

# 실내 광 무선 통신 특성 해석을 위한 포톤 모델링 방법

## A Photon Modeling Method for Characterization of Indoor Optical Wireless System

이 정 한 · 이 행 선

Jung-Han Lee · Haengseon Lee

### 요 약

본 논문에서는 실내 환경에서 가시 광선을 이용한 무선 망 설계에 필요한 가시광의 특성 예측을 위해 포톤 모델을 이용하는 방법을 제시한다. 광선을 이용하는 경우, 높은 주파수와 짧은 파장을 갖고 있으므로 광선 추적법을 이용하는 것이 일반적이거나, 환경이 복잡하고 복수의 반사, 투과뿐만 아니라 물체 표면의 거친 정도 등의 재질을 고려한 난반사까지 고려해야 하는 경우, 매우 많은 시간이 걸리는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 본 논문에서는 광선 추적법을 보완하여 광선의 세기를 포톤의 밀도로 근사하여 계산 정밀도와 계산 시간을 타협하는 방식을 제시한다.

### Abstract

In this paper, an analysis method for indoor optical wireless channel properties based on photon model is presented for characterization of communication environment. In contrast to radio waves, optical waves have very short wavelengths and very high frequencies, so that material properties become important. Channel models including diffuse reflections and absorption effects due to material surface textures make conventional electromagnetic wave analysis methods based on ray tracing consume enormous time. To overcome these problems, an analysis method using photon model is presented that approximates light intensity by a density of photons. The photon model ensures that simulation time is within a predictable limit.

Key words : Ray Tracing, Photon Model, Indoor Optical Wireless

### I. 서 론

가시광선을 이용한 통신(optical wireless communication)은 설치의 간편함과 동시에 송·수신기 구조가 매우 단순하다는 장점을 가지고 있어 많은 관심을 받고 있다<sup>[1],[2]</sup>. 그러나 가시광선의 주파수가 매우 높음으로 인해 기존의 전파를 사용하는 방식의 통신과는 다른 점이 많다. 전파(~10 GHz)를 이용한 통신 방식에서는 위상 동기 시간(coherence time)이 매우 긴 발진기(oscillator)의 설계가 용이하여 동기 변·복조가 가능하고 이 결과로서 낮은 SNR을 갖고

서도 높은 비트율(bit rate)을 갖는 데이터를 전송하는 송·수신기를 만들 수 있다는 장점이 있으나, 단말기 구조가 복잡해지고 설계의 난이도가 높아지기 때문에 저가이면서 고속의 data를 전송하는 제품을 구성하기는 힘든 편이다. 이에 반해 광선을 이용한 통신은 LED와 포토 다이오드 또는 포토 트랜지스터를 이용하고, OOK(On-Off Keying) 방식으로 송·수신기를 구현하고 있으므로 매우 저가의 제품을 만들기 쉽다는 장점이 있다. 그러나 광원으로 쓰이는 LED는 동기 시간이 매우 짧기 때문에 낮은 SNR로도 통신 가능한 방식인 동기 변·복조는 원천적으로

「본 연구는 삼성전자의 연구비 지원을 받아 수행된 것임.」

서강대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Eng., Sogang University)

· 논문 번호 : 20080428-053

· 수정완료일자 : 2008년 6월 5일

쓸 수 없다. 동기 시간을 늘이기 위해 LED 대신 레이저 다이오드를 광원으로 이용할 수는 있으나, 이마저도 동기 시간이 초고주파 대역의 발진기에 비하면 매우 짧으므로 비동기 방식의 변·복조 방법을 쓸 수밖에 없다. 그러나 이 방식을 채택하여 상대적으로 요구되는 SNR이 증가하여도 간단하고도 저가의 단말기가 가능하므로 이러한 단점을 상쇄하고서도 충분한 장점을 갖는다.

전파의 경우, 물체에 부딪힌 후 반사 또는 회절에 의해 전파의 특성이 바뀐다. 전파의 경우 파장의 길이가 물체 표면의 거친 정도(roughness)에 비해 매우 크므로 대부분의 물체 표면에서 거울 면 반사(specular reflection)가 일어나고, 모서리 부분에서 전파의 세기가 불연속이 되는 것을 막아주기 위해 회절 현상에 의한 전파가 생겨난다. 이에 반해 가시광선은 파장이 매우 짧으므로, 거친 정도가 이상적으로 0이 아닌 대부분의 물체 표면에 부딪힌 후, 난반사를 일으켜 산란 광선의 진행 방향이 공간상에 균일하게 분포되는 Lambertian 광원으로 근사 가능하다. 물론 거울 면처럼 매끄러운 표면에서는 퍼지는 정도가 훨씬 적다. 회절 현상이 일어나는 범위 또한 전파에 비해서 매우 좁은 영역이기 때문에 회절 영역은 설계에서 무시해도 좋다.

전파를 수신하는 단말기에서 신호는 안테나에 유도되는 전압을 증폭한다. 반면에 광 검출기(photo detector)에서 수신되는 신호는 입사파의 빛의 세기(intensity)에 비례하는 광전류(photo current)이다. 즉, 수신되는 가시광선의 전력이다. 빛의 세기(intensity)는 위상 정보가 없으므로 광 검출기의 출력은 광원에서 들어온 다중 경로 신호들의 단순 합산이 된다. 이에 반해 전파를 수신하는 경우, 입력 신호는 전기장에 의해 안테나에 유도된 전압이기 때문에 위상 정보가 들어 있다. 즉, 다중 경로를 거친 후에 들어온 신호들은 위상에 따라서 보강 간섭이 될 수도 있고, 상쇄 간섭이 되어 입력 신호가 0이 될 수도 있는 상황이다. 이런 관점에서 보면 광선을 이용하여 통신망을 설계하는 것이 전파에 비해서는 수월함을 알 수 있다. 그러나 앞에서 언급되었듯이, 회절 현상이 일어나는 영역이 상대적으로 좁아서 전파와는 달리 공간상에 가시광선을 넓게 퍼뜨리기가 힘들다는 단점이 있다. 이런 이유로 대부분의 가시광선을 이용

하는 통신 방식은 가시 영역(line of sight)에서 송수신 신호를 주고받게끔 되어 있다. 가시 영역에서 동작하는 경우, 단점은 무선 신호의 커버리지(coverage) 영역이 매우 좁아 움직이는 물체 또는 사람에 의해 신호가 끊길 확률이 많다는 것이다. 이러한 단점을 해결하기 위해 표면이 거칠어 난반사가 일어나는 Lambertian 면에서 빛이 전 방향으로 퍼져나가는 성질을 이용하여 넓은 범위에 빛이 도달하게 만들면 전파와 비슷하게 넓은 공간에 신호를 보낼 수 있다. 그러나 커버리지 영역이 늘어나는 것에 비례해, 빛의 세기가 급속히 줄어드는 단점이 있어서 정밀한 채널 모델을 이용하여 망을 설계할 필요가 있다.

광선이 가진 이와 같은 특성을 고려하여 통신망 설계에 필요한 채널 특성을 계산하기 위한 방법으로 광원에서 나온 광선의 경로를 계산하기 위해 광선 추적법(ray tracing)을 이용하는 것이 기존의 연구 방법이였으며, 많은 연구가 이 방법을 사용하여 진행되어 왔다. 광선 추적법은 광원에서 광선을 공간상의 각 지점으로 발사하고, 정해진 차수만큼 반사나 투과 경로를 계산하게 되므로 차수가 높아지거나 광선의 경로가 많아지는 경우, 그에 비례하여 계산 회수가 기하급수적으로 증가하게 된다는 단점이 있다. 특히, 난반사를 이용하여 광신호가 넓은 영역을 커버하게 만드는 상황에서는 더욱더 계산 횟수가 늘어난다. 이러한 계산상의 문제점을 해결하기 위해 가능한 모든 경로를 추적하지 않고 랜덤 방향을 선택하는 Monte Carlo 방식을 이용하는 방법<sup>[3]</sup>이 시도되었으나, 이 또한 정확한 계산 결과를 얻기 위해서는

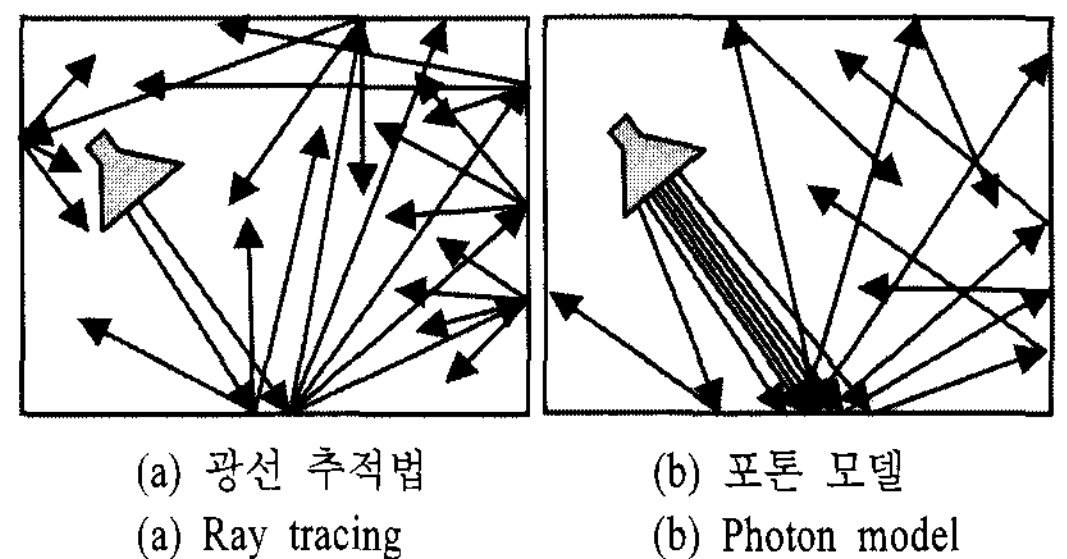


그림 1. 난반사를 일으키는 면으로 둘러싸여 있는 경우 광선 추적법과 포톤 모델의 광선 경로  
Fig. 1. Ray paths by photon model and by simple ray tracing method when surrounding surfaces cause diffuse reflections.

매우 많은 계산량이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 컴퓨터 그래픽 분야에서 쓰이고 있는 포톤 모델 방식<sup>[4]</sup>을 이용하여 채널 특성을 예측하는 방법을 제시한다.

광선 추적법의 경우, 물체 표면의 거친 정도가 심하지 않은 경우 광선이 표면에 부딪힌 후 입사각과 같은 크기의 반사각을 갖고 반사파가 진행하거나, 스넬의 법칙에 따라 광선이 굴절하는 진행하는 성질을 이용하는데, 물체 표면이 거칠어 난반사를 일으키는 경우는 광선이 표면에 부딪힌 후 여러 방향으로 산란되어 광선의 가능한 경로의 가지 수가 기하급수적으로 늘어나게 되고 계산량도 기하급수적으로 증가하는 문제점이 생긴다(그림 1(a)). 이에 반해 본 논문에서 제시하는 포톤 모델을 이용한 계산 방식에서는 빛의 세기를 포톤 경로들의 밀도로 나타내어, 광원에서 나오는 빛을 광원의 복사 패턴에 비례하는 밀도(angular density)를 갖는 포톤 경로들의 집합으로 나타낸다. 광원에서 나온 빛이 물체에 부딪히는 경우 산란파는 표면의 재질을 고려한 BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)에 따라 산란 방향이 결정되고, 반사율에 따라 흡수 여부가 정해진다. 포톤 모델에서는 포톤이 물체에 부딪히면 산란 방향이 가능한 여러 방향 중 한 방향으로 선택되는데, 이 때 방향별로 선택되는 확률은 BRDF에 비례한다. 또한, 물체 표면에서 반사율에 따라 포톤이 물체 표면에 흡수되거나 방향을 바꾸어 진행을 반복하므로, 포톤 모델에서 계산 회수는 포톤의 개수와 반사/투과 차수의 곱에 비례하게 된다(그림 1(b)). 이에 반에 앞서 언급한 단순한 광선 추적법의 경우는 계산 회수가 반사/투과 차수에 기하급수적으로 비례한다. 본문에서는 포톤 모델을 이용하여 빛의 세기를 계산하고, BRDF를 이용하여 물체 표면 재질의 특성에 따라 산란되는 포톤을 모델링 하는 방법을 제시한다.

## II. 포톤을 이용한 해석 방법

포톤을 이용한 해석 방법에서 고려할 사항은 크게 세 가지이다. 첫째로 광원을 모델링 해야 하고, 둘째로 광원에서 나온 포톤이 물체에 부딪히는 경우 산란된 포톤 방향의 분포, 셋째로 포톤들을 이용하

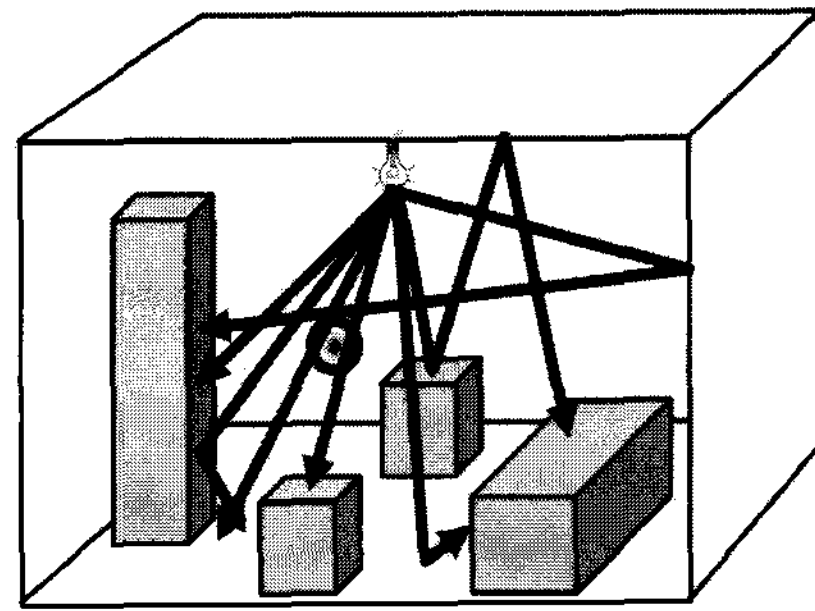


그림 2. 광원에서 나온 포톤들의 경로  
Fig. 2. Photon paths emitted from a light source.

여 빛의 세기, 시간 지연(delay) 정보를 포함한 임펄스 응답(impulse response)을 구하는 방법이다. 그림 2는 광원에서 나온 포톤이 물체에 부딪히면서 경로를 바꾸는 상황을 도시한 것이다. 광원에서 나오는 포톤은 광원의 복사 패턴에 따라 진행 방향별 밀도가 정해지며, 광선이 물체와 부딪히면 진행 방향별 밀도에 변화가 생기는데, 이 또한 물체의 재질에 따르도록 한다고 하면, 광선의 특성을 포톤 모델을 이용하여 설명하는 것이 가능하게 된다. 빛이 물체에 부딪혀 반사하는 경우에 물체 표면의 재질을 고려한다면 산란 방향이 거울 면 반사 방향뿐만 아니라 그 이외의 방향으로 진행되는 포톤이 존재한다. 또한, 반사율에 따라 포톤 중 일부는 방향을 바꾸어 계속 진행하고, 일부는 표면에 흡수되게 모델링 하면 실제 빛의 세기에 비례하는 포톤의 밀도를 얻을 수 있다. 이런 방식으로 빛의 진행을 포톤이라는 입자의 흐름으로 설명할 수 있는데, 이를 이용하여 실내에서 가시광선을 이용한 무선 통신망의 채널 특성을 계산할 수 있다. 2-1, 2-2, 2-3에서 포톤을 이용하여 광원, 물체 재질을 모델링 하는 방법, 포톤을 이용하여 빛의 세기(intensity)를 계산하는 방법, 시간 지연(delay profile)을 계산하는 방법을 다루고, 2-4에서는 수신기의 특성도 모델링 하는 방법을 다룬다.

### 2-1 광원 모델링

광원의 특성은 주파수 스펙트럼과 광원의 복사 패턴 정보로 모델링할 수 있다. 광원에서는 포톤이 만들어지므로, 그 생성 과정에서 두 가지 정보가 필요하다. 즉, 주파수 분포와 공간상의 복사 패턴(포톤

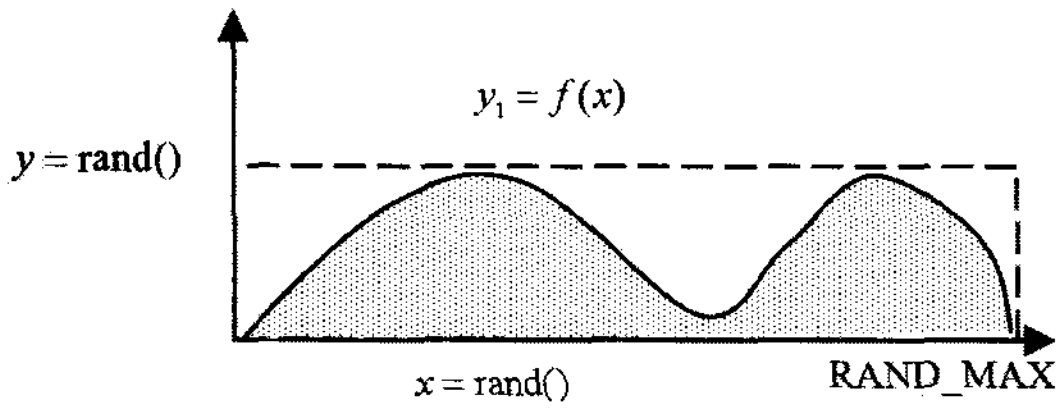


그림 3. 임의의 확률 분포  $y=f(x)$ 를 갖는 포톤을 생성하는 방법

Fig. 3. Method of photon generation which conforms to a distribution function  $y=f(x)$ .

의 방출 방향별 밀도 분포)이 정해지면 생성될 포톤은 통계적으로 그 분포를 따라야 한다. 포톤의 개수는 시뮬레이션의 정밀도에 따라 정할 수 있으므로, 정해진 개수를 가지면서 두 분포를 따르는 포톤을 생성하면 된다. 랜덤 변수 1개를 이용하여 주파수를 정하고, 다시 랜덤 변수를 하나를 더 이용하여 복사 패턴에 비례하는 통계적 분포를 갖는 포톤을 생성한다.

프로그램 상으로 구현하기 위해 C컴파일러에 기본 내장 라이브러리 함수인 rand( )를 사용하면 0~RANDMAX(32767)의 정수를 균일한 밀도로 생성해 준다. 이를 이용하여 임의의 분포 함수를 만들려면 Monte Carlo simulation에서 rejection method<sup>[5]</sup>를 쓰면 된다. 그림 3에서 x와 y축 좌표를 정할 때, 둘 다 rand( ) 함수로  $(x_1, y_1)$ 쌍을 만들고 이 좌표가 위 그림에서 점으로 표시한 부분에 속하는지 판단한다. 단순히  $y_1 < f(x_1)$  여부만 판단하여 이 조건을 만족하면  $(x_1, y_1)$ 쌍을 이용하여 포톤을 만들면 되고, 만족 못하는 경우 다시 rand( ) 함수를 이용하여  $(x_2, y_2)$ 쌍을 만들고 만족 여부를 판단하여 만족할 때까지 반복하면 된다. 광원에서 나오는 모든 포톤에 대하여 이 과정을 반복하면  $f(x)$ 라는 분포 함수를 따르는 포톤이 생성된다. 여기서  $f(x)$ 를 광원의 스펙트럼 분포로 하면 원하는 스펙트럼 성분을 갖는 포톤을 만들 수 있다.

광원의 복사 패턴을 모델링 하기 위해서는 주파수에 대한 1차원 rejection test에서 사용한 방법을 2차원으로 확장하면 된다. 즉, 광원의 위치를 기준으로 한 포톤의 방출 방향에 대해 복사 패턴을 이용하여  $f(\theta, \phi)$ 라는 공간상의 방향 별로 복사 패턴에 비례하는 함수를 만들고, 랜덤 변수 2개를 이용하여  $(\theta, \phi)$ 의 쌍을 정하고, 그 때 함수  $f$ 의 값과 또 다른

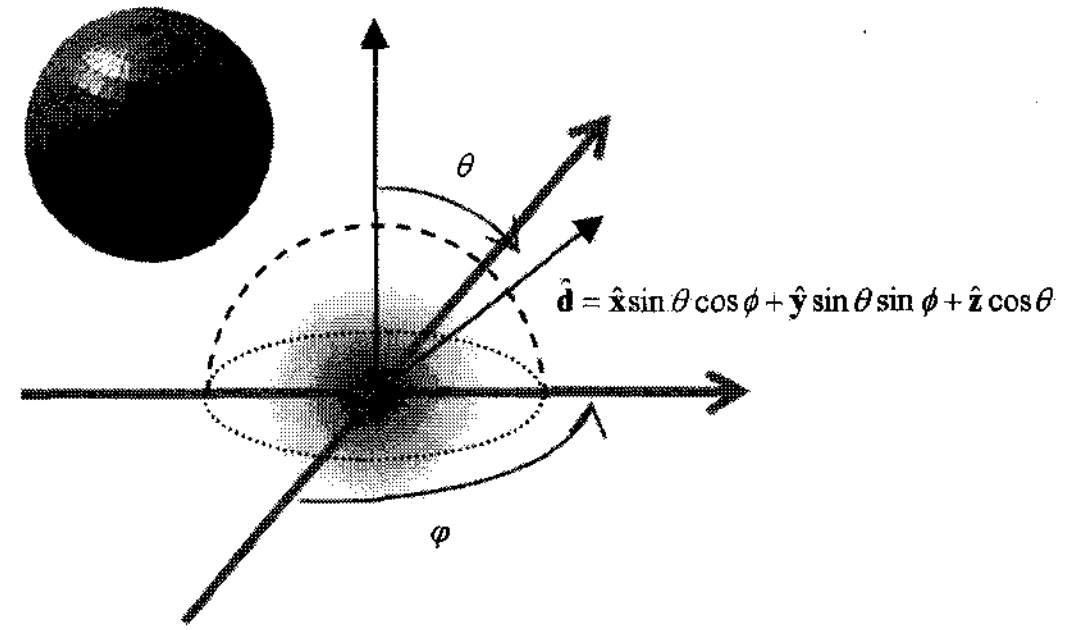


그림 4. Isotropic source 모델링을 위한 2차원 랜덤 변수  $(\theta, \phi)$ 의 분포

Fig. 4. Distribution of two-dimensional random variables to model an isotropic light source.

랜덤 변수  $y$ 의 값을 비교하면 복사 패턴에 비례하는 밀도를 갖는 포톤을 생성이 가능하다. 그림 4는 광원에서 모든 방향에 대해 균일한 밀도를 갖는 포톤을 생성하는 방법이다.

구면상의 임의의 점을 구 좌표계 변수인  $\theta, \phi$ 로 표시하면 위와 같고, 이 두 변수를 이용하여 공간상의 면적을 구하면  $\sin \theta d\theta d\phi$  이 된다. 즉, 구면 상에 균일한 밀도로 분포하려면  $\theta$ 에 따른 분포가  $\sin$  함수를 따르는 분포 함수를 만들면 된다.  $\theta$ 에 대해서는  $\sin \theta$  함수를 따르고,  $\phi$ 에 대해서는 균일하므로  $\theta$ 는 rejection method에 의해 구하고,  $\phi$ 는 단순히 rand( ) 함수를 이용하면 된다.

위와 같은 3차원 패턴을 만드는 경우에도 똑같이 rejection method를 써서 포톤을 생성한다. 그림 5는 실제적인 LED의 복사 패턴과 임의의 방향성을 갖는

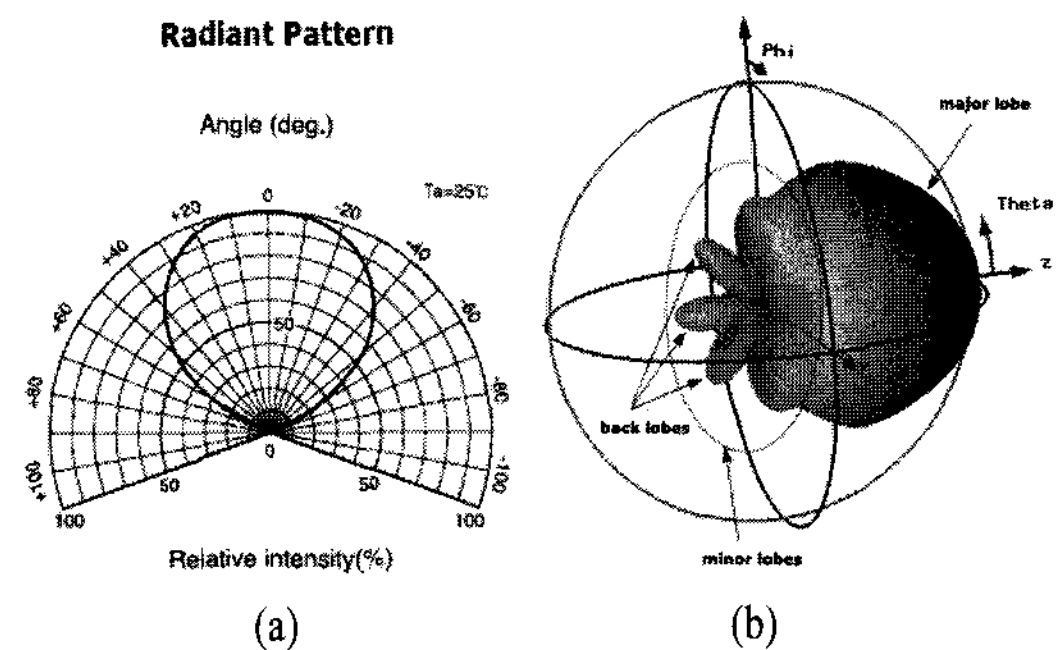


그림 5. (a) 광원으로 쓰이는 일반적인 LED의 복사 패턴, (b) 3차원 복사 패턴의 한 예

Fig. 5. (a) Radiation pattern of an LED, (b) Example of a three dimensional radiation pattern.

광원의 복사 패턴이다. 이 경우의 포톤을 생성하는 방법도 그림 3의 경우와 기본적으로 같은 방식이나 단지 함수  $f(\theta, \varphi)$ 를 복사 패턴으로 대치하면 된다.

### 2-2 포톤의 반사, 투과

포톤의 진행 방향은 광원에서 방출되어 직진하다가 물체에 부딪히면 반사, 굴절, 산란을 일으킨다. 그 후에 진행 방향은 통계적인 분포를 갖는데, 그 형태는 표면의 재질(texture)과 관련되어 있다. 그림 6에서 표면의 재질에 따라 매끄러운 면인 경우, 거울면 반사 방향으로 산란된 포톤이 진행하고, 표면이 거친 경우 난반사를 일으킨다. 표면의 거친 정도(roughness)에 따라 포톤이 산란된 후 진행 방향은 거울면 반사 각도뿐만 아니라 다른 각도에 대해서도 유한한 확률 밀도를 갖게 된다. 표면의 재질은 크게 매끄러운 거울면 반사를 일으키는 재질과 난반사를 일으키는 Lambertian 표면, 앞의 두 재질로 분류하기 어려운 나머지의 경우로 나눌 수 있다. 그림 6은 각각 매끄러운 거울면 반사 재질, Lambertian 재질, 그 외의 표면 재질에서 빛의 산란 방향, 즉 포톤의 산란 방향을 보여준다.

포톤의 산란 방향은 컴퓨터 그래픽 분야의 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 함수를 이용하고 랜덤 변수를 이용해 BRDF 분포를 따르는 포톤의 산란 방향을 선택하게 하면 된다.

$$\frac{d\Phi_r}{d\omega_r} = f_{BRDF} \cos \theta_r \cdot d\Phi_i \quad (1)$$

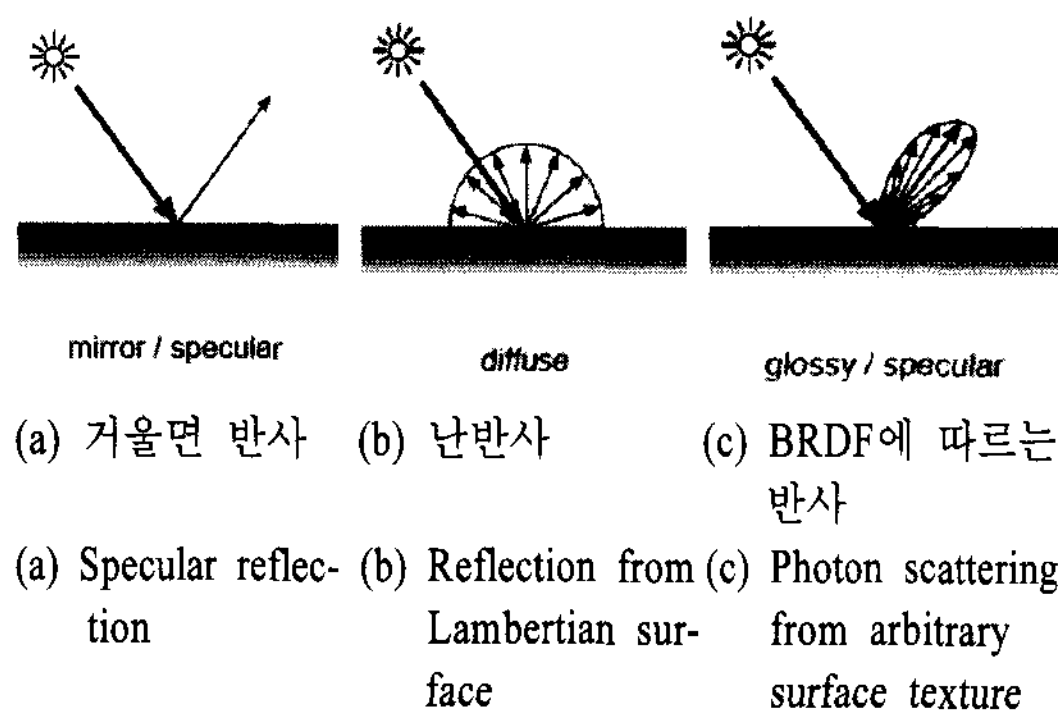


그림 6. 표면 재질에 따른 포톤의 산란 방향의 분포  
Fig. 6. Directions of scattered photons change with textures of surfaces.

위 식에서  $\Phi_i$ 와  $\Phi_r$ 은 입사파와 반사파의 포톤 흐름의 밀도이다. BRDF는 이론적 또는 실험적으로 구할 수 있다. 본 연구에서는 이 결과를 좀 더 계산하기 쉬운 다항식으로 근사한 Schlick<sup>[6]</sup>의 결과를 이용했다. Schlick의 BRDF는 다음과 같다.

$$f_r(x, \bar{\omega}, \bar{\omega}') = S(u) \left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{\pi} + gD(t, \nu, \nu', w) \\ + sf_{r,s}(x, \bar{\omega}, \bar{\omega}') \end{array} \right\} \quad (2)$$

위 식에서  $S(u)$ 는 프레넬 반사 계수이다. 또한,  $u = \bar{\omega} \cdot \bar{H}$ ,  $t = \hat{n} \cdot \bar{H}$ ,  $\nu = \bar{\omega} \cdot \hat{n}$ ,  $\nu' = \bar{\omega}' \cdot \hat{n}$ 이고,  $\bar{\omega}$ 는 산란각의 방향 벡터이고,  $\bar{\omega}'$ 는 입사각의 방향 벡터이다.  $\hat{n}$ 은 표면의 법선 벡터이다.  $\bar{H}$ 는 입사각과 반사각의 중간에 해당하는 방향을 나타내고 다음 식으로 정의된다.

$$\bar{H} = \frac{\bar{\omega} + \bar{\omega}'}{|\bar{\omega} + \bar{\omega}'|}, \quad w = \bar{T} \cdot \frac{\bar{H} - (\hat{n} \cdot \bar{H})\hat{n}}{|\bar{H} - (\hat{n} \cdot \bar{H})\hat{n}|} \text{이고, } \bar{T} \text{는 표}$$

면의 접선 방향 벡터이다. 나머지 수식도 Schlick의 모델을 이용하면 다음과 같다.

$$D(t, \nu, \nu', w) = \frac{G(\nu)G(\nu')Z(t)A(w) + 1 - G(\nu)G(\nu')}{4\pi\nu\nu'} \quad (3)$$

식 (3)에서  $Z(t) = \sigma[1 + (\sigma - 1)t^2]^{-2}$ 이고, 나머지는 식 (4)와 같다.

$$A(w) = \sqrt{\frac{\psi}{\psi^2 - \psi^2 w^2 + w^2}}, \quad G(\nu) = \frac{\nu}{\sigma - \sigma\nu + \nu} \quad (4)$$

$g$ 는  $g = 4\sigma(1 - \sigma)$ 으로 정의되고, 나머지  $d, s$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$d = \begin{cases} 0 & \text{for } \sigma < 0.5 \\ 1 - g & \text{otherwise} \end{cases}, \quad s = \begin{cases} 1 - g & \text{for } \sigma < 0.5 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

Schlick의 모델을 이용하기 위해서 실험적으로 결정해야 하는 파라미터는 두 가지다. 거친 정도(roughness:  $\sigma$ )와 비등방성(anisotropy:  $\psi$ )이다. 둘 다 0~1까지의 값을 갖는다. 거친 정도는 0인 경우가 거울면 반사에 해당하고, 1인 경우 Lambertian에 해당한다.  $\psi$ 는 0인 경우가 비등방성인 경우이고, 1인 경우 등방성이다. 이 파라미터를 이용해서 결이 있는



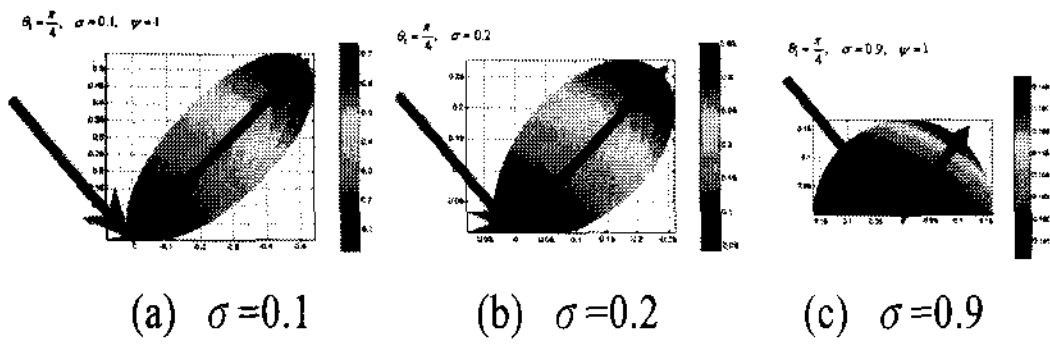


그림 7. 표면 거칠기( $\sigma$ )에 따른 산란 포톤의 진행 방향 분포

Fig. 7. Scattered photon distribution as roughness parameters change.

나무 표면이나, 한 방향으로 결이 난 금속 표면을 모델링할 수 있다.

그림 7은 Schlick의 모델을 이용해 물체 표면의 거친 정도에 따라 산란되는 포톤 방향의 분포 함수를 각도별로 그래프로 나타낸 것이다. 그림 7에서 광원에서 나온 포톤은 물체 표면에 45도 각도로 입사하고 있다. 표면의 거친 정도에 따라 산란되는 포톤의 방향 분포가 달라지는 것을 보여주고 있다. 거친 정도가 1에 가까울수록 산란 후 공간상의 전 방향으로 퍼지는 것을 알 수 있다.

Schlick의 모델을 이용하여 실제 물체의 표면 재질을 고려한 계산을 위해  $\sigma$ ,  $\psi$ 의 두 파라미터는 광원에 의해 산란되는 산란 광선의 분포를 측정하여 정할 수 있다.

### 2-3 Intensity 계산

광원에서 만들어진 포톤들이 방출되어 물체들에 부딪히는 과정을 계속하면서 포톤의 경로가 정해진다. 부딪히는 과정은 사용자가 정한 횟수까지만 반복하도록 되어 있다. 이런 식으로 포톤 경로의 집합이 완성되면, 이를 이용하여 무선 채널의 특성을 파악하는데 필요한 설계 파라미터를 추출할 수 있다. 그림 8은 만들어진 포톤 집합을 이용하는 방법을 설명해 준다.

포톤을 이용하여 빛의 세기를 구하는데 문제점은, 특정한 관측점을 지나는 포톤들의 개수를 세어 세기를 구하기 어렵다는 것이다. 원래 빛의 광량은 연속된 물리량이나, 계산의 편의를 위해 도입한 포톤이라는 개념의 특성상 공간상의 분포가 불연속적이기 때문이다. 이런 문제점을 해결하기 위해 포톤 경로들의 밀도를 이용한다. 이 방식에서는 수신점 한 군데의 빛의 세기를 구하기 위해, 수신점을 포함하는

작은 크기의 반지름을 가진 구를 이용한다. 포톤의 경로인 광선들 중 이 구를 통과하고 지나가는 것의 개수를 세고, 그 수를 구의 단면적으로 나누는 방식이다. 빛의 세기는 스칼라량이지만, 수신기에 수신되는 전력을 구하기 위해서는 방향을 포함하는 포인팅(poynting) 벡터를 만들어야 한다. 이를 위해 수신 구(reception sphere)를 만들고, 방향에 관계없이 이 구를 가로지르는 ray들을 전부 찾은 후 단순히 개수만을 세는 것이 아니라, ray의 방향의 단위 벡터들을 합산하고 단면적( $\pi r^2$ ,  $r$ 은 수신 구의 반지름)으로 나누면 포톤의 전력 흐름의 밀도에 해당하는 포인팅 벡터가 구해진다. 이것이 방향성을 고려해서 얻은 빛의 세기가 된다. 여기에서 수신 구의 반지름이 커지면 커질수록 수신점 주변의 빛의 세기 값이 많이 반영되므로 공간상의 해상도는 떨어지나, 통신 채널 특성을 얻기 위한 용도이므로 해상도가 그다지 높지 않아도 별 문제가 되지 않는다. 공간 해상도를 높이기 위해서는 광원에서 방출되는 전체 포톤의 개수를 늘리고 수신 구의 반지름을 줄이면 된다.

광원에서 나오는 전력을  $P_T$ 라고 하고, 포톤의 개수를  $N$ 개라 가정하면 공간상의 단면적  $A$ 를 통과하는 포톤의 개수는 다음 식이 된다. 왼쪽 위에 있는 광원으로부터 포톤이 방출되면, 거리가 멀어질수록 포톤의 밀도가 줄어들게 되는데, 줄어드는 정도가 거리의 제곱에 반비례하는 밀도라는 것을 알 수 있다. 이 밀도의 변화는 맥스웰 방정식에서 유도되는

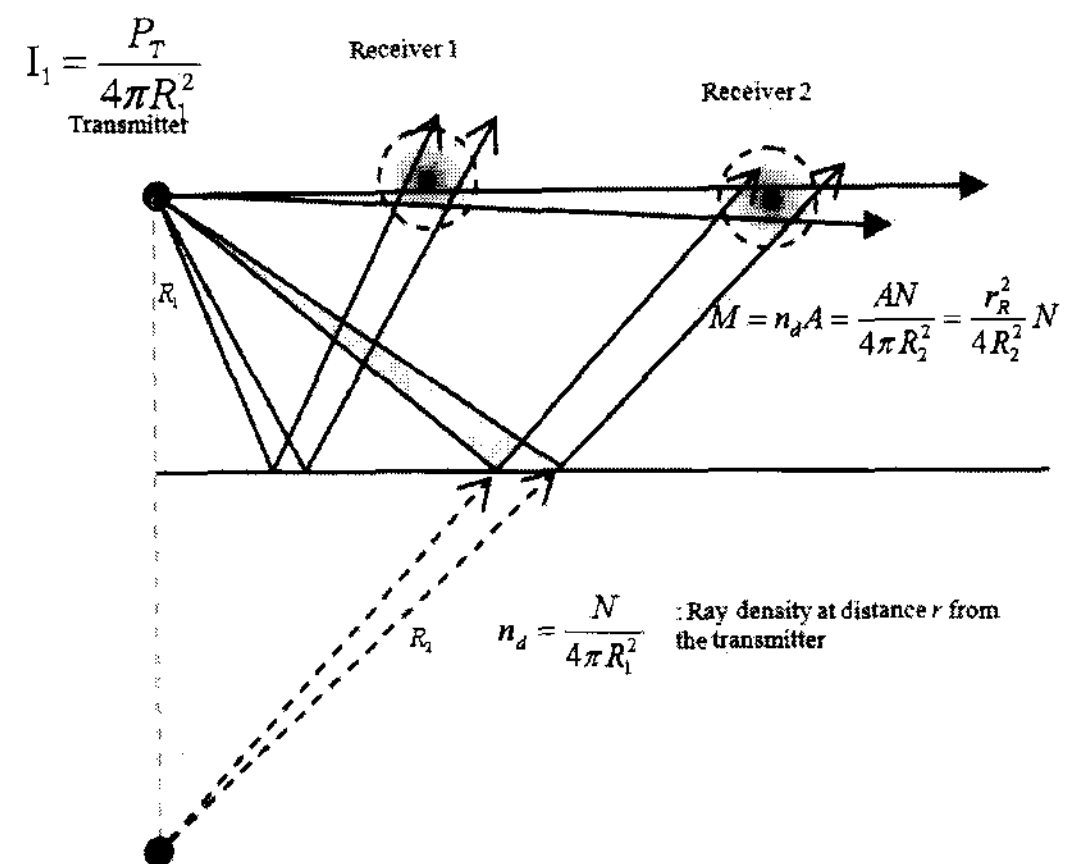


그림 8. Reception sphere를 이용한 intensity 계산  
Fig. 8. Calculation of light intensity using reception sphere.

점 전원에서 나오는 빛의 세기가 거리의 제곱에 반비례한다는 사실과 동일하다. 그림 8에서 수신기 2의 위치에서 수신되는 포톤의 밀도를 구하기 위해 반지름이  $r_R$ 인 수신 구를 이용하면 수신되는 포톤의 개수는 식 (6)에서  $M$ 과 같다.

$$M = n_d A = \frac{AN}{4\pi R_2^2} = \frac{r_R^2}{4R_2^2} N \quad (6)$$

포톤의 개수에 포톤 1개의 전력을 곱하면 수신 전력은 다음 식 (7)이 된다.

$$P_R = M \frac{P_T}{N} = \frac{r_R^2}{4R_2^2} N \frac{P_T}{N} = \frac{\pi r_R^2}{4\pi R_2^2} P_T \quad (7)$$

이 식은 공간상의 각 지점에서 광선의 전력을 구하려면, 수신 구를 이용하여, 구를 통과하는 포톤 경로의 개수를 세면 된다는 것을 알려주고 있다.

동시에 포톤 경로를 찾는 과정에서 광원에서부터 포톤이 진행한 거리를 쉽게 계산할 수 있으므로 시간지연(delay spread) 정보도 구할 수 있다. 수신 지점이 정해지면 수신 구를 정하여 구와 교점을 갖는 포톤들을 찾고 광원에서부터 진행해 온 거리를 평균하면 시간 지연 특성도 구할 수 있다.

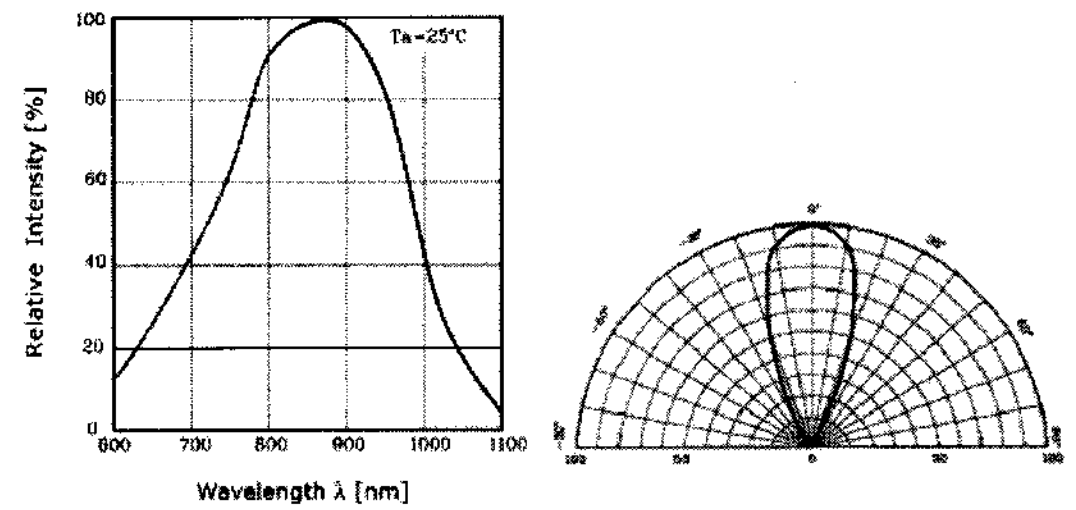
### 2.4 Receiver Property

위의 계산은 수신기의 특성을 고려하지 않은 결과를 제시한다. 그러나 실제 시스템에서 수신기의 특성에 따라 통신 채널의 연결 특성의 변화가 크므로 이를 고려해야 한다. 이를 위해서 아래와 같이 수신기의 파장별 민감도(sensitivity)와 수신기의 복사 패턴의 영향을 고려해주는 함수를 만들어 사용한다. 아래에서  $r$ 은 수신 구의 반지름이다. 최종적인 수신기의 전류(photo current)는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$I = \frac{1}{\pi r^2} \sum P_{\text{photon}} \cdot f_{\text{spectrum}}(\lambda) f_{\text{pattern}}(\hat{d}_{\text{photon}}) \quad (8)$$

그림 9는 포토 다이오드의 파장별 민감도와 수신 패턴이다.

필요에 따라서  $f_{\text{pattern}}(\hat{d}_{\text{photon}})$ 에 receiver의 FOV(Field Of View)를 고려하게 할 수도 있다.



(a) 포톤의 파장별 수신기 (b) 포톤의 입사각에 따른  
의 민감도를 나타내는 수신기의 민감도를 나타  
함수  $f_{\text{spectrum}}(\lambda)$  내는 함수  $f_{\text{pattern}}(\hat{d}_{\text{photon}})$   
(수신기의 패턴).  $\hat{d}_{\text{photon}}$ 는  
포톤의 진행 방향  
(a) A function  $f_{\text{spectrum}}(\lambda)$  (b) A function  $f_{\text{pattern}}(\hat{d}_{\text{photon}})$   
models sensitivities of represents variation of light  
light reception with reception with directions  
wavelength variation of incoming rays

그림 9. Receiver 특성 모델링  
Fig. 9. Modeling of properties of a receiver.

### III. 계산 결과 및 실험을 통한 검증

본 연구에서 제안한 포톤 모델을 이용한 계산 결과는 다음과 같다. 모델의 정확도를 검증하기 위해 참고문헌 [7]의 결과와 비교했다. 5×5×3 m의 방에 점 광원이 있는 경우이다. 벽면과 지면의 반사 계수가 각각 0.8, 0.3인 경우의 결과이다. 그림 10의 결과는 포톤을 200만 개 생성하여 광원을 모델링 한 결

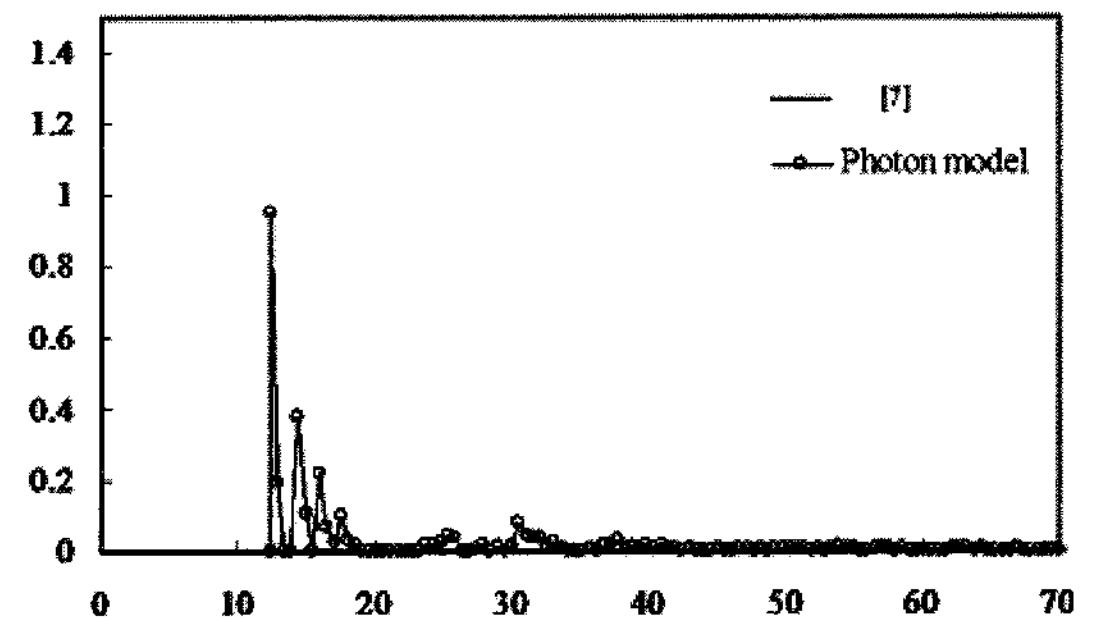
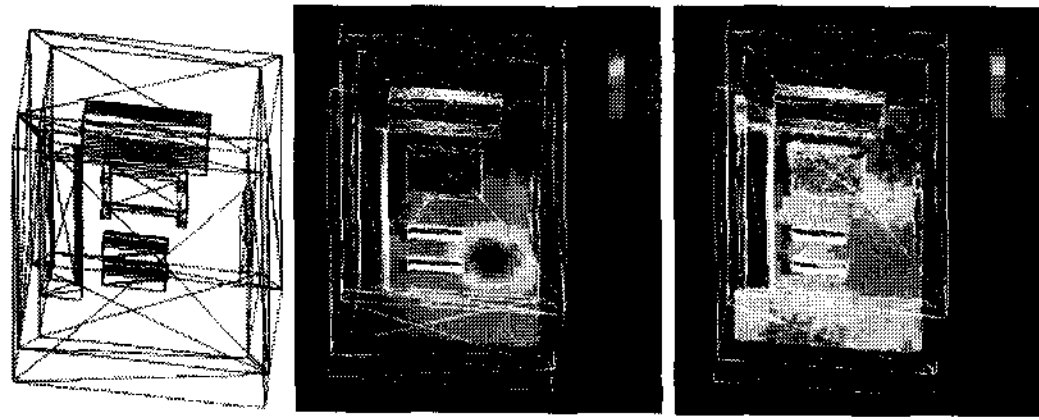


그림 10. 코사인 함수 형태의 복사 패턴을 갖는 점 전원의 임펄스 응답<sup>[7]</sup>과의 비교. x축은 수신된 포톤들의 광원에서 방출된 후의 시간 지연

Fig. 10. Comparison of simulation data with results in [7]. An impulse response is plotted versus time delay.



(a) 구조 (b) 빛의 세기 분포 (c) 시간 지연  
 (a) Indoor environment (b) Distribution of light intensity (c) Delay spread

그림 11. 소파와 테이블이 있는 실내의 (a) 구조, (b) 빛의 세기 분포, (c) 시간 지연

Fig. 11. Simulation results of a room with sofas and a table. (a) indoor environment, (b) distribution of light intensity, (c) delay spread.

과이다. 광원은 코사인 함수 형태의 복사 패턴을 갖고, 수신기 또한 같은 형태의 복사 패턴을 갖게 했다. 방의 벽면과 천장은 반사 계수(reflection coefficient)가 0.8, 지면은 0.3인 경우이다. 참고문헌 [7]에 비해서 포톤 모델을 쓰는 경우 포톤을 생성하고 반사, 투과, 산란하는 경우, 매질의 특성에 따른 분포가 되도록 고려해주고, 그 외에는 단순히 포톤의 개수만을 세면 되기 때문에 200만 개의 포톤을 이용하고 반사 회수를 8회로 하더라도 포톤 경로를 생성하는데 시간은 1분 정도 소요된다(CPU intel core2-duo 2.4 GHz). 물론 방 안에 다양한 물체가 놓여 있는 경우는 시간이 비례적으로 늘어난다.

계산 과정은 실내 환경 데이터를 읽어들이고, 광원과 수신기의 특성을 정의하고 포톤을 생성한다. 포톤은 정해진 회수의 반사 또는 투과 과정을 거치면서 직선들의 집합을 만들어 간다. 포톤 경로가 생성되면 그 정보를 이용하여 임펄스 응답, 시간 지연 특성(delay spread), excess delay 등의 원하는 채널 특성 파라미터들을 계산할 수 있다. 그림 11은 소파와 테이블이 있는 실내에 광원이 하나 있을 때 시뮬레이션한 결과이다. 계산에 쓰인 포톤의 개수는 100만 개이다. 오른쪽 아래 부분에 광원이 있고, 천장과 바닥 등의 모든 물체의 반사율이 0.44인 재질로 되어 있는 경우의 빛의 세기 분포, 시간 지연 특성을 보여주고 있다. 광원에서 멀어질수록 빛의 세기는 줄어들고, 시간 지연 특성의 편차는 증가하는 일반적인 경향을 잘 보여주고 있다.

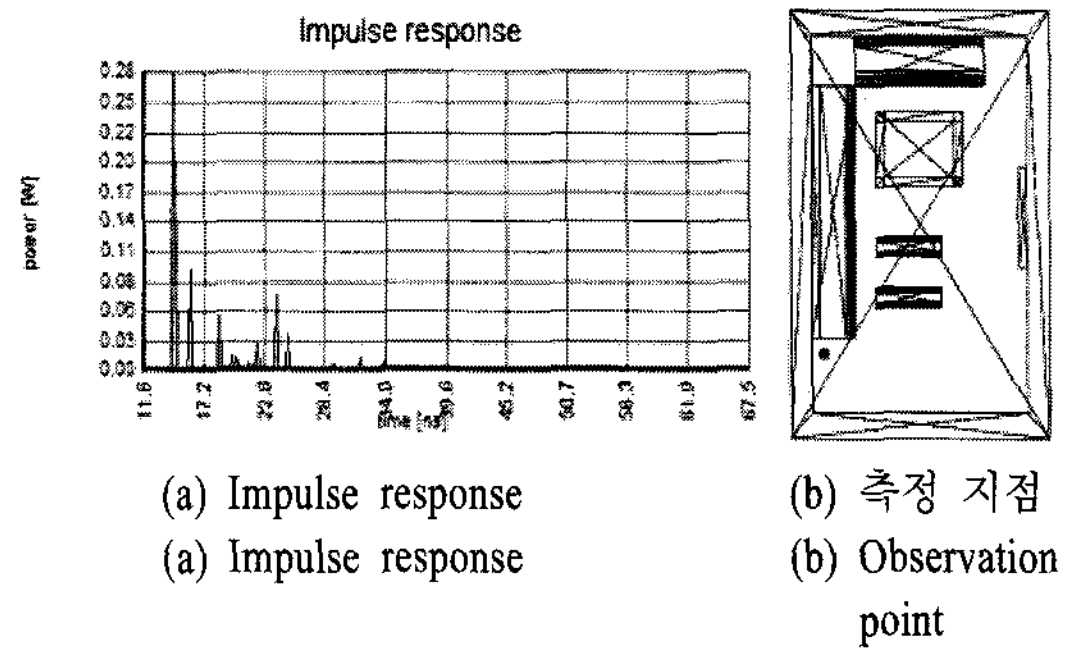


그림 12. 왼쪽 밑의 붉은 지점으로 표시된 부분의 Fig. 12. Impulse response at the point marked by red spot.

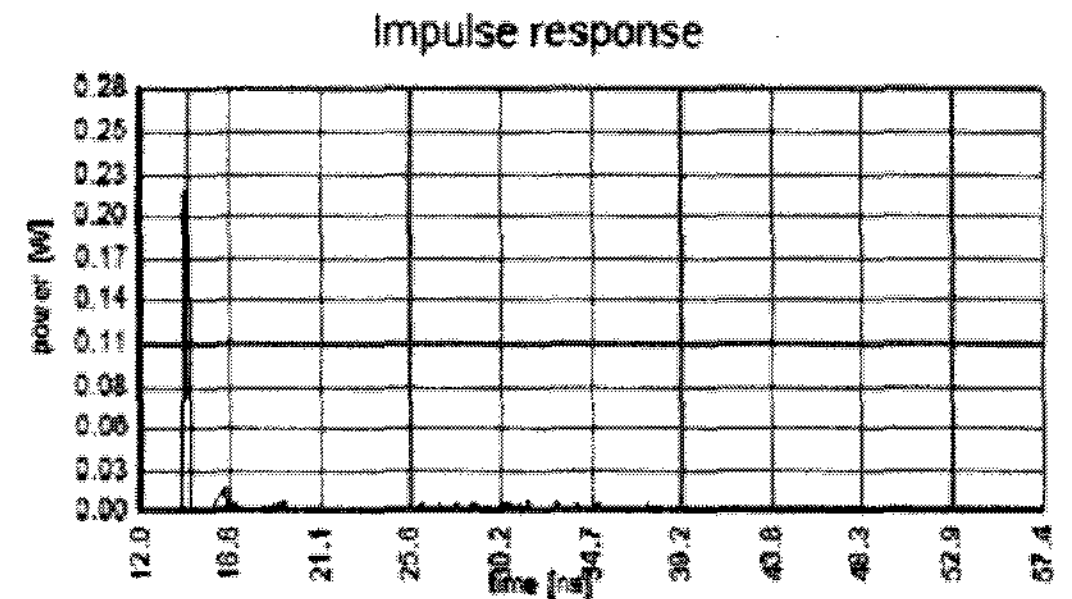


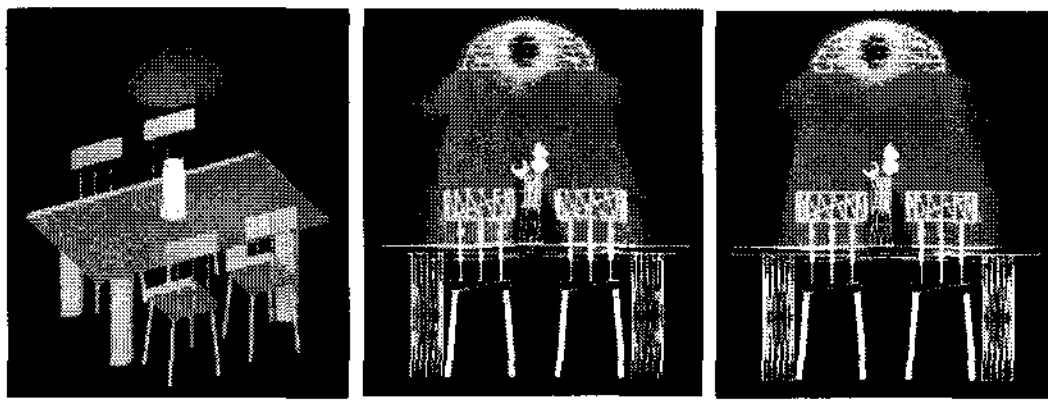
그림 13. 천장과 바닥, 소파의 재질을 Lambertian surface로 바꾼 경우의 임펄스 응답(그림 10과 동일 지점에서 계산한 결과임)

Fig. 13. Impulse response of a room when the textures of the ceiling, floor and sofas are changed to Lambertian(Measurement position is the same as in Fig. 10.).

천장과 바닥, 소파의 재질을 난반사를 일으키는 Lambertian 면로 바꾼 후의 시뮬레이션 결과는 다음과 같다. 그림 11에 비해 물체 표면이 난반사를 일으키는 경우, 다중 경로에 의한 신호가 줄어드는 것을 알 수 있다(그림 13).

좀 더 복잡한 환경에서도 포톤 모델을 이용한 시뮬레이션은 포톤의 개수를 조절하여 계산의 정밀도와 계산 시간을 타협할 수 있는 장점이 있다. 그림 14는 10만 개의 포톤을 이용한 계산 결과이다. 계산 시간은 3분이다. 포톤을 50만 개로 계산한 경우, 시간은 15분 걸렸다. 그림 14의 결과를 볼 때 포톤 모델링 방법에 의한 해석 결과는 매우 빠르게 수렴함을 알 수 있다.





(a) 환경 (b) 10만개의 포톤 (c) 50만개를 이  
 (a) Environment (b) Intensity distribu- 용한 결과  
 tion with 100,000 500,000 pho-  
 tons tons

그림 14. 식탁, 의자, 전등 갓이 있는 조명의 시뮬레이션 결과

Fig. 14. Simulation result of a set of a table and chairs illuminated by a light source with a reflector.

#### IV. 결 론

실내 환경에서 LED 같은 광원을 이용하여 통신 망을 설계할 때 필요한 통신 채널 특성을 예측하는 방법을 제시했다. 가시광선처럼 매우 높은 주파수를 가진 전파가 실내의 물체에 의해 산란을 일으키는 경우, 매우 짧은 파장으로 인해 물체 표면의 재질의 영향을 고려해야 한다. 표면 재질에 따른 산란 특성의 모델링은 컴퓨터 그래픽 분야의 BRDF를 이용하였고, 채널 특성 계산을 위한 전파 경로는 포톤 모델을 이용하여 공간상의 포톤 경로로 모델링 했다. 단순 광선 추적법에서 난반사를 일으키는 경우, 계산 시간이 기하급수적으로 증가하는 문제 또한 포톤 모델을 이용하여 극복하고, 광원과 수신기의 복사 패턴을 모델링 하는 방법도 제시했다. 또한, 기존 문헌의 결과와 비교하여 정확한 값을 예측할 수 있다는 것을 검증했고, 다양한 환경에서 시뮬레이션 결과도 제시했다. 본 논문의 방법을 이용하면 실내 환경의 복잡한 물체가 있는 경우에도, 각 물체의 재질을 고

려하기 위해 반사율과 BRDF 파라미터들을 실험적 방법으로 구한 결과만 있으면 정확한 채널 특성을 계산하여 가시광선을 이용한 무선 망 설계를 효율적으로 할 수 있게 해줄 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

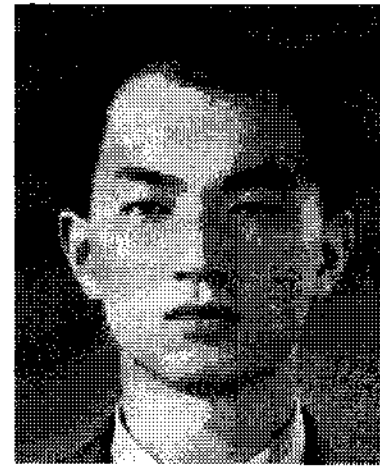
- [1] Joseph M. Kahn et al., "Non-directed infrared links for high-capacity wireless LANs", *IEEE Personal Communications*, no. 2, 1994.
- [2] Joseph M. Kahn, William J. Krause, and Jeffrey B. Carruthers, "Experimental characterization of non-directed indoor infrared channels", *IEEE Trans. on Communications*, vol. 43, no. 2, pp. 1613-1623, Feb. 1995.
- [3] Francisco J. Lopez-Hernandez, Rafael Perez-Jimenez, and Asuncion Santamaria, "Ray tracing algorithms for fast calculation of the channel impulse response on diffuse IR wireless indoor channels", *Optical Engineering*, vol. 39, no. 10, pp. 2775-2780, Oct. 2000.
- [4] H. W. Jensen, "Global illumination using photon maps", *Eurographics*, vol. 7, pp. 21-30, 1996.
- [5] Matthew N. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics*, CRC Press, pp. 538-541, 2001.
- [6] C. Schlick, "An inexpensive BRDF model for physically-based rendering", *Eurographics*, vol. 13, no. 3, pp. 234-246, 1994.
- [7] J. R. Barry, J. M. Kahn, W. J. Krause, E. A. Lee and D. G. Messerschmitt, "Simulation of multipath impulse response for indoor wireless optical channels", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 367-379, Apr. 1993.

이 정 한



2007년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)  
2007년 3월~현재: 서강대학교 전자공학과 석사과정  
[주 관심분야] 초고주파 산란 해석, EMI/EMC

이 행 선



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
1997년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
2000년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
2000년 8월~2004년 2월: LG전자 선임연구원  
2004년 2월~현재: 서강대학교 전자공학과 조교수  
[주 관심분야] 초고주파 산란 해석, EMI/EMC