

# 실외 전파 특성 계산을 위한 고속 3차원 광선 추적법

## Acceleration Techniques for 3D Ray Tracing for Outdoor Propagation Model

이 행 선

Haengseon Lee

### 요 약

본 논문에서는 무선 망 설계에 필요한 전파 특성 예측을 위한 방법 중 하나인 광선 추적법의 속도 향상 방법을 제시했다. 빠르고 정확한 광선 추적을 위해 ray tube라는 매개체를 이용하여 전파의 반사, 투과, 회절을 계산하는데, 건물 등의 방해물이 많을수록 계산 시간이 매우 늘어나는 문제점을 해결하기 위해 중복된 계산을 줄이는 방법들을 제시했다.

### Abstract

In this paper, acceleration techniques for a three dimensional ray tracing method are presented. Ray tracing methods are widely adopted to obtain radio propagation channel models, however calculation times increase with the number of scatters such as buildings, hills and mountains. Various techniques are proposed in combination of ray tube concept.

Key words : Ray Tracing, Propagation, Acceleration

## I. 서 론

이동 통신을 위한 무선 망 설계에서 필요한 channel의 특성을 예측하기 위한 방법으로 통계적인 방법이 흔하게 쓰여 왔다. 이 방법은 근사적으로 channel 특성을 예측하는데 도움이 되지만, 건물이 많거나 복잡한 지형 등의 장애물이 많은 경우, 오차가 너무 커서 이를 보완하기 위해 실제 측정에 의한 방법을 병행적으로 사용해야 한다는 단점이 있다. 이에 반하여 실제 지형과 건물의 형태 및 물질의 구성을 고려하여 전파 특성을 수치 해석적으로 접근하는 방법이 별도로 개발되어 왔다. 수치 해석적인 방법으로는 기하광학적 방법<sup>[1],[2]</sup>이나 GTD(Geometrical Theory of Diffraction), moment method, FDTD 등이 쓰여 왔으며<sup>[3]</sup>, 각 순서대로 계산량이 매우 많

아진다. 이러한 이유로 기하광학적 방법이나 이에 회절을 고려한 GTD 많이 이용되었다. 이 방법에서는 전파 특성을 계산하기 위해 송신 안테나로부터 전파가 진행할 수 있는 모든 경로를 찾는 ray tracing에 electromagnetic wave의 특성을 고려한 계산을 수행하게 된다. 다른 수치 해석적 방법에 비해 계산량이 작다고는 하지만 복잡한 지형이나 건물들이 많은 경우인 도심지에 적용하는 경우에는 여전히 계산량이 많아진다.

본 논문에서는 ray tracing과 GTD를 이용하여 전파 특성을 예측할 때 필요한 계산량을 효과적으로 줄이는 방법을 제시한다.

## II. Ray Tracing 개요

Ray tracing 방법은 원래 기하광학에서 렌즈를 설

「본 연구는 KT연구개발본부의 연구비 지원을 받아 수행된 것임.」

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

· 논문 번호 : 20070806-082

· 수정완료일자 : 2007년 10월 24일

계하기 위해 쓰였던 방법으로, 이를 이용하여 컴퓨터 그래픽에서 실제적인 영상을 만들어 내는데도 많이 이용되어 온 방법이다. 이 경우, ray tracing은 반사와 투과만 고려하므로 재귀적인 방법을 쓰는 경우, 프로그래밍하기 매우 간단하다. 이 방법이 전파 특성 예측에 쓰이는 경우에는, 송신 안테나에서 나오는 전파를 ray라고 하고, ray가 진행하는 경로를 일일이 계산해서 경로 중에 일어난 반사, 투과 현상을 고려하여 전파의 세기를 계산하게 된다. 기하광학은 주로 눈에 보이는 영상만을 다루었으므로, 회절 현상이 고려되지 않아서 VHF나 UHF 대역의 무선 망 설계에 이용되는 경우, 음영 지역에서 오차가 매우 크다는 단점이 있다. 이 점을 해결하기 위해 기하광학에 회절까지 고려한 방법으로 GTD를 이용한 방식이 많이 쓰이고 있다.

GTD를 이용한 ray tracing 방법에도 ray를 어떤 방식으로 찾아가에 따라서 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 송신 안테나에서 생겨나는 ray들의 경로를 추적하는 방법으로 간단한 것은 송신 지점에서 일정한 간격의 각도로 나누어 ray들을 전 방향으로 쏘아서 반사, 투과, 회절 경로를 찾는 방법이 있다. 이 방법은 개념상 간단하고 프로그래밍하기도 간단하다는 장점이 있다. 그러나 각도 간격이 충분히 작지 않은 경우, 실제 전파 특성을 예측하기에 충분한 ray가 만들어지지 않아서 측정 결과와 오차가 많이 생기는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 각도의 간격을 좁히는 경우 계산량이 매우 많아지는 단점이 있다. 다른 방법으로는 ray들의 경로가 변하는 원인인 반사, 투과, 회절을 일으키는 물체를 찾아서 전파들의 묶음(ray tube)들의 경로를 찾는 방법을 들 수 있다<sup>[1]</sup>. 이 방법에서 반사는 전파가 닿는 물체의 면이 일으키므로, 전파가 생겨나는 송신 안테나의 위치와 물체 면을 이용하여 각별 형태의 ray tube들을 만들어, 각별 안에 들어가는 ray들의 경로는 한 번만 계산하여 기억시켜 두게 된다. 그러므로 여러 지점에서 propagation loss를 계산하기 위해서 고려해야 할 것은 그 지점이 어느 ray tube에 포함되는지 고려하기만 하면 된다는 장점이 있다. 투과 또한 전파가 입사하는 면이 만들어 내고, 회절은 전파가 입사하는 면에 접한 모서리(edge)가 만들어 낸다. 그러므로 반사, 투과, 회절에 해당되는 ray tube들을 만들어 순서대

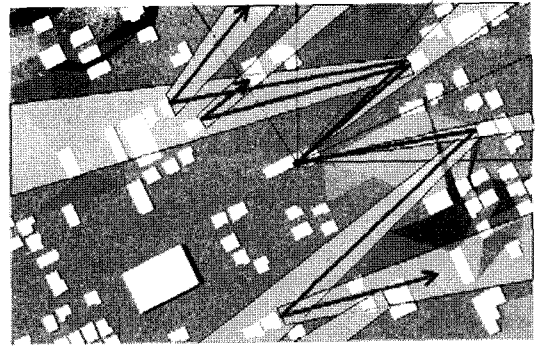


그림 1. 송신 안테나로부터 ray tube 생성 과정  
Fig. 1. Ray tube generation from transmit antenna.

로 이어 놓고 어느 tube에 관측 지점이 속하는지 검사하고, tube에 속하면 tube들이 만들어진 순서와 반대로 거슬러 올라가면서 반사, 투과, 회절에 의한 전파 세기의 변화를 계산해 가면 propagation loss와 propagation delay를 얻을 수 있다.

### Ⅲ. 속도 개선 방법

Ray tube를 이용한 ray tracing 방법은 기존의 ray tracing 방법에 비해 속도가 개선되기는 했으나, 건물이 많은(수백~수천 개) 도심지의 전파 특성을 계산에는 역시 많은 시간이 소모된다. 계산 시간을 줄이기 위해, ray tracing의 어느 부분에서 시간이 가장 많이 소요되는지를 찾아보면 알 수 있다.

시간이 많이 소요되는 부분은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 하나는 각각의 ray tube를 생성하는 건물의 면과 모서리를 찾을 때이고, 다른 하나는 관측 지점이 어느 ray tube에 포함되는지 검사하는 단계이다. 이 두 과정에서 각각 속도 개선 방법을 제시하면 그림 1과 같다.

#### 3-1 Ray Tube Generation

먼저 ray tube를 이용하여 ray tracing을 하려면 송신안테나에서 직접 전파가 도달하는 영역에 해당하는 ray tube가 있다(그림 1). Line of sight 영역에 해당하기 때문에 이 ray tube 이름을 LOS ray tube라고 하자. LOS ray tube는 ray tube tree의 root에 해당한다. Root에서 각 건물면에 visibility test를 수행하여 직접 보이는 면이 있으면, 그 면은 반사파를 만든다. 즉,

반사에 해당하는 ray tube를 만든다. 모든 건물면에 visibility test를 수행하기 위해 각 건물의 각 면마다 다른 건물 면에 가리는지 아닌지를 검사해야 한다. 이 검사의 횟수는 건물 면 수의 제곱에 비례하므로, 이 단계에서 계산 횟수를 줄이려면 LOS ray tube를 분할해야 한다. LOS ray tube는 송신 안테나 위치를 중심으로 하여 전 방향의 입체각을 모두 비추므로 편의상 일정한 각도를 가진 부채꼴로 적당히 나누면 된다. 이 경우, 계산 횟수는 나눈 부채꼴의 개수에 비례해서 줄어든다. 예를 들어 전체 건물 면의 개수를  $N$ 인 경우, 송신 안테나에서 보이는 면을 찾기 위해  $N$ 개의 면 각각에 대하여 검사를 수행하려면, 특정한 한 개의 면에 대해 나머지  $N-1$ 개의 면이 송신 안테나를 가리는지 검사해야 한다. 즉, 총 계산 회수는  $N(N-1)$ 회가 된다. 그러나 전체 공간을  $M$ 개의 부채꼴로 나누면 평균적으로 각 부채꼴에  $N/M$ 개의 건물 면이 포함되고, 필요한 계산 회수는  $(N/M)(N/M-1)$ 회가 되어 대략  $(N/M)$ 의 제곱 회 정도 검사해야 한다. 이 과정을  $M$ 개의 부채꼴에 대해 수행하면 계산 회수는  $N^2/M$ 회가 되어 부채꼴의 개수에 비례하여 줄어든다.

LOS ray tube들을 생성하면서 송신 안테나에서 직접 보이는 면들을 찾는 과정도 거친다. 각 ray tube에 속하면서 line of sight인 면들이 다음 단계의 ray tube를 만드는 seed가 된다. 이 면들을 이용하여 반사파와 투과, 회절 효과를 계산해 주는 ray tube들을 만들 수 있다. 먼저 반사 ray tube는 찾아진 면과 송신 안테나의 면에 대한 image point를 이용하여 만들 수 있다. LOS ray tube와 다른 점은 LOS ray tube가 송신 안테나를 정점으로 한 각뿔 형태인데 비해, 반사 ray tube는 각뿔이 반사면에 의해 잘린 각뿔대 형태라는 것이다. 투과 파는 찾아진 면을 통과하여 반대쪽 면으로 튀어나오는 형태이므로 투과 각을 계산하여 반대쪽 면을 찾은 후, 이 면과 굴절을 고려하여 보정한 송신 안테나 위치로 투과 ray tube를 만든다. 회절은 LOS ray tube에서 찾아진 보이는 면의 edge를 이용하여 만들면 된다. 각 ray tube를 만드는 과정에서 각각의 정점에 해당하는 지점에서 보이는 면을 다시 찾고 위에 서술한 과정을 재귀적으로 반복하면 된다. 이 과정에서 새로운 ray tube의 영역(각뿔, 각뿔대 등)이 정해지고, 이 안에 포함되면서 정점에서 보이

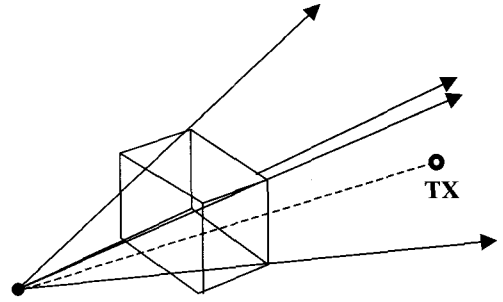
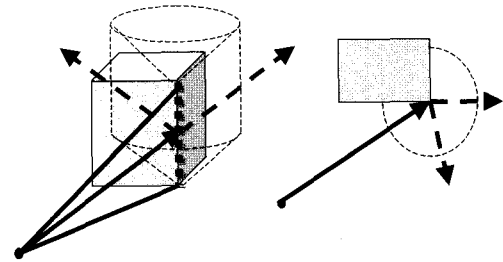


Image source

그림 2. 반사파를 위한 ray tube  
Fig. 2. Ray tube for reflect rays.



Source

그림 3. 회절파를 위한 ray tube  
Fig. 3. Ray tube for diffracted rays.

는 면을 찾는 계산을 계속해야 한다. 각 ray tube의 형태는 그림 2 및 3과 같다.

이 계산의 양이 매우 많기 때문에 시간이 많이 걸린다. 속도를 개선하기 위해 본 논문에서 채택한 방법은 quad tree를 이용하여 전체 건물 면들을 사각형 모양의 블록에 분류하여 넣고, 이 블록들을 대상으로 ray tube에 속하는 것을 찾고, 찾아진 블록들에 포함된 건물 면을 대상으로 다시 한 번 더 ray tube에 속하는지 검사하면, 검색회수가  $\log n$ ( $n$ 은 건물 면의 개수)에 비례하게 된다(그림 4). Quad tree를 이용하는 것은 전체 건물 면들이 분포한 공간을 4개로 분할하는 과정을 재귀적으로 수행하면서 각 분할된 블록에 건물면들이 포함되는지 확인하여, 포함되는 경우 각 블록별로 포함되는 건물 면을 기록해 두고 나중에 이용하는 방식을 쓰는 것이다.

일단 Ray tube에 속하는 면들을 찾기 위해 quad tree를 사용하면, 개개의 ray tube에 속하는 건물들을 찾기 위해 전체 건물 면에 대해 포함 여부를 검사할

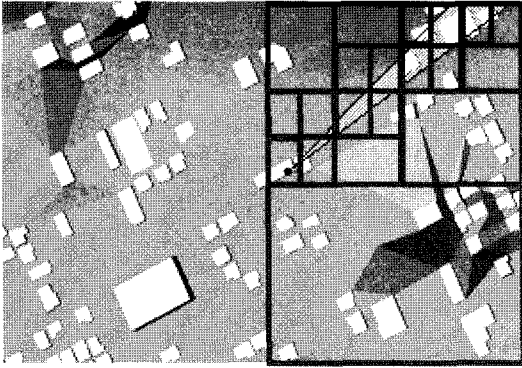


그림 4. Quad tree를 이용하여 ray tube에 포함되는 건물 면을 찾는다.

Fig. 4. Building walls included ray tubes are found using quad tree.

필요 없이 quad tree의 단계별 분할을 나타내는 사각형이 ray tube에 속하는지 확인하고, 속하지 않는 경우 그 사각형 블록에 포함되는 건물 면들은 검사할 필요도 없이 ray tube에 속하지 않음을 알 수 있으므로 각 단계별 분할마다 검사해야 할 건물 면의 개수는 1/4로 줄어든다. 즉, ray tube에 속하는 건물 면을 찾는데  $\log_4 m$ 에 비례하는 검사 회수만 필요하게 된다.

그 후에 ray tube에 포함되는 건물 면을 모두 구한 상태에서 각 ray tube의 정점에서 직접 보이는 면을 찾기 위해, 포함되는 면들을 거리에 따라 sorting을 했다. Sorting 없이 검색을 하는 경우는 ray tube안에 포함된 건물 면의 개수를  $m$ 이라고 하면 계산 회수는  $m^2$ 이 되지만, sorting한 후에는 ray tube의 정점에서 특정한 면이 보이는지 검사하는 경우, 정점에서 그 면보다 멀리 떨어져 있는 면은 검사할 필요가 없으므로 계산 회수는 평균적으로 절반이 되어  $m^2/2$ 회가 필요하다. 또한, 건물 면은 source의 방향을 향하는 것과 반대 방향의 것이 섞여 있으므로, 실제 source에서 보이는 면만 계산하면 되므로 계산 회수는 또 다시 줄어들어 평균적으로  $m^2/8$  정도가 된다.

실제 계산에 소요되는 시간은 quad tree를 사용했을 때,  $M \cdot \log_4(N/M)$ 에 비례하는 시간에 각 ray tube에 속하는 삼각형들의 집합을 만들 수 있다. Ray tube에 속하는 건물 면을 분류한 후에, ray tube의 source 위치인 정점에서 가시 영역(line of sight)에 있

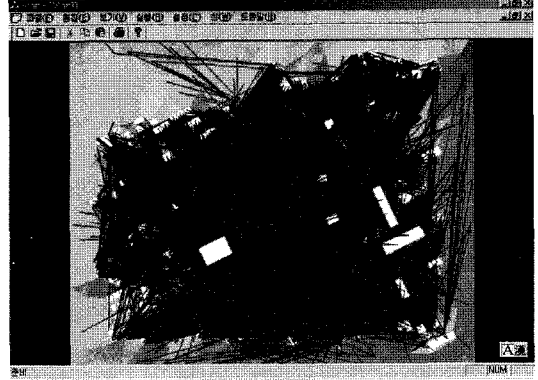


그림 5. 생성된 ray tube들을 간단히 표시하기 위해서 직선으로 그렸다. 위 그림은 건물 개수 250개인 경우 9만 개의 ray tube 모습을 보여주고 있다.

Fig. 5. Generated ray tubes are represented by lines. With 250 buildings, 90,000 ray tubes are found.

는 건물 면을 찾는 시간은 최악의 경우 ray tube에 속하는 건물 면 개수의 제곱에 비례하는 시간이 걸린다. 프로그램의 수행 시간은 quad tree와 sorting, hash function의 유무에 따라 아래와 같이 달라진다. 동등한 계산 과정이 아니므로 앞에서 제시한 계산 회수의 감소를 바로 관찰할 수는 없으나 효과가 있음을 알 수 있다. Sorting에 의한 효과는 ray tube 생성을 끝마친 후 어느 한 지점에서 수신 전력을 예측할 때, source의 위치에서 가시 영역에 있는지 여부를 확인하는 과정과도 관련이 있다.

### 3-2 관측 지점에서 Propagation Loss 계산

Ray tube들의 생성이 다 끝난 후에 필요한 것은 어느 한 관측 지점에서 propagation loss를 계산하는 것이다. 이 단계에서 수행해야 할 계산은 간단하다. 즉, 해당 지점이 어느 ray tube에 속하는지 가려내고, 포함되는 ray tube에 의한 propagation loss를 구하면 된다. 그림 5에서는 반사 회수를 4회로 제한하고, 회절 회수를 1회로 제한했을 때, 건물의 개수가 250개인 경우 생성된 ray tube를 직선으로 표시하여 도시한 결과이다. 이 그림에서 생성된 ray tube 수는 9만 개 정도로 어느 ray tube에 속해 있는지 검사하는 과정에서 매우 많은 계산이 필요함을 알 수 있다. 이를

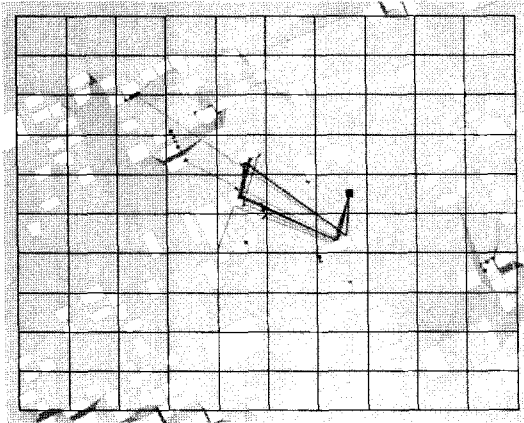


그림 6. Hash 함수를 이용하기 위해 블록화된 영역. 직선은 ray tube를 나타냄

Fig. 6. Observation points are grouped into small blocks for using hash function. Solid lines represent ray tubes.

해결하기 위해 본 연구에서는 hash function을 이용하여 계산 회수를 획기적으로 줄였다(그림 6). 건물이 분포된 영역의 블록으로 나눈 후, 관측 지점의 좌표를 입력하면 그 지점이 속해 있는 블록의 번호를 반환하는 hash 함수를 만들었다. Hash 함수는 관측 지점의 x, y 좌표를 기준점의 좌표를 빼준 후, 블록 사각형의 변의 길이로 나눈 값을 정수 값을 취하도록 내림을 하게 만들면 된다. 각각의 블록을 통과하는 ray tube들을 사전에 조사하여 저장해 놓은 후, 관측 지점이 어느 블록에 들어가는지 알면, 9만개의 ray tube 전체에 대해 포함 여부를 검사할 필요 없이, 해당 블록에 저장된 ray tube들을 대상으로 전기장을 계산하는 방식을 이용하여 계산 횟수를 줄였다. 참고로, 본 논문의 방식을 적용하여 그림 7의 건물들이 분포된 영역에서 150×150개의 지점에 관해 propagation loss를 계산하는데 소요된 시간은 단 10분이었다. 사용된 PC는 Pentium4(2.8 GHz)의 CPU와 512 MB의 메모리를 가졌다.

그림 8, 9는 계산된 결과를 보여주고, 측정치와의 비교도 포함하였다. 측정 데이터의 경향성을 제대로 따라가고 있음을 보여주고 있다. 계산 과정에서 지면의 세부적인 상황은 고려하지 않았고, 각 반사 단계에서 1회의 회절만을 고려한 결과이다. Ray tube를 이용한 방식은 컴퓨터 메모리 상에 전파 경로로서

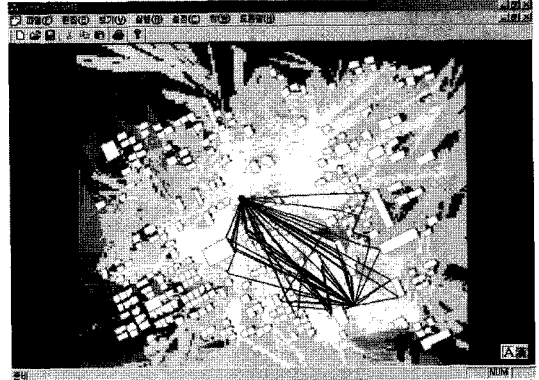


그림 7. 전파 손실 (2차원)(150×150 points)  
Fig. 7. Propagation loss map(150×150 points).

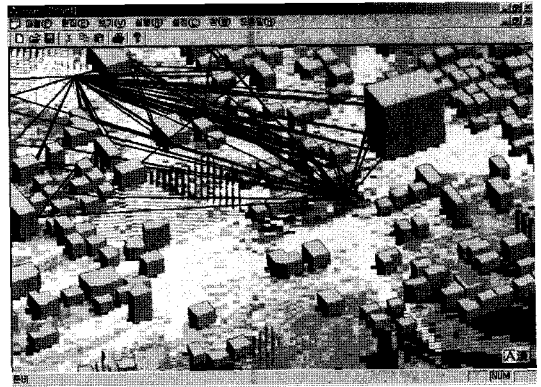


그림 8. 3차원 전파 손실 맵(빨간색은 loss가 적고 파란색은 loss가 큰 부분임)  
Fig. 8. Three dimensional view of propagation loss map(Red color indicates small attenuation, while blue color large loss.).

가능한 모든 ray tube를 기억시켜 놓고 계산에 이용하는데, 그림 3의 회절 ray tube의 형태는 반사파를 위한 ray tube나 LOS 경로를 나타내는 ray tube에 비해 영역이 훨씬 넓으므로, 회절 후 생성되는 ray tube 개수는 기하 급수적으로 증가하게 된다. Ray tube가 하나도 도달하지 않는 영역을 줄이기 위해서는 2차 이상의 회절이 필요하나, 기하급수적인 ray tube의 증가와 계산 시간의 증가로 인해 1차의 회절만 고려한 결과를 제시했다. 계산에 이용한 지면의 비유전율은 ( $\epsilon_r=15$ ,  $\sigma=0.1$  S/m)이고 주파수는 2.3 GHz이다. 그림 9에서 RSSI는 수신된 신호의 크기이며, 송신 안테나로부터 거리를 x축으로 하여 결과를 도시

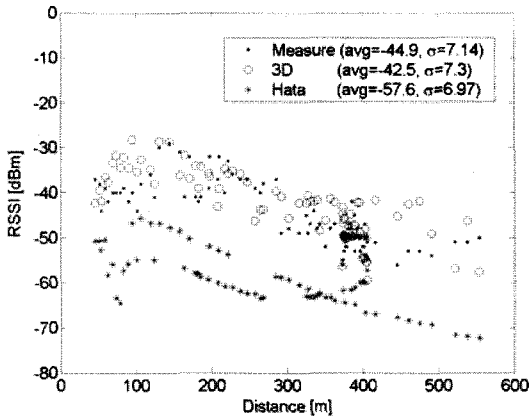


그림 9. 실험 결과와의 비교  
Fig. 9. Comparison with measurements.

했다. 송신 안테나는 지면에서 20 m 높이에 위치한다. 측정 전 구간에서 평균값이 -44.9 dBm이고, 표준편차는 7.14 dBm이다. 본 논문을 바탕으로 한 시뮬레이션 결과는 관측 지점 전 구간에서 -42.5 dBm의 평균 값과 7.3 dBm의 표준 편차를 갖는다. 간단한 비교를 위해 대도시에서의 Hata model 결과와 비교했다. 측정 위치는 신촌 지역이다.

#### IV. 결 론

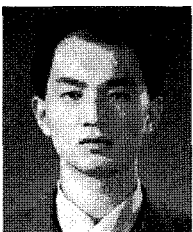
도심 지역에서 전파 특성 해석을 위해 ray tracing

을 이용하여 계산하는 경우, 매우 많은 계산량 때문에 늘어나는 시간을 줄이는 방법을 제시했다. 본 논문에서는 quad tree, hash function, sorting 등을 이용하여 propagation loss를 얻는데 필요한 계산량을 획기적으로 줄여서 건물이 밀집한 도심 지역에서 건물 분포와 형태를 고려한 정확한 전파 특성을 계산하여 무선 망 설계를 효율적으로 할 수 있게 해줄 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] K. J. Gladstone, J. P. McGeehan, "Computer simulation of multipath fading in the land mobile radio environment", *Proc. Inst. Elect. Eng., pt. G*, vol. 27, no. 6, pp. 323-330, Dec. 1980.
- [2] Hyeongdong Kim, Hao Ling, "Electromagnetic scattering from an inhomogeneous object by ray tracing", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 40, no. 5, pp. 517-525, May 1992.
- [3] Hae-Won Son, Noh-Hoon Myung, "A deterministic ray tube method for microcellular wave propagation prediction model", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 47, no. 8, pp. 1344-1350, Aug. 1999.

#### 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