

# 다중 벽면 구조의 실내 환경에서 2차원 광선추적법 구현 및 시뮬레이션

정승희\*, 강철규\*\*, 오창현\*\*\*

## 요약

본 논문에서는 다중 벽면 구조의 실내 환경에서 전파의 전달특성을 모델링하기 위해 ray-launching 기반의 광선추적법을 이용한 2차원 ray-tracing 시뮬레이터를 구현하였고, 이를 통해 ray의 전파 경로를 분석하고 평가하였다. 실험 결과, 구현된 광선추적법의 경로 패턴 및 시간지연 분포는 동일한 무선 환경에서 수행된 이전의 실험 결과와 비슷한 결과가 나타남을 확인하였으며, 송수신 거리 및 방사각에 따른 수신반경의 조정이 타당함을 확인하였다. 특히 비가시거리 송수신 환경에서 다중 벽면을 투과한 ray가 반사와 투과를 형성하여 수신기에 도달할 때까지의 ray의 impulse response는 기존 연구의 실험 결과와 대부분 일치하였으며, 송신기에서 방사되는 ray의 방사각을 1°에서 7°까지 달리하여 실험한 경우 도출된 channel profile이 서로 유사함을 확인하였다.

## Implementation and Simulation of 2D Ray-tracing Technique in Multiple-wall Indoor Environment

Seung-Heui Jeong\*, Chul-Gyu Kang\*\*, Chang-Heon Oh\*\*\*

## Abstract

In this paper, we implemented a ray-tracing simulator with a ray-launching technique and generated the propagation path of each ray in a multiple-wall indoor environment. In this simulator, we adopted two dimension ray-tracing techniques considering the reflection and penetration were dominant propagation factor in the indoor channel. From the result, we verified that this ray-tracing simulator shows the similar path pattern and delay distribution with the experiment results of the previous research. Especially, impulse responses of the ray were corresponding to reference result in non-line of sight of multiple-wall indoor environment. Furthermore, we confirmed that channel profiles having respectively different departure angle 1 degree to 7 degree were similar between them.

Keywords : 광선추적법, 채널모델링, ray-tracing, channel profile, delay spread, multipath propagation

## 1. 서론

최근 발전된 IT 기술을 바탕으로 실내 환경에서 무선 근거리 통신망 및 무선 개인 통신망의 활발한 이용이 이루어지고 있다. 이러한 무선 통신 시스템의 효율적인 설계 및 원활한 활용을

위해서는 사용 환경에 따른 전파 특성의 정확한 분석이 요구된다. 그러나 실외 환경에 비해 복잡한 구조의 산란체와 반사체로 이루어진 실내 환경에서 송수신 연결간의 정확한 전파특성 분석 및 예측은 어려운 실정이며, 특히 비가시거리 경로상의 건물 내부 환경의 전파는 내벽, 천장, 바닥 및 가구 등으로 인하여 실외 환경에 비해 많은 전파 장애물이 존재하고 수많은 반사와 투과를 통해 전파가 전달되므로 경로 손실 및 신호의 지연(delay)을 일으키는 다중경로가 발생하게 된다.

따라서 무선 통신 시스템 설계에 필요한 채널의 특성을 정확히 예측하기 위해 다양한 방안이

※ 제일저자(First Author) : 정승희  
접수일자:2007년07월20일, 심사완료:2007년08월17일  
\* 한국기술교육대학교 전기전자공학과  
maju9797@kut.ac.kr  
\*\* 한국기술교육대학교 전기전자공학과  
\*\*\* 한국기술교육대학교 정보기술공학부 부교수

연구되어 왔으며, 이를 위해서 많은 비용과 시간이 요구되는 실험적인 수단을 통한 전파특성 해석 방법 보다는 이론적인 수단을 통하여 전파특성을 예측하는 방법이 보다 능률적인 방법이라 할 수 있을 것이다.

전파의 무선 환경을 예측할 수 있는 대표적인 분석 방법으로 UTD(Uniform Geometrical Theory of Diffraction)에 기반한 광선추적법이 가장 우수성을 인정받고 있으며 여러 문헌들을 통하여 그 정확성이 입증되었다[1][2][3]. 이러한 광선추적법은 전기영상법(image-method)과 광선발사법(ray-launching)으로 나눌 수 있다.

전기영상법은 점대점 광선추적법의 일종으로 수신 시험을 필요로 하지 않으면서도 반사점과 회절점등을 제공하므로 해석결과가 정확하고, 빠른 장점이 있으나, 복잡한 구조의 건물이나 실내 환경을 해석하기에는 어렵다는 단점 때문에 십자형 복도와 같은 간단한 구조를 해석하는데 주로 활용된다.

이에 반해, 광선발사법은 송신 안테나로부터 등간격의 ray를 발사한 뒤 각각의 ray를 추적하여 수신점에 도달하는 ray의 경로를 찾는 방식으로써, 수신 안테나에 도착하는 ray의 경로뿐 아니라, 도달하지 않는 ray의 경로까지도 모두 검색해야 하는 단점이 있으나, 임의의 건물 모양이나 실내의 복잡한 구조의 환경에서도 해석이 가능하다는 장점이 있다[4].

따라서 본 논문에서는 다수의 벽면으로 구성된 실내 환경의 전파특성을 분석하기 위해 광선발사법 기반의 광선추적법을 활용하여, 전파의 반사 및 투과에 의한 전달 특성을 분석하고자 한다. 이를 위해 복잡한 실내 구조를 간단하게 구현할 수 있는 시뮬레이터를 개발하여 분석에 활용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장 서론에 이어 2장에서는 광선추적법에 대해 기술하며, 3장에서는 광선추적법을 구현하고 실내 환경에서의 전파특성을 분석한다. 4장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## 2. 광선추적법 (Ray-tracing)

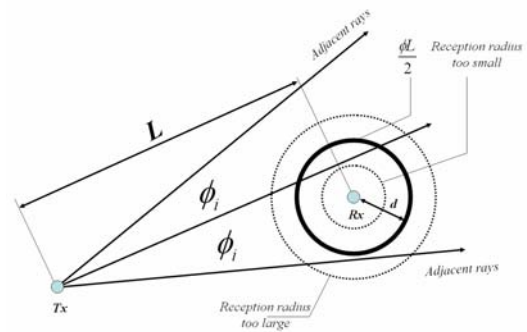
광선추적법을 포함한 결정론적인 무선 전파

예측 모델링 기법은 마이크로 셀과 실내 환경에서 경로 손실을 정확하게 예측할 수 있는 방법으로 널리 이용되고 있다. 특히 광선추적법은 기존의 통계적 방법에 비하여 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, RMS(root mean square) delay spread와 같은 무선 시스템을 설계하는데 요구되는 정확하고도 결정론적인 전파 모델을 만들어낼 수 있다[4]. 본 장에서는 실내 환경에서 수신기에 도달하는 대부분의 ray가 반사 및 투과에 의해 도달하는 특성을 고려하여, 3차원 광선추적법에 비하여 구현의 복잡도가 높지 않으면서 타당한 예측 결과를 보이는 2차원 광선추적법에 대하여 기술한다.

### 2.1 송신기와 수신기

일반적으로 2차원 광선추적법에서 송신기는 모든 방향으로 균일하게 방사되는 점의 형태로 가정한다. 이때, 송신기에서 방사되는 ray의 각도는 일정한 등간격을 유지하되, 무한히 조밀하게 방사할 수 없으므로 송신기와 수신기 사이의 거리에 따라 수신기의 수신 반경을 조정해야 한다.

(그림 1)과 같이 2차원 광선추적법에서 수신기는 일정한 크기의 반경을 가진 원으로 가정하며, 수신기의 반경 근처를 지나는 ray와 교차할 수 있도록 반경의 크기를 결정해야 한다.



(그림 1) 수신기의 반경과 ray의 진행방향

예를 들어, 수신기의 반경이 너무 큰 경우, 수신되는 ray 뿐만 아니라 인접 ray까지 수신되는 것으로 인식할 수 있으며, 이는 유사한 특성을 보이는 중복된 ray를 수집하게 되므로, 전파환경

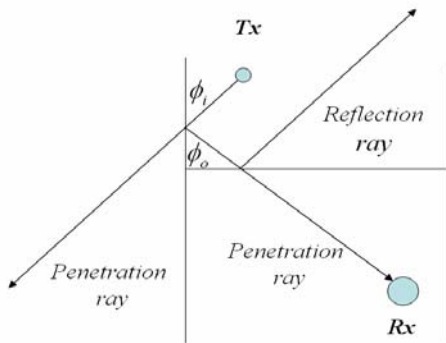
의 효율적 분석에 부적합하다. 반면에 수신기의 반경이 너무 작은 경우, 수신기의 반경에 도달한 ray를 인식하지 못하게 되므로 전파환경 분석을 위한 ray의 수가 부족해지는 단점이 있으며, 이는 타당한 분석 결과 도출의 어려움 및 적정 수준의 ray 확보를 위해 방사각을 조밀하게 재조정해야 하므로 결과적으로 효율적인 전파환경 분석에 부적합하게 된다. 그러므로 수신기의 수신 범위를 적당한 크기로 조정해야 한다[5]. 일반적으로 송신기로부터 방사된 ray는 진행하면서 퍼지기 때문에 수신기의 반경 역시 송신기로부터의 거리에 따라 변화하게 된다. 송신기에서 방사되는 ray의 방사각을  $\phi_i$ 라 하고, 송신기와 수신기 사이의 거리를  $L$ 이라 할 때,

$$d \leq \frac{1}{2}\phi L. \quad (1)$$

식 (1)과 같이 수신 반경  $d$ 가 만족되면 ray가 수신된 것으로 가정할 수 있다.

### 2.2 벽면에 의한 반사 및 투과

송신기로부터 방사된 ray는 진행하면서 벽이나 다른 방해물에 의해 반사 혹은 투과하게 되며, 일부는 흡수된다. 따라서 (그림 2)와 같이 벽면에 입사하는 ray, 반사하는 ray 그리고 투과하는 ray가 존재하게 된다.



(그림 2) Ray의 반사 및 투과

일반적인 실내 환경에서 송신된 ray는 실외 환경에 비해 ray의 수신 형태가 주로 반사파에

의존하여 수신되는 경향을 보인다. 따라서 본 논문에서는 장애물에 의한 산란 및 회절의 영향을 배제하고 반사 및 투과에 의한 영향만을 고려한 간략한 구조의 2차원 광선추적법을 이용하여, 다중 벽면으로 이루어진 실내 환경의 전파특성을 실험하였다.

송신기에서 방사된 ray가 다중 벽면의 경계면에 의해 투과와 반사 되는 경우의 손실 계수를 알기 위해서는 해당 벽면의 재질 및 투과와 반사에 대한 정확한 계수가 요구된다. 그러므로 경계면에서 수평편파의 단일 투과 및 단일 반사계수는 다음과 같다.

$$\Gamma_s = \frac{\cos\theta - \sqrt{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right) - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right) - \sin^2\theta}}. \quad (2)$$

식 (2)에서  $\theta$ 는 입사각이며, 본 논문에서는 상대유전율의 계수로  $\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 3$ 을 가정하였다. 따라서 반사 및 투과의 횟수가 증가할수록 전달되는 에너지는 감소하기 때문에 일정 횟수 이상의 충돌이 발생한 ray의 수신 전력을 제한할 필요가 있다. 이에 본 논문에서는 ray의 최대 충돌 가능 횟수를 10회로 제한하여 실험하였다.

### 2.3 자유경로 손실

자유공간 경로손실(PL)은 송신기와 수신기 사이의 전력의 차이로 정의되며, 거리에 따라 선형적으로 감소된다. 일반적인 자유공간 경로 손실 값은 양의 값으로 표현하며, 안테나의 이득을 포함하였을 경우 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$PL(dB) = 10\log\frac{P_t}{P_r} = -10\log\left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2}\right]. \quad (3)$$

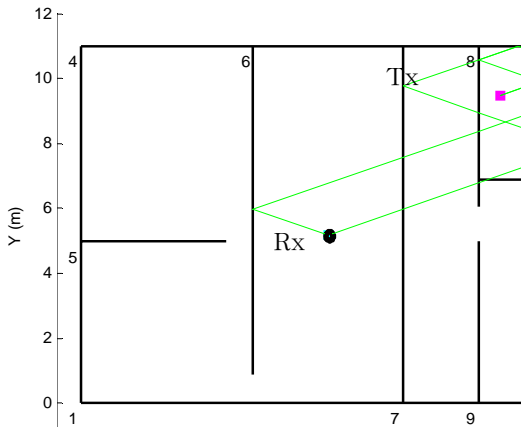
여기서  $P_t$ 는 송신기의 전력,  $d$ 는 송수신기 사이의 거리이며,  $G_t$ 와  $G_r$ 은 단위가 없는 수로  $G_t$ 는 송신 안테나 이득 값,  $G_r$ 은 수신 안테나 이득 값이다. 또한  $\lambda$ 는 파장의 길이이다.

### 3. 광선추적법 구현 및 성능 평가

#### 3.1 실험환경

본 연구에서 고려된 실험 환경은 20m×11m의 크기로 송신기의 위치는 x축 방향으로 6.7950m와 y축 방향으로 9.4850m의 위치에 존재하며, 수신기는 9.9150m, 5.1850m에 위치해 있다. 내부는 각기 여러 개의 공간으로 이루어져 있으며, 각 공간을 구분하는 벽면은 ray가 투과 또는 반사가 이루어지는 재질로 구성되어 있다.

수신기의 반경은 송수신기의 거리 및 방사각에 따라 상이하며 본 논문에서는 방사각이 1°, 3°, 5°, 7°인 경우를 각각 실험하였다. 또한 그림 3과 같이 송신기와 수신기는 서로 비가시거리 장소에 위치하며, 송신기의 경우, 4면이 가로막힌 실내 내부로 가정하였다.



(그림 3) 다중벽면의 실내 환경

실험을 위해 본 논문의 시뮬레이터에서는 복잡한 벽면 구조로 이루어진 실내를 여러 개의 직선으로 이루어진 단순한 형태로 가정하였다. 이러한 가정은 복잡한 구조의 실내 환경이라도 간단하게 구현할 수 있으며, 반사체의 추가 및 제거를 용이하게 할 수 있는 장점이 있다.

송신기에서 방사된 ray는 수신기를 향해 반사와 투과를 반복하여 진행하게 되며, 이때 벽면과의 충돌은 해당 ray의 전파 경로 손실과 연관되므로 벽면과 ray와의 충돌 가능 횟수는 반사와 투과에 관계없이 최대 10회로 제한하였다. 또한, 전 방향으로 방사된 ray 중에서 최대 충돌 횟수

10회 이내에 수신기에 도착한 ray만 유효한 ray로 인정하였으며, 건물 내부의 영역을 벗어나 외부 방향으로 투과된 ray에 대해서는 경로추적을 진행하지 않는다.

본 논문에서 수행한 광선추적법의 실험 파라미터는 <표 1>과 같다.

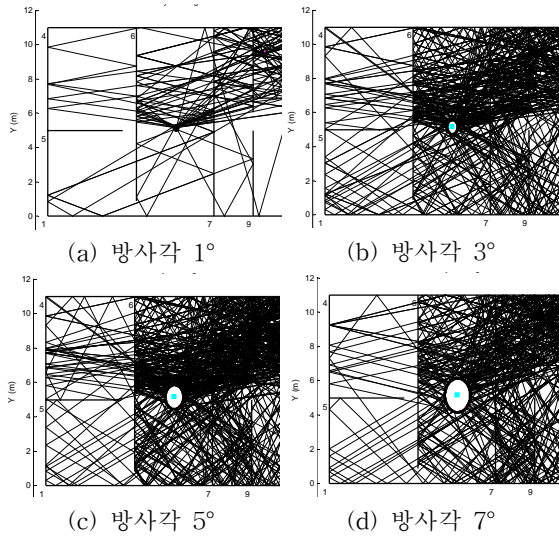
<표 1> 실험 파라미터

Parameters	Value
Build. size	20m×11m
Tx position	6.7950m, 9.4850m
Rx position	9.9150m, 5.1850m
Angle step	1°, 3°, 5°, 7°
Angle region	1°- 360°
Maximum collisions	10
Tx power	30dB
Freq. bandwidth	100MHz

#### 3.2 실험 결과

(그림 4)는 송신기에서 방사되는 각도를 각각 1°, 3°, 5°, 7°로 가정하고 실험한 광선추적법의 결과이다. 이때, 송수신기 사이의 거리는 모두 일정하므로 방사각의 크기가 증가할수록 수신반경의 크기는 더 커지게 된다. 이는 송신기와 수신기 사이의 거리에 따른 수신반경을 고려하였기 때문이며, 이때 수신 반경의 크기는 식 (1)을 따른다.

실험결과 방사각이 1°에 비해 3°, 5°, 7°일 때, 수신기에 도달한 ray의 표본 수는 증가하지만, 유사한 경로 형태의 신호가 집중적으로 수신되는 경향을 보인다. 또한, 다중 구조의 벽면을 반사 및 투과하는 ray는 실내 내부의 벽면을 일정 횟수 이상 충돌함으로써 수많은 반사파 및 투과파를 생성하게 된다. 이러한 투과 및 반사파는 새로운 ray의 시작점이 되며, 이를 통해 실제 환경에서 비가시거리 환경에 있는 수신기라 하더라도 다양한 각도로 수신 가능함을 확인할 수 있다. 광선추적법은 방사된 ray의 모든 경로를 추적하지만, 수신기에 도달하는 ray만 유효하다고 가정하기 때문에 실험 결과에서 수신기에 도달하지 못하는 ray는 배제하였다.



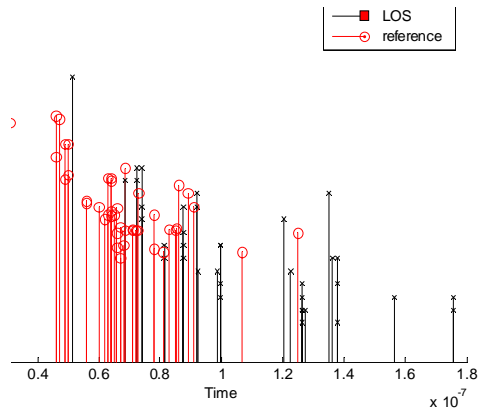
(그림 4) 방사각에 따른 ray의 경로 패턴

본 논문에서는 광선추적법 시뮬레이터의 타당성을 검증하기 위해 다중 벽면으로 구성된 실내 환경에서 실험을 수행한 후, 유사한 환경에서 전파의 전달특성을 해석한 참고문헌[6] 결과와 비교하였다. 참고문헌에 구현된 실내 환경에서의 impulse response 결과와 본 실험에서 구현한 시뮬레이터의 impulse response를 (그림 5)와 (그림 6)에 비교하였다.

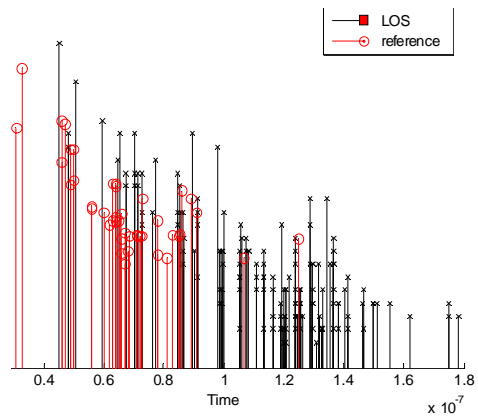
(그림 5)는 ray의 방사각이 1°인 경우로서 결과[6]와 시간 지연 분포는 유사함을 보이나, 본 실험에서는 excess delay profile이 최대 18usec에 걸쳐 나타남을 확인하였다. 한편, (그림 6)은 ray의 방사각이 3°인 경우로서 방사각이 1°인 경우와 유사한 시간 지연 분포를 보이나, 마찬가지로 excess delay profile이 최대 18usec에 걸쳐 나타남을 확인하였다.

본 시뮬레이터에서 수행된 결과와 참고문헌의 결과가 지연시간이 늘어날수록 상이한 이유는 기존연구에서는 수신된 ray의 전력이 일정 전력 이하로 수신된 경우에는 표현하지 않음에 따른 결과로 풀이된다. 이에, 수신된 ray의 전력을 일정 수준 이하로 제한하였을 경우 해당 ray의 impulse response를 (그림 7)에 나타내었다. 송신기에서 방사된 ray는 방사각의 간격에 관계없이 비슷한 분포의 전파특성이 나타남을 (그림 8)에서 확인할 수 있으며, 이를 통해 송수신기 거

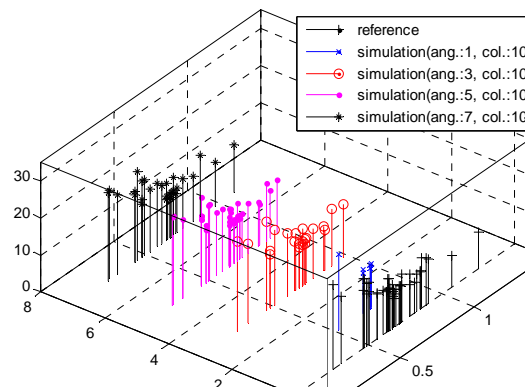
리에 따른 수신반경의 상대적 조정이 타당함을 확인할 수 있다.



(그림 5) Ray의 impulse response (방사각 1°)

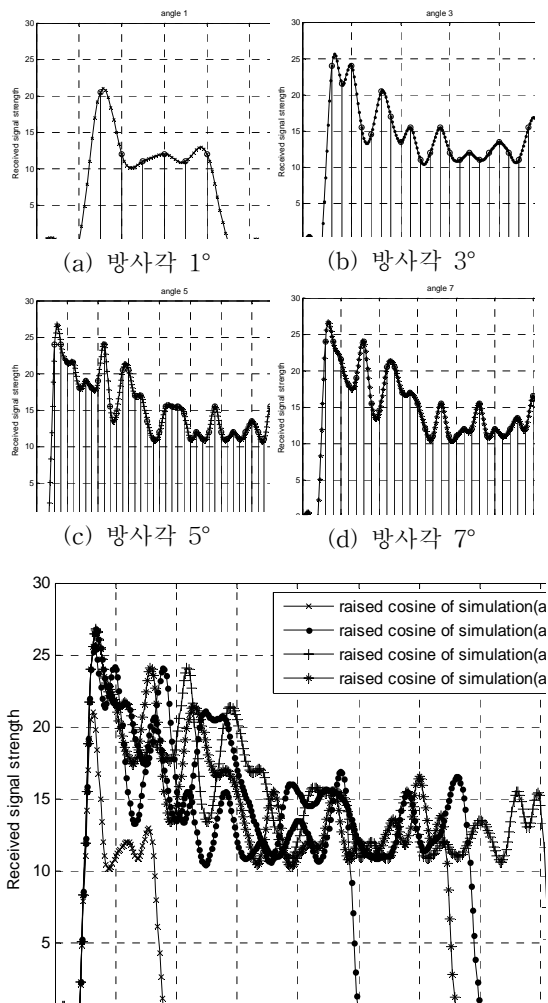


(그림 6) Ray의 impulse response (방사각 3°)



(그림 7) 방사각에 따른 ray의 impulse response

또한 대역폭이 제한된 채널에서 신호는 다양한 매질을 반사 또는 통과하게 된다. 이때 발생하는 multipath fading은 인접 심볼간 간섭(ISI)을 발생시킬 수 있다. 그러므로 올림형 코사인 필터를 이용하여 인접 심볼간 간섭을 제한할 수 있으며, (그림 8)은 올림형 코사인 필터가 수신된 ray에 적용되었을 경우 도출된 channel profile을 나타내고 있다. 방사각이 1°인 경우의 channel profile은 방사각에 따른 수신 반경과 수신된 ray의 전력 제한으로 인하여 표본 ray의 수가 적음에 따른 것으로 전체적인 channel profile의 분포는 나머지 방사각에 따른 channel profile과 유사함을 확인할 수 있다.



(그림 8) 방사각에 따른 channel profile

### 4. 결론

본 논문에서는 실내 환경에서 전파의 전달특성을 모델링하기 위해 ray-launching 기반의 2차원 ray-tracing 시뮬레이터를 구현하였고, 이를 통해 다중 벽면으로 구성된 환경에서 ray의 전파 경로를 분석하였다. 본 시뮬레이터에서는 실내 환경에서 지배적인 전파 형태인 반사와 투과만을 고려한 광선추적법을 적용하였으며, 이를 통해 ray의 전달 특성을 파악하고자 하였다.

실험 결과, 구현된 광선추적법의 시간지연 분포는 유사한 무선 환경에서 수행된 이전의 실험 결과와 비슷한 결과가 나타남을 확인하였다. 특히, 비가시거리 송수신 환경에서 다중 벽면을 투과한 ray가 반사와 투과를 형성하여 수신기에 도달할 때까지의 경로 패턴 및 지연시간 분포는 참고문헌의 실험 결과와 대부분 일치하였다. 또한, 인접 심볼간 간섭을 제거할 수 있는 올림형 코사인 필터가 적용된 channel profile은 방사각의 변화에 관계없이 서로 비슷함을 알 수 있으며, 이러한 channel profile은 향후 무선 통신 시스템 설계에 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 회절 및 산란을 고려하지 않았으나, 실제 실내 무선 환경에서는 모서리 부근에서 발생하는 ray의 회절 효과도 무시할 수 없으리라 예상된다. 따라서 향후 본 논문에서 구현한 광선추적법을 보완하여 다양한 내부 구조물의 모서리에서 발생하는 회절에 대한 정확한 데이터가 적용된다면, 실내 환경뿐만 아니라 실외 환경에서도 무선 통신 시스템의 성능 분석 및 설계에 활용될 수 있을 것이다.

### 참고 문헌

[1] Schaubach, K.R., Davis, N.J., and Rappaport, T.S. "A ray tracing method for predicting path loss and delay spread in microcellular environments," Vehicular Technology Conference, vol. 10, pp. 932-935, May 1992.

[2] S. Y. Tan and H. S. Tan, "A theory for propagation path-loss characteristics in a city-street grid," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 37, pp. 333-342, Aug. 1993.

[3] Tan, S.Y., Tan, H.S., "Improved three-dimensional ray tracing technique for micro cellular propagation models," Electronics Letters, vol. 31, pp. 1503-505, Aug. 1995.

[4] 손해원, 명노훈, "광선 추적법을 이용한 마이크로셀 전파환경 예측모델 개발," 한국전자과학회, 전자과학기술 제10권, 제1호, pp. 2-15, 1999. 3.

[5] 이효진, 이봉근, 손태호, "Ray Tracing과 회절이론에 의한 다층 건물내 전파 감쇄특성," 대한전자공학회, 대한전자공학회 학술대회 논문집 제19권, 2호, pp. 59 5-598, 1996. 11.

[6] Bardia Alavi, Distance measurement error modeling for time-of-arrival based indoor geolocation, Ph. D., Thesis Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts, Apr. 2006.



**정 승 희**

2005년 : 한국기술교육대학교 정보통신공학과(공학사)  
 2007년 : 한국기술교육대학교 전기전자공학과(공학석사)

2007년~현재 : 한국기술교육대학교 전기전자공학과(박사과정)  
 관심분야 : 휴대인터넷, USN/RFID, Wireless Sensor N/W



**강 철 규**

2004년 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부(공학사)  
 2006년 : 한국기술교육대학교 전기전자공학과(공학석사)

2007년~현재 : 한국기술교육대학교 전기전자공학과(박사과정)  
 관심분야 : HDR-WPAN, MIMO, Wireless Sensor N/W

**오 창 현**



1988년 : 한국항공대학교 항공통신공학과(공학사)  
 1990년 : 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과(공학석사)  
 1996년 : 한국항공대학교 대학원 항공전자공학과(공학박사)

1990년~1993년 : 한진전자(주) 기술연구소 전임연구원  
 1993년~1999년 : 삼성전자(주) CDMA 개발팀 선임연구원  
 1999년~현재 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부 부교수  
 2006년~2007년 : 방문교수(University of Wisconsin-Madison)  
 관심분야 : 이동통신, 무선통신, Wireless Sensor N/W, CR