

마이크로셀 전파전파 모델을 위한 결정적인 Ray Tube 방법

정희원 손해원*, 명노훈*

A Deterministic Ray Tube Method for Microcellular Wave Propagation Prediction Model

Hae-won Son*, Noh-Hoon Myung* Regular Members

요약

최근 마이크로셀의 전파 환경을 기술하기 위한 전파전파 모델로서 UTD(Uniform Geometrical Theory of Diffraction)에 바탕을 둔 광선 추적(ray tracing) 모델이 많이 연구되고 있다. 광선 추적 모델은 크게 광선 발사법(ray launching method)을 이용한 델과 전기 영상법(image method)을 이용한 모델의 두 가지 종류로 구분할 수 있는데 이들은 각각 해석 결과의 정확성과 해석 속도 및 해석 대상의 일반성 면에서 여러 가지 한계를 가지고 있다. 본 논문에서는 레이 튜브 트리(ray tube tree)를 이용한 새로운 광선 추적법을 제안한다. 제안한 방법은 임의의 건물 모양 및 도로 구조에 대한 해석이 가능하며 여러 번의 반사와 회절의 조합으로 이루어지는 모든 전파 경로를 불필요한 계산 없이 빠짐없이 고려함으로써 빠르고 정확한 해석 결과를 제공한다. 또한 제안한 방법은 근본적으로 전기 영상법에 근거를 둔 점대점 광선 추적법으로서 정확한 반사점과 회절점을 제공하고 수신구를 이용한 수신 시험을 하지 않기 때문에 매우 정확한 해석 결과를 제공한다.

ABSTRACT

For microcellular wave propagation prediction, ray tracing model based on uniform geometrical theory of diffraction (UTD) has gained attentions because it provides much more accurate solution than other models together with its simplicity in analysis. In this paper, we present a new and very fast ray tracing method using a ray tube tree, which can solve some of the problems that other ray tracing methods have. It is developed for quasi-three-dimensional environments and can be applied to any complex propagation environment composed of arbitrary shaped buildings and streets. It finds all propagation paths from a transmitter to a receiver extensively with very high computation efficiency.

I. 서론

최근 이동통신에 대한 수요의 급증으로 인하여 한 정된 주파수 자원으로 보다 많은 가입자를 수용하기 위한 마이크로셀에 대한 연구가 절실해지고 있다. 마이크로셀은 반경이 1km이내인 셀로 기존의 매크

* 한국과학기술원전기 및 전자공학과
論文番號: 97331-0918
接受日字: 1997年 4月 29日

로셀과 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 분포 외에도 건물 개개의 모양 및 배치에 의하여 전파 환경이 크게 영향을 받게 된다. 이는 마이크로셀이 작은셀 반경을 가지며 인접셀간의 간섭을 줄이기 위하여 기지국의 송신 전력을 작게 제한하고 기지국 안테나의 높이를 주변 건물들의 높이보다 낮게 설치하기 때문이다. 따라서 마이크로셀 시스템의 성공적인 구현을 위해서는 경로 손실 등과 같은 전파 환경에 대한 정확한 이해가 필요하며 다양한 주변 환경에 대하여 정확한 예측 결과를 제공할 수 있는 새로운 전파 전파 모델이 필요하다.

현재 마이크로셀의 전파 환경을 기술하기 위한 전파전파 모델로는 UTD(Uniform Geometrical Theory of Diffraction)에 바탕을 둔 광선 추적(ray tracing) 모델이 가장 우수성을 인정받고 있으며 이미 여러 문헌들을 통하여 그 정확성이 입증되었다[1]-[14]. 그런데, 지금까지 발표된 광선 추적 모델들은 주로 광선 발사법(ray launching method)과 전기 영상법(image method)에 바탕을 둔 것들로서 여러 가지 문제점을 가지고 있다.

광선 발사법은 송신 안테나로부터 등간격으로 다수의 레이(ray)를 발사한 뒤 각각의 레이를 추적하여 수신점에 도달하는 레이를 찾는 방법이다. 이 방법은 임의의 건물 모양 및 도로 구조에 대하여 해석이 가능하다는 장점을 가지고 있으나, 실제로 수신 안테나에 도달하는 레이뿐만 아니라 도달하지 않는 레이들도 모두 검색하여야 하므로 상당히 많은 해석 시간을 요구한다. 또한 정확한 반사점과 회절점을 결정하지 못하며 수신구(reception sphere)에 근거한 수신 시험(reception test)의 부정확성으로 인하여 해석 결과의 정확도도 상당히 떨어지게 된다.

한편, 전기 영상법을 이용한 광선 추적법은 점대점(point-to-point) 광선 추적법의 하나로서 수신 시험을 필요로 하지 않고 정확한 반사점과 회절점을 제공하므로 해석 결과가 상당히 정확하며 해석 속도도 상당히 빠른 장점이 있다. 그러나 전기 영상을 생성하

는 산란체의 결정이 어려워 복잡한 모양의 건물이나 도로 구조를 해석하기에 부적당하므로 십자형 도로와 같은 간단한 구조를 해석하는데 주로 사용된다.

최근에는 전기 영상법의 이러한 한계를 극복하기 위한 여러 가지 접근이 시도되고 있다. Tan 등은 전기 영상을 생성하는 산란체들을 결정하기 위하여 '시험 레이(test ray)'라는 개념을 사용하였는데[13] 여기서 시험 레이는 근본적으로 광선 발사법에 바탕을 둔 것으로서 전기 영상을 생성하는 모든 가능한 산란체들을 찾는다는 보장이 없으며 기존의 전기 영상법보다 상당히 많은 양의 계산량을 필요로 하여 해석 속도가 상당히 느려지게 된다. 또 하나의 접근 방법으로 VT(visibility tree) 방법이 발표되었다[14]. 이 방법은 우선 주변 산란체들에 대한 정보로부터 가능한 산란 경로들을 분석하여 이들을 실제 전파 경로의 후보로 선정한 후 이들 가운데 주어진 송신 안테나와 수신 안테나의 위치로부터 반사 법칙과 회절 법칙을 만족하는 전파 경로를 찾아내는 방법으로서 여전히 실재하지 않는 레이들을 검색하여야 하므로 계산 속도가 상당히 떨어지게 된다.

본 논문에서는 앞에서 언급한 기존의 광선 추적법의 한계를 극복한 새로운 방법을 제안한다. 제안한 방법은 임의의 건물 모양 및 도로 구조에 대한 해석이 가능하며 여러 번의 반사와 회절의 조합으로 이루어지는 모든 전파 경로를 불필요한 계산 없이 빠짐없이 고려함으로써 빠르고 정확한 해석 결과를 제공한다. 또한 이 방법은 근본적으로 전기 영상법에 근거를 둔 점대점 광선 추적법으로서 정확한 반사점과 회절점을 제공하고 수신구를 이용한 수신 시험을 하지 않기 때문에 매우 정확한 해석 결과를 제공한다.

II. 결정적인 레이 튜브 방법(Deterministic Ray Tube Method)

본 논문에서 제안한 방법은 준 3차원(quasi-three-dimension) 환경에 적합하도록 개발되었다. 즉 모든 건물의 높이가 송수신 안테나의 높이보다 충분히 높아서 건물 지붕에서의 회절파는 무시할 수 있다고 가정하였다. 제안된 방법을 설명하기 위해서는 우선 송

신 튜브, 반사 튜브, 회절 튜브라고 명명한 3가지 종류의 레이 튜브(ray tube)에 대한 정의가 필요하다. 이들 레이 튜브들은 준 3차원 환경을 지면에 투영한 2차원 평면에서 정의되며 주변 건물들에 대한 정보로부터 생성된다.

송신 튜브는 송신 안테나에 의하여 생성되며 안테나의 위치와 π radian의 튜브각에 의하여 정의된다. 이 튜브는 주변 건물들의 벽면과 모서리에 의한 전파

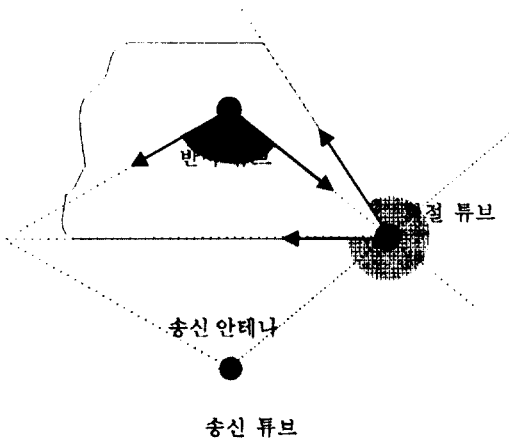


그림 1. 송신 튜브와 종속 튜브들
Fig. 1. Transmitter ray tube and its children

의 가려짐에 의하여 그림 1과 같이 불규칙적인 모양을 가지게 되며 송신 튜브를 가리는 건물의 벽면과 모서리는 각각 반사 튜브와 회절 튜브를 송신 튜브의 종속체로서 생성한다. 그림 1은 이러한 과정을 보여주고 있다. 만약 수신 안테나가 송신 튜브 내에 위치한다면 송신 안테나와 수신 안테나 사이에 직접파가 존재하는 것으로 판단한다.

반사 튜브는 건물 벽면에 의한 전파의 반사를 나타내는 것으로서 송신 튜브나 회절 튜브 또는 다른 반사 튜브에 의하여 생성되며 벽면에서의 전기 영상의 위치와 벽면의 번호, 그리고 π radian 이하의 튜브각에 의하여 정의된다. 여기서 전기 영상은 송신기로부터의 다중 반사 영상일 수도 있고 건물의 모서리를 2차 전원으로 생각할 경우 이들의 다중 반사 영상일 수도 있다. 반사 튜브는 이전의 송신 튜브나 수신 튜브, 또는 다른 반사 튜브들이 벽면에 가려짐에 의하여 이 튜브들의 종속체로서 생성된다. 전기 영상의 위치는 송신 안테나의 위치나 부채꼴 모양을 가진 이전 튜브의 꼭지점의 위치로부터 정해지며 생성된 반사 튜브의 꼭지점이 된다. 반사 튜브의 각은 이전 튜브를 가리는 벽면의 전체 또는 일부분에 의하여 결정되며 그림 2와 같이 두개의 단위 벡터 P_1 과 P_2 에 의하여 기술된다. 반사 튜브는 그들의 종속체로서 튜브 내부의 벽면과 모서리들로부터 다른 반사 튜브나 회절 튜브

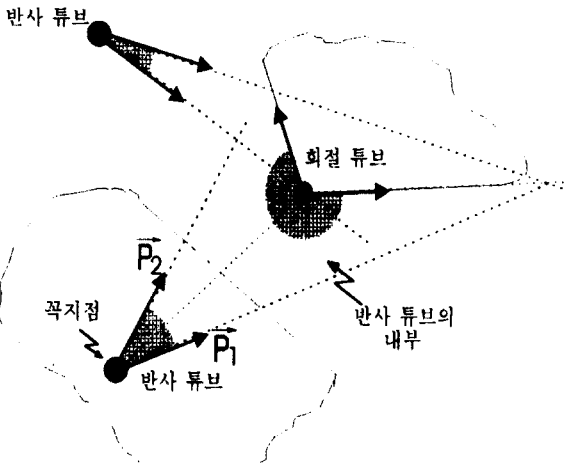


그림 2. 반사 튜브와 종속 튜브들
Fig. 2. Reflection ray tube and its children

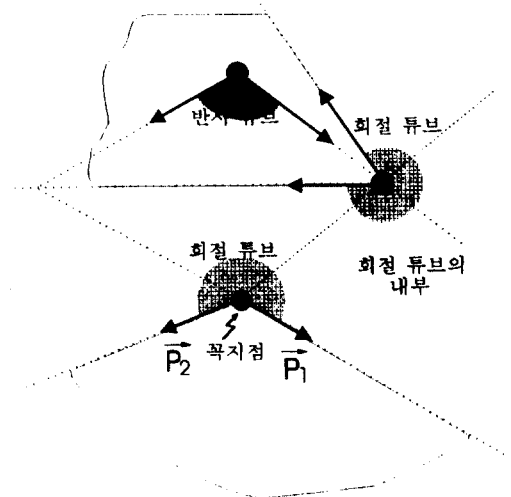


그림 3. 회절 튜브와 종속 튜브들
Fig. 3. Diffraction ray tube and its children

들을 생성할 수 있다. 그림 2에 그 과정을 나타내었다. 기본적으로 반사 튜브는 튜브각과 벽면으로 경계된 부채꼴 모양이지만 이 튜브 내의 건물들에 의한 가려짐에 의하여 불규칙적인 모양을 가지게 된다.

회절 튜브는 건물 모서리에 의한 회절파를 나타내는 것으로 이전의 3가지 튜브들의 종속체로서 생성된다. 회절 튜브는 모서리의 위치와 모서리 번호, 그리고 튜브각으로 기술되며 모서리의 위치가 튜브의 꼭짓점이 된다. 튜브각은 모서리를 구성하는 두개의 벽면에 의하여 결정되며 그림 3과 같이 두개의 단위 벡터 P_1 과 P_2 로 표현된다. 회절 튜브의 모양도 기본적으로는 부채꼴 형태이지만 튜브 내의 건물들에 의한 가려짐에 의하여 불규칙적인 모양을 가지게 된다. 회절 튜브의 종속 튜브들은 튜브 내의 벽면과 모서리들에 의하여 생성된다.

어떠한 복잡한 환경에 대해서도 이들 3가지 종류의 튜브들은 주변 건물들의 정보로부터 항상 생성될 수 있으며 트리 구조로 저장될 수 있다. 이 트리의 루트(root)는 항상 송신 튜브가 된다. 송신 튜브는 주변 건물들에 의한 반사 튜브나 회절 튜브를 종속 튜브로 가질 수 있으며 각각의 반사 튜브나 회절 튜브들도 그들의 종속 튜브로서 다른 반사 튜브나 회절 튜브를 생성할 수 있다. 이러한 반복적 과정을 통하여 주어진 트리의 깊이(depth)까지 트리를 생성할 수 있으며

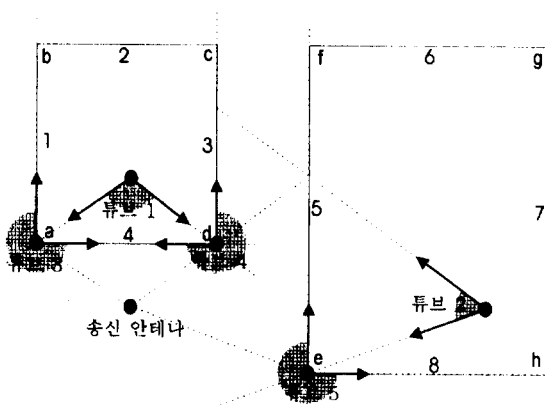


그림 4. 2개의 건물로 구성된 환경의 2차원 투영도
Fig. 4. Plan view of two rectangular buildings

이때 트리의 깊이는 전체 산란 횟수를 N 이라고 할 때 $N+1$ 로 주어진다.

그림 4는 2개의 사각형 건물로 구성된 간단한 환경의 지면에 대한 2차원 투영도이다. 각각의 건물은 4개의 벽면과 4개의 모서리로 구성되어 있다. 편의상 벽면은 '1'에서 '8'까지 번호를 붙였으며 모서리들은 'a'에서 'h'까지 이름을 붙였다. 송신 안테나는 4번 벽면 아래에 위치하고 있으며 송신 튜브를 생성한다. 이때 이 송신 튜브는 트리 구조의 루트로 저장된다. 1차 산란 과정에서 송신 튜브는 2개의 벽면(4, 5)과 3

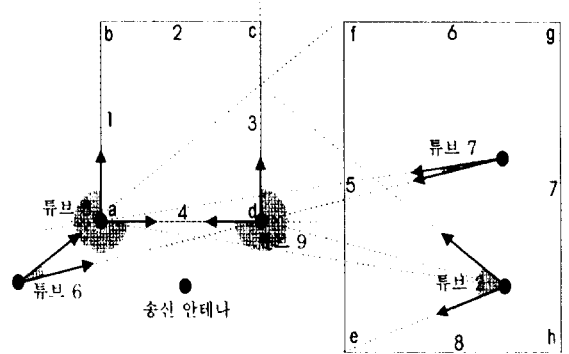


그림 5. 반사 튜브 2의 종속 튜브들
Fig. 5. Children of the reflection ray tube 2

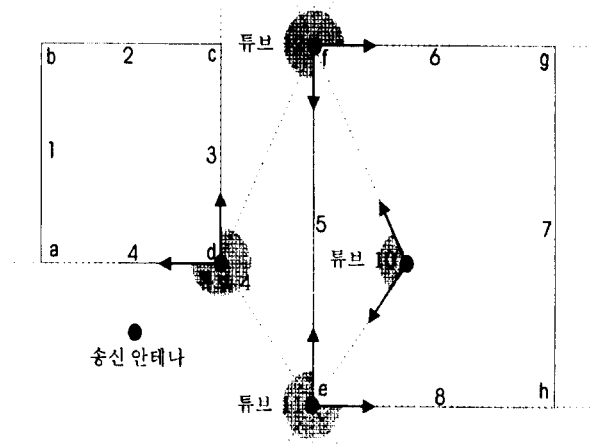


그림 6. 회절 튜브 4의 종속 튜브들
Fig. 6. Children of the diffraction ray tube 4

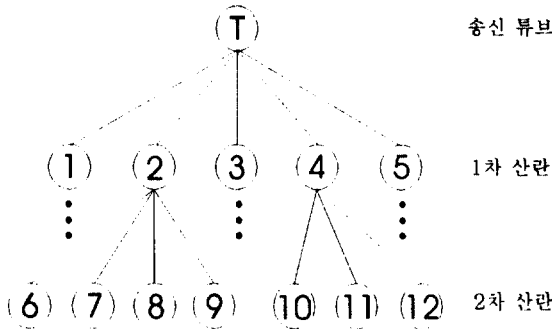


그림 7. 그림 4-6의 과정을 통해 생성된 레이 튜브 트리
Fig. 7. Ray tube tree constructed from Figs 4-6

개의 모서리(a, d, e)에 의하여 가려지며 따라서 그림 4와 같이 2개의 반사 튜브와 3개의 회절 튜브가 생성된다. 각각의 반사 튜브에 대하여 튜브의 꼭지점의 위치는 대응하는 각 벽면에 생성되는 송신 안테나의 전기 영상의 위치와 동일하며 튜브각은 각 벽면이 송신 튜브를 가리는 정도에 의하여 결정된다. 한편, 회절 튜브들은 대응하는 각 모서리를 꼭지점으로 하고 모서리를 구성하는 두개의 벽면에 의하여 튜브각이 결정된다. 2차 산란 과정에서는 1차 산란 과정에서 생성된 5개의 튜브들이 각각 반사 튜브와 회절 튜브들을 그들의 종속 튜브로서 생성한다. 예를 들어 벽면 5에 의하여 생성된 반사 튜브 2는 2개의 벽면과 2개의 모서리에 의하여 가려지는데 이로 인하여 벽면 3과 4에 2개의 반사 튜브(6, 7)와 모서리 a와 d에 2개의 회절 튜브(8, 9)를 생성한다. 비록 회절 튜브 8과 9는 앞서 1차 산란 과정에서 생성된 회절 튜브 3, 4와 동일한 꼭지점과 튜브각을 가지지만 트리 구조에서 그들의 부모들이 다르기 때문에 서로 다른 튜브들로 간주되어야 한다. 그림 5는 2차 산란 과정에서 반사 튜브 2로부터 생성된 4개의 튜브들을 보여주고 있다.

다른 예로서, 모서리 4에 위치한 회절 튜브 4는 1개의 벽면과 2개의 모서리에 의해서 가려지며 따라서 그림 6에서와 같이 1개의 반사 튜브(10)와 2개의 회절 튜브(11, 12)를 생성한다. 그림 7은 이러한 과정을 통하여 앞에서 예로든 2차원 투영도에서 생성된 레이 튜브 트리(ray tube tree)를 보여준다. 그림에서 트리의 깊이는 3이며 이는 2차 산란 과정까지 고려한 것이다. 이렇게 트리를 생성하는 과정에서는 산란의 차수

를 제한하는 방법 이외에도 트리 노드(node)의 생성을 제한하는 다양한 평가 기준을 사용할 수 있다. 예를 들어 각 노드를 생성하는 과정에서 전체 회절의 횟수를 제한하거나 각 튜브 내의 필드의 세기를 근사적으로 계산하여 주어진 문턱값 이하의 세기를 가지는 튜브들을 생성하지 않을 수도 있다.

일단 레이 튜브 트리가 완성되면 광선 추적법을 이용하여 송신 안테나로부터 수신 안테나에 도달하는 모든 경로를 찾을 수 있다. 제한한 방법은 트리의 생성 과정이 수신 안테나의 위치와 무관하므로 어떠한 위치의 수신 안테나에 대해서도 동일한 트리를 이용하여 전파 경로를 찾을 수 있다. 전파 경로를 찾는 과정은 다음과 같다. 주어진 수신 안테나의 위치에 대하여 생성된 레이 튜브 트리를 검색하면서 수신 안테나를 그 내부에 포함하는 튜브들을 찾는다. 일단 그러한 튜브들을 찾으면 트리로부터 각각의 튜브에서 루트 튜브(송신 튜브)까지의 일련의 튜브들을 찾을 수 있다. 이때 수신 안테나를 포함하는 각각의 튜브들은 2차원 평면에서 하나의 전파 경로와 일대일로 대응하며 전기 영상법에 자주 쓰이는 광선 역추적법(backward ray tracing method)을 이용하여 2차원 평면상에서 반사점과 회절점들의 위치를 계산할 수 있다. 그림 8은 레이 튜브 트리를 바탕으로 광선 역추적법을 이용하여 전파 경로를 찾는 한 예를 보여주고 있다. 그림에서 튜브 10은 그 내부에 수신 안테나를 포함하고 있으므로 그림 7의 트리로부터 송신 튜브

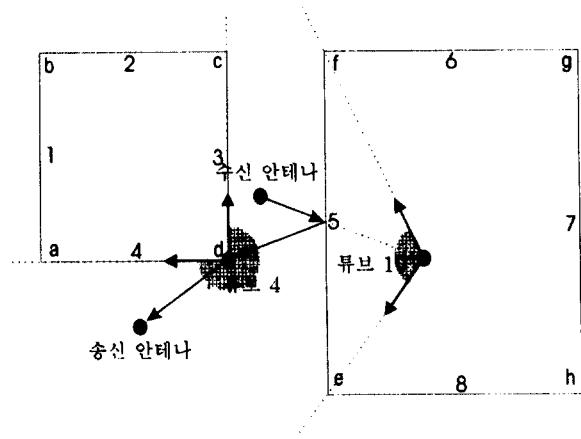


그림 8. 그림 7의 레이 튜브 트리로부터 찾은 전파 경로의 예
Fig. 8. Example of propagation path found from the ray tube tree

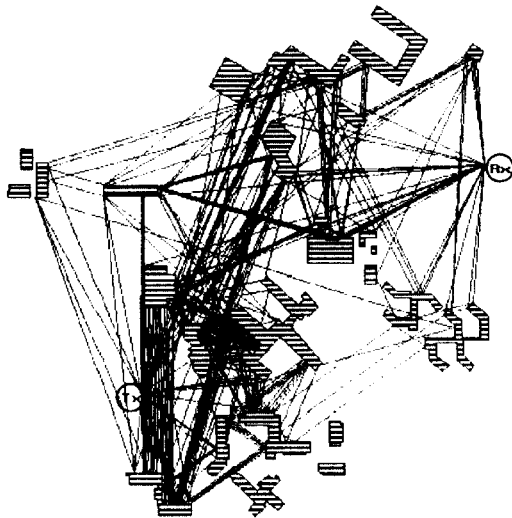


그림 9. 한국과학기술원 동쪽 지역에서의 광선 추적 예
Fig. 9. An example of ray tracing in campus of KAIST

까지 '튜브 10 → 튜브 4 → 송신 튜브'의 일련의 튜브들을 찾을 수 있다. 튜브 10은 벽면 5로부터 생성된 반사 튜브이므로 벽면 5에 위치한 반사점은 수신 안테나와 튜브 10의 꼭지점을 잇는 직선이 벽면 5와 만나는 교점에 위치한다. 튜브 4는 모서리 d에 생성된 회절 튜브이므로 회절점은 모서리 d에 위치하며 마지막 튜브는 송신 튜브이므로 수신 안테나로부터 송신 안테나까지의 전파 경로는 '수신 안테나 → 벽면 5의 반사점 → 모서리 d의 회절점 → 송신 안테나'로 결정된다. 이러한 방법으로 수신 안테나를 포함하는 각 튜브로부터 모든 전파 경로를 찾을 수 있다. 각 튜

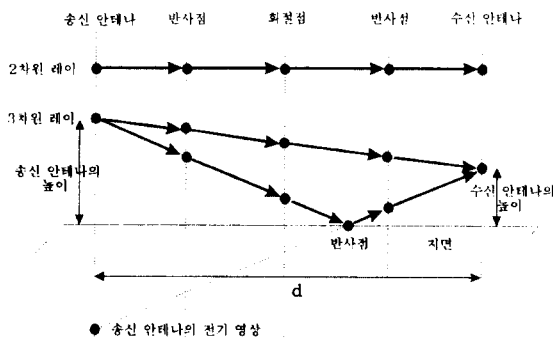


그림 10. 2차원 레이의 3차원 변환
Fig. 10. Conversion of 2-D ray to 3-D ray

브들은 2차원 평면에서 반드시 하나의 전파 경로와 대응되므로 광선 방사법이나 VT 방법과 같이 불필요한 레이들을 추적하는 경우가 없으며 따라서 계산 효율을 상당히 향상시킬 수 있다. 그림 9는 제안한 방법을 이용한 경로 추적의 한 예를 보여준다. 그림에서 복잡한 건물들로 구성된 2차원 투영도는 한국과학기술원을 모델로 작성한 것이며 1번의 회절을 포함하여 최대 10번의 산란 과정을 고려하였다.

2차원 투영도에서 생성한 레이 튜브 트리로부터 얻어진 레이는 그림 10과 같이 송수신 안테나의 높이와 지면을 고려하여 3차원에서의 레이로 변환할 수 있다. 2차원 레이는 지면에서 반사가 일어나지 않는 레이와 지면에서 반사가 일어나는 2개의 레이를 모두 나타내고 있으며 3차원에서 반사점과 회절점의 정확한 좌표 계산 (그림에서 x와 y좌표는 2차원의 경우와 동일하므로 z좌표만을 구하면 된다.)을 통하여 2개를 구분한다. 그림 10은 송신기로부터 '반사-회절-반사'의 과정을 거쳐 수신기로 도달하는 2차원 레이를 2개의 3차원 레이로 변환하는 과정을 나타낸 것이다. 그림에서 d는 2차원 레이의 전체 길이를 나타내며 이로부터 그림과 같이 반사점 및 회절점의 높이에 대한 좌표(z좌표)를 구한다. 지면에 의한 반사파는 그림에서와 같이 송신점의 지면에 대한 전기 영상을 이용하여 지면에서의 반사점을 구함으로써 계산되어질 수 있다.

마지막으로 각 전파 경로에 의해 수신 안테나에 도달하는 필드의 세기는 UTD를 이용하여 구할 수 있다



그림 11. Ottawa시의 건물 지도
Fig. 11. Plan view of the downtown core of Ottawa, Canada

[16]-[18]. 임의의 점 Q 에 반사점이나 회절점이 위치하고 이 점에 입사하는 전계의 세기를 $E^i(Q)$ 라고 하면 수신점 P 에서의 반사파 $E^r(P)$ 나 회절파 $E^d(P)$ 의 전계는 다음과 같이 주어진다.

$$E^r(P) = E^i(Q) R A_s e^{jks} \quad (1)$$

$$E^d(P) = E^i(Q) D A_d e^{jks} \quad (2)$$

여기서 각각의 변수들은 다음과 같으며 이들에 대한 자세한 설명은 부록에 주어져 있다.

R = dyadic reflection coefficient

D = dyadic diffraction coefficient

A_s = spreading factor for a reflection from a surface

A_d = spreading factor for a diffraction at an edge

k = propagation constant

s = distance from Q to P

앞의 식들을 이용하여 수신 안테나에 도달하는 각각의 레이들의 전계의 세기를 구한 후 이를 벡터적으로 중첩(superposition)하면 수신 안테나에 도달하는 전계의 세기를 알 수 있다.

III. 수치 해석 결과

본 논문에서는 제안한 방법의 우수성과 해석 결과의 정확성을 보이기 위하여 임의의 건물 형태와 도로 구조를 갖는 실제 환경에서 해석을 수행한 후 문헌 [15]의 측정 결과와 비교하였다. 문헌[15]는 캐나다의

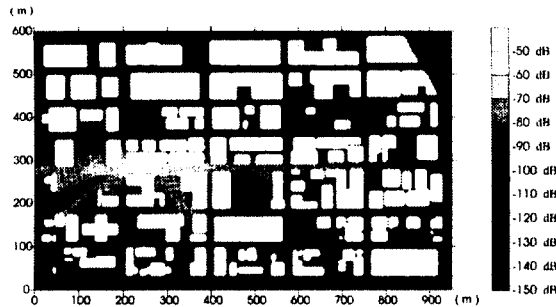


그림 12. Ottawa시의 경로 손실 지도
Fig. 12. Path loss map of Ottawa

오타와(Ottawa)시에서 측정된 결과를 보여 주고 있다. 그림 11은 측정이 이루어진 곳의 건물 지도이다. 송신 안테나는 그림에서 Slater street의 좌표 (240, 271)에 위치하고 있으며 송신 안테나와 수신 안테나의 높이는 각각 8.5m, 3.65m로서 도로를 따라 차량으로 이동하면서 측정하였다. 송신 안테나와 수신 안테나는 작은 그라운드 면을 가지는 모노폴 안테나이며 안테나의 이득을 고려하여 경로 손실을 측정하였다. 측정 주파수는 910MHz이며 1.4m 간격으로 측정한 후 매 10m 마다 평균을 취하였다. 그림 11의 건물 지도에서 넓은 면적을 차지하는 건물들은 고층 건물들이고 좁은 면적을 차지하는 건물들은 일반적으로 3층 건물이며 모든 건물의 높이는 안테나의 높이보다 높다.

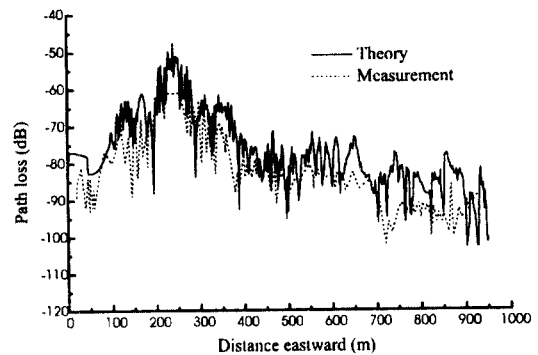


그림 13. Slater Street에서의 경로 손실
Fig. 13. Path loss in Slater Street

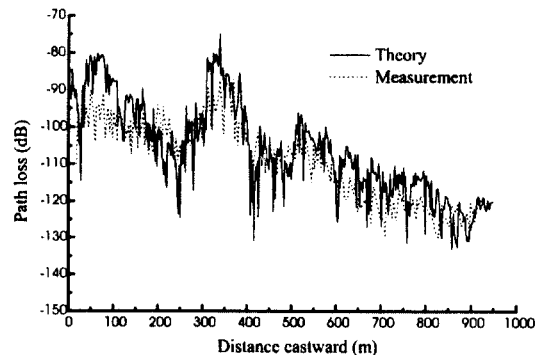


그림 14. Laurier Street에서의 경로 손실
Fig. 14. Path loss in Laurier Street

그림 12는 그림 11의 건물 지도를 이용하여 제안한 방법으로 계산한 경로 손실 지도이다. 이때 건물들의 상대 유전율과 전도도는 각각 9와 0.1S/m로 두었고 지면의 상대 유전율과 전도도는 각각 15와 7S/m로 두었다. 회절 횟수는 1번으로 하였으며 반사와 회절을 포함한 전체 산란 횟수는 10번으로 제한하였다. 또한 수신 안테나에 도달한 레이들의 경로 손실은 150dB이하인 것들만을 고려하였다. 그림 12의 결과를 얻기 위하여 2차원 투영도에서 레이 튜브 트리를 생성하는데 소요된 시간은 Digital사의 Alpha station으로 297초이며, 252,868개의 반사 튜브와 784개의 회절 튜브를 생성하였다. 튜브 트리가 생성된 후 5m 간격으로 수신점의 위치를 이동하면서 전체 12,508개의 수신 안테나 위치에 대하여 경로 손실 해석을 수행하였으며 이 때 소요된 시간은 934초(수신 안테나의 위치 하나당 0.075초)이다. 따라서, 그림 12와 같은 결과를 얻기 위하여 소요된 시간은 전체 20분 정도이며 이는 문헌[13]에서 전기 영상법과 광선 발사법을 혼합하여 건물 100개에 대하여 해석하는데 소요되는 시간(수신 안테나의 위치 하나당 25분)과 비교하여 볼 때 상당히 빠른 것이다. 참고로 그림 11의 건물 지도에는 130개의 건물이 있으며 614개의 벽면으로 구성되어 있다.

그림 12를 살펴보면 개개의 건물의 영향이 매우 중요함을 알 수 있다. 그림에서 Slater Street는 LOS(line of sight) 구간이므로 경로 손실이 비교적 작

으며 Laurier Street는 송신 안테나 주변의 빈 공간으로 인하여 Albert Street의 경우보다 경로 손실이 크게 생기지 않음을 볼 수 있다. 또한 LOS 구간에서 NLOS 구간으로 수신 안테나를 이동할 경우 수신 전력이 짧은 구간에서 10-20 dB정도 감소함을 볼 수 있다.

그림 13-15는 Slater Street, Laurier Street 및 Queen Street에서 경로 손실의 이론적 해석 결과와 측정 결과를 비교한 것이다. Slater Street는 LOS 구간인데 이론적 해석 결과가 측정 결과보다 약 10dB 가량 높게 나타났다. 이는 해석 과정에서 건물 이외의 여러 가지 산란체(가로수 등)들을 무시하였기 때문에 해석할 때 가정한 것처럼 완전한 LOS가 유지되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 송신 안테나 부근에서 측정값이 일정한 것은 측정 과정에서 수신기가 포화되었기 때문이다. Laurier Street와 Queen Street의 해석 결과도 측정 결과와 거의 일치하는데 Queen Street에서의 해석 결과는 Laurier Street의 경우보다 측정 결과와 조금 큰 차이를 보인다. 이는 송신 안테나와 수신 안테나 사이에 전파 장애물이 많을수록 이론적 해석에서의 여러 가지 가정들에 의한 오차가 커지기 때문인 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 레이 튜브 트리를 이용한 새로운 광선 추적법을 제안하였다. 제안한 방법은 어떠한 복잡한 환경에도 적용할 수 있으며 준 3차원 환경에서 다중 반사와 회절의 조합으로 이루어지는 모든 전파 경로를 정확하게 찾을 수 있다. 또한 기존의 광선 발사법에서와 같은 불필요한 계산량을 줄임으로써 매우 빠른 해석 속도를 가지고 있으며 점대점 광선 추적법에 근거한 상당히 정확한 해석 결과를 제공한다. 본 논문에서 제안한 방법은 레이 튜브 트리의 생성 과정에서 투과파를 고려하면 옥내 환경으로의 확장이 가능하다.

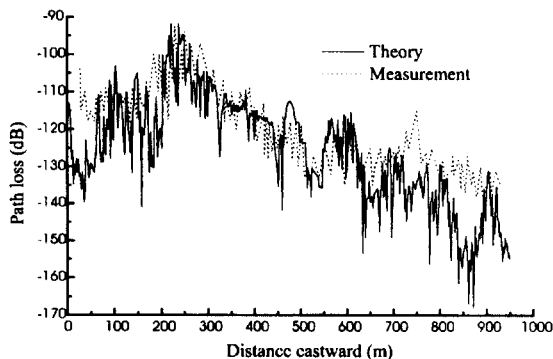


그림 15. Queen Street에서의 경로 손실

Fig. 15. Path loss in Queen Street

부 록

본문 중 식(1)과 (2)에 나타난 변수들에 대한 설명은 다음과 같다[18]

$$R = R_s e'_s e'_s + R_h e'_h e'_h$$

$$R_s(\theta, \epsilon') = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon' - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon' - \sin^2 \theta}}$$

$$R_h(\theta, \epsilon') = \frac{\epsilon' \cos \theta - \sqrt{\epsilon' - \sin^2 \theta}}{\epsilon' \cos \theta + \sqrt{\epsilon' - \sin^2 \theta}}$$

$$\epsilon' = \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$$

$$D = -D_1 \beta_0^2 - D_h \phi' \phi'$$

$$D_{s,h} = D_1 + D_2 + R_{s,h}(D_3 + D_4)$$

$$D_1(L, \phi, \phi', \beta_0, n) = -\frac{e^{-\lambda \pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin \beta_0} \cot \left[\frac{\pi + (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kLa^+(\phi - \phi')]$$

$$D_2(L, \phi, \phi', \beta_0, n) = -\frac{e^{-\lambda \pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin \beta_0} \cot \left[\frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kLa^-(\phi - \phi')]$$

$$D_3(L, \phi, \phi', \beta_0, n) = -\frac{e^{-\lambda \pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin \beta_0} \cot \left[\frac{\pi + (\phi + \phi')}{2n} \right] F[kLa^+(\phi + \phi')]$$

$$D_4(L, \phi, \phi', \beta_0, n) = -\frac{e^{-\lambda \pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin \beta_0} \cot \left[\frac{\pi - (\phi + \phi')}{2n} \right] F[kLa^-(\phi + \phi')]$$

$$F(x) = 2\sqrt{x} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-u^2} du \quad \text{for } x > 0$$

$$F(x) = F^*(|x|) \quad \text{for } x < 0$$

$$a^\pm(\phi, \phi') = 2 \cos^2 \left[\frac{2\pi n N^\pm - (\phi \pm \phi')}{2} \right]$$

N^\pm = integer that most nearly satisfy the following two equations

$$2\pi n N^+ - (\phi \pm \phi') = \pi$$

$$2\pi n N^- - (\phi \pm \phi') = -\pi$$

$$n = \frac{2\pi - \alpha}{\pi}$$

α = interior wedge angle

$$A_s(s) = \frac{\rho}{s + \rho}$$

$$A_h(s) = \sqrt{\frac{\rho}{s(\rho + s)}}$$

참고 문헌

1. V. Erceg, S. Ghassemzadeh, M. Taylor, D. Li, and D. L. Schilling, "Urban/suburban out-of-sight propagation modeling," IEEE Communicat. Mag., vol. 30, pp. 56-61, June 1992.

2. V. Erceg, A. J. Rustako and R. S. Roman, "Diffraction around corners and its effects on the microcell coverage area in urban and suburban environments at 900 MHz, 2 GHz, and 6 GHz," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 43, pp. 762-766, Aug. 1994.

3. A. J. Rustako, Jr., N. Amitay, G. J. Owens and R. S. Roman, "Radio propagation at microwave frequencies for line-of-sight microcellular mobile and personal communications," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 40, pp. 203-210, Feb. 1991.

4. K. R. Schaubach, N. J. Davis and T. S. Rappaport, "A ray tracing method for predicting path loss and delay spread in microcellular environments," in 42 IEEE Veh. Technol. Conf., Denver, CO, May 10-13, 1992, vol. 2, pp. 932-935.

5. K. R. Schaubach and N. J. Davis, "Microcellular radio-Channel propagation prediction," IEEE Antennas Propagat. Mag., vol. 36, pp. 25-33, Aug. 1994.

6. M. C. Lawton and J. P. McGeehan, "The application of GTD and ray launching techniques to channel modeling for cordless radio systems," in 42 IEEE Veh. Technol. Conf., Denver, CO, May 10-13, 1992, vol. 2, pp. 125-130.

7. M. C. Lawton and J. P. McGeehan, "The application of a deterministic ray launching algorithm for the prediction of radio channel characteristics in small-cell environments," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 43, pp. 955-969, Nov. 1994.

8. C. Bergljung and L. G. Olsson, "Rigorous diffraction theory applied to street microcell propagation," in IEEE Global Telecommunicat. Conf., GLOBECOM '91, Phoenix, AZ, Dec. 1991, pp. 1292-1296.

9. S. Y. Seidel and T. S. Pappaport, "Site-Specific Propagation Prediction for Wireless In-Building Personal Communication System Design," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 43, pp. 879-891, Nov. 1994.

10. S. Y. Tan and H. S. Tan, "UTD propagation model in an urban street scene for microcellular communications," IEEE Trans, Electromagn. Compat., vol. 35, pp. 423-428, Nov. 1993.

11. 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.

12. S. Y. Tan and H. S. Tan, "Improved three-dimensional ray tracing technique for microcellular propagation models," Electron. Lett., vol. 31, pp. 1503-1505, Aug. 1995.

13. S. Y. Tan and H. S. Tan, "A microcellular communications propagation model based on the uniform theory of diffraction and multiple image theory," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 44, pp. 1317-1326, Oct. 1996.

14. M. G. Sanchez, L. de Haro, A. G. Pino and M. Calvo, "Exhaustive ray tracing algorithm for microcellular propagation prediction models," Electron. Lett., vol. 32, pp. 624-625, Mar. 1996.

15. J. H. Whitteker, "Measurements of path loss at 910 MHz for proposed microcell urban mobile systems," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 37, pp. 125-129, Aug. 1988.

16. R. J. Luebbers, "Finite conductivity uniform GTD versus knife edge diffraction in prediction of propagation path loss," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 32, pp. 70-76, Jan. 1984.

17. P. D. Holm, "UTD-diffraction coefficients for higher order wedge diffracted fields," IEEE

Trans. Antennas Propagat., vol. 44, pp. 879-888, June 1996.

18. D. A. McNamara, C. W. I. Pistorius and J. A. G. Malherbe, Introduction to the Uniform Geometrical Theory of Diffraction, Boston, MA:Artech House, 1990.



손 해 원(Hae Won Son) 정회원
1994년 2월:경북대학교 전자공학과(공학사)
1996년 2월:한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)
1996년 3월~현재:한국과학기술원 전기및 전자공학과 박사과정

*주관심분야:안테나및 전파전파, 이동통신 등



명 노 훈(Nah Hoon Myung) 정회원
1976년 2월: 서울대학교 전기공학과(공학사)
1983년 12월: Ohio State Univ. 전기공학과(공학석사)
1986년 8월: Ohio State Univ. 전기공학과(공학박사)

1986년 9월~현재:한국과학기술원 전기및 전자공학과 교수

*주관심분야: 전파전파및 산란해석, 마이크로파 공학, 이동및 위성통신, EMI/EMC/EMS 등