 이용하는 방법으로 이 연구에서는 수신부인 포토다이오드가 송신부인 LED 조명등으로부터 수신된 RSSI를 측정하여 송신부로부터 수신부가 떨어진 수평거리(horizontal distance)를 측위 하는 방법이다. 그림 1과 같이 수평거리에 따른 RSSI를 측정하여 R-D 특성곡선을 구할 수 있다. 다수의 LED 조명등이 광원이 되는 경우 포토다이오드에서는 다수의 광원으로부터 가시광 중첩에 의한 RSSI가 측정된다.

### 2.2 LED 광출력 편차를 고려한 채널 모델

조명용 백색 LED는 램버시안 방사 형태를 갖으며, LOS(line-of-sight)만 고려해도 방사 패턴은 거의 정확히 추정

가능하므로 본 연구에서는 channel DC gain에 대해서만 고려하였다[10]. 램버시안 방사 강도  $R_0$ 는 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_0(\phi) = \left[ \frac{m+1}{2\pi} \right] \cos^m(\phi) \tag{1}$$

$$m = -\ln 2 / \ln(\cos \phi_{1/2}) \tag{2}$$

위 수식에서  $\phi$ 는 LED의 수직축에 대한 수신부의 방사각을 의미하고,  $m$ 은 램버시안 출력의 차수로 식 2와 같고 여기서  $\phi_{1/2}$ 는 LED의 광출력이 절반이 되는 방사각이다. 출력 광파워(transmitted optical power)  $P_{tx}^i$ 는 식 3과 같다. 여기서  $P_{LED}$ 는 LED의 광출력이고,  $e(i)$ 는 가우시안 분포 형태를 갖는  $i$ 번째 LED 광출력의 편차로써 조명강도 편차를 고려한 시뮬레이션을 위해 추가되었다. 식 4에서  $H_{LOS}(0)$ 은 LED의 channel DC gain,  $d$ 는 LED와 수신부 간의 거리,  $A_{rx}$ 는 포토다이오드의 검출 유효 영역(detector window area),  $\psi$ 는 수신부의 수직축에 대한 LED 광의 입사각,  $\psi_c$ 는 포토다이오드의 FOV이다.

$$P_{tx}^i = (P_{LED} + e(i)) * R_0(\phi) \tag{3}$$

$$H_{LOS}(0) = \begin{cases} \frac{A_{rx}}{d^2} R_0(\phi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \tag{4}$$

LED로부터 수신된 전체 광파워  $P_{rx,LOS}$ 는 각 LED의 channel DC gain을 합한 것으로 식 5와 같다. 포토다이오드에 최종적으로 수신된 광파워  $P_{rx}$ 는 식 6과 같으며, 여기서  $T_f(\psi)$ 는 광필터의 전달 계수이며,  $g(\psi)$ 는 concentrator 이득이다. 포토다이오드의 전류는 식 7과 같으며,  $R$ 은 포토다이오드의 반응도(A/W)로 포토다이오드로 입사되는 광입력(watt)에 대한 전기적 출력(ampere)의 비율이다.

$$P_{rx,LOS} = \sum_{i=1}^{LEDs} P_{tx}^i H_{LOS}^i(0) \tag{5}$$

$$P_{rx} = P_{rx,LOS} * T_f(\psi) * g(\psi) \tag{6}$$

$$i = P_{rx} * R \tag{7}$$

## 3. 가상 가시광 중첩을 이용한 RSSI 기반의 측위법

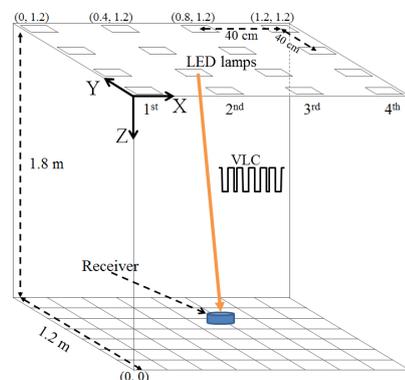


그림 2 실내 측위 시스템  
Fig. 2 Indoor localization system

본 장에서는 가상 가시광 중첩을 이용한 RSSI 기반의 측위 방법에 대해서 설명하고자 한다. 그림 2는 일정 간격으로 설치된 4x4의 조명등과 수신부로 구성된 조명 시스템을 나타내며, 그림 3은 각 조명등의 점멸 상태를 나타낸다. 수신부에서는 RSSI신호를 이용하여 소속영역 찾기 및 세부 위치 계산을 하게 되는데, 세부위치 계산을 위한 R-D 특성곡선을 구하기 위해 정규화 및 가상화 과정이 수행된다.

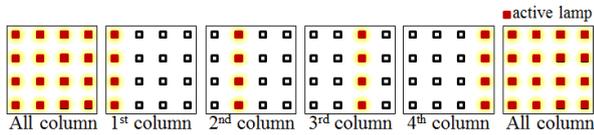


그림 3 LED 조명등의 점멸제어 방식  
Fig. 3 Method of blinking control of LED lighting

3.1 실내 측위 시스템과 조명등 제어

행렬 구동방식의 조명등 제어는 그림 3(렬 구동의 경우만 예시한 것임)과 같이 조명부에서 1개 조명렬씩 점멸상태를 변경하여 수신부에서 조명렬로 부터의 거리 계산이 가능하게 하는 것으로 각 등을 하나씩 점멸하는 방식보다 ID 데이터 전송량이 대폭 감소(4x4의 경우 16펄스가 8펄스로 감소)한다. 그러나 수신부의 위치가 경계면 쪽으로 이동하는 경우 RSSI가 약해지는 현상이 발생한다. 이 문제는 신호 정규화와 가상 가시광 중첩법을 도입하여 해결이 가능하며, 이에 대한 설명은 3.3절에서 다룬다.

3.2 수신부의 소속영역 찾기

그림 4와 같이 수신부가 위치한 소속영역을  $Z_1, Z_2, Z_3$ 으로 할당한다. 2개 조명렬로부터 측정된 RSSI의 크기를 비교하여 RSSI의 값이 큰 영역이 수신부가 위치하는 소속영역이다.

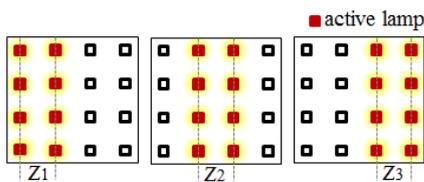


그림 4 수신부의 위치에 따른 소속영역 할당  
Fig. 4 Mapping zone according to the position of a receiver

위 그림에서 수신부가  $Z_2$ 에 위치한다면 2, 3 조명렬의 신호를 가장 많이 받고, 이 두 신호의 값 또한 가장 크게 된다. 이 때 실제 조명등은 그림 4와 같이 2개 조명렬씩 점멸 제어 하는 것이 아니라 측정된 각 조명렬의 RSSI를 합산하는 방식이다. 즉, 조명부의 제어방식을 변경하지 않고 그림 4와 같은 조명등 점멸상태의 효과를 내는 것이 가상 가시광 중첩의 핵심이다.

이상의 방식을 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z\_RSSI_n &= RSSI_n + RSSI_{n+1}, \quad n = 1, 2, 3 \\ z &= FindMax(Z\_RSSI_1, Z\_RSSI_2, Z\_RSSI_3) \end{aligned} \quad (8)$$

위 식에서  $n+1$ 은 가상 가시광 중첩을 위한 가상 조명렬의 번호이고,  $RSSI_n$ 은 측정된 각 조명렬의 RSSI를 버퍼에 저장한 것이며, 소속영역에 대한  $Z\_RSSI_n$ 은 소속영역에 인접한 2개 조명렬의  $RSSI_n$ 과  $RSSI_{n+1}$ 를 산술적으로 더하여 구한다. 구해진 3개의  $Z\_RSSI_n$ 에서 가장 큰 값으로 부터 수신부가 위치하는 소속영역의 번호  $z$ 가 결정된다.

3.3 정규화된 R-D 특성곡선

그림 5는 조명렬로부터 수평거리에 따른 RSSI를 측정하여 R-D 특성곡선을 생성하는 방법을 개념적으로 표시한 것이다. 그림은 3개의 가상 조명렬의 우측열을 기준점으로 하여 수신부가 좌에서 우 방향으로 수평이동 하는 경우에 대한 각각의 특성곡선을 구한 것으로,  $C_1$ 의 경우는 가상 조명렬이 없는 경우(조명구간 밖에 위치:  $RSSI_0$ )를 의미한다. 또한 분모의 모든 조명렬 점멸 상태는 조명렬 양단의 조도 약화를 보상하기 위한 정규화를 의미한다. 또한 수신부가 광원에 가까울수록 입사각, LED 광출력의 편차 및 외란(전압 변동이나 외부 조명)에 둔감한 특성을 갖는 R-D 특성곡선을 생성할 수 있도록 3개의 특성곡선을 사용하였다. 수신부가 반대 방향으로 이동하는 경우는 특성 곡선의 좌우 대칭성에 따라 동일한 특성곡선을 사용한다.

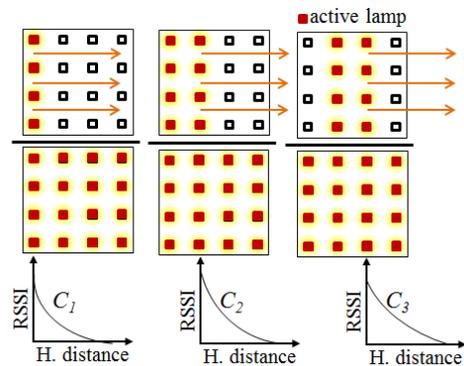


그림 5 조명등 점멸상태에 따른 정규화 R-D 특성곡선  
Fig. 5 Normalized R-D curve according to the blinking state of LED lighting

R-D 특성곡선의 생성법을 수식으로 표현하면 다음과 같다. 먼저 가상 가시광 중첩을 이용하여 특정 y에 대한 x 위치 변화에 따른 각 조명렬의 세기  $RSSI_{c,x}$ 와 전체 조명렬의 세기  $RSSI_{t,x}$ 를 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} RSSI_{c,x} &= RSSI_{n-1,x} + RSSI_{n,x}, \quad n = \begin{cases} 1, & \text{if } c=1 \\ 2, & \text{if } c=2 \\ 3, & \text{if } c=3 \end{cases} \\ RSSI_{t,x} &= \sum_{n=1}^4 RSSI_{n,x} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $c$ 는 R-D 특성곡선의 번호,  $n$ 은 각 조명렬의 번호

이며,  $n-1$ 은 가상 조명렬의 번호이고,  $RSSI_{0,x}$ 는 0으로 설정한다.

다음 단계는 조명렬 양단의 신호 약화를 보상하기 위한 정규화 과정으로 다음식과 같다.

$$n\_RSSI_{c,x} = \frac{RSSI_{c,x}}{RSSI_{t,x}}, \quad c = 1, 2, 3 \quad (10)$$

이와 같은 과정을 조명렬 상단에서 하단까지 y축 변위에 대해 반복한 후 그 값을 평균 내어 x축 방향의 R-D 특성곡선을 다음과 같이 구한다.

$$N\_RSSI_{c,x} = Average(n\_RSSI_{c,x}) \quad (11)$$

$$R-D Curve_c = CreateCurve(N\_RSSI_{c,x}, Hdst_{c,x}), \quad c = 1, 2, 3 \quad (12)$$

여기서  $R-D Curve_c$ 는 정규화된  $N\_RSSI_{c,x}$ 와 수평거리  $Hdst_{c,x}$ 와의 함수관계를 이차원 배열로 저장하여 다음 절의 수평거리 계산에 사용된다. 이 식에서  $Hdst_{c,x}$ 는  $N\_RSSI_{c,x}$ 가 측정된 조명렬로부터 x축 방향의 떨어진 수평거리이다.

이와 같이 구해진 3개의 R-D 특성곡선은 좌우대칭 구조로 설치된 조명환경으로 인해 세로축 방향에 대해서도 동일하게 적용된다.

### 3.4 수평거리 계산법을 이용한 측위법

이 절에서는 RSSI로부터 수신부의 위치를 계산하는 측위법에 대하여 기술한다.

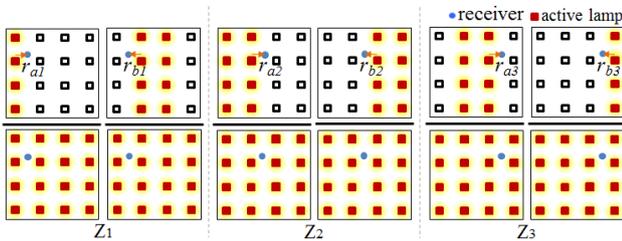


그림 6 수신부가 속한 영역에 따른 측위 방법  
Fig. 6 Positioning method according to the zone where a receiver belongs

앞선 3.2절의 방법에 따라 수신부의 소속영역  $z$ 가 결정되면 그림 6과 같이 수신부 좌우의 R-D 특성곡선이 결정된다. 이 특성곡선으로부터 수신부의 수평거리 측정을 위해 가상 조명렬을 이용한 정규화 된 RSSI는 다음 식으로 구해진다.

$$RSSI_a = RSSI_{n-1} + RSSI_n, \quad n = \begin{cases} 1, & \text{if } z = 1 \\ 2, & \text{if } z = 2 \\ 3, & \text{if } z = 3 \end{cases} \quad (13)$$

$$RSSI_b = RSSI_n + RSSI_{n+1}, \quad n = \begin{cases} 2, & \text{if } z = 1 \\ 3, & \text{if } z = 2 \\ 4, & \text{if } z = 3 \end{cases}$$

$$RSSI_t = \sum_{n=1}^4 RSSI_n$$

여기서  $n$ 은 각 조명렬의 번호이며,  $n-1$ 과  $n+1$ 은 가상 조

명렬의 번호이고, 조명구간 밖의  $RSSI_0$ 과  $RSSI_5$ 는 0으로 설정한다.

이 RSSI 값은 식 10과 같은 정규화 과정을 통하여 수신부의 좌측  $n\_RSSI_a$ , 우측  $n\_RSSI_b$ 로 변환된다. 변환된 값은 3.3절에서 기술한 R-D 특성곡선으로부터 식 14의 과정을 통하여 2개의 수평거리  $r_a, r_b$ 로 변환된다.

$$r_a = Interp(R-D Curve_c, n\_RSSI_a), \quad c = \begin{cases} 1, & \text{if } z = 1 \\ 2, & \text{if } z = 2 \\ 3, & \text{if } z = 3 \end{cases} \quad (14)$$

$$r_b = Interp(R-D Curve_c, n\_RSSI_b), \quad c = \begin{cases} 3, & \text{if } z = 1 \\ 2, & \text{if } z = 2 \\ 1, & \text{if } z = 3 \end{cases}$$

여기서  $c$ 는 소속영역  $z$ 에 따라 좌우 조명렬 환경에 의해 선택된 R-D 특성곡선의 번호이며,  $Interp(.)$ 는  $n\_RSSI$ 의 값이 R-D 특성곡선의 2차원 행렬 원소의 사이 값인 경우 매트랩의  $interp1()$ 를 사용하여 보간값을 구하는 함수이다.

2개의 수평거리가 구해지면 식 15의 관계식을 이용해 수신부의 위치를 구한다.

$$Position = m + \frac{r_a - r_b}{2}, \quad m = \begin{cases} 0.2, & \text{if } z = 1 \\ 0.6, & \text{if } z = 2 \\ 1.0, & \text{if } z = 3 \end{cases} \quad (15)$$

여기서  $m$ 은 소속영역에 인접한 2개 조명렬 사이의 중간 지점의 위치이다. 예를 들어 수신부의 소속영역이  $Z_2$  라면  $m$ 은 조명렬 2번(0.4)과 3번(0.8)의 중간 지점인 0.6이 된다. 따라서 수신부가 그림 6에서  $Z_2$  소속영역에 위치한  $r_{a2}$ 는 R-D 특성곡선  $C_2$ 를,  $r_{b2}$ 는 좌우 대칭관계에 따른  $C_2$ 로부터 각각의 수평거리를 계산해 X축 상의 위치를 얻을 수 있다.

이 장에서 기술한 방법으로 각 행의 조명렬 제어를 통해 Y축 상의 수신부의 위치도 획득하여 X-Y 평면상의 수신부의 위치를 구한다.

## 4. 실험과 시뮬레이션

본 장에서는 제안하는 가상 가시광 증첩을 이용한 RSSI 측위 방법의 유효성 검증을 위한 시뮬레이션을 수행한다.

표 1 시스템 모델의 파라미터

Table 1 Parameters of the system model

Parameter	Value
Room size	1.2x1.2x1.8 m <sup>3</sup>
Simulation space for R-D Curve	2.0x2.0x1.8 m <sup>3</sup>
Single LED power	45 mW
Semi-angle at half power( $\theta_{1/2}$ )	30 deg.
Number of LEDs arrays	16
Number of LEDs per array	18
LED pitch	0.04 m
FOV at the receiver( $\psi_c$ )	$\pm 75$ deg.
Detector physical area of PD (A)	1 mm <sup>2</sup>
Photodiode responsivity (R)	0.62 A/W
Concentrator gain (g( $\psi$ ))	1.0
Transmission coefficient of optical filter (T <sub>f</sub> ( $\psi$ ))	1.0
Reflection	0
Target model of photodiode	SFH203P@SIMENS

시뮬레이션을 위해 실내 측위 시스템 모델에 사용된 주요 파라미터는 표 1과 같다. R-D 특성곡선을 구하기 위한 시뮬레이션 공간은 2.0×2.0×1.8 m<sup>3</sup> 설정하였으며, 측위 시뮬레이션은 40 cm 간격으로 설치된 4x4의 조명등과 이 조명등으로부터 수직으로 1.8 m 하단에 위치한 수신부로 구성된 1.2×1.2×1.8 m<sup>3</sup> 공간의 조명 시스템 환경에서 수행된다. 그림 7은 시뮬레이션에서 포토다이오드의 대상 모델로 삼고 있는 지멘스社의 SFH203의 지향성 특성으로, 이 특성은 시뮬레이션에 반영되어 시뮬레이션과 실제 환경 사이에 RSSI 분포 형태의 오차를 최소화 한다.

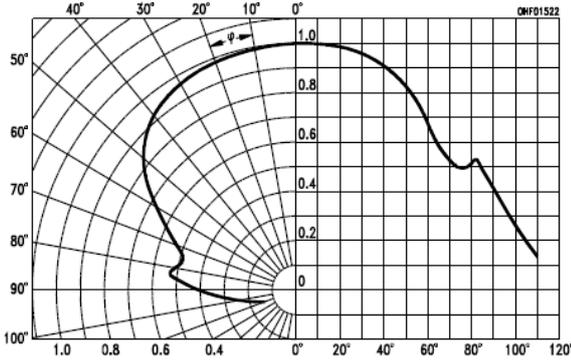


그림 7 포토다이오드의 지향성 특성  
Fig. 7 Directional characteristic of a photodiode

#### 4.1 가상 가시광 중첩을 이용한 조도 비교

이 실험은 RSSI와 조도는 비례 관계에 있으므로 위치별 조도를 측정하여 RSSI의 가상 가시광 중첩의 방식이 유효한지 확인하는 실험이다. 20 cm 간격으로 각 조명렬로부터 측정된 조도와 전체 조명렬이 켜졌을 때 측정된 조도를 비교한다. 실험 결과는 표 2와 같으며, 전체 조명렬을 켜졌을 때 조도 값과 각 조명렬을 산술적으로 더한 조도 값의 차이는 3 룩스(lux) 이내이다. 따라서 가상 가시광 중첩의 방식은 이론적 뿐만 아니라 실험적으로 유효함이 검증되었다.

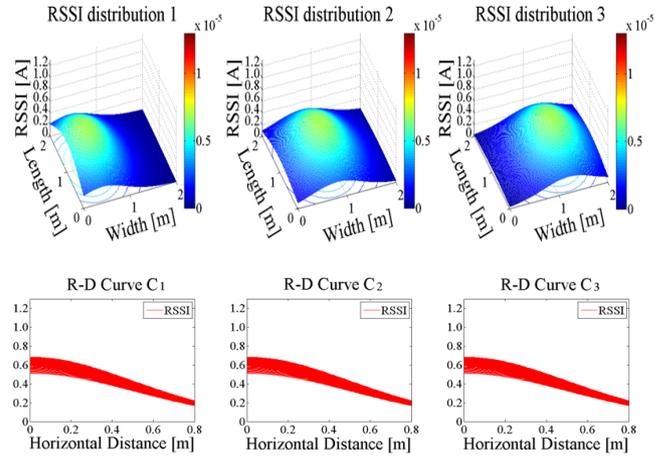
표 2 위치에 따른 조도 측정

Table 2 Intensity of illumination according to the position

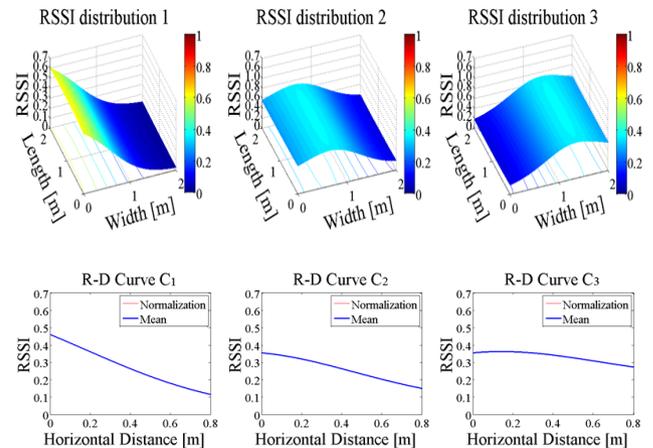
Pos.	1st	2nd	3rd	4th	All	Sum	Error
0	89	56	15	7	169	168	1
20	78	83	29	9	199	199	0
40	52	92	53	15	210	212	2
60	29	76	79	28	210	212	2
80	16	48	92	50	203	206	3
100	10	26	80	76	190	192	2
120	7	14	52	91	161	164	3

#### 4.2 R-D 특성곡선의 시뮬레이션

이 시뮬레이션은 제안한 가상 가시광 중첩을 이용한 정규화 R-D 특성곡선법이 유효한지를 확인하기 위한 것으로 매트랩을 활용하여 시행하였다. 그림 8은 1, 2, 3번 조명렬이 각각 광원으로 동작했을 때의 RSSI 분포(상단)와 R-D 특성곡선(하단)을 표시한 것이다.



(a) RSSI distribution and R-D curves



(b) Normalized RSSI distribution and R-D curves

그림 8 RSSI 분포와 R-D 특성곡선

Fig. 8 RSSI distribution and R-D curves

그림 8 (a)는 정규화하지 않았을 때 RSSI 분포를 3D로 표현한 것이고, 하단은 각 조명렬의 위치(0 m, 0.4 m, 0.8 m)부터 R-D 특성곡선을 구해 2D로 표현한 것으로 Y축 위치에 따라 수많은 R-D 특성곡선이 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 8 (b)는 정규화를 수행했을 때 RSSI 분포와 R-D 특성곡선을 구한 것이다. 정규화를 통해 Y축 위치에 관계없이 단일 R-D 특성곡선을 구했지만, C<sub>3</sub>의 일부 구간(0~0.3 m)에서 특성곡선의 함수 관계가 만족되지 않는(2:1 매핑) 문제가 발생 한다. 따라서 앞서 제시한 가상 가시광 중첩을 이용하여 정규화에 따른 문제를 보상하면, 그림 8의 (b)가 다음 그림과 같이 1:1

매핑이 가능한 R-D 특성곡선으로 변한다.

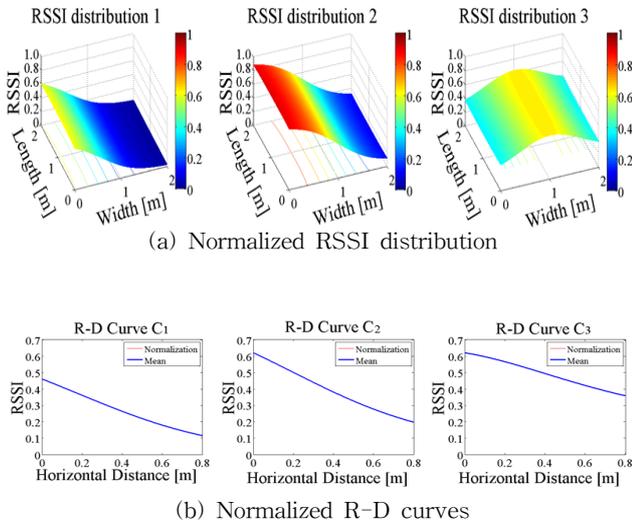


그림 9 가상 가시광 중첩을 이용한 정규화된 RSSI 분포와 R-D 특성곡선  
 Fig. 9 Normalized RSSI distribution and R-D curves with virtually overlapped visible light

그림 9는 1, 2, 3번 조명렬이 각각 광원으로 동작했을 때 가상 가시광 중첩을 이용하여 정규화한 RSSI 분포와 R-D 특성곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 C<sub>3</sub> 구간에서의 2:1 매핑문제가 해결되었을 뿐만 아니라, 가상 가시광 중첩을 사용하지 않은 R-D 특성곡선보다 거리 감도가 개선되었다.

### 4.3 측위 오차의 시뮬레이션

제안한 가상 가시광 중첩을 이용한 RSSI 측위 방법의 정밀도를 측정하고, LED 광출력의 편차에 얼마나 강인한지 확인하기 위한 시뮬레이션을 수행 하였다.

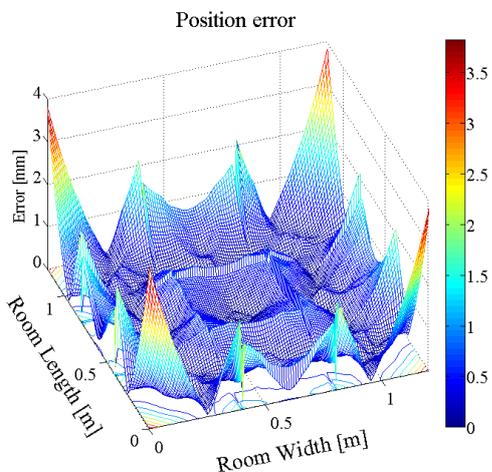


그림 10 14,641개의 지점에서 측위 오차의 분포  
 Fig. 10 Distribution of localization error at 14,641 points

먼저 이상적인 환경에서의 제안한 알고리즘의 측위 정밀도를 알아보기 위하여 LED 광출력이 일정한 경우에 대한 시뮬레이션을 하였고, 이어서 LED 광출력의 편차를 고려한 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 10은 LED 광출력이 일정한 경우 14,641개의 지점에서 시뮬레이션을 수행한 측위 오차의 결과이며, 최대 오차 3.81 mm, 평균 오차 0.48 mm로 기존의 연구결과(1.0×1.0×1.3 m<sup>3</sup> 측위 환경에서 최대 오차 3.89 cm, 평균 오차 1.68 cm)[1]와 비교할 때 높은 측위 정밀도를 보인다. 측위공간의 중앙부분에서 오차가 울퉁불퉁한 이유는 소속영역별로 다른 R-D 특성곡선을 적용함에 기인하며, 좀 더 정밀한 측위 정밀도(0.59 mm 이하)를 얻기 위해서는 이에 대한 후속 연구가 필요하다.

표 3은 LED 광출력의 편차를 고려한 경우에 시뮬레이션 결과로, 가우시안 랜덤난수를 이용해 LED 광출력에 에러율(0.5~3.0 %)을 적용하여 625개의 지점에 대해서 1,000회 시행한 것이다.

표 3 LED 광출력 편차를 고려한 시뮬레이션 결과

Table 3 Simulation result under the error of the optical power of LED

Error [%]	Mean error [mm]	Max error [mm]	Error [%]	Mean error [mm]	Max error [mm]
0.5	2.3	13.5	2.0	9.0	44.0
1.0	4.5	24.2	2.5	11.2	52.9
1.5	6.7	33.8	3.0	13.4	62.1

시뮬레이션 결과를 통해 제안한 측위방법에서 LED 광출력의 편차에 따른 측위 오차를 확인 하였고, 광출력의 오차율이 증가함에 따라 측위 오차도 증가하는 결과를 보여준다. 이 결과에서 광출력 오차 3.0 %에서 최대 62.1 mm 측위 오차가 발생하는데 정밀 측위를 위해서는 이를 개선하는 후속 연구가 필요하다.

## 5. 결 론

본 논문에서 실내 측위를 위해 가상 가시광 중첩을 이용한 RSSI 기반의 측위 방법을 제안하였다. 가상 가시광 중첩 기법을 기반으로 한 수신부의 소속영역 찾기, 정규화 R-D 특성곡선 생성법 그리고 측위 방법을 제시하였다. 특히 정규화 과정을 통하여 조명영역 외곽에서의 조도 약화에 대한 보상법을 추가하여 전압강하나 LED 특성변화에 따른 전반적인 조도 변화에 따른 강인성을 확보하였다. 아울러, 시뮬레이션이 가능한 R-D 특성곡선의 생성이 가능함을 확인하였고, 측위 오차 시뮬레이션에서는 최대 오차 3.81 mm, 평균 오차 0.48 mm의 측위 정밀도를 얻었다. 또한 LED 광출력의 편차를 고려한 시뮬레이션을 통하여 조명강도 편차에 대한 측위 오차의 허용한도를 설정 할 수 있는 기틀을 마련하였다. 결론적으로 본 연구에서 제안한 가상 가시광을 이용한 RSSI 기반의 측위법은 넓은 실내 공간까지 확장 가능한 위치 인식 기법으로 실용화될 수 있음을 보여주었다.

## References

- [1] S.-Y. Jung and C.-S. Park, "Lighting LEDs based Indoor Positioning System using Received Signal Strength Ratio," Proceedings of 3DSA2013, vol. 8, p. 5, Osaka, 26-28 June 2013.
- [2] K. Panta and J. Armstrong, "Indoor localisation using white LEDs," Electronics Letters, vol. 48, no. 4, pp. 228-229, Dec. 2012.
- [3] T. Nguyen and Y. M. Jang, "Highly Accurate Indoor Three-Dimensional Localization Technique in Visible Light Communication Systems," The Journal of Korea Information and Communications Society, vol. 38, no. 9, pp. 775 - 780, Sep. 2013.
- [4] Y. Gu, A. Lo, and I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," Communications Surveys & Tutorials, IEEE, vol. 11, no. 1, pp. 13 - 32, 2009.
- [5] S.-Y. Jung, S. Hann, and C.-S. Park, "TDOA-based optical wireless indoor localization using LED ceiling lamps," Consumer Electronics, IEEE Transactions on, vol. 57, no. 4, pp. 1592 - 1597, 2011.
- [6] T.-H. Do and M. Yoo, "TDOA-based indoor positioning using visible light," Photon Netw Commun, vol. 27, no. 2, pp. 80 - 88, Aug. 2014.
- [7] S.-H. Yang, D.-R. Kim, H.-S. Kim, Y.-H. Son, and S.-K. Han, "Visible light based high accuracy indoor localization using the extinction ratio distributions of light signals," Microwave and Optical Technology Letters, vol. 55, no. 6, pp. 1385-1389, 2013.
- [8] I.-H. Jang, Y.-S. Kim, and A.-S. Choi, "Analysis of Luminous Quantity Changes by the Dimming Control of the LED Lamp," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 24, no. 10, pp. 13 - 20, Oct. 2010.
- [9] L. Zeng, D. O'brien, H. Le-Minh, K.-W. Lee, D.-K Jung, and Y.-J. Oh "Improvement of Date Rate by using Equalization in an Indoor Visible Light Communication System," the 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications, pp. 678-682, Shanghai, 26-28 May 2008.
- [10] W. Zhang and M. Kavehrad, "A 2-D indoor localization system based on visible light LED," Photonics Society Summer Topical Meeting Series, pp. 80 - 81, Seattle, 9-11 July 2012.

## 저 자 소 개

**김 대 영(Dae Young Kim)**

1982년 12월 3일 생. 2006년 조선대 제어계측공학과 졸업. 2009년 광운대 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.

Tel : (02)940-5142

E-mail : akmasky@gmail.com

**이 건 영(Keon Young Yi)**

1959년 8월 2일 생. 1982년 한양대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~현재 광운대 전기공학과 교수

Tel : (02)940-5142

E-mail : keonyi@kw.ac.kr