

## 전자파 영향 평가를 통한 최적의 전파 기지국 위치 결정 방법\*

박성헌\*\* · 박지현\*\*\*

### Optimal Wave Source Position Determination Based on Wave Propagation Simulation\*

Sunghun Park\*\* · Jihun Park\*\*\*

#### ■ Abstract ■

In this paper, we propose a method to determine optimal wave source for mobile telephone communication. The approach is based on wave propagation simulation. Given a wave source we can determine wave propagation effects on every surfaces of wave simulation environment. The effect is evaluated as a cost function while the source's position  $x, y, z$  work as variables for a parameter optimization. Wave propagated in 3 dimensional space generates reflected waves whenever it hits boundary surfaces. If a receiver is away from a wave source, it receives multiple waves which are reflected from various boundary surfaces in space. Three algorithms being implemented in this paper are based on a raytracing theory. If we get 3 dimensional geometry input as well as wave sources, we can compute wave propagation effects all over the boundary surfaces. In this paper, we present a new approach to compute wave propagation. First approach is tracing wave from a source. Source is modeled as a sphere casting vectors into various directions. This approach has limit in computing necessary wave propagation effects on all terrain surfaces. The second approach proposed is tracing wave backwards: tracing from a wave receiver to a wave source. For this approach we need to allocate a wave receiver on every terrain surfaces modeled, which requires enormous amount of computing time. But the second approach is useful for indoor wave propagation simulation. The last approach proposed in this paper is tracing sound by geometric computation. We allow direct, 1-reflection, and 2-reflection propagation. This approach allows us to save in computation time while achieving reasonable results. But due to the reflection limitation, this approach works best in outdoor environment.

\* 본 연구는 2000년 정보통신부 우수대학원 지원사업에 의하여 연구되었음.

\*\* 명지대학교 지식정보학부 부교수

\*\*\* 홍익대학교 정보컴퓨터공학부 부교수

## 1. 서 론

본 논문에서는 이동 통신을 위하여 전파 기지국을 최적의 위치에 세울 수 있는 방법을 제시한다. 이 방법은 전자파 전파 현상을 광 추적(ray tracing) 방법을 사용하여 시뮬레이션 한 후 그 결과로 얻을 수 있는, 주위 환경을 나타내는 3차원 물체 표면에서의 영향을 계산함으로써 가능하다. 주위 물체의 전자파 세기는 비용함수로 계산되어지고, 전파 기지국의 위치는 최적화를 위한 함수의 변수로 설정되어, 비 선형방정식 문제를 풀면 최적의 전파 기지국의 위치를 계산할 수 있다. 이러한 광 추적을 사용한 시뮬레이션은 3가지 방법을 적용하였다.

첫 번째 방법은 전파 기지국에서 일정한 방향으로 전자파를 쏘아서 전파되는 현상을 계산하는 법이며(본 논문에서는 정 방향 추적 법, forward tracing, 이라 칭함), 이 때 전파 수신 원은 주위 환경으로 표현되는 삼차원 물체 표면이다. 이 삼차원 물체 표면은 일정한 크기의 삼각형으로 분할되어 각각의 면에 도달하는 전자파의 세기를 측정하게 된다. 이 방법을 사용하면 계산 시간은 빠른 편이나, 전파가 도달할 수 있는 데도 불구하고, 계산을 정확하게 하지 못하게 되는 표면들이 많이 발생한다. 이러한 단점을 보완하기 위한 여러 가지 방법이 있을 수 있으나, 본 논문에서는 이 방법과 완전히 반대의 방법을 사용하는데, 두 번째 방법은 전자파를 수신 원에서 전파기지국으로 역으로 추적해 나가는 방법이다.(본 논문에서는 역 방향 추적 법, backward tracing, 이라 칭함) 이 방법을 사용하면 비교적 정확한 계산을 할 수 있으나, 계산 시간이 많이 걸린다. 이 방법은 실내등에서의 전자파를 측정하는데 사용하면 효과적이다. 마지막으로 본 논문에서 제일 중점을 두는 방법은 기하학 적으로 전자파 도달을 계산하는 기법이다. 이 경우, 직접전파, 1번 반사, 2번 반사 파를 고려한다. 이 방법은 실외의 경우에 효율적이며, 반사횟수가 제한적이므로 실내 시뮬레이션으로는 부적합하나, 계산

시간이 빠르면서 비교적 정확한 계산을 할 수 있는 장점이 있다. 이상의 방법들에 대하여 구현하였으며, 각 방법에 따른 장단점을 비교하였고, 본 논문의 중요한 결과는 기하학 적인 방법을 사용하여 국부적으로 최적의 전파 기지국 위치를 최적화 기법을 사용하여 제시할 수 있다는 것이다.

물리학에서 전파는 파동현상의 한 종류로 정의하고 있는데, 이에 따라 전파는 파동의 성질과 같이 진동수가 많아지면 고주파, 진동수가 작으면 저주파라 한다. 또 진폭이 크면 전파 세기가 커지고, 진폭이 작아지면 세기가 작아진다. 우리가 본 연구에서 수행하고자 하는 전파는 이동 전화 등을 염두에 둔 것이다. 전자파도 파동의 일종이므로 파동의 일반적인 성질을 그대로 갖는다. 즉 반사, 굴절 및 회절의 성질을 가지며 전자파의 전파에 중요한 역할을 한다. 반사는 파동이 밀도가 높은 반사 매질에 충돌할 때 일어나는 현상이다. 굴절이란 입사파가 밀도가 다른 매질로 진행될 때 진행 속도와 방향이 변화하는 현상을 말한다. 이때 변화하는 양은 두 매질의 밀도 비에 의하여 결정된다. 회절 현상은 진행하는 파동이 투과할 수 없는 물체에 부딪혔을 때 발생한다. 이때 물체 뒤쪽의 일부 영역(음영 영역)은 파동이 물체 주변에서 구부러짐에 따라 발생하게 된다. 음영 영역과 직접 전파 영역 사이를 회절 영역이라고 한다. 이 회절영역의 신호 강도는 직접 전파에서보다 약하다. 그러나 실제적으로는 음영영역에서도 신호의 강도가 0이 되지 않는데, 이 것은 다른 물체에 반사된 파가 산란되어 이 영역에 존재할 수 있기 때문이다. 회절의 강도는 파장과 물체의 크기 및 전자기학적 특성에 의해 결정된다.

<표 1>은 미국의 경우 무선데이터서비스 유형과 특징을 나타낸 것으로, 900MHz 부근의 전파 특성은 반사의 특성이 강하고 회절의 특성은 약하다고 한다. 이에 본 연구에서는 전파의 반사에 중점을 두어 광 추적 기법을 사용한 전파의 추적에 관한 3가지 방법을 제시하고, 이들의 특성을 비교하며, 최적의 접근 방법을 제시하고자 한다.

〈표 1〉 미국의 경우 무선데이터서비스 유형과 특징

통신망	주파수 대역	주요 목표시장	커버리지	전송속도
무선호출	35-36, 43-44, 152-159, 454-460, 929-931MHz	단방향메세징(one-way messaging)	전국	512-6400bps
협대역 PCS	901-902, 930-931, 940-941MHz	양방향메세징(two-way messaging)	잠재적으로 전국	6400-25600bps
회선교환셀룰러 데이터(CSCD)	800MHz	팩스, 파일전송, 인터넷	잠재적으로 아날로그 셀룰러 커버리지와 동일	1200-9600bps이상, 14400이하
셀룰러 디지털 패킷데이터(CDPD)	800MHz	양방향메세징, transaction-based application(신용카드 조회 등), 디스패치	현재 U.S POPs의 55%, 잠재적으로 아날로그셀룰러 커버리지와 동일	4800-1200bps
디지털Cellula/PCS/SMR Network	800, 900, 1900MHz	단방향 및 양방향 메세징, 파일전송, 인터넷	커버리지는 몇 개의 기업으로 제한, 잠재적으로 전국	9600-14400bps
ARDIS	800MHz	양방향메세징, data service to field services, 물류기업	427개의 U.S 대도시지역	1200-9600
BellSouth Wireless Data	900MHz	양방향메세징, 디스패치/field service, 데이터검색, 인터넷	U.S POPs의 92%	4800bps
Metricom	902-928MHz, 204GHz-unlicensed, 203- licensed	양방향메세징, 파일전송, 인터넷, LAN과 인트라넷 접속	4개 지역, 다수의 공항과 대학교	9400-28800bps, 12800bps 계획중
Teletrac	900-928MHz -unlicensed	차량위치 추적관리	13개 메트로폴리탄 지역	2400bps

전자파의 전파 특성에 대하여 간단히 말하면, open area에서 전파의 세기는 전송 거리의 k승에 반 비례하여 (많이 사용하는 k값은 2, 3, 4, 5) 감소한다. 즉, 거리가 멀수록 수신되는 전력의 세기가 작게 된다. 그런데, 전파의 세기는 거리에 비례하여 단조 감소하지 않고 굴곡이 있는데 (이를 fading이라고 함), fading 현상은 반사, 회절, 산란 등의 다중 경로를 통하여 전파된 신호의 상호 간섭에 의하여 나타나는 것이다. 따라서, 보다 정교한 전파 (propagation) 모델은 shadow fading ( $L_{shadow}$ )과 multipath fading ( $L_{multi}$ ), 송수신 안테나 이득 (G)과 전파 경로 손실 ( $L_{path}$ )을 고려하는 것이고, 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_r = P_{tx} - L_{path} + G + L_{shadow} + L_{multi} \quad (3)$$

- $P_r$  = 수신 전력 레벨 (dB)
  - $P_{tx}$  = 송신 전력 레벨 (dB)
  - G = 안테나 이득 (0 또는 6 dB, 송신/수신에 따라)
  - $L_{path}$  = 전파 경로 손실 (Okumura-Hata 모델, Lee 모델 등의 모델을 이용하여 계산)
- 참고로, 대도시에 적용되는 Okumura-Hata 모델은

$$L = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_b - A(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log d$$

$A(h_m)$  = 이동국의 높이  $h_m$ 에 대한 보정 계수  
 $(8.29(\log(1.54h_m))^2 - 1.1)$

- $h_b$  = 기지국의 높이 (m)
- $h_m$  = 이동국의 높이 (m)
- f = 사용 주파수 (MHz)
- d = 이동국과 기지국과의 거리 (m)

이다[7].

본 논문의 연구는 두 가지 목표로 나눌 수 있는데, 첫째 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 가장 경제적으로 송신 기지국을 세울 위치를 결정하기 위한 알고리즘 개발과, 둘째 여러 개의 송신기에서 방사된 전파가 한 개의 수신기에 미치는 효과를 계산하는 알고리즘의 개발에 목표를 두고 있다. 전파가 삼차원 공간에서 전파되는 과정은 전파의 발생 특성과 함께, 공간에 펼쳐져 있는 지형과 지표면 반사특성 등에 의해 영향을 받는다. 특히, 전파를 광선 추적법(ray tracing)을 이용하여 전파 송신과 반향 특성을 고려하도록 알고리즘을 개발하기 위해서는 국내의 다양한 지형 지물과 지표면의 특성에 대한 데이터 베이스화 및 이들의 물리적 현상에 대한 알고리즘화가 필요하다. 또한 본 연구의 특징은 1개의 송신 기지국에 대해, 주위 환경으로 모델링 된 삼차원 물체 표면 혹은 표면에서 1.5m(사람 귀의 위치) 떨어진 모든 위치에 대하여 전파 수신 상태를 계산할 수 있다는 점에서 기존의 ray tracing 기법을 사용한 외국의 알고리즘과 차별화 하고자 한다. 물론 본 알고리즘에서 여러 개의 송신기지국과 하나의 수신 이동국 간의 전파 송수신 상태도 계산할 수 있다.

본 연구는 IMT-2000 사업 및 차 차세대의 이동통신 기법과 관련하여 모든 대역의 주파수에 대하여 실내 및 야외 환경에 대하여 전파 전달에 대한 시뮬레이션 알고리즘을 개발하고자 한다. 이 연구와 관련하여 도심, 야외, 주택, 지하철역 등 삼차원 지형이 생성될 경우, 이 지형을 입력으로 하여 가상의 기지국을 설정하고, 이 전파 원에 대하여 전파 선을 추적하여, 삼차원 지형 표면에 대한 전파 분포의 측정을 위한 시뮬레이션을 위한 알고리즘 개발에 관한 연구이다.

## 2. 관련 연구

전파와 소리는 밀접한 연관관계를 가지고 있다. 본 논문에서는 주파수 대역별로 소리와 전파를 구별하고자 한다. 소음 진동 학에서의 소리 추적 및

계산법은 일반적으로 음원부터 시작하여 수음자까지 추적하여 나가는 정 방향 추적 법이다. 이 방법에 의하면 필요 없는 소리 파를 추적하게 되어 계산시간을 낭비하거나, 혹은 모든 소리 파를 고려하지 못하므로 수음자 입장에서 볼 때, 정확한 추적이 되지 않을 수 있다.

이 중에서도 [1]번 논문은 기지국과 수신기 사이의 직접 혹은 1번만 반사된 간접 전파 전달을 계산하는데, 이 결점으로 인하여 여러 번 반사될 경우에 대하여 고려하지 못한다. 본 논문에서 제안한 기하학 적인 계산법과 유사하리라 추정되나, 자세한 알고리즘은 나타나 있지 않다. 본 논문에서는 실내 환경 등 여러 번 반사가 필요한 계산을 위해서는 역 방향 추적 법을 제시한다[2, 3]. 논문은 3차원 ray tracing 기법을 사용하고 있으나, 송신자와 수신자가 각각 1개일 경우만 전파 세기 예측을 할 수 있는 시스템이며, 본 논문은 이러한 기능 이외에도, 무한대의 수신자에 대하여 전파 세기를 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 한다[4]. 논문은 2차원 ray tracing 기법을 사용하여 삼각형 분할을 사용하여 빠른 전파 전달 예측을 할 수 있는 기법에 관한 논문이며, [5]번 논문은 knife-edge 회절에 대한 2차원 ray tracing 기법을 사용한 논문이며, 본 연구의 후속 연구에서 보다 일반적인 경우에 대하여 연구할 계획이며, [1-5] 논문들은 전파 송신 예측 기능을 가진 소프트웨어 개발에 중점을 둔 반면, [6]번 논문은 이러한 소프트웨어를 소개하고 현장 실험결과와 비교 분석한다. 또한 국내의 “대부 통신”(www.dbtel.co.kr)에서도 이러한 소프트웨어를 개발중이나, 회사 자체 특성상 자세한 기능은 알 수 없다.

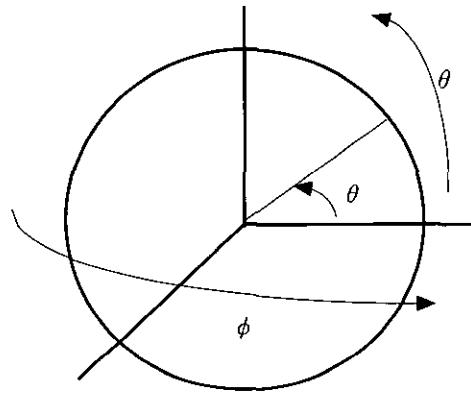
삼차원 지형을 fractal을 사용하여 임의로 제작하였으며, 제작된 임의의 삼차원 지형 혹은 실내(방) 등에 대하여 전파 시뮬레이션을 위한 알고리즘 개발 및 구현을 하였다. 아래의 <그림 4>, <그림 5>, <그림 6>은 이러한 시뮬레이션의 결과를 보여주며, 각각의 방법에 대한 장단점을 비교하였다. 즉 계산 시간과 시뮬레이션의 결과의 상관 관계이다.

정 방향 광선추적을 통한 시뮬레이션은 계산 시간이 빨라질 수 있으나, 빠뜨리는 표면이 쉽게 발생할 수 있어서 시뮬레이션의 질이 떨어지며, 목표 지점과의 거리에 따라 발생하는 추적 벡터의 개수를 조절하여야 한다. 아주 많은 광선을 쏠 경우 계산 시간 역시 많이 걸리게 된다.

역 방향 광선 추적을 통한 시뮬레이션은 최상의 시뮬레이션의 질을 제공해 주나, 계산시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 이것은 엄청난 수의 수신자를 각각의 표면에 설정해야 하므로, 표면의 개수에 따라 시간이 기하학 적으로 늘어날 수 있다.

기하학을 사용한 시뮬레이션은 송신기와 수신기 및 주위환경에서 1번 2번 등 제한된 횟수로 반사하여 도달할 수 있는 가능성만 따진다. 1번 반사만 허용할 경우 빠른 시간에 계산이 가능하고, 실외 환경일 경우 계산 질도 만족스러운 정도이나, 실내 환경 등 여러 번 반사가 필요한 환경을 위한 시뮬레이션의 질은 역 방향 광선 추적보다 뒤떨어지는 것을 발견하였다.

역을 나누는 방법을 개발한다. 이 방법에서는 인접한 영역을 표현하는 벡터끼리의 내각이 일정하지는 않다. 그러나 이 방법에서는 임의의 구 표면을 경도 상으로는  $2n$ 개 위도 상으로는  $n$  개의 영역으로 총  $2n^2$ 개로 나눈다. <그림 1>은 반지름이  $r$  인 하나의 구를 경도( $\phi$ )/위도( $\theta$ ) 상으로 나눈 것을 나타낸다.



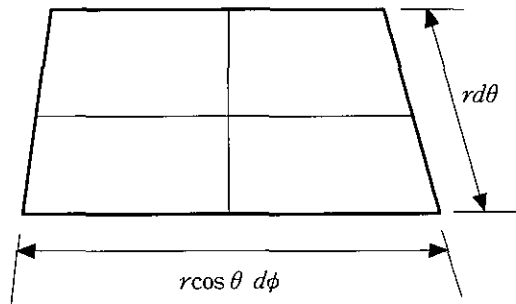
<그림 1> 전파원/수신원 모델링

### 3. 전파 경로 추적 및 시뮬레이션

#### 3.1 전파원 혹은 수신원의 모델링

이 절은 정 방향 혹은 역 방향 추적 법에만 해당한다. 기하학 적인 방법은 추적의 개념을 사용하지 않으므로, 추적을 하기 위한 구 형태의 모델링은 필요 없다. 각각의 전파 원(전파 기지국) 혹은 수신원(핸드폰 : 이동 국)은 하나의 구로 모델링 된다. 여기서 중요한 것은 구의 크기가 아니고 하나의 구를 몇 개의 영역으로 나눌 것인가 이다. 각 영역의 중심과 구의 중심을 잇는 벡터가 전파 원 혹은 수신원에서 쏘는 여러 개의 벡터 중 하나로 표현된다. 수학적으로 하나의 구를 여러 개의 영역으로 나누되 위에서 언급된 모든 인접한 영역을 표현하는 벡터간의 내각이 동일하게 만드는 것은 불가능하다. 단 몇몇의 특별한 경우에는 성립이 가능하다. 그것의 한 예가 사면체일 것이다.

다음에서는 구에 대해 동일한 면적을 갖도록 영



<그림 2> 구표면상의 하나의 영역

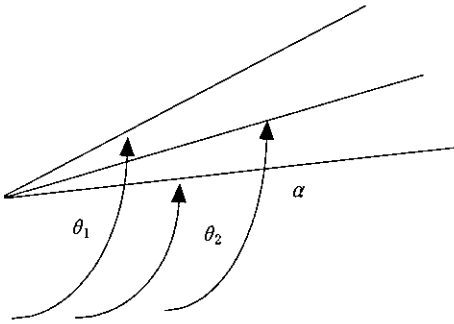
<그림 2>, <그림 3> 에서는 구 표면 상 하나의 영역을 나타낸다. 여기서 위도 상으로는  $\theta_2 - \theta_1$  크기이고, 경도 상으로는  $r \cos \theta d\phi$  의 크기를 가진다. 이것은 위도 상 높이에 따라 밑변의 길이가 달라지기 때문이다. 이러한 경우에 대하여 면적을 계산하면, 구 표면의 총 면적은  $4\pi r^2$  이고, 경도 상  $\phi$ 도일 때 하나의 영역에 대한 면적은  $r^2 \phi (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)$ 이며, 위도 상 구 표면의 한 영역을 양분하는 각도는  $\alpha$ 이다.

$$\int_{\phi=0}^{\phi=360} \int_{\theta=-90}^{\theta=90} r^2 \cos \theta \, d\theta \, d\phi = 4 \pi r^2$$

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} r^2 \cos \theta \, d\theta \, d\phi = r^2 \phi (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)$$

$$r^2 \phi (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) = 2r^2 \phi (\sin \alpha - \sin \theta_1)$$

$$\alpha = \sin^{-1}(0.5 (\sin \theta_1 + \sin \theta_2))$$



〈그림 3〉 구표면상의 하나의 영역

### 3.2 삼차원 지표면/실내 표면 생성

삼차원 지표면은 fractal을 사용하여 생성하였다. 이를 위하여 하나의 삼각형을 4개의 작은 삼각형으로 분할하는 방법을 사용하였으며, 삼각형의 세 변의 중심을 각각 random number generator를 사용하여 삼각형의 normal을 기준으로 하여 변화를 가한다. 즉 하나의 삼각형 모서리를 만드는 선분은 삼각형 normal에 평행하고 선분에 수직인 방향으로 변화를 가하여 새로운 지점을 만든다. 이렇게 추가되는 점 3개는 새로운 4개의 삼각형을 만드는 데 사용되어진다. 이렇게 변화를 가하여 만들어진 4개의 삼각형 각각에 대하여 4개의 작은 삼각형으로 분할하는 방법을 재귀적 방법을 사용하여 수행하였다. 삼각형 생성에 관한 계통적 정보는 Level Of Detail(LOD) browsing을 위하여 저장된다. 험한 산 혹은 완만한 산등은 계수를 사용하여 조정하였다.

실내 표면을 표현하기 위하여 직사각형의 물체를 만들어 내는 프로그램을 작성하였다. 이 프로그램은 미리 정해진 크기의 삼각형으로 모든 벽을 조

개어 낸다. 각각의 벽면을 이루는 삼각형들에 대하여 전자 수신 도를 정 방향, 역 방향 혹은 기하학적인 방법으로 계산해 낼 수 있다.

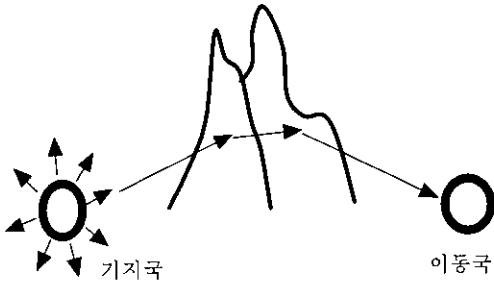
### 3.3. 전파 경로 추적 방법

전파 경로 추적 방법은 그 벡터들을 각각 추적해 나간 후에 그 결과를 모아서 visualization/시물레이션을 함으로써 전파된 상태를 알아낼 수 있다. 경로 추적 방법에는 정 방향 추적 방법과 역 방향 추적 방법, 혹은 기하학적인 방법이 있다. 역 방향 추적 방법이 정 방향 추적 방법에 비해서 벡터를 계산할 때 필요 없는 계산을 줄일 수 있기는 장점이 있으나 계산 시간은 많이 소요될 수 있다. 모든 계산에 있어서 직접적인 전파와 간접적인 전파로 인한 거리를 계산한다. 여기서 계산된 거리는 전파식에 입력되어져서 상응하는 전파 세기를 계산하게 된다.

### 3.4 정 방향 추적 법

정 방향 추적은 전파 원(기지국)에서부터 일정한 방향으로 ray를 쏘아서 ray를 따라간다.〈그림 4〉 ray가 표면에 반사되면 반사되는 ray를 계속 추적하며, 투과될 경우 투과된 ray 또한 따라가는 방법이다. 이러한 방법을 사용할 경우, ray는 반사/투과를 거치면서 세기가 약해지게 된다. 일정한 세기 이하로 약해지면 더 이상 추적하지 않는다. 반사되는 ray의 방향은 입사각과 반사각이 같도록 결정되며, 투과되는 ray의 방향은 굴절 율을 계산하여 결정하며, 하나의 ray에 대하여 무수히 많은 ray들이 발생한다. 주위 환경의 표현은 삼차원 다각형등을 사용하는데, 다각형에는 기하학 정보 외에 표면 특성에 대한 정보를 포함한다. 주위 환경을 나타내는 다각형이 전파를 수신하는 이동국이 된다. 표면 특성의 정보는 반사를 및 투과율 정보를 포함한다. 이러한 ray들은 주위 환경으로 표현된 물체에 소음의 세기 정보를 제공할 수 있게되며, 각각

의 ray로부터 세기 정보를 모아서 합하면 한 표면의 세기로 결정할 수 있다.



<그림 4> 정방향 추적방법

이 방법에서는 전파 원(기지국)에서부터 전자파의 전파를 시뮬레이션 해 나가는 방법이다. 이를 위하여 전자파 원을 시작으로 하여 전자파를 의미하는 벡터를 쏘고 이를 추적한다. 벡터를 쏘는 방법은 전자파 원을 하나의 구로 간주하고, 구의 표면을 동일한 면적을 가진 구 표면영역들로 분리한다. 각각의 구 표면 영역의 중심에 해당하는 지점을 찾아내어 전자파 원의 중심(구의 중심)에서 영역의 중심으로 벡터를 쏜다. 이 벡터가 하나의 영역을 대표하는 전자파를 의미하게 되는 것이다. 이 방법의 문제점은 전자파를 의미하는 벡터의 개수를 생성하는데 있다. 벡터의 개수가 많으면 보다 정확한 전자파 추적이 가능할 수 있다. 그러나 엄청난 개수의 벡터 추적으로 인하여 아주 많은 계산 시간이 소요될 뿐만 아니라, 아무리 많은 벡터를 쏘아도 맞추지 못하는 지표면이 있을 수 있다. 즉 이러한 지표면에 대한 정보는 전자파가 도달하지 못하는 지역에 있는 것인지 아니면 전자파 벡터 개수가 부족한 이유인지 쉽게 결정을 내리지 못한다. 이러한 치명적인 문제점을 극복하기 위하여 전자파 원과 지표면과 거리 및 지표면을 나타내는 다각형의 크기를 고려하여 추적용 전자파 개수를 결정할 수 있겠으나, 발생 가능한 문제를 완벽히 해결하지 못하므로 바람직한 접근 방법은 아니라고 본다. 다음은 정 방향 추적법을 사용한 전파 추적 알고리즘을 나타낸다.

```

main()
{
    for ( i = 1 ; i <= n ; ++i ) /* 반복 : 전파원을 나타내는 구의 위도상으로 n번 분할*/
        for ( j = 1 ; j <= 2*n ; ++j ) /* 반복 : 구의 경도상으로 2n 개로 분할*/
        {
            구 표면상 하나의 영역에 대한 표면 중심점 계산 ;
            추적벡터 = 표면 중심점 - 구 중심 ;
            call intersect(추적벡터) ; /*추적 벡터와 주위지형 표현 다각형과의 교차계산 */
        }
}
    
```

함수 intersect() 는 다음과 같이 구성된다.

```

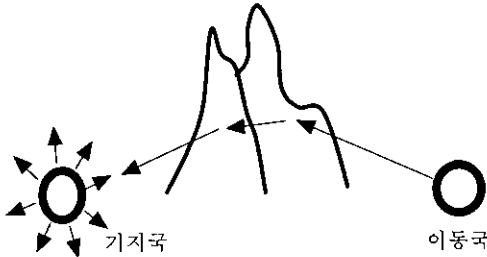
intersect(추적벡터)
{
    모든 다각형에 대하여 제일 가까운 다각형 찾기. 만약 못 찾았으면 return ;
    충돌한 다각형 알아냄. 충돌지점 계산;
    충돌한 다각형의 정보 기록 난에 충돌지점 세기. 위치 저장 ;
    반사벡터 계산 ;
    표면 특성 고려한 반사벡터 세기 결정 ;
    투과벡터 계산 ;
    표면 특성 고려한 투과벡터 세기 결정 ;
    call intersect(반사벡터) ;
    call intersect(투과벡터) ;
}
    
```

이러한 계산이 종료된 후에 주위 환경을 나타내는 각각의 다각형들에 저장된 모든 충돌 정보를 합하면 각각의 다각형에서 받는 전파 세기가 계산된다. 충돌 정보는 추후의 정교한 계산을 위하여 linked list로 저장된다.

### 3.5 역 방향 추적 법

정 방향 추적법의 문제점은 아무리 많은 양의 추적 벡터를 전자파 원에서 발산시켜도 빠르게 되는 지표면 등이 발생할 수 있는 문제다. 이를 위하여 추가의 조치를 취할 수 있겠으나, 완벽하게 문

제점을 해결할 수 없다. 이를 보완하기 위하여 역 방향 전파 추적을 시도하였다.



〈그림 5〉 역방향 추적방법

〈그림 5〉는 역 방향 전파 추적을 나타내는데, 지표면을 나타내는 모든 삼각형의 표면의 중심을 계산하고, 중심에서 삼각형의 normal vector 방향으로 1.5m(사람의 귀 높이) 수직으로 상승시킨 위치를 수신 원의 중심으로 하여 전파를 감지한다. 즉 전파를 수신 원(이동국 : 핸드폰)에서부터 송신 원(기지국)까지 어떤 경로를 통하여 도달할 수 있는가를 계산하는 방법이다. 전파를 감지하기 위한 방법은 수신 원을 나타내는 구를 사용하여, 구를 동일한 면적으로 분할하고, 구 표면상 분할된 영역의 중심 지점을 그 영역을 대표하는 것으로 하고, 대표하는 벡터를 발사시키는 것이다. 그리하여 이 벡터가 주위의 지표면과 반사되는 벡터를 정해진 허용된 반사횟수만큼 추적하는 것이다. 만일 지표상의 반사되는 지점에서 전파 원으로의 벡터와 반사 벡터와의 dot product가 양의 값을 가질 경우, 이 전파 원이 역 방향 추적에 대해 기여하는 것으로 계산한다. 이러한 추적은 모든 지표면을 나타내는 다각형에 대하여 이루어지므로 상당한 계산 시간이 소요되게 된다. 여기서 지표면의 삼각형 개수가  $m$ 개이고, 추적 벡터의 개수가  $2n^2$ 일 경우, 총  $2mn^2$ 개의 벡터에 대한 추적이 일어나게 된다. 물론 이들 벡터들은 투과 및 반사를 거듭하므로 엄청난 횟수의 벡터 연산이 필요하다. 여기서 구의 표면을 분할하기 위한  $n$  값은 정 방향(forward) 추적 방법보다 크기가 현저히 작도록 한다. 이렇게 할 경

우 이 방법의 장점은 지표면을 표현하는 모든 삼각형을 위한 계산이 정확히 이루어져 비교적 정밀한 결과를 얻을 수 있다는 것이며, 특히 실내의 추적에 대해 효과적이다. 이것은 실내는 밀폐된 공간이며, 실내에서는 많은 횟수의 반사가 일어나고, 표면을 나타내는 삼각형의 개수가 비교적 작기 때문이다. 이와 반면에 지표면을 나타내는 삼각형의 개수는 입력 자료에 전적으로 의존하게 되므로 상대적으로 계산 시간에 있어서 불리할 것으로 예측된다. 물론 이 모든 것은 입력 자료의 형태에 좌우되는 것이다. 다음은 역 방향 추적법을 사용한 전파 추적 알고리즘을 나타낸다.

```

main()
{
    for ( k = 1 ; k <= m ; ++k ) /* 반복 : 모든 지표 환경 표현 다각형 m개에 대하여 */
    {
        for ( i = 1 ; i <= n ; ++i ) /* 반복 : 수신원을 나타내는 구의 위도상으로 n번 분할 */
        for ( j = 1 ; j <= 2*n ; ++j ) /* 반복 : 구의 경도상으로 2n 개로 분할 */
        {
            구 표면상 하나의 영역에 대한 표면 중심점 계산 ;
            추적 벡터 방향으로 1.5 미터 구를 상승시킴 ;
            추적벡터 = 표면 중심점 - 구 중심 ;
            call intersect(추적벡터, &세기) ; /* 추적벡터와 주위지형 다각형 교차계산 */
        }
        하나의 다각형에 대해 앞에서 계산되는 모든 세기를 더함 ;
        모든 전파원에 대해 수신원에서 송신원으로의 직접 경로 확인,세기 계산하여 더함 ;
    }
}

```

함수 intersect()는 다음과 같이 구성된다.

```

intersect(추적벡터,&세기)
{
    모든 다각형에 대하여 제일 가까운 다각형 찾음.
    만약 못 찾았으면 return ;
    충돌한 다각형 알아냄. 충돌지점 계산 ;
}

```



```

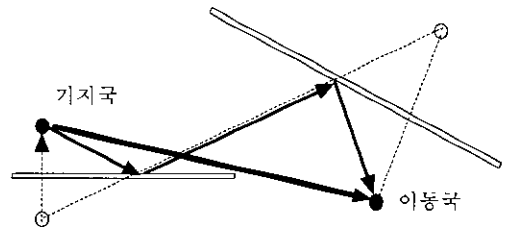
모든 전파원에 대해 원 충돌위치에서 송신원으로
의 직접 경로 확인 ;
세기 계산하여 더함 ;
반사벡터 계산 ;
표면 특성 고려한 반사벡터 세기 결정 ;
call intersect(반사벡터,&계산된세기) ;
세기 = 세기 + 계산된세기 ;
투과벡터 계산 ;
표면 특성 고려한 투과벡터 세기 결정 ;
call intersect(투과벡터,&계산된세기) ;
세기 = 세기 + 계산된세기 ;
}
    
```

### 3.6 기하학적 계산 법

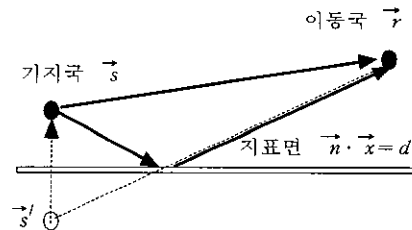
시뮬레이션 결과 질을 높이는 정 방향 추적 법 및 역 방향 추적의 공통적인 어려움은 엄청난 계산시간에 있다. 이러한 계산시간 상의 어려움을 보완하기 위하여 기하학 적인 계산 방법을 개발하였다. <그림 6>, <그림 7>이 방법에서는 전파 원과 수신 원 사이에는 직접적인 전파와 1회 혹은 2회의 제한적인 반사만 존재하는 것으로 가정한다. 즉 이 방법에서는 먼저 송신 원과 수신 원 사이에 직접적인 경로가 있는지, 혹은 1회, 2회 등 제한적인 반사를 통한 경로가 있는지 전적으로 기하학적인 수식에 의존하여 계산한다. <그림 7>에 1회 반사 <그림 6>에 2회 반사를 사용한 계산 방법이 나타나 있다. 물론 필요에 따라 반사 횟수를 늘일 수 있는 계산식도 유도 가능할 것이나, 계산 시간 증대로 연결된다. 이 방법은 방향과는 전혀 무관한 방법이다. 반사 횟수에 대한 제한이 몇몇 전자파의 특성에 따라 무리일 수 있으나, 주파수가 아주 높지 않은 경우에는 큰 무리 없이 받아들일 수 있다고 가정할 것이다. 이를 위하여 전파 원과 수신 원 사이의 반사지점을 계산하는 식을 개발하였다. <그림 7>, <그림 6>은 전자파가 한 번, 두 번 반사될 경우 전자파 추적을 위한 수식을 유도하는 절차를 나타낸 그림이다. 여기서 각각의 전파 원/수신 원에서는 반사가 가능한 임의의 벽면을 기준으로 허상을 만든다. 두 개의 허상을 연결하면 각각의 벽면과 만나는 지점들이 반사지점이 된다.

이러한 방법에서 삼각형으로 이루어진 벽면의 개수가  $m$ 이고, 한 개의 전파 원이며, 1번 반사일 경우  $m^2$ 번, 2 번 반사일 경우  $m^3$  번의 반사 확인이 필요하다. 물론 계산 횟수를 줄이는 방법도 개발 가능하다. 이 방법의 장점은 실외 환경을 고려한 1 번 반사일 경우, 계산 시간이 이때까지 제안된 방법 중 제일 빠르다는 점이다. 다만 여기서 고려하는 반사 회수는 1 번 혹은 2 번만 고려하므로, 여러 번 반사되는 경우에 대해서는 적절한 계산법이 되지 못할 것이다.

다음은  $n$ 개의 기지국에 대하여 기하학적 계산 방법을 사용한 전파 세기 계산 알고리즘을 나타낸다. 여기서는 1 번 반사만을 가정하기로 한다. 2 번 반사일 경우, main()의 제일 내부에 모든 물체들에 대한 또 하나의 반복이 필요하다.



<그림 6> 기하학 적인 계산을 통한 전자파 계산방법(2번 반사의 경우)



$$\vec{n} : \text{반사 면의 수직 벡터}$$

$$\vec{s}' : \text{기지국의 허상 위치 벡터}$$

$$\vec{n} \cdot \vec{x} = d : \text{반사(지표)면의 평면 방정식}$$

$$\vec{s}' = \vec{s} + 2 \left( \frac{d - \vec{n} \cdot \vec{s}}{|\vec{n}|} \right) \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|}$$

$$\text{반사지점} = \vec{r} + \frac{d - \vec{n} \cdot \vec{r}}{\vec{n} \cdot \left( \frac{\vec{s}'}{|\vec{s}'|} - \vec{r} \right)} \left( \frac{\vec{s}'}{|\vec{s}'|} - \vec{r} \right)$$

<그림 7> 기하학 적인 계산을 통한 소리 전파 계산 방법(1번 반사의 경우)

```

main()
{
  for ( k = 1 ; k <= m ; ++k ) /* 반복 : 모든 지
    표 환경 표현 다각형 m개에 대하여 */
    for ( i = 1 ; i <= n ; ++i ) /* n개 송신 원(기
      지국) */
      {
        k번째 다각형에 대한 표면 중심점 계산 ;
        수직 벡터 방향으로 중심점(수신원) 1.5
          미터 상승시킴 ;
        수신 원(이동국)과 송신 원(기지국) 사이
          의 직접 경로 확인 ;
        경로 존재시 경로 길이 저장 ;
        /* 수신원(이동국)에서 송신원(기지국)으로
          의 1 번 반사 경로 확인 */
        for ( j = 1 ; j <= m ; ++j ) /* 반복 : 모
          든 지표 다각형 m개에 대하여 */
          {
            j 번째 다각형을 경유한 경로가 존재
              하는지 확인 ;
            경로 존재시 반사 경로 길이 저장 ;
            전파 세기 계산법에 의하여 하나의
              수신원에 대한 세기를 축적해 나감 ;
          }
      }
}

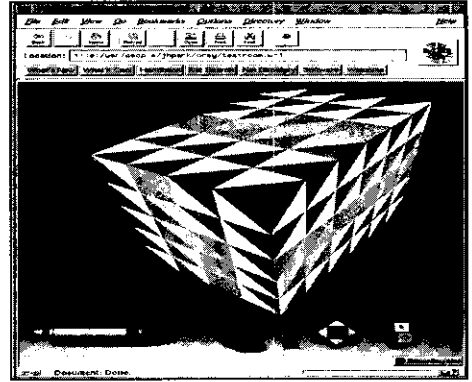
```

#### 4. 각 방법에 대한 시뮬레이션 결과 및 비교

본 논문에서는 정 방향, 역 방향 추적을 통한 전파와 영향 시뮬레이션 및 기하학 적인 계산을 통한 전파와 영향을 계산해 보았다. 먼저 주위 환경을 모델링한다. 주위 환경은 실내 및 실외 환경으로 나누어 볼 수 있다.

본 논문에서는 실외의 환경을 fractal기법을 사용하여 지표면을 생성하였다. 실내의 경우에는 벽을 생성하는 프로그램을 작성하여 실내 환경을 모델링 하였다. 또한 모델링 된 환경에 기지국을 설정하였으며, VRML로 출력된 시뮬레이션 결과물 상에 기지국은 붉은 색의 구로 표현되었다. <그림 8>, <그림 9>는 실내의 내부와 외부

내는 것이다.



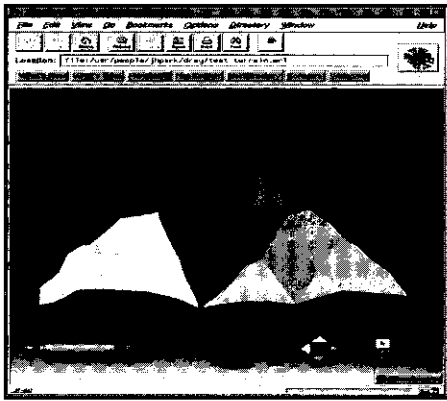
<그림 8> 방의 외부



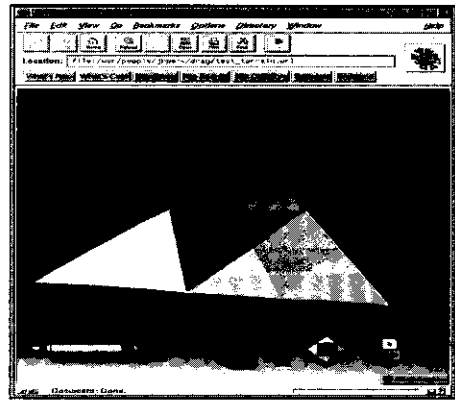
<그림 9> 벽이 있는 방의 내부

또한 실외 환경을 위하여 앞에서 밝힌 바와 같이 fractal을 사용하여 지표면을 생성하였다. 색깔 별로 달리 표현되는 삼각형들은 fractal의 진행 상태를 보여주는 것이다. <그림 10>은 비교적 평평한 지표를 보여주며, <그림 11>은 굴곡이 심한 지표를 보여준다.

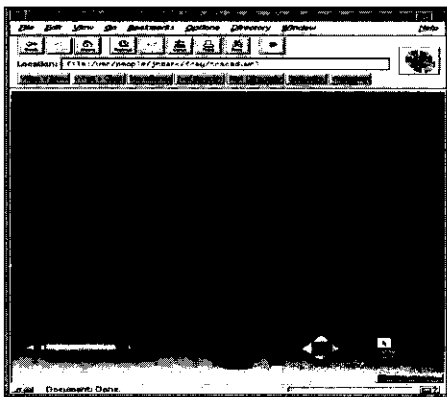
정 방향 기법을 사용하여 전파 추적을 할 경우, 발생하는 영향이 <그림 12> 및 <그림 13>에 나타나 있으며, 여기서 붉은 부분은 덩성덩성 나타나며, 일종의 원을 그리는 것을 발견할 수 있다. 이때 발생하는 필연적인 결과이며, 이러한 현상을 줄이기 위하여 상당히 많은 횟수의 전파 ray를 발사하는 것이 하나의 해결책이다. 이렇게 되면 계산 시간이 증가하게된다.



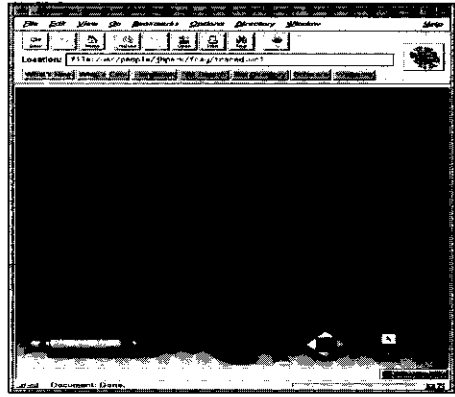
<그림 10> 평평한 지표



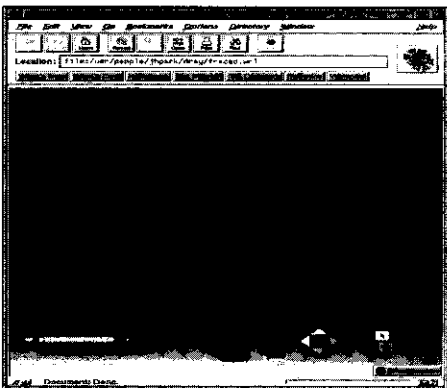
<그림 11> 굴곡이 심한 지표



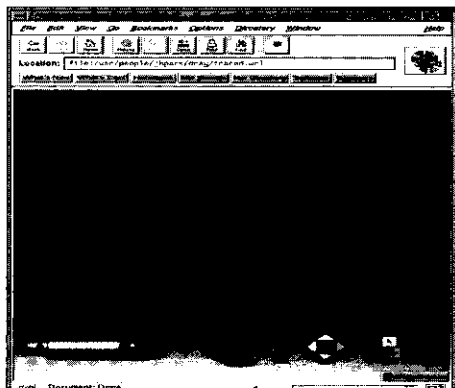
<그림 12> 정방향 추적



<그림 13> 정방향 추적



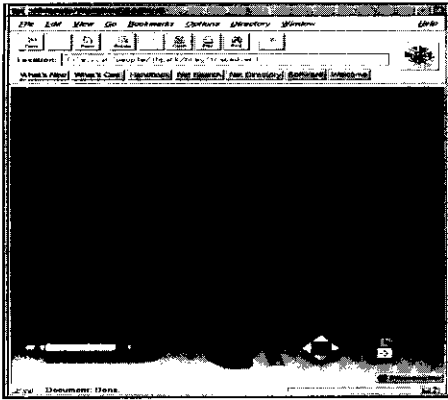
<그림 14> 기하학 적 계산



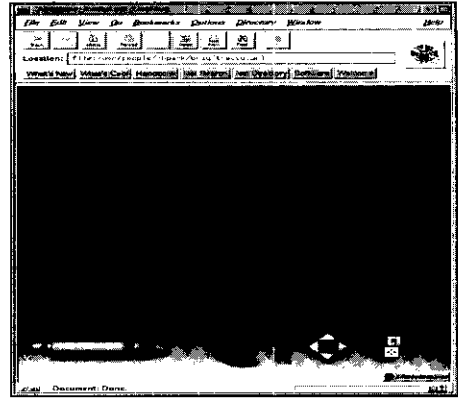
<그림 15> 기하학 적 계산

이러한 실외 환경의 보완책으로 제시된 것이 기하학적 계산 방법이다. <그림 14>와 <그림 15>에

서는 기하학 적으로 계산된 방법을 보여주는데, 전체 표면에 대하여 계산이 되었으며, 계산 시간도



〈그림 16〉 역방향 실내추적



〈그림 17〉 역방향 실내추적

빠르다. 물론 계산 환경에 따라 많은 차이가 있을 수 있음을 밝혀두며, 본 계산에서는 1번 반사만 고려한 경우이다.

앞에서 언급한 바와 같이 실내의 계산을 위하여 엄청난 횟수의 반사가 허용되어야 하므로 기하학적인 방법은 효과적이지 못하며, 역 방향 추적이 효과적이다. <그림 16>과 <그림 17>은 역 방향 추적에 의한 결과를 나타낸다. 보는 바와 같이 실내 내부에 있어서 모서리 등에서 전자파의 세기가 세어짐을 알 수 있었으며, 벽으로 인하여 전자파가 벽을 지나 다른 쪽으로 전파되는데 있어서 벽이 장애가 됨을 알 수 있다.

## 5. 전파 기지국 위치 결정을 위한 최적화

본 장은 기하학적인 방법을 중심으로 설명한다. 한 번의 전자파 전파 시뮬레이션은 한 번의 최적화의 비용함수 계산에 해당한다. 기지국의 위치는 우리가 푸는 최적화 문제의 변수가 되며, 변수의 개수는  $x, y, z$  세 개이다. 또한 모든 지표면은 삼각형으로 모델링 되었으며, 삼각형의 중심에서 표면에 수직인 방향으로 1.5m 되는 위치에 수신기가 있는 것으로 시뮬레이션 하였다. 기하학적인 시뮬레이션 방법을 사용하면 기지국과 수신기 사이의 직접적 전파 가능여부, 거리, 또한 반사를 통한 간

접 전파인 경우, 반사지점, 기지국에서부터 반사지점까지의 거리 및 첫 번째 반사지점과 두 번째 반사지점간의 거리 등 반사지점간의 거리, 최종적으로 반사지점에서 수신기까지 거리등을 계산할 수 있으며, 이 값들은 수신기에서 수신하는 전파의 세기를 결정하는데 중요한 역할을 한다. 지표면의 모든 수신 점에서 받는 전파의 세기를 합하면 단순한 비용함수가 된다. 물론 수신 지표면간에 중요도가 존재할 수 있다. 이 경우에는 각 수신 점에 대하여 가중치를 두어 비용함수를 조정할 수 있다. 한번의 시뮬레이션은 비용함수를 한번 계산한 것이 된다. 이러한 시뮬레이션을 통하여 비용함수를 계산하고, 기지국 위치를 변수로 하여 국부적으로 최적의 위치를 찾아낼 수 있다.

이러한 최적화 문제에서 중요한 것이 비용함수를 계산하는데 걸리는 시간이다. 정 방향(forward) 추적 법을 사용할 경우, 시뮬레이션의 질이 저하되므로 사용을 지양하였으며, 역 방향(backward) 추적 법은 모든 수신기에서 구를 사용한 역 방향 전파 추적을 해야 하므로 너무 오랜 계산 시간이 소요되었다. 그리하여 이 연구에서는 기하학적인 추적 법을 사용하게 되었으며, 비록 실내에는 반사의 제한 때문에 정확한 시뮬레이션에 미흡하나, 실외에서는 많은 횟수의 반사가 일어나지 않으므로 효과적이라 판단된다.

이러한 최적화 문제를 푸는데 있어서 경제적인

면도 제약으로 작용할 수 있다. 실제적으로 기지국을 세우기 위하여 소유주와 협상을 필요로 하는데, 어떤 경우 많은 임대료를 지불하여야 할 것이다. 비용함수의 결정에 있어서 많은 요소들이 존재할 수 있다. 모든 지역에서 전파가 만족할 만큼 도달하도록 하느냐 혹은 일부 중요한 지역을 중심으로 전자파의 전파가 이루어지느냐에 따라 비용함수의 계산 방법도 많은 차이가 날 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 서로 다른 세 가지의 다른 전자파 추적 방법을 구현하였다. 정 방향 추적 법은 아무리 많은 개수의 추적 벡터를 발산하여도 맞을 수 있음에도 불구하고 맞추지 못하는 삼각형이 있을 수 있다. 이러한 이유는 전자파 원에 대한 모델링이 완벽하지 못하기 때문이며, 더 좋은 방법이 존재하겠지만 상당한 계산 시간이 소요될 것이다. 이를 보완하기 위하여 거리에 따라 발산하는 추적 벡터의 수를 조절할 수 있겠으나 완벽한 대안은 되지 못한다.

역 방향 추적 방법은 수신 원(이동국)에서 추적 벡터를 쏘아 전파를 추적하는 방법이다. 이 방법의 단점은 하나의 표면을 나타내는 삼각형에 대하여 하나의 수신 원을 두어야 한다는 것이며, 결국 엄청난 개수의 추적 벡터를 발산하게 된다. 이것이 방법의 단점이 되며, 장점은 상당히 정확한 추적 결과를 얻을 수 있으며, 한정된 공간으로 구성된 실내의 추적 등에 사용하면 보다 효과적이다.

본 논문에서 마지막으로 제시한 추적 방법은 기하학 적으로 계산하는 방법인데, 이 방법은 빠르게 전자파의 전파를 계산할 수 있으나, 허용되는 반사의 횟수가 제한적이므로 야외 등 전파 반사 회수가 낮은 지역에서 사용하는데 적합할 것이다.

이러한 세 가지 방법의 공통적인 문제점은 하나의 물체를 표현하는 방법에 따라 결과가 달라질 수 있다는 점이다. 즉 하나의 원통을 생각해 보자. 한쪽 끝에는 전자파 원이 다른 한쪽 끝에는 수신 원

이 있다고 가정한다. 원통을 표현하는 방법은 아주 많다. 원통을 표현하는 데 있어서 중요한 것은 원통을 몇 개의 삼각형으로 나누느냐 하는 것이다. 개수가 많을수록 전자파 원에서 수신 원으로의 경로는 많아지며, 경로가 많아지면 상대적으로 수신 원에 도달하는 전자파의 세기도 세어진다. 즉 이러한 삼각형을 사용한 지표면 모델링 및 전파 추적법에 있어서 지표면을 나타내는 삼각형의 크기를 고려하여 전자파를 계산하는 방법이 강구되어야 할 것이다.

또 다른 관점은 최적화 기법을 사용하여 문제를 풀 경우에 전체적(global) 최적의 해를 제공해 줄 수는 없다는 것이다. 다만 국부적(local) 최적 해를 기대할 수 있다. 본 연구에서 고려되지 않은 것은 여러 가지가 있을 수 있다. 도심의 경우 전파 기지국을 아무 곳이나 세울 수 없을 수 있다는 것이고, 본 연구에서는 최소한 기지국의 위치 조절, 기지국 위치/높이에 따른 비용 등을 함수로 변환하여 최적의 위치를 결정하는데 도움을 줄 수 있을 것이며, 이러한 제약점들을 수식으로 표현하여 최적화 문제/비 선형방정식 문제를 푸는데 제약함수로 사용할 수 있을 것이다.

이러한 여러 가지 계산 시간상의 제약/시뮬레이션의 질 등을 고려하여 기하학 적인 전자파 시뮬레이션 방법을 제시하였으며, 이러한 시뮬레이션을 사용하여 최적화 문제로 변환함으로써 최적의 기지국 위치를 결정하는데 도움을 줄 수 있다는 것이 본 논문의 중요한 기여이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Peter Ho. C.M., Theodore S. Rappaport, Wireless Channel Prediction in a Modern Office Building Using an Image-Based Ray Tracing Method, Proceedings of the Globecom '93, 1993.
- [2] Reinaldo A. Valenzuela, A Ray Tracing Approach to Predicting Indoor Wireless

- Transmission, Proceedings of the 1993 IEEE 43th Vehicular Technology Conference, 1993.
- [3] Naruniranat. S., Y. Huang, D. Parsons, A three-dimensional Image Ray Tracing (3D-IRT) Method for Indoor Wireless Channel Characterization, Proceedings of the 1999 High Frequency Postgraduate Student Colloquium, 1999.
- [4] Zhang ZJ, Yun Z, Iskander MF, Ray tracing method for propagation models in wireless communication systems, Electronics Letters, Vol.36, No.5, pp.464-465, 2000.
- [5] Mokhtari H, Lazaridis P, Comparative study of lateral profile knife-edge diffraction and ray tracing Technique Using GTD in Urban Environment, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.48, No.1, pp.255-261, 1999.
- [6] Kim, SC et al., Radio propagation measurements and prediction using three-dimensional ray tracing in Urban Environments at 908MHz and 1.9GHz, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.48, No.3, pp.931-946, 1999.
- [7] Fapojuwo, A.O., et al, A simulation study of speech traffic capacity in digital codeless telecommunication systems, IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol.41, No.1, pp.5-17, 1992.