

마이크로셀 전파 환경에서 광선 추적법에 의한 예측 결과의 오차에 관한 분석

Analysis of Errors in Prediction Results of Ray Tracing Propagation Model for Microcellular Environments

손 해 원 · 명 노 훈

Hae-won Son · Noh-Hoon Myung

요 약

본 논문에서는 광선 추적법을 이용한 마이크로셀 전파 환경 예측 모델에서의 여러 가지 오차들에 관하여 해석하였다. 반사 및 회절 계수의 부정확성 및 계산 과정에서 이들의 횡수 제한이 예측 결과에 미치는 영향을 분석하였으며, 특히 건물 지도의 유한한 해상도에 의한 건물 데이터베이스의 오차가 전파 환경 예측 결과에 미칠 수 있는 영향에 대하여 자세히 분석하였다. 빠르고 정확한 예측 결과를 얻기 위해서는 각 건물들에 대하여 적절한 전기적 상수들의 선결과 반사 및 회절 횡수의 적절한 제한이 필요함을 보였다. 또한, 건물 지도의 해상도가 나빠질수록 예측 결과의 오차가 증가함을 보였으며, LOS 구간과 NLOS 구간을 구분하여 그 오차의 크기를 분석하였다. 본 논문에서의 결과를 바탕으로 건물 지도의 해상도에 따른 예측 결과의 최대 오차 한계를 6 dB이하로 제한할 경우 적절한 건물 지도의 해상도는 5 m정도가 됨을 알 수 있다.

Abstract

In this paper, we analyze various errors in prediction results of ray tracing propagation model for microcellular environments. It is shown that improper electrical parameters of building materials and limitations of diffraction orders can cause high errors in prediction results. Especially, the effect of errors in building database on prediction results is considered in detail. It is also shown that the prediction error increases as the resolution of building map data is getting worse, and the error is analyzed depending on LOS and NLOS domains. Based on the results obtained by the analysis developed in this paper, 5 m resolution is suitable for the building map data if the maximum prediction error is required to be below 6 dB.

I. 서 론

최근 이동통신에 대한 수요의 급증으로 인하여 한정된 주파수 자원으로 보다 많은 가입자를 수용하기 위한 마이크로셀에 대한 연구가 절실해지고

한국과학기술원 전기 및 전자공학과(Dept. of Electrical Engineering, KAIST)

· 논문 번호 : 971219-089

· 수정완료일자 : 1998년 3월 9일

있다. 마이크로셀은 반경 1 km이내의 셀로 기존의 매크로셀과 여러 가지 상이한 점이 많으며 특히 전파 환경에서 두드러진 차이를 보인다. 매크로셀에서는 전파 환경이 주로 지형 및 건물의 분포에 의하여 특징 지워졌으나 마이크로셀에서는 지형과 건물의 분포뿐만 아니라 건물 개개의 모양 및 배치에 의하여 전파 환경이 크게 달라진다. 따라서 마이크로셀에서의 전파 환경을 정확히 예측하기 위해서는 각 건물들의 모양 및 배치에 의한 영향을 정확히 반영할 수 있는 새로운 전파전파 모델이 필요하며, 현재 이러한 모델들 가운데 UTD(Uniform Geometrical Theory of Diffraction)에 바탕을 둔 광선 추적 모델(ray tracing model)이 가장 우수성을 인정받고 있다.

한편, 사용하는 전파전파 모델이 아무리 우수하다 하더라도 그 예측 결과는 모델에의 입력 변수들의 부정확성에 의하여 영향을 받게 된다. 광선 추적 모델의 경우 예측 결과에 크게 영향을 미치는 입력 변수들은 크게 세 가지로 요약될 수 있다. 첫째는 반사 계수 및 회절 계수의 부정확성이다. 이는 각 건물의 전기적 상수(유전율, 전도도)들의 부정확성에 기인한다. 둘째는 반사 및 회절 윗수의 제한이다. 이들은 광선 추적 모델이 근본적으로 안고 있는 문제점인 과도한 계산량의 요구를 해결하기 위하여 적절히 제한된다. 예측 결과의 정확성에 크게 영향을 미치는 또하나의 중요한 변수는 건물 데이터베이스의 부정확성에서 기인한다. 정확한 건물 데이터베이스의 구축은 광선 추적 모델에 있어서 가장 중요한 요구 사항이지만 대개의 경우 비용과 기술 등의 문제에 의하여 구축된 데이터베이스의 정확도는 제한을 받게 마련이다. 위의 세 가지 변수들 가운데 반사 및 회절 계수의 부정확성과 이들의 제한이 예측 결과에 미치는 영향은 이미 여러 논문들에서 발표된 바 있으나 건물 데이터베이스의 부정확성에 의한 영향은 거의 발표된 것이 없다. 따라서 본 논문에서는 광선 추적법을 이용한 전파 환경 예측 결과에 있어서 반사 및 회절 계수의 부정확성 및 이들의 제한이 미치는 영향에 대하여 간단하게 설

명한 후, 주로 건물 데이터베이스의 부정확성이 미치는 영향에 대하여 중점을 두어 논하고자 한다.

본 논문에서는 광선 추적 모델에서의 여러 가지 오차를 분석하기 위한 시험 모델로서 준 3차원 광선 추적 모델(quasi-3 dimensional ray tracing model)을 이용하였다. 준 3차원 광선 추적 모델은 건물들의 높이가 무한하다고 가정한 모델로서 안테나의 높이가 주변 건물들의 높이보다 충분히 낮은 경우 비교적 정확한 예측 결과를 준다. 광선 추적 알고리즘으로는 본 저자들이 개발한 deterministic ray tube 방법^{[1],[2]}을 사용하였으며 이에 관해서는 2절에서 간략하게 설명한다.

본 논문에서의 시험 건물 데이터베이스로는 맨해튼 모델을 이용하였다. 맨해튼 모델은 마이크로셀 환경을 가장 잘 대표하는 모델로서 본 논문에서의 해석 결과의 객관성을 뒷받침 해줄 수 있는 가장 적당한 모델이라고 생각된다. 한편, 건물 데이터베이스의 오차는 유한한 해상도를 가지는 건물 지도에서 기인한다. 예를 들면 Kurner^[3]와 Grosskopf^[4]는 각각 12.5 m와 5 m의 해상도를 가지는 건물 지도를 이용하여 그들이 개발한 전파전파 모델의 정확성을 검증하였다. 그러나 그들은 건물 지도의 부정확성에 의하여 발생할 수 있는 예측 결과의 오차에 대해서는 언급하지 않았다. 따라서 본 논문에서는 건물 지도의 해상도가 2.5 m, 5 m 및 10 m인 경우 LOS와 NLOS구간에서 예측 결과에 미치는 영향을 통계적으로 분석하였다.

II. Deterministic Ray Tube Method

Deterministic ray tube 방법^{[1],[2]}은 본 저자들이 개발한 준 3차원 광선 추적 알고리즘으로서 임의의 형태를 가지는 건물 및 도로 구조를 빠른 속도로 매우 정확하게 해석할 수 있는 방법이다. 이는 주어진 송신점에 대하여 해석하고자 하는 영역 내의 각 건물의 벽면 및 모서리에 의하여 생기는 전기영상을 지정된 전력의 문턱값에 도달할 때까지 반복적으로 생성하고 이를 tree 구조의 데이터로 저

장한 뒤 주어진 수신점의 위치를 기준으로 이러한 tree를 검색함으로써 송신점으로부터 수신점에 도달하는 전파 경로를 수신점으로부터 역으로 추적하여 찾는 방법이다. 이때 tree의 각 전기 영상은 소속되는 각 벽면 및 모서리에 대한 정보와 함께 일종의 ray tube를 형성한다. 여기서 ray tube라 함은 기존의 정의와는 달리 어떤 건물의 벽면 및 모서리에 의한 반사파 및 회절파가 도달할 수 있는 범위를 나타내는 tube로 정의한다. 전기 영상 tree의 생성 과정에서 수신점의 위치는 영향을 미치지 않으므로 일단 tree가 생성되면 어떠한 위치의 수신점에 도달하는 전파 경로도 짧은 시간 내에 찾을 수 있다. 전기 영상 tree의 생성은 건물들을 위에서 바라본 2차원 투영도에서 이루어지며 안테나의 높이와 지면의 영향 등은 수신점의 위치가 주어졌을 때 tree를 검색함으로써 얻어진 2차원 ray로부터 적절한 계산을 통하여 3차원에서의 정확한 반사점 및 회절점을 계산함으로써 고려된다. Deterministic ray tube 방법은 다음과 같은 장점을 가진다.

- 임의의 건물 배치 및 도로 구조에 대하여 해석할 수 있다.
- 준 3차원 환경에서 주어진 전력 문턱값 이상의 모든 전파 경로를 찾을 수 있다.
- Ray launching 방법과는 달리 정확한 반사점과 회절점을 찾을 수 있으며 reception test를 하지 않으므로 매우 정확한 해석 결과를 준다.
- 주변 환경을 이용한 지능적인 광선 추적 방법으로서 빠른 해석 속도를 가진다.

특히, 본 논문에서의 건물 데이터베이스의 오차에 대한 통계적 해석은 deterministic ray tube 방법의 정확성과 빠른 속도를 바탕으로 하여 가능하였으며, 이 방법에 관한 자세한 사항은 문헌[1]을 참고하기 바란다. 그림 1은 deterministic ray tube 방법을 이용하여 본 저자들이 소속된 대학 캠퍼스 건물들에 의한 반사와 회절파로 구성된 광선 추적의 한 예를 보여 준다. 그림에서 고려한 반사 및 회절의 횟수는 각각 10번과 1번이다.

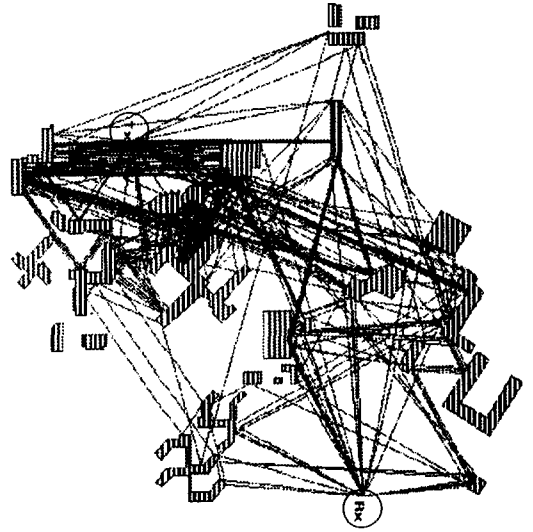


그림 1. Deterministic ray tube method를 이용한 광선 추적의 예

Fig. 1. An example of ray tracing using deterministic ray tube method.

Ⅲ. 반사 및 회절 계수의 부정확성 및 산란 횟수의 제한에 의한 영향 분석

마이크로셀에서의 전파 환경 예측에 있어서 UT-D에 바탕을 둔 이론적 해석 결과의 주된 오차 가운데 하나는 반사 및 회절 횟수의 제한 및 그 계수의 부정확성으로부터 발생한다. 반사 및 회절 횟수는 광선 추적 모델이 근본적으로 안고 있는 문제점인 과도한 계산량의 요구를 해결하기 위하여 적절히 제한되어야 하며, 또한 실제 건물들은 여러 가지 물질의 복합으로 이루어져 있으나 이들을 이론적 모델에서 일일이 고려하기는 어려우므로 실제 측정을 바탕으로 하여 평균적인 전기적 상수들(상대 유전율 및 전도도)을 찾아내는 것이 필요하다.

본 논문에서는 광선 추적법을 이용한 예측 결과의 다양한 오차를 분석하기 위하여 그림 2와 같은 시험 건물 데이터베이스를 설정하였다. 그림 2는

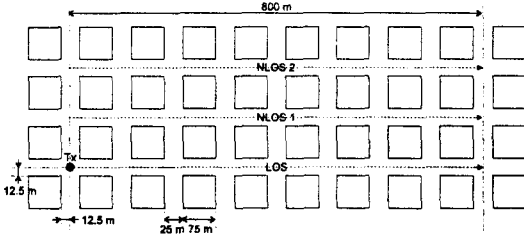


그림 2. 시험에 사용된 기준 건물 데이터베이스(맨해튼 모델)

Fig. 2. Reference building database of a test site (Manhattan Model).

가로 방향으로 10개와 세로 방향으로 4개의 건물들로 구성된 맨해튼 모델이며 그림과 관련된 여러 가지 변수들 및 광선 추적 모델에 입력되는 변수들은 표 1에 나타내었다.

그림 3은 그림 2의 맨해튼 모델에 대하여 건물들의 상대 유전율을 3, 6, 9로 변화시키면서 NLOS1 구간에서의 광대역 경로 손실을 계산한 것이다. 광

표 1. 시험 건물 데이터베이스와 광선 추적 모델의 여러 가지 입력 변수

Table 1. Input parameters of ray tracing model for a test site.

건물의 넓이	75 m
도로의 넓이	25 m
건물의 상대 유전율	3, 6, 9
건물의 전도도	0.1 S/m
지면의 상대 유전율	15
지면의 전도도	7 S/m
주파수	1.8 GHz
송신 안테나의 높이	10 m
수신 안테나의 높이	2 m
반사 횟수	10 번
회절 횟수	0, 1, 2 번
전력 문턱값	-160 dB

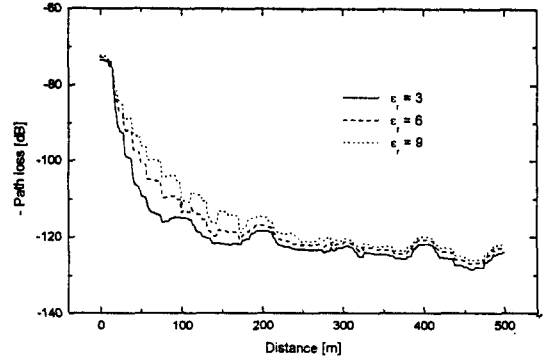


그림 3. 건물의 상대 유전율 변화에 대한 경로 손실의 변화

Fig. 3. Path loss for various relative permittivities of building material.

대역 경로 손실은 다중 경로파들의 위상을 고려하지 않고 각각의 전력을 더한 경로 손실로서, 본 논문에서는 예측 결과의 오차를 분석할 때 다중 경로 페이딩에 의한 널(null) 등의 효과를 무시하기 위해서 주로 광대역 경로 손실을 이용하였다. 한편, 건물들의 전도도는 0.1 S/m로 두었고 회절 횟수는 한 번으로 제한하였으며 그 외의 변수들은 표 1의 값과 동일하다. 그림 3을 살펴보면 건물의 상대 유전율에 따라 경로 손실이 송신 안테나와 인접한 교차로에서 가까운 구간(0~200 m)에서는 수 dB 정도 차이가 나지만 교차로에서 멀어질수록 그 차이가 미미해짐을 알 수 있다. 이는 교차로에서 가까운 구간에서는 다중 반사파들의 영향이 크고 교차로에서 멀어질수록 회절파에 의한 영향이 크기 때문이다. 임의의 수신 안테나의 위치에 대하여 다중 반사파들은 회절파에 비하여 상대적으로 많은 수의 산란 현상을 겪게 되므로 건물의 상대 유전율의 변화에 따라 그 영향을 크게 받게 된다. 따라서, 해석 결과의 정확도를 높이기 위해서는 건물의 상대 유전율의 선택에 있어서 신중을 기하여야 함을 알 수 있다. 건물의 상대 유전율 외에 건물의 전도도 및 지면의 여러 전기적 상수들도 해석에 있어서 중요

한 변수이지만 건물의 상대 유전율이 5이상일 경우 실제 건물의 전도도가 0.1 S/m 주변이므로 2 GHz의 주파수 대역을 고려할 때 건물의 상대 유전율의 변화에 비하여 큰 영향을 미치지 않는다.

그림 4는 그림 2의 맨해튼 모델에 대하여 회절의 회수를 0, 1, 2로 변화시키면서 NLOS1 구간에서의 광대역 경로 손실을 계산한 것이다. 건물의 상대 유전율 및 전도도는 각각 9, 0.1 S/m로 두었으며 그 외의 변수들은 표 1의 값과 동일하다. 그림 4를 살펴보면 회절을 고려하지 않는 경우와 회절을 1번 고려한 경우는 상당한 차이를 나타내고 있으나 회절을 1번 고려한 경우와 회절을 2번 고려한 경우는 미소한 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 다중 회절의 경우 그 전력이 상당히 작아짐을 나타낸다. 회절 회수의 선택은 소요되는 해석 시간에 큰 영향을 미치므로 해석 결과의 실효성을 잃지 않는 범위에서 적절하게 이루어져야 한다.

IV. 건물 데이터베이스의 오차에 의한 영향 분석

건물 데이터베이스에서 건물의 위치와 모양에 대한 오차는 각 건물을 구성하는 모서리 좌표들의 오차로부터 발생한다. 예를 들어 맨해튼 모델을 구성하는 사각형 건물의 경우 네 개의 모서리 좌표들이 정확하게 정해지지 않음으로써 오차가 발생하는데

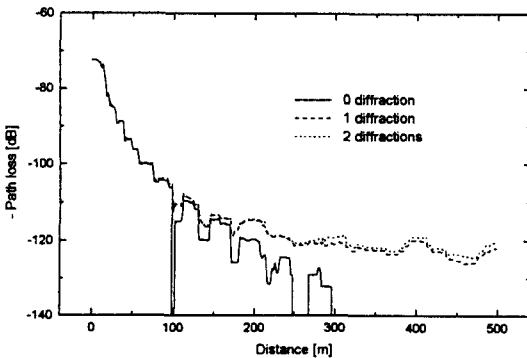


그림 4. 회절 회수의 변화에 대한 경로 손실의 변화
Fig. 4. Path loss for various diffraction orders.

이러한 오차는 건물 데이터베이스를 얻기 위한 건물 지도의 해상도와 관련이 있다. 건물 지도의 해상도를 R m라고 하고 임의의 건물 모서리의 정확한 좌표를 (x_0, y_0) 라고 할 경우 실제 우리가 얻을 수 있는 모서리의 좌표 (x, y) 는 $[x_0 - R, x_0 + R]$ 과 $[y_0 - R, y_0 + R]$ 에서 균일 분포(uniform distribution)를 가지는 random variable로 나타낼 수 있다.

본 논문에서는 그림 2의 시험 건물 데이터베이스를 기준으로 하고 이를 각각 2.5 m, 5 m 및 10 m의 해상도를 가지는 건물 지도로부터 얻었다고 가정하여 건물들의 모서리들을 각각의 해상도에 따른 균일 분포의 오차를 가지도록 재배치하였다. 또한 해석 결과의 정확성을 유지하기 위하여 각 해상도에 따라 균일 분포의 오차를 가지는 100개의 건물 데이터베이스를 구성하여 예측 오차의 통계적 해석을 시도하였다. 건물들의 상대 유전율과 전도도는 각각 9, 0.1 S/m로 두었으며 반사 및 회절의 회수는 각각 10번과 1번으로 제한하였다. 그 외의 여러 변수들은 표 1과 동일하다. 그림 5는 오차가 없는 기준 건물 데이터베이스에 대하여 그림 2에 표시된 3개의 구간(LOS, NLOS1, NLOS2)에서의 광대역 경로 손실을 나타내었으며, 참고로 LOS 구간에 대

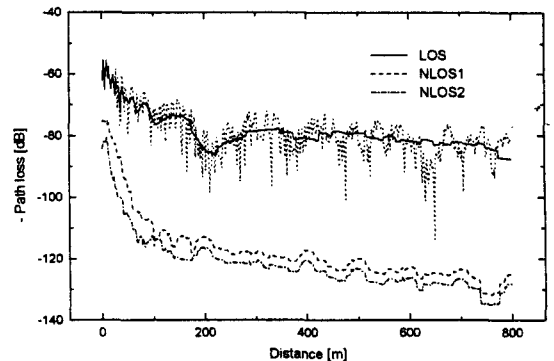


그림 5. 기준 건물 데이터베이스를 이용한 경로 손실 해석
Fig. 5. Path loss on three streets with reference building database.

해서는 협대역 경로 손실을 같이 나타내었다.

그림 6~8은 LOS, NLOS1 및 NLOS2 구간에서 건물 지도의 해상도가 2.5, 5, 10 m인 경우에 대하여 예측 결과의 평균 오차를 계산한 것이다. 각 그림은 건물 지도의 해상도가 나빠질수록 예측 결과의 오차가 증가함을 보여준다. 건물 지도의 해상도가 2.5 m일 경우 세 구간에서의 오차는 모두 3 dB

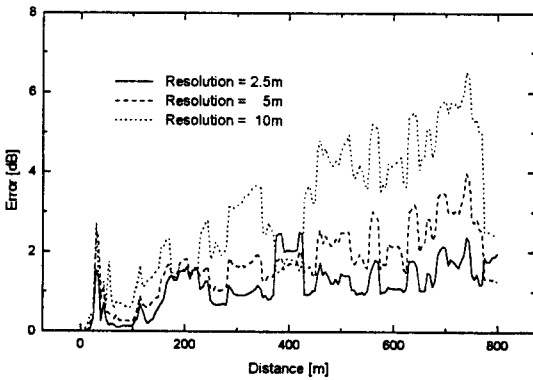


그림 6. LOS 구간에서 건물 지도의 해상도에 따른 평균 오차

Fig. 6. Mean errors on LOS street for each finite resolution of building map.

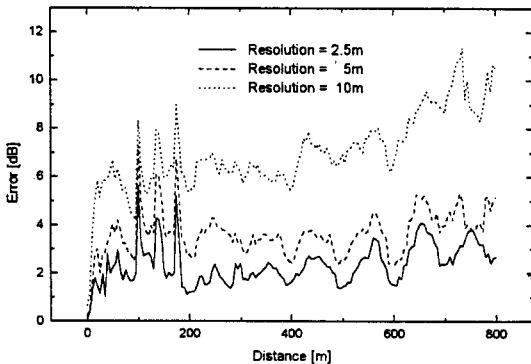


그림 7. NLOS1 구간에서 건물 지도의 해상도에 따른 평균 오차

Fig. 7. Mean errors on NLOS1 street for each finite resolution of building map.

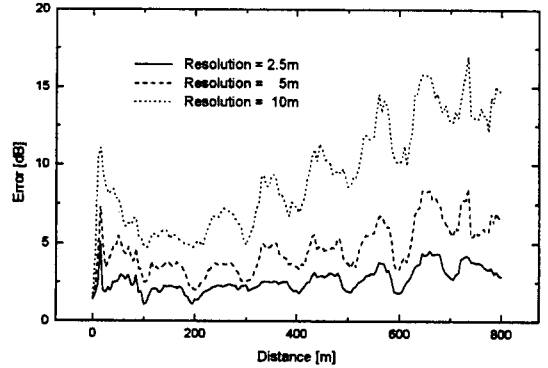


그림 8. NLOS2 구간에서 건물 지도의 해상도에 따른 평균 오차

Fig. 8. Mean errors on NLOS2 street for each finite resolution of building map.

미만이지만 해상도가 5 m일 경우 예측 오차는 NLOS2 구간의 경우 5 dB에 다다르며 해상도가 10 m일 경우에는 10 dB에 가까운 예측 오차가 발생한다. 또한 그림에서 LOS 구간에서의 오차는 NLOS 구간에서의 오차보다 훨씬 작음을 알 수 있는데 이는 LOS 구간에서의 dominant ray인 직접파의 크기가 건물 지도의 해상도에 관계없이 항상 일정하기 때문이다.

한편, 각 구간에서의 예측 오차의 크기는 송신 안테나로부터의 거리가 증가함에 따라 비례하여 증가하며 NLOS1 구간에서보다 송신 안테나로부터 멀리 떨어져 있는 NLOS2 구간에서의 예측 오차가 증가함을 알 수 있는데 이는 송신 안테나로부터의 거리가 멀수록 주변의 건물들에 의하여 상대적으로 많은 반사와 회절을 겪은 다중파들의 오차가 누적되어 나타나는 현상이다. 그림에서 또하나의 특이한 점은 교차로 부근에서의 예측 오차가 상대적으로 작다는 점인데, 이는 각 교차로에서의 dominant ray가 건물 모서리에서의 회절파들이며 이들은 상대적으로 적은 회수의 반사를 겪으면서 수신 안테나에 도달하기 때문에 건물 데이터베이스의 오

차의 영향을 적게 받기 때문이다. 표 2는 각 구간에
서의 건물 지도의 해상도에 따른 평균 예측 오차를
나타내었다.

이상의 결과에서 볼 때 건물 지도의 해상도에 따
른 건물 데이터베이스의 오차는 광선 추적법을 이
용한 전파 환경 예측 모델의 예측 결과에 매우 큰
영향을 미침을 알 수 있다. 만약 10 m의 해상도를
가지는 건물 지도를 이용하여 건물 데이터베이스를
구성할 경우 NLOS 구간에서의 경로 손실 예측 결
과는 실제 측정 결과와 6 dB이하의 오차를 가질 수
없으며 실제 오차가 6 dB이하라 하더라도 그 오차
의 크고 작음을 논하는 것은 무의미한 일이다.

V. 결 론

본 논문에서는 광선 추적법을 이용한 마이크로셀
전파 환경 예측 모델에서의 여러 가지 오차들에 관
하여 논하였다. 반사 및 회절 계수의 부정확성 및
이들의 제한이 예측 결과에 미치는 영향을 분석하
였으며 빠르고 정확한 예측 결과를 얻기 위해서는
각 건물들에 대하여 적절한 전기적 상수들의 선정
과 반사 및 회절 회수의 적절한 제한이 필요함을 보
였다. 또한, 건물 지도의 해상도가 나빠질수록 예측
결과의 오차가 증가함을 보였으며, LOS 구간과
NLOS 구간을 구분하여 그 오차의 크기를 자세히
분석하였다. 건물 지도의 유한한 해상도에 따른 오

차는 경우에 따라 반사 및 회절 계수의 부정확성과
그 회수의 제한에 따르는 오차보다 더욱 크게 나타
난다. 특히, NLOS 구간에서 송신 안테나 주변에서
는 반사 및 회절에 의한 오차가 크고, 송신 안테나
에서 멀어질수록 건물 지도의 유한한 해상도에 따
른 오차가 크다. 본 논문에서의 결과를 바탕으로 건
물 지도의 해상도에 따른 예측 결과의 최대 오차 한
계를 6 dB이하로 제한할 경우 적절한 건물 지도의
해상도는 5 m정도가 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 손해원, 명노훈, “마이크로셀 전파전파 모델
을 위한 전기영상트리를 이용한 결정적인
Ray Tube 방법,” 마이크로파 및 전파전파
연구회 춘계 발표회, 대한전자공학회, May
24, 1997.
- [2] H. W. Son, N. H. Myung, “A Deter-
ministic Ray Tube Method for Microcell-
ular Wave Propagation Prediction Mod-
el,” *IEEE Transactions on Antennas and
Propagation*, accepted for publication.
- [3] T. Kurner et al., “Concepts and Results
for 3D Digital Terrain-based Wave Propa-
gation Models: An Overview,” *IEEE J.
Select. Areas Commun.*, vol. 11, no. 7, pp.
1002-1012, 1993.
- [4] R. Grosskopf, “Prediction of Urban Pro-
pagation Loss,” *IEEE Transactions on
Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 5,
pp. 658-665, 1994.

표 2. 건물 지도의 해상도에 따른 각 구간별 평균 오차
(평균 오차 ± 표준 편차 [dB])

Table 2. Mean errors on three streets for each fi-
nite resolution of building map(mean er-
ror ± standard deviation [dB]).

구간 해상도	LOS	NLOS1	NLOS2	전체
2.5 m	1.16±0.60	2.34±0.84	2.63±0.79	2.04±0.98
5 m	1.73±0.87	3.66±0.96	4.63±1.55	3.34±1.68
10 m	3.05±1.66	7.04±1.62	9.33±3.45	6.47±3.53

손 해 원



1994년 2월 : 경북대학교 전자공학과
(공학사)
1996년 2월 : 한국과학기술원 전기
및 전자공학과(공학석사)
1996년 3월~현재 : 한국과학기술원
전기 및 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 이동통신 등

명 노 훈



1976년 2월 : 서울대학교 전기공학
과(공학사)
1982년 12월 : Ohio State Univ.
전기공학과(공학석사)
1986년 8월 : Ohio State Univ.
전기공학과(공학박사)

1986년 9월~현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과
교수

[주 관심분야] 전파전파 및 산란해석, 마이크로파 공학, 이
동 및 위성통신, EMI /EMC /EMS 등