

실내 전파 특성 계산을 위한 삼각형 모델 기반의 3차원 광선 추적법

Three Dimensional Ray Tracing Based Indoor Propagation Model Using Triangulated Surfaces

송재영 · 이행선

Jaeyoung Song · Haengseon Lee

요약

본 논문에서는 실내 환경에서 무선 망 설계에 필요한 전파 특성 예측을 위해 3차원 광선 추적법을 이용하여 계산하는 방법을 제시했다. 실내의 경우는 벽면을 투과하는 전파, 복잡한 실내 구조물에 의한 산란 등으로 생기는 다양한 전파 경로를 정확히 모델링 하기 위해 3차원 광선 추적법을 적용하여 계산할 필요가 있다. 복잡한 실내 구조물을 수용하기 위해 물체들을 삼각형 면들로 모델링 하고, 이 삼각형 면을 이용하여 반사, 투과, 회절에 의한 효과를 고려하여 수신 전력을 계산하기 위한 ray tube를 만들고 계산의 효율성을 높이는 방법을 제시했다.

Abstract

In this paper, an indoor propagation model based on 3d ray tracing is presented for wireless communications. In case of indoor propagation models, various radio propagation paths such as wall-transmitted wave and scattered wave from ceilings, pillars, and furnitures arises and 3-D formulation is needed. To accommodate such scatterers, objects are modeled by triangulated surfaces and ray tubes using those surfaces are introduced and efficient calculation methods using the tubes are presented.

Key words : 3d Ray Tracing, Indoor Propagation

I. 서론

실내에서 무선 통신이 다양하게 쓰이고 있고 앞으로 점점 서비스가 확대되는 상황에서 실내 무선 망 설계에서 필요한 channel의 특성을 예측하기 위한 정밀한 방법이 필요하다. 기존의 방법은 실외와 마찬가지로 자유 공간 모델이나 지면 반사만을 고려한 실외 전파 모델을 쓰거나, 측정 결과를 통한 통계적인 방법이 흔하게 쓰여 왔다. 이러한 방법은 계산이 간단한 장점이 있으나, 개별적이고 다양한 실내 환경을 충분히 고려하지 못하는 단점이 있어서 설치와

함께 측정을 통하여 문제점을 해결하는 방식의 무선망 설계가 필요하다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하고자 건물이나 가구 등의 구조물과 물질의 구성을 고려하여 전파 모델을 컴퓨터를 이용하여 정량적으로 계산하여 얻는 방법이 연구되어 왔다. 이러한 정량적인 모델의 예로는 기하광학적 방법^{[1],[2]}이나 UTD(Uniform Theory of Diffraction), Moment method, FDTD 등이 쓰여 왔다^[3]. 현재 무선 통신 방식으로 쓰이고 주로 있는 주파수 대역에서 전파의 특성을 고려하여 가장 많이 쓰이는 방식은 기하광학적 방법에 회절을 고려한 UTD 방식이 주로

「본 연구는 KT연구개발본부의 연구비 지원을 받아 수행된 것임.」

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

· 논문 번호 : 20080401-044

· 수정완료일자 : 2008년 6월 9일

이용되고 있다.

본 연구에서는 기하광학과 UTD 방식을 이용하여 실내에서 전파 특성을 계산하는 방식을 제시한다. 실내의 전파 특성은 벽이나 문을 통한 투과파, 천장을 통한 반사파, 가구 등에 의한 산란 등으로 전파의 경로가 매우 복잡해진다. 이러한 상황에서 정밀한 예측을 위해서는 3차원 광선 추적법^[4]이 필수적이다. 본 논문에서는 복잡한 실내 환경을 삼각형을 이용하여 모델링 하는 방법과 이 삼각형들을 이용하여 3차원 ray tube를 생성하는 방법, 계산에 활용하는 방법을 제시한다.

II. 실내에서 전파 모델

실내 환경에서 전파특성을 계산하기 전에 필요한 사항은 실내 환경을 모델링 하는 것이다. 실내에는 천장, 벽면, 가구, 문 등의 다양한 사물이 존재한다. 이렇게 다양한 환경을 다루기 위해서 본 연구에서는 사물을 삼각형으로 이루어진 면들의 집합으로 변환하고 ray tracing에 필요한 계산들을 삼각형들에 대해 수행하는 방식을 썼다. Ray tracing에서 필요한 계산은 ray와 면이 교차점이 있는지 여부와 반사파, 투과파의 경로를 정해주는 것이다. 삼각형으로 표시된 물체들에 대해 ray의 교차 여부 판별, 분할 방법 등이 컴퓨터 그래픽 분야에서 매우 많이 연구되어 있으므로 그 결과를 이용한다. 일단 환경 데이터를 삼각형으로 나타냈으므로, ray tracing 연산은 삼각형에 대해서만 수행하면 된다. 삼각형의 분할은 edge 하나에 삼각형이 2개만 접하도록 수행하면 계산 시간 면에서 유리하다.

먼저 반사에 의한 전파를 고려하기 위해 반사 ray tube라는 개념을 도입하고 삼각형에 대해 적용하였다. 반사파는 전파가 진행하다가 진행 방향을 가로막는 삼각형에 교차할 때 생기므로, 삼각형 전체의 집합에 대해 전파와 교점이 있는지 여부를 검사하면 된다. 여러 면이 교차하는 경우, 진행 방향으로 최초로 마주치는 삼각형이 반사파를 만들어낸다고 생각할 수 있다. 이 삼각형에 대해 최초의 송신 지점의 거울 대칭점을 찾으면 그 점과 삼각형이 반사파를 만들 때 필요한 모든 정보를 담고 있다고 생각해도 된다. 반사 후의 전파는 이 대칭점을 송신점으로 하

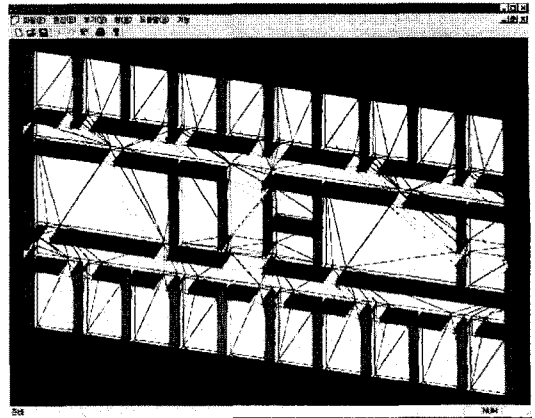


그림 1. 삼각형으로 분할한 실내 환경. 바닥과 천장도 삼각형으로 분할되었음.

Fig. 1. Triangulated surfaces of indoor environment. Floors and ceilings are also divided.

여 교차된 삼각형 면에서 튀어 나가는 형태를 취한다. 그림 2는 송신(source) 지점으로부터 반사파가 생기는 과정을 알려주고 있다. 1차 반사에 의해서 생기는 image source가 새로운 송신점이 되고, 반사파가 존재하는 영역은 ray가 닿는 삼각형과 image source가 이루는 삼각쌍대임을 알 수 있다. 삼각형 단위로 분할되어 있으므로 모양이 복잡한 물체라고 하여도 쉽게 ray tube를 생성할 수 있다. Ray tube를 생성하면서 동시에 image source의 위치와 삼각형의 꼭지점들이 이루는 각쌍대 표면의 4개의 평면의 방정식을 저장해 놓으면 이를 이용하여 tube에 수신점이 포함되는지 여부를 매우 빠르게 검사할 수 있다. 2차 이후의 반사는 1차적으로 구한 image source를 송신점으로 정하고 같은 과정을 반복하면 된다. 각 쌍대 모양을 갖는 ray tube들이 이어져 있는 형태로 전체 ray tube가 생성되게 된다. 각 쌍대들이 연결된 영역의 형태가 겹치는 부분, 겹치지 않는 부분이 있으나, 각 수신점에 대해 전기장을 구하는 경우 수신점에서 각 ray tube의 영역에 속하는지 여부를 역방향으로 각 ray tube 단계를 거슬러 올라가며 막히지 않는 경로가 존재하는지 확인하면 되므로 정확한 경로를 쉽게 찾을 수 있다. 송신점에서 tube를 생성해 가는 과정에서 걸리는 시간에 비해 역경로 존재 확인을 위한 과정에서 시간은 효과적으로 줄이는 것이 가능한데, 이는 tube 생성 과정에서 tube에 포함되는

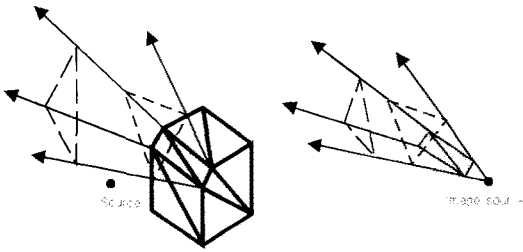


그림 2. 송신점(TX)로부터 반사에 의해 생기는 image source들의 위치

Fig. 2. Positionsof image sources generated by reflections from triangulated walls.

삼각형들을 기억해 놓고 이들에 대해서만 교차 여부를 확인하면 되기 때문이다. Ray launching 방법에서는 송신 안테나에서 전 방향의 입체각에 대해 ray를 발사하나, 위와 같은 과정을 거치면 송신 안테나에서 바로 보이는(line-of-sight) 삼각형을 찾고 이들에 대해서만 tube를 만들면 되므로 불필요한 계산을 줄일 수 있다.

둘째로 회절을 모델링 하기 위해서는 회절이 일어나는 이유부터 생각해 봐야 한다. 회절은 광선 추적법으로 계산하는 경우 생기는 음영 지역에서 전파의 세기가 불연속적으로 0이 되는 상황을 제거해 주는 효과를 갖고 있다. 그러므로 반사파를 고려하기 위해 전파가 진행하는 과정에서 처음으로 교차하는 삼각형의 모서리(edge)에 의해서 불연속이 생길 수 있다. 전파와 교차하는 삼각형의 edge들 중 인접한 삼각형과 이루는 각도가 예각인 경우, 공간상에서 전파 세기의 불연속이 생기는 영역이 많으므로 이 경우에 회절에 의한 전파의 기여를 더하면 된다. 그림 3에서 source 또는 image source에서 보이는 삼각형을 찾은 경우, 삼각형의 세 변 중에서 edge의 각도가 예각인 것들(굵은 선으로 표시)만이 회절 edge가 되므로 이들에 대해서 회절 ray tube를 생성하면 된다.

그림 4에 회절 ray tube에 포함되는 영역을 표시하고, 포함 여부를 판단하는 방법을 표시했다. 반사를 일으키는 삼각형의 edge 중에서 각도가 180도 미만인 것들을 골라내어 회절에 의한 전파를 계산한다. 그림 4의 (b)는 측정 지점이 정해져 있을 때 회절 ray tube에 속하는지 여부를 판단하기 위해서 edge와 측정 지점 사이를 막는 면이 있는지 여부를 판단하기 위해, 먼저 #1, #2의 꼭지점에서 보이는 면들을 찾아

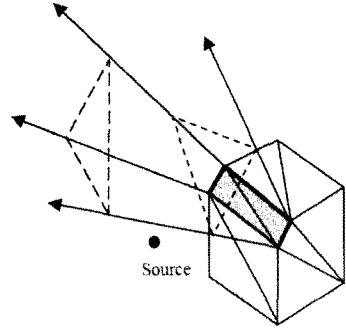
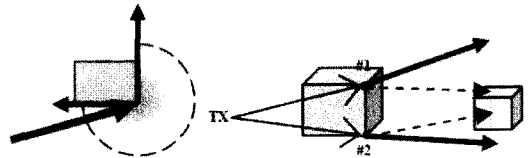


그림 3. 회절을 일으키는 edge들(굵은 선). Source에서 보이는 삼각형들의 edge중 각도가 작은 것들임.

Fig. 3. Diffracting edges(thick line) are those of visible triangles that have angles less than pi radian.



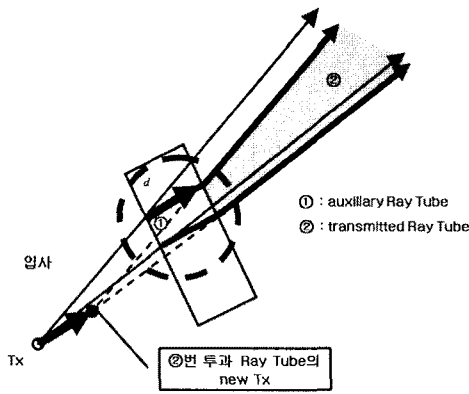
- (a) 회절이 생기는 edge는 1차적으로 반사파를 만드는 면의 edge이다.
- (b) 회절 현상이 영향을 미치고 있는지 여부를 판단하기 위해 edge와 측정 지점 사이를 가리는 면이 있는지 검사하는 방법
- (a) Diffractions are primarily due to edges of surfaces which are lit by sources
- (b) Whether diffractions are considered or not is determined by sequences of test. First, triangulated surfaces visible from point #1 or #2 are selected. Then, tests are conducted if the surfaces get in the way from edges and observation points

그림 4. 회절에 의한 ray tube 영역
Fig. 4. Diffraction ray tube regions.

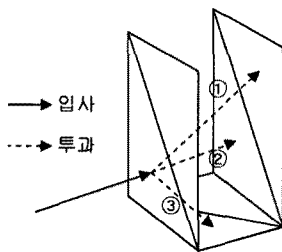
내고, 이 면들이 측정 지점을 막고 있는지 여부를 판단하는 방식으로 하여 엄밀하게 검사하는 방법이다.

회절 ray tube에 속하는 관측점에서 전기장은 참고문헌 [5]의 결과를 이용하여 계산하면 된다.

세 번째로 실내에서 고려해야 하는 것은 벽면에 대한 투과파이다. 파장에 비해 두껍지 않은 벽면들이 실내에 많이 있는 상황이므로 이에 대한 고려를 하지 않은 계산 결과는 실제 측정에 의한 수치에 비



(a) 투과에 의한 source 위치 변화
(a) Change of virtual source position by wall transmission



(b) Snell의 법칙에 의한 투과파 경로 선택
(b) Transmitting wave path selection by Snell's law

그림 5. 투과파 모델링 방법. 투과에 의해 소스의 위치가 바뀌고, 소스의 세기도 투과계수 만큼 줄어든다.

Fig. 5. Modeling method of transmit wave. Ray tubes are generated with new source at position Tx' with strength reduced by the transmission coefficient of the wall.

해 훨씬 적은 전파의 세기를 예측하게 된다. 투과의 경우에도 벽면이 삼각형으로 분할되었기 때문에 삼각형들의 배치 정보로부터 투과 경로를 예측해야 한다. 투과파의 경로는 Snell의 법칙을 따라서 가능한 모든 경로를 찾아야 한다. 그림 5에서 ①, ②는 가능성이 있는 경로이나 ③은 가능성이 없다. 입사파의 ray tube 영역과 Snell의 법칙을 고려하여 경로를 정한다. 투과파에 해당하는 ray tube도 기본적으로 반사를 일으키는 삼각형이 찾아지는 경우 그 삼각형을 이용해서 생성하면 된다. 즉, source 또는 image source에서 보이는 삼각형을 찾은 경우 반사 ray tube가 만들어지고, 삼각형을 둘러싸는 edge들의 각도가 180도 미만인 경우 회절 ray tube가 생성된다. 또한, 삼각형의 재질이 전파 투과 재질인 경우, 투과파 ray

tube도 동시에 만들어진다. 투과 재질인지 여부는 삼각형 데이터 구조체에 저장해 놓고 불러 쓰면 된다. 투과 재질인 경우, 다중 반사를 고려한 반사 계수와 투과 계수를 polarization 별로 계산하면 된다.

그림 5(a)에서는 투과파의 영향을 받는 범위를 보여주고 있다. 벽면을 통과하면서 굴절이 일어나므로 송신점 Tx의 위치는 영역 ②에서의 송신점 역할을 하기 위해 벽의 두께를 고려하여 위치를 이동시켜서 ray tube를 생성한다. 벽면의 유전율과 전기 전도도가 낮은 경우는 변화량이 적고, 반대인 경우는 벽면 내에서 수직으로 진행한다고 가정해도 되기 때문이다. 그림 5(b)는 벽의 일부를 삼각형의 조합으로 표시한 그림이다. Ray가 들어가는 삼각형에서 굴절각을 계산하여 ray를 굴절하게 하고 투과 가능한 반대면 삼각형을 고르는 과정이다. 이 과정에서 반대면의 중심부에 전기장의 세기가 한계값보다 작으면 투과 tube를 생성하지 않고, 큰 경우는 생성하는 방식으로 계산 시간을 줄일 수 있다. 전기장의 계산은 참고문헌 [6]의 결과를 이용하였다.

수신 전력을 구하는데 사용되는 식은 다음과 같다. 안테나의 방향별 directivity에 polarization을 곱하여 vector 형태의 source 출력을 이용한다^{[7],[8]}. 송신 전력 P_T 인 송신기에서 나오는 전파는 식 (1)로 표시할 수 있다.

$$\mathbf{E}_{in} = \sqrt{\frac{\eta P_T}{4\pi} G_T(\theta_T, \phi_T)} \cdot \frac{(h_{T,v} \hat{\theta}_T + h_{T,h} \hat{\phi}_T)}{R} e^{-jkR} \quad (1)$$

위 식에서 $G_T(\theta_T, \phi_T)$ 는 송신 안테나를 기준으로 한 좌표축에서 (θ_T, ϕ_T) 방향으로의 directivity이다. 송신 안테나의 편파가 수평인지 수직인지 여부에 따라 $h_{T,v} \hat{\theta}_T + h_{T,h} \hat{\phi}_T$ 를 정해주면 된다. 안테나 지지대를 기준으로 할 때 수직 편파는 $\hat{\theta}_T$ 방향, 수평 편파는 $\hat{\phi}_T$ 방향의 단위 벡터로 표시한다. R 은 송신 안테나로부터 거리이고 η 는 377 Ω 이다.

송신 안테나로부터 나온 전파는 실내 구조물에 의해 반사, 산란, 투과가 일어나 polarization, 위상, 크기가 바뀐다. 식 (2)는 반사, 투과, 회절의 가능한 한 조합에 해당하는 산란을 거치고 수신기에 도달한 전파의 전기장이다.

$$\mathbf{E}_{received} = \left[\prod A(s_{i-1}, s_i) (\bar{\mathbf{R}}_i \text{ or } \bar{\mathbf{T}}_i \text{ or } \bar{\mathbf{D}}_i) e^{-jk s_i} \right] \cdot \mathbf{E}_{in} \quad (2)$$

$A(s_{r-1}, s_r)$ 는 반사, 투과, 회절에 의한 진폭의 감소를 설명해 주는 divergence factor이다. $\bar{\mathbf{R}}, \bar{\mathbf{T}}, \bar{\mathbf{D}}$ 는 반사, 투과, 회절 계수로서 polarization을 고려한 dyadic 형태이다.

실제 수신되는 전파는 다중 경로에 의한 전파들의 합이므로 식 (3)과 같이 여러 경로를 거친 전파들에 수신 안테나의 polarization, directivity를 내적한 값이 수신 전압이 된다.

$$V_R = \lambda \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}} \sum \sqrt{G_R(\theta_R, \phi_R)} \cdot [(h_{R,v} \hat{\theta}_R + h_{R,h} \hat{\phi}_R) \cdot \mathbf{E}_{received}] \quad (3)$$

다중 경로에 대하여 안테나에 입사하는 방향에 따라 polarization을 고려한 directivity를 내적하고 합산하면 된다. Z_0 는 수신기의 입력 임피던스이다. 최종적인 수신 전력은 식 (4)로 주어진다.

$$P_R = \frac{|V_R|^2}{Z_0} \quad (4)$$

위의 식들을 모두 계산한 수신 전력의 식은 Friis 공식과 동일한 형태가 된다.

III. 계산 결과 및 실험을 통한 검증

본 연구에서 제안한 ray tube들을 이용하여 실내에서 전파 특성을 계산하는 프로그램을 만들고, 실험 결과와 비교하는 과정을 제시한다. 전파 특성 예측 프로그램은 송신 안테나의 3차원 복사 패턴을 생성하는 것부터 시작한다. 안테나의 제조사들이 제시하는 elevation pattern과 azimuth pattern, 그리고 polarization 특성, 안테나 형태의 대칭성을 이용하여 3차원 복사 패턴을 형성하고, 이로부터 입사파가 만들어진다. 3차원 복사 패턴을 실험이나 시뮬레이션을 통해 확보한 경우는 그대로 사용하면 된다. 그림 6는 실험에 쓰인 안테나이다. 편의상 광대역 안테나는 bow-tie 안테나를 이용했다. 실험에서 사용한 주파수는 2.6 GHz였다. 이 주파수에서 최대 gain은 2.3 dBi이다. 계산에 이용한 바닥과 천장의 비유전율은 ($\epsilon_r=15, \sigma=0.1$ S/m)이다.

실험 조건은 그림 7과 같다. 송신기는 2.6 GHz의 CW(Continuous Wave) 신호이고, 수신기는 동일한 안

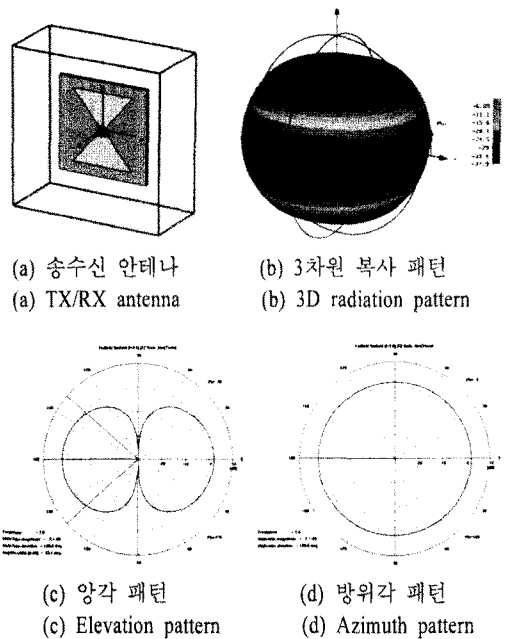


그림 6. 측정에 쓰인 보우타이 안테나와 복사 패턴
Fig. 6. Bow-tie antenna used in the measurement and its radiation pattern.

테나를 연결한 스펙트럼 분석기를 이용했다.

송신기에서 출력은 -12 dBm이고, cable loss는 1.75 dB이다. 수신기에는 이득이 13 dB인 LNA가 연결되고, cable loss는 2.75 dB이다. 송수신에 동일한 안테나를 이용했다. 측정 경로는 각각 48.6 m+8.1 m, 29.7 m+9 m로 된 굽은 경로이다. 실험 환경에서 천장의 높이는 2.5 m였다. 각 경로는 가시 경로와 회절 경로를 포함하고 있다. 측정은 45 cm 간격으로 127개, 87개 지점에서 이루어졌다.

본 논문에서 제시한 삼각형 기반의 ray tube에 의한 시뮬레이션 조건으로는 6차의 반사와 투과를 포함하고, 회절은 2차 회절까지 일어나도록 설정하여 계산하고 실험 결과와 비교했다. 송신 안테나 또는 image source에서 보이는 삼각형을 찾을 때마다 반사, 투과에 해당하는 ray tube가 생성되고, 삼각형의 edge들이 인접한 삼각형과 이루는 각도가 180보다 작은 경우 회절 ray tube도 생성된다. 6차의 반사/투과 ray tube들이 재귀적으로 생성되고 tree 구조에 저장된다. 각 단계의 반사/투과와 함께 회절도 계산된다. 2차 회절의 의미는 회절이 2회 연속까지만 계산된다는 의미이다. 실제 계산에서는 6차까지의 반사/

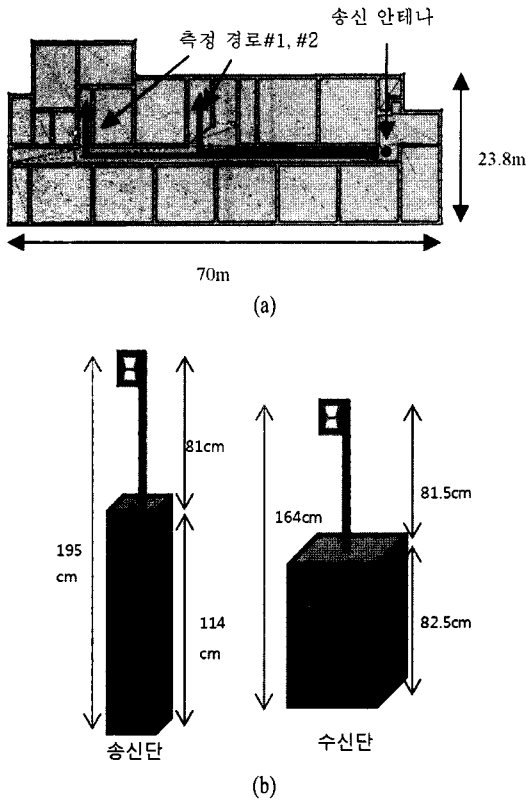


그림 7. (a) 측정 환경, (b) 송신기와 수신기의 위치
 Fig. 7. (a) Measurement environment, (b) Positions of a transmitter and a receiver.

투과 ray tube들을 생성해가면서 각 삼각형에 닿는 전력이 최소 전력(-160 dBm으로 설정)보다 작은 경우 더 이상 tube를 찾지 않고 새로운 경로를 찾게 하여 계산 시간을 단축시켰다. 수신 전력 계산 결과는 실내 구조가 단순하여 반사 회수를 3회 이상으로 하면 거의 수렴하였으나, 구조가 복잡한 경우는 필요에 따라 차수를 조절할 필요가 있다.

그림 8은 측정 경로 #1을 따라서 구한 계산 결과 값과 실제 측정 값의 비교이다. 시뮬레이션 설정에서 회절의 회수를 2차로 제한하였다. 3차원 시뮬레이션에서 재귀적인 방식으로 회절을 계산하면 2차 이상의 회절을 고려하는 경우, 매우 많은 경로가 가능하여 계산 시간 또한 많이 걸리나, 본 논문에서는 edge 주변의 tube 영역을 작은 각도를 갖는 pie 형태로 나누어 각 분할 내에 들어 있는 삼각형의 개수를 줄여 ray들의 경로 계산에 시간이 적게 걸리게 했다(그림 9). 이 경로에서는 송신 안테나에서 나오는 입

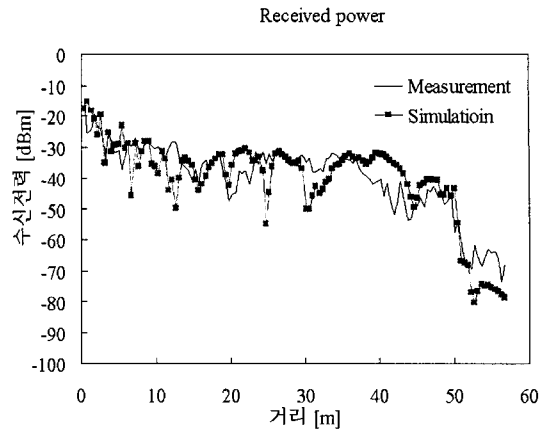


그림 8. 측정 경로 1을 따라서 얻은 수신 전력
 Fig. 8. Received power data obtained by measurements along path #1.

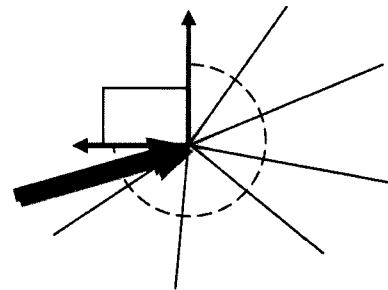


그림 9. 계산 속도를 높이기 위해 분할된 회절 ray tube 영역
 Fig. 9. Divided diffraction ray tubes for accelerated calculation.

사파, 벽, 천장, 바닥의 반사파, 회절파, 벽을 투과했던 전파들 모두를 계산에 이용하게 된다. 측정값과 시뮬레이션 값은 127개 지점에서 표본을 이용하여 비교한 결과, 평균적으로 -0.91 dB의 오차를 갖고 표준편차는 7.3 dB였다.

그림 10의 결과는 경로 2에 대해 측정된 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 것으로 오차 평균은 -0.8 dB이고, 표준편차는 7.1 dB이다. 측정 지점의 개수는 87개이다.

그림 11은 시뮬레이션 결과를 2차원으로 도시한 결과이다. 150x150개의 지점에 대해 계산을 수행하고, 반사 4회, 회절 2회의 설정으로 생성되는 ray tube의 개수는 8만개이고, 계산 시간은 2분이었다(펜티엄 4 코어 2 듀오 2.6 GHz PC).

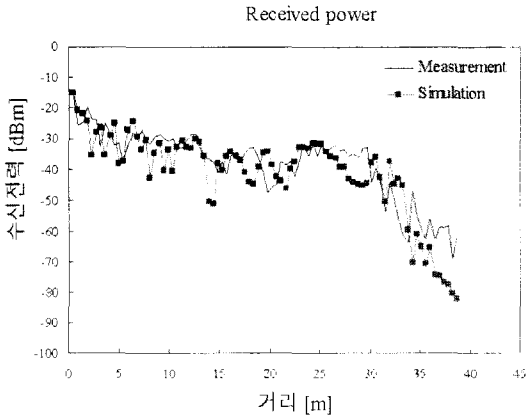


그림 10. 측정 경로 2를 따라서 얻은 수신 전력
 Fig. 10. Received power data obtained by measurements along path #2.

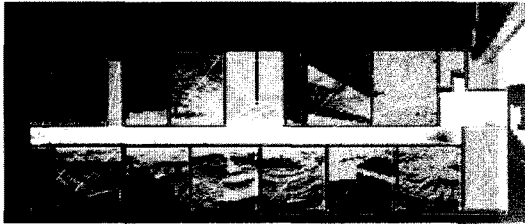


그림 11. 3차원 시뮬레이션 결과를 2차원으로 도시한 결과. 붉은 색이 수신 전력이 크고 초록색, 파랑색이 수신 전력이 작음
 Fig. 11. Two dimensional plot of 3d simulation results. In red region, received power level is high, while green or blue region low.

IV. 결 론

실내 환경에서 정확한 전파 특성 예측을 위해 삼각형으로 분할된 실내 환경과 삼각형을 이용한 ray tube를 이용하여 3차원 ray tracing과 UTD를 이용하여 계산하는 방법을 제시했다. 또한, 실험 결과와 비교하여 짧은 계산 시간에도 불구하고 정확한 값을 예측할 수 있다는 것을 검증했고, 다중 회절에서 계산 시간이 많이 걸리는 단점을 회절 영역을 분할하여 해결하는 방법도 제시했다. 본 논문에서 제시한 방법을 이용해 실내 환경에서도 벽, 문, 가구 등이 있는 경우에도 정확한 전파 특성을 계산하여 무선

망 설계를 효율적으로 할 수 있게 될 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.
- [4] 이행선, "실외 전파 특성 계산을 위한 고속 3차원 광선 추적법", *한국전자과학회논문지*, 18(11), pp. 1231-1236, 2007년 11월.
- [5] Raymond J. Luebbers, "Finite conductivity uniform GTD versus knife edge diffraction in prediction of propagation path loss", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 32, no. 1, pp. 70-76, Jan. 1984.
- [6] Walter D. Burnside, Ken W. Burgener, "High frequency scattering by a thin lossless dielectric slab", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 31, no. 1, pp. 104-110, Jan. 1983.
- [7] Shin-Hon Chen, Shyh-Kang Jeng, "An SBR/Image approach for radio wave propagation in indoor environments with metallic furniture", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 45, no. 1, pp. 98-105, Jan. 1997.
- [8] Francisco S. Adana et al., "Propagation model based on ray tracing for the design of personal communication systems in indoor environments", *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, vol. 49, no. 6, pp. 2105-2112, Nov. 2000.

송 재 영



2005년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)

2007년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)

2007년 3월~현재: 삼성전자 정보통신총괄 무선사업부 안테나개발 Lab.

[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