DBpia

論文 95-3-3-17

개인 휴대 통신을 위한 마이크로셀의 모양 및 배치 연구

正會員 李 栗 魯, 洪 大 亨*

A Study on the Design and Layout of Microcells for Personal Communication System

Youl No Lee, Dae Hyoung Hong* Regular Members

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구 92-21-11에 의한 연구결과임

要 約

차세대 개인휴대통신은 마이크로셀 시스템으로 구성될 것이다. 본 논문에서는 마이크로셀 환경에서의 전자파 전파에 대하여 연구하였다. 연구 결과로 Ray Tracing 알고리즘을 이용한 전자파 전파 예측 모델을 설정하였다. 이 모델을 적용하여 여러가지 전자파 전파 특성을 예측하기 위한 시뮬레이션을 구성하였다. 개발된 시뮬레이션을 이용하여 평균 전파손실을 예측하였고 셀 모양도 예측하여 도시하였다. 그리고 시뮬레이션을 옥외 마이크로셀 시스템에 적용하여 특정 기지국 위치와 주파수 재사용 패턴에 대하여 신호대 간섭비를 도출하였다.

옥외인 경우는 도심지 형태인 맨하탄 모델을 시뮬레이션에 적용하였고 시뮬레이션 예측 결과를 통계적 특성의 전파모델 결과와 비교하였다. 옥내인 경우는 서강대학교 K관 건물의 구조를 시뮬레이션에 적용하였다. 그리고 그 건물에서 전파 측정 실험을 수행하여 실측 결과를 시뮬레이션 예측 결과와 비교하였다. 검증 결과 개발된 시뮬레이션이 마이크로셀 환경에서 여러가지 전자파 전파 특성을 거의 정확히 예측함을 확인하였다. 결과적으로 마이크로셀 시스템을 설계할 때 성능을 예측하고 또 설계를 가장 효율적으로 하기 위하여 여기서 개발된 시뮬레이션이 매우 유용하게 사용될 수 있음을 보였다.

ABSTRACT

Personal Communication System(PCS) will be realized using microcells and/or picocells. In this paper, we studied the electromagnetic wave propagation in microcell environment. As a result, we developed a simulation program to predict the radio channel characteristics in the microcell environments. For the simulation we adopted the Ray tracing algorithm as the propagation prediction model. Using this simulation, the shape of each cell can be predicted and drawn. For a system with base stations located and a frequency reuse pattern applied, the signal-to-interference(C/I) performance can also be estimated.

* 西江大學校 電子工學科
Dept. of Electronic Eng., Sogang Univ.
論文番號 : 94349
接受日字 : 1994年 12月 2日

www.dbpia.co.kr

For outdoor environment, the simulation has been applied to the Manhattan street model. The simulation results have been compared with those of the statistical model referenced. For indoor environment, the simulation has been applied to K Hall in Sogang University. The signal strength measurements have also been carried out. The measurement data have been compared with those of the simulations. Results show that the simulation developed is a good prediction tool of the propagation characteristics in the microcell environments. The simulation can be a very useful planning tool to design the microcell systems for PCS.

Ⅰ. 서 론

차세대 개인 휴대 통신을 위한 마이크로셀 시스템에서의 전자파 전파 특성은 마크로셀 시스템과는 많은 차이를 보인다. 옥외에서는 주위 건물 높이에 비해 낮은 송신 안테나와 작은 송신 출력 때문에 높은 빌딩을 따라 전파가 진행되고, 옥내에서는 건물 내부 구조물의 배치와 재질에 따라 전파 특성이 불규칙하게 변하게 된다. 또 기존의 셀룰라 이동 전화 시스템(마크로셀 시스템)에서는 보통 한 기지국의 서비스 지역(셀)을 반경이 1~20Km인 육각형 모양으로 나타낸다. 그러나 마이크로셀 시스템에서는 마크로셀 시스템과는 달리 옥외 또는 옥내의 경우에 따라, 도로나 건물 블럭의 배치와 재질에 따라, 건물 내부 구조물의 배치와 재질에 따라 불규칙한 셀 모양을 가지게 된다. 특히 옥내의 경우에는 3차원 모양의 불규칙한 셀을 가지게 된다. 그러므로 마이크로셀 시스템에서 정확한 전파 특성 예측과 셀 모양 예측을 위해서는 건물 배치와 재질, 건물 내부 구조물 배치와 재질 등이 안테나 높이와 주파수와 더불어 중요하게 고려되어야 된다.[1][2] 그러므로 마크로셀 시스템의 일반적인 전자파 전파 예측 방법인 실험 측정 결과의 통계적 특성을 이용한 전자파 전파 예측 방법은 마이크로셀 시스템에 적용하기에는 효과적이지 못하다.

본 논문에서는 건물의 다양한 형태에 따라 효과적으로 전파 경로를 추적하는 Ray Tracing 알고리즘을 이용하여 마이크로셀 시스템의 전자파 전파 예측 시뮬레이터를 구성하였고 시뮬레이션을 통하여 평균 전파손실을 예측하였다.[3] 그리고 예측된 평균 전파손실을 이용하여 옥외와 옥내 마이크로셀 시스템에서의 셀 모양을 예측하고 도시하였다. 옥내에서는 시뮬레이션에 적용한 건물에서 실제 측정 실험을 수행하여 그 실측 결과와 시뮬레이션 예측 결과를 비교하여 검증하였다. 그리고 옥외인 경우에 시뮬레이터를 이용하여 제안된 기지국 위치와 셀 모양에 대하여 주파수 재사용 패턴에 따른 신호대 간섭비를 예측하였다.

본 논문은 2장에서 Ray Tracing을 이용한 전자파 전파 예측 모델을 설명하였고 3장에서는 시뮬레이션 구성에 대하여 설명하였다. 옥내 전파 측정 실험 구성 및 실험 방법에 대하여는 4장에서, 5장에서는 시뮬레이션 결과 및 검증에 대하여 설명하였다. 그리고 시뮬레이터를 이용한 신호대 간섭비 예측 결과를 6장에 제시하였고 7장에서는 결론을 맺었다.

Ⅱ. Ray Tracing을 이용한 전자파 전파 예측 모델

Ray Tracing은 3차원 그래픽을 위한 그래픽 알고리즘의 하나로 물체에 대한 시선 방향에 따라 색의 농도를 계산하여 2차원 물체를 3차원으로 전환하는 알고리즘이다. Ray Tracing을 전자파 전파 예측 시뮬레이션에 응용하기 위하여 물체를 건물에, 시선의 방향을 송신되는 전파 경로에 대응시켜 각 경로에 따른 평균 수신전계강도를 구한다.

아래 그림 1에서 보듯이 송신기에서 송신된 전자파 전파 경로는 직접, 반사, 투과, 산란 등 다양한 형태로 진행된다. Ray Tracing을 이용한 전파모델은 이렇게 다양하게 진행하는 전파 경로를 추적하여 수신기에 수신되는 여부를 확인, 수신 경로의 전계강도를 계산한다. 그리고 각각의 전파 경로는 독립적으로 구분되어지며 전체 평균 수신신호세기에 독립적으로 중첩되어 계산되어 진다.

송신된 전파 경로중에서 수신되는 i 번째 전파 경로의 수신신호세기는 다음과 같다.

$$|E_i|^2 = \frac{Z_0 P_e}{4\pi} G_{ti} G_{ri} L_i(d) L_s(\Psi_i) \prod \Gamma_j^2(\Theta_j) \prod T_j^2(\Theta_i) \quad (1)$$

www.dbpia.co.kr

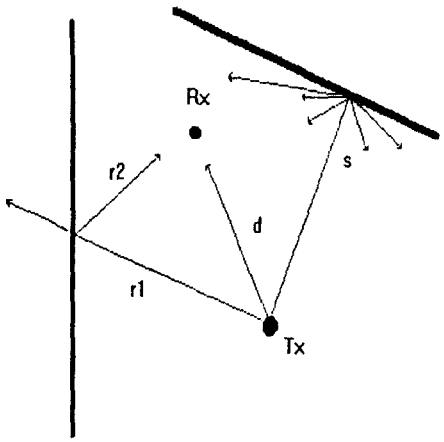


그림 1. 건물에 의해 반사, 투과, 산란되는 전파 경로
Fig. 1. Reflected, Transmitted, and Scattered Rays

표 1. 각 변수에 대한 설명
Table 1. Explanation for Each Parameter

변수	내 용
P_e	유효 송신 전력 (ERP)
G_{ti}	송신 안테나 이득
G_{ri}	수신 안테나 이득
L_i	i 번째 경로 전파손실
L_s	산란에 의한 i 번째 경로 전파손실
Γ_i	반사계수
Γ_i	투과계수
Z_0	Free Space Wave Impedence

각각의 변수는 표 1에 설명하였다.

협대역 채널에서 수신되는 전계강도는

$$E_t = \sum_i |E_i| \, e^{j\phi_i} \tag{2}$$

이고 여기서 ϕ_i는 i번째 경로의 위상을 나타낸다. 수신신호세기는 $|E_t|^2$에 비례하므로 $|E_t|^2$을 평균하여 평균 수신신호세기를 구한다.

$$\langle |E_t|^2 \rangle = \langle \left| \sum_i |E_i| \, e^{j\phi_i} \right|^2 \rangle = \sum_i \sum_k |E_i||E_k| \langle e^{j(\phi_i - \phi_k)} \rangle$$

ϕ는 0~π사이에서 변하게 되므로 $\langle e^{-j(\phi_i-\phi_k)} \rangle$는 $i \neq k$에서는 0이 된다.

그러므로 평균 수신신호세기는 모든 수신되는 전파 경로들의 세기를 더한 형태로 표현된다.

$$S = \sum_i^k \frac{|E_i|^2}{Z_0} \tag{3}$$

또한 Path Loss는 위 식으로부터 송신 전력에 대한 평균 수신신호세기의 차이를 통하여 산출한다.

식 (1)에서의 반사계수 (Γ_i)는 다음 식 (4)와 같이 건물면에 대한 전파의 입사 각도와 건물의 유전율, 전도율에 의하여 결정지어진다.

$$\Gamma_i = \frac{\sin\alpha_i - a\sqrt{\varepsilon_c - \cos^2\alpha_i}}{\sin\alpha_i + a\sqrt{\varepsilon_c - \cos^2\alpha_i}} \tag{4}$$

여기서 α_i는 입사각, $\varepsilon_c = \varepsilon_r - j60\sigma\lambda$, a는 반사면에 대하여 Horizontal Polarization일때는 $1/\varepsilon_c$이고 Vertical Polarization일 때는 1이다.

아직까지는 건물 블럭과 복잡한 건물내 구조물의 재질에 따른 유전율과 전도율에 대한 측정 자료가 충분히 알려져 있지 않으므로 본 논문에서는 옥외와 옥내로만 분류하여 일정한 유전율과 전도율을 시뮬레이션에 적용하였다. 또 투과계수는 여러 측정 실험을 통해 얻어진 건물 재질에 따른 투과손실로부터 계산하여 건물 재질에 따라 달리 적용하였다. 이러한 반사계수와 투과계수는 이에 따라 전파 특성이 많이 변하게 되므로 건물내에 전자파 전파 특성을 예측하는데 매우 중요하게 고려되어야 할 변수이다.

도심 지역의 옥외나 옥내에는 복도 끝이나 건물 블록 끝에 많은 모서리가 있게 되고 모서리로 인해서 전파의 회절 현상이 일어난다. 전파의 회절은 비가시 영역에서 평균 수신전계강도에 크게 영향을 주기 때문에 고려해야 할 전파 특성이다. 흔히 반사, 투과, 산란만을 고려한 경우 마이크로셀 시스템에서 전자파 전파 예측 결과는 측정 결과와 많은 오차를 가지게 된다. 본 논문에서는 Geometric Optic을 수정, 보완한 GTD (Geometric Theory of Diffraction) 알고리즘을 이용하여 전파모델에 회절을 고려하였다. Geometric Optics는 옥내와 옥외에서 송신기와 수신기가 가시 영역인 경우 해석적으

www.dbpia.co.kr

로 건물에 의한 전파 경로의 반사, 투과 등을 계산하는데 효과적인 방법이다. 그러나 Geometric Optics는 송신기와 수신기가 비가시 영역인 경우에 전파의 회절을 적용하지 못한다는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 GTD (Geometric Theroy of Diffraction) 알고리즘을 이용하여 전파모델에 회절을 고려하였다.

회절되는 전파 경로 식은 Geometric Optics의 반사경로 공식에 반사계수를 회절계수로 대체함으로 얻을 수 있다. 그림 2는 모서리에서 회절되는 전파의 기하학적 모형이고 회절계수는 아래와 같은 식 (5)로 표현된다. 회절계수 공식은 다소 복잡하게 보이지만 컴퓨터를 이용하면 쉽게 계산 결과를 얻어낼 수 있다.

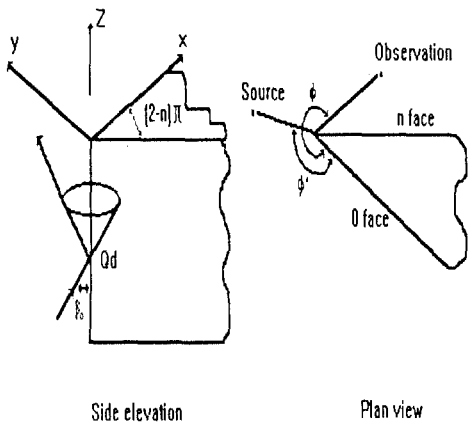


그림 2. 모서리에 회절되는 전파의 기하학적 모형
Fig. 2. Geometry of a Diffracted Path

회절계수는 아래와 같은 식 (5)에서 구해진다.

$$D_s^h = \frac{-\exp(-j\pi/4)}{2n\sqrt{2\pi\beta}\sin(\beta_0)}\left[\cot\left[\frac{\pi+(\varphi-\varphi')}{2n}\right]F(\beta L g'(\varphi-\varphi'))+\cot\left[\frac{\pi-(\varphi-\varphi')}{2n}\right]F(\beta L g(\varphi-\varphi'))\right. \quad (5)$$
$$\left. + R_0\cot\left[\frac{\pi-(\varphi+\varphi')}{2n}\right]F(\beta L g(\varphi+\varphi')) + R_n\cot\left[\frac{\pi-(\varphi+\varphi')}{2n}\right]F(\beta L g'(\varphi+\varphi'))\right.$$

위 식 (5)에서 Fresnel Transition Function은 다음과 같이 표현된다.

$$F(x) = 2j\sqrt{x}\exp(jx)\int_{\sqrt{x}}^{\infty}\exp(-j\tau^2)\,d\tau$$

$$L = \frac{s\,s'\sin^2\beta_0}{s+s'}$$

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

또 R은 수직편극과 수평편극에 대한 반사계수이고 $N^{\pm}$는 다음을 가장 가깝게 만족하는 정수이다.

$$2\pi nN' - (k) = \pi \quad 와 \quad 2\pi nN - (k) = -\pi$$

위 식 (5)의 회절계수로부터 회절되는 경로의 수신신호세기를 다음의 식 (6)과 같이 구하고 이것을 식 (3)의 평균 수신신호세기에 적용하여 전체적인 평균 수신신호세기를 계산한다.

$$|E_i|^2 = \frac{Z_0 P_e}{4\pi} L_i(d)\prod D_s^{h2} \quad (6)$$

Ⅲ. 시뮬레이션 알고리즘 구성

Ray Tracing 알고리즘을 이용하여 전파 경로를 추적하여 평균 수신전계강도를 예측하는 시뮬레이터를 구성하였다. 송신 안테나가 전방향성인 경우에 모든 방향으로 균일하게 전파경로를 설정한 후에 각 송신 경로들 가운데 수신기에 직접 수신되는 경로를 확인, 수신전계강도를 구했다.

본 논문에서는 옥외 마이크로셀 환경에서 2차원 좌표로 도심지 모델을 설정하고 시뮬레이션을 구성하였다. 이는 송신 안테나 높이가 주변 건물에 비하여 낮은 경우에 유효한 모델이다. 일반적으로 Coverage 반경이 Break Distance (약 500m)이내인 경우에는 2차원에서 Ray Tracing 방법의 적용이 적절한 것으로 알려져 있다.[7][12] 송신 안테나를 전방향성으로 가정하여 2차원에서 5°각도 간격으로 모든 방향에 균일하게 송신 경로

www.dbpia.co.kr

(72개)를 설정하여 시뮬레이션 하였다. 그리고 각 송신 경로는 전체 송신 출력을 송신 경로 수로 나눈 값만큼의 송신 출력을 가진다고 가정하였다. 또 건물 블럭에 대한 반사계수는 모든 건물 블럭의 유전율(10)과 전도율(0.005)이 일정하다고 가정하고 식 (4)의 Fresnel 공식을 이용하여 계산하였다. 건물 블럭을 통과한 전파 경로는 수신신호세기에 크게 영향을 미치지 못한다고 가정하고 무시하였다. 또 건물에 반사되는 횟수가 13번 이상인 전파 경로도 수신신호세기에 크게 영향을 미치지 못하므로 무시하였다.

옥내인 경우도 전방향성 송신 안테나로 가정하고 3차원 좌표에서 모든 방향으로 균일하게 송신 경로를 설정하기 위하여 구를 정다면체로 해석하여 구심에서 각각의 모서리 방향으로 송신 경로(1002개)를 설정하여 시뮬레이션 하였다. 또한 건물에 대한 반사계수는 모든 건물의 유전율(2.44)과 전도율(0.005)이 일정하다고 가정하고 식 (4)의 Fresnel 공식을 이용하여 계산하였다. 투과손실은 건물 재질에 따라 다르게 적용하였다. 또 건물 면과 11번 이상 반사 또는 투과되는 전파 경로도 무시하였다.

아래 표 2에 식 (4) Fresnel 공식을 이용한 반사계수 결과와 참고문헌에서 인용된 반사계수 측정 결과를 각각 보인다.[4] 측정 결과는 주파수가 1.8 GHz이며 벽의 재질이 벽돌인 경우이다. 식 (4)의 결과는 주파수가 1.8 GHz이고 유전율이 2.44, 전도율이 0.005인 경우이다. 각각의 경우에 입사각에 따른 반사계수를 입사면에 대하여 Vertical Polarization과 Horizontal Polarization일 경우로 구분하여 비교하였다.

표 2. 입사 각도에 따른 반사계수 측정 결과와 예측 결과
Table 2. Measured and Simulated Result of the Reflection Coefficient

각 도	Vertical Polarization		Horizontal Polarization	
	측정 결과	예측 결과	측정 결과	예측결과
0	1.00	1.00	1.00	1.00
20	0.66	0.60	0.16	0.19
30	0.73	0.45	0.20	0.04
40	0.66	0.36	0.26	0.07
50	0.56	0.30	0.32	0.14
60	0.52	0.27	0.36	0.18
70	0.48	0.23	0.42	0.20
80	0.47	0.22	0.47	0.22

Vertical Polarization과 Horizontal Polarization인 두 경우에 식을 통한 결과와 실측 결과가 많은 차이를 보인다. 이러한 이유는 측정한 벽면이 Inhomogenous하거나 벽의 표면이 불규칙하기 때문이라고 해석할 수 있다. 그러므로 옥내인 경우에 Fresnel 공식에 의한 반사계수 계산은 어느 정도 오차를 가지고 있고 이에 대한 수정, 보완이 필요하다.

또 건물 재질을 고려한 투과손실은 1.8GHz 대역에서 참고 문헌에 보고된 여러 측정 결과를 토대로 시뮬레이션에 적용하였다.[5] 시뮬레이션에 적용한 건물 내부는 아래 표 3에 나타냈듯이 3가지 형태로 구분하여 각각의 재질에 따라 투과손실을 달리하여 시뮬레이션에 적용하였다. 물론 이러한 건물 재질에 대한 단순한 구분은 예측 결과의 오차 원인이 된다. 또 벽면의 두께에 따른 투과손실이 다르므로 좀더 다양한 건물 내부 재질에 대한 고려와 두께에 따른 투과손실에 대한 변화 등 여러 가지 옥내 전파 특성에 대한 연구가 계속해서 진행되어야 할 것이다.

표 3. 건물 재질에 따른 투과 손실
Table 3. Transmission Loss of Each Wall Material

건물 재질	투과 손실	투과 계수
유리창	1.8 dB	0.813
건물 내벽(block brick)	9 dB	0.355
건물 floor(콘크리트)	15 dB	0.178

옥외인 경우와는 달리 옥내인 경우에는 3차원 좌표에서 실제 안테나 패턴에 대한 고려가 이루어져야 한다. 3차원 좌표에서 시뮬레이션되는 옥내인 경우에는 안테나의 Elevation 패턴과 Azimuth 패턴이 다르기 때문에 반드시 안테나 패턴을 고려해야 한다. 본 시뮬레이션에서는 아래 식 (7)과 같이 구좌표계를 써서 안테나 이득을 근사화한 공식을 적용하였다.[6] 근사화한 안테나 이득 G는 다음과 같다.

$$G(\theta,\varphi)_{m,n,\alpha,\beta} = H_{m,n,\alpha,\beta}(\theta \cdot C(\varphi)$$
$$C(\varphi) = \text{constant} \qquad (7)$$
$$H_{m,n,\alpha,\beta}(\theta) = \cos^{\alpha}(m\theta) \cdot \sin^{\beta}(n\theta)$$

여기서 θ, φ는 구좌표계에서의 각도를 의미하고 $C(\varphi)$는 일반적인 안테나 이득, m과 n은 Lobe의 갯수를 α, β는 Directivity를 의미한다.

www.dbpia.co.kr

시뮬레이션의 송.수신 안테나 모두에 적용될 다이폴 안테나인 경우에는 3 차원에서 안테나 이득은 다음 식 (8)와 같다.

$$G(\theta,\varphi)_{1.1.0.2}=H_{1.1.0.2}(\theta)\cdot C(\varphi)$$
$$H_{1.1.0.2}(\theta)=\sin^2(\theta) \quad (8)$$
$$\therefore\ G(\theta,\varphi)_{1.1.0.2}=C(\varphi)\cdot\sin^2(\theta)$$

Ⅳ. 옥내 전파 측정 실험

시뮬레이션에 적용한 건물 모델인 서강대학교 K관에서 옥내 전파 측정 실험을 진행하였다. 일반적으로 전파 측정 실험을 통하여 수신신호세기 또는 시간지연 등 여러가지 채널 특성을 측정하지만 본 실험에서는 옥내에서의 수신신호세기만 측정하였다. 그리고 수신신호세기 측정 데이타는 시뮬레이션 예측 결과의 검증 자료로 활용하였다.

실험에 사용한 실험 장비는 아래 그림 3과 같이 크게 송신단, 수신단, 수신 데이타 처리 부분으로 구성되었다. 송신단에서는 Sweep Oscillator를 사용하여 CW Signal을 송신하였다. 송신 주파수는 차세대 개인휴대통신 시스템의 사용 주파수 대역안에서 1.875 GHz를 설정하였다. 송신 출력 13.5 dBm, 표준 다이폴 안테나 이득 3 dBi이고 0.5 dB Feeder Loss를 고려한 송신 ERP는 16.0 dBm이다.

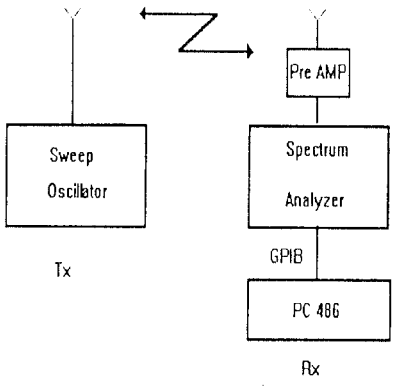


그림 3. 측정 장비 구성도
Fig. 3. The Measurement Set-up

수신단은 표준 다이폴 안테나, Pre-Amp, Spectrum Analyzer (ADVANTEST R3271)로 구성하였다. 안테나 이득은 3 dBi이고 Pre-Amp 이득은 21.7 dB, Noise Figure는 6.5 dB이다. Spectrum Analyzer는 100 Hz~26.5GHz 입력 주파수 범위와 -135dBm~+35dBm 입력 범위를 가지는데 수신단에서 열잡음 등의 영향으로 인하여 수신신호세기를 정확히 측정하지 못하는 경우가 생기므로 정확한 전파손실을 측정하기 위하여 입력단에 Pre Amp를 사용하였다. 수신단의 Feeder Loss는 1.1 dB이다.

수신 데이타 처리 부분은 GPIB와 486 PC로 구성하였다. GPIB는 Spectrum Analyzer와 486 PC를 연결하는 Interface Bus로서 Spectrum Analyzer가 PC 프로그램에 따라 구동하고 수신된 데이타가 즉시 486 PC에 자동 저장될 수 있도록 연결하는 역할을 한다.

측정 방법은 송신 안테나를 K관 건물 3층 중앙 복도에 2.0 m 높이로 설치하였고 건물내 복도와 방안에서 수신 안테나를 일정한 속도로 일정한 방향 없이 움직이면서 평균 수신신호세기를 측정하였다. 평균 수신신호세기는 1 Meter Square내에서 수신 안테나를 1.6 Meter 높이로 유지하면서 10초 동안 이동할 때 수신되는 신호세기의 평균값으로 도출하였다. 각 수신신호는 100ms 마다 Sampling되어 수집되므로 10초 동안 수집된 100개의 데이타를 평균하여 평균 수신신호세기를 구하고 이를 전파손실로 환산하여 486 PC에 저장하였다.

Ⅴ. 시뮬레이션 결과 및 검증

시뮬레이션 예측결과를 검증하였다. 옥외 마이크로셀 시스템의 경우는 이미 실측을 수행하고 그 결과로부터 통계적 특성을 이용한 모델을 도출하는 연구가 많이 진행되어 왔고 발표되었다.[7-9] 따라서 이러한 연구들로부터 실측을 근거로 도출된 전자파 전파 모델은 신뢰성이 높다고 인정하고 본 연구에서 구현한 시뮬레이션 예측결과를 통계적 특성을 이용한 모델의 결과와 비교하여 검증하였다. 한편 옥내 마이크로셀의 결과는 기존에 도출된 모델이 없으므로 실측을 수행하였고 실측이 수행된 서강대학교 K관 모델을 시뮬레이션에 적용하여 예측 결과와 실측 결과를 비교, 검증하였다.

www.dbpia.co.kr

5.1 옥외 마이크로셀 시스템의 시뮬레이션 결과

옥외 마이크로셀 시스템의 경우 연구가 많이 진행되고 결과가 발표되어온 간략한 도심지형태인 가로 2300m×세로 2300m인 맨하탄 모델을 적용하였다.[11] 송신 안테나 높이가 건물 블럭 높이에 비하여 충분히 낮다고 가정하면 건물 위를 통과하는 전파 진행 경로를 무시할 수 있게 되므로 그림 4와 같은 2차원 좌표에서 도심지 모델을 설정, 시뮬레이션에 적용하였다.[12] 도로의 넓이는 모두 30m로 하였고 건물 블럭은 가로 100m×세로 100m인 정사각형으로 가정하였다. 또 모든 건물 블럭의 재질은 일정하고 벽면은 고르다고 가정하였다.

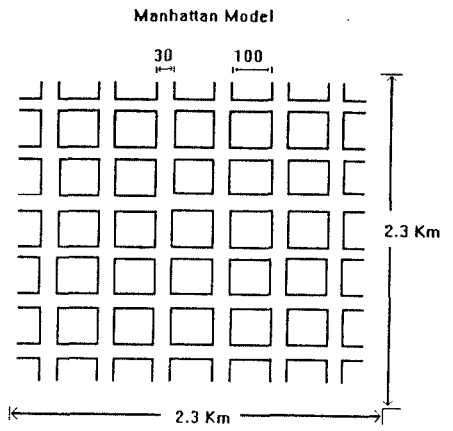


그림 4. 시뮬레이션에 적용한 옥외 도심지 모델
Fig. 4. The Outdoor Urban Model

시뮬레이션 결과를 살펴보면 그림 5에서 보듯이 가시 영역인 경우에 전파손실 예측 결과가 실험적 모델의 전파손실 결과와 Break Point (380m)전에는 비슷한 결과를 나타내다가 Break Point 후부터 오차가 생김을 알 수 있다. Break Point 이후에 오차가 생기는 원인으로는 첫째 건물 형태가 2차원 평면에서 고려되어 전파의 첫번째 Fresnel Zone이 지면에 의하여 제거됨을 무시하였기 때문이다. 둘째로는 시뮬레이션에서는 건물위를 통한 전파 경로를 무시하였기 때문이다. 이러한 오차를 해결하기 위해서는 건물 높이와 지형의 높낮이를 고려한 Database가 시뮬레이션에 적용되어 건물 위로의 전파 진행과 지형의 높낮이에 의한 전파 감쇄를 고려해야 한다. 또 다른 방법으로 여러 외국 발표 논문은 옥외 도심지 가시 영역인 경우의 전파손실을 화상이론(Image Theory)에 의한 Two Ray Model에 의하여 정확히 예측함을 보였다.[8] 그러므로 가시 영역인 경우에 전파손실을 Two Ray Model로 모델링하는 방법도 고려하여야 할 것이다.

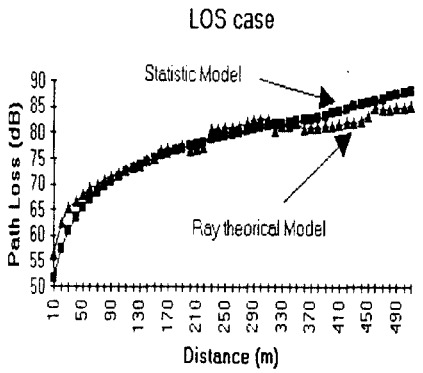


그림 5. 가시 영역의 전파손실 (Break Point 약 380m)
Fig. 5. The Mean Pathloss for Line-of-Sight (Break Point is at 380m)

여러 논문들에 기재된 측정 결과에 의하면 옥외 도심지에 수신기가 비가시 영역에 있을 경우의 전파손실은 가시 영역인 경우보다 매우 크게 나타난다. 특히 가시 영역에서 비가시 영역으로 바뀌는 코너에서는 매우 큰 전파 감쇄가 일어나므로 효과적인 시스템 설계를 위하여는 정확한 전파손실 예측이 필요하다. 코너 이후 지점에서 수신신호는 반사 또는 투과되는 전파보다는 주로 회절되는 전파에 영향을 받음으로 시뮬레이션에서는 코너에서 전파 회절을 고려하기 위하여 GTD 이론을 적용하였다.

일반적으로 코너로부터 10m 이내에 25dB 정도의 전파손실이 생기고 이는 여러 실측을 통해서 이미 확인되었다.[9] 그림 6에서 전파의 회절을 고려하여 코너에 의해 생기는 전파손실 시뮬레이션 결과와 일반적인 실험적 모델 결과를 비교하였다.

그림에서 보듯이 시뮬레이션 결과가 실험적 모델 결과와 비슷함을 알 수 있다. 이는 GTD 이론을 적용한 시뮬레이션이 비가시 영역의 전파손실을 예측할 수 있음을 보인다. 또 전파회절을 고려하지 않은 경우에 송신기에 대하여 비가시 영역에 있는 교차로와 건물 블록에서는 전파손실 결과가 실측에 크게 벗어남을 확인할 수 있었

www.dbpia.co.kr

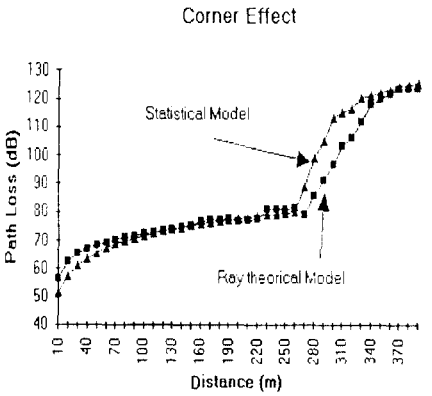


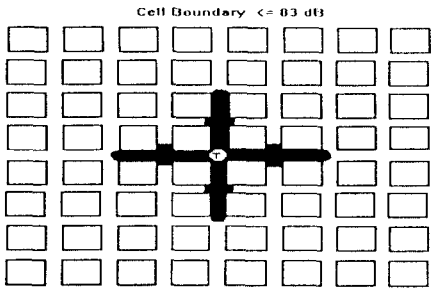
그림 6. 코너에서의 전파손실
Fig. 6. The Mean Pathloss on the Corner

다. 그러므로 비가시 영역에서 전파의 회절은 중요하게 고려되어야 할 전자파 전파 특성 중의 하나임을 확인할 수 있었다.

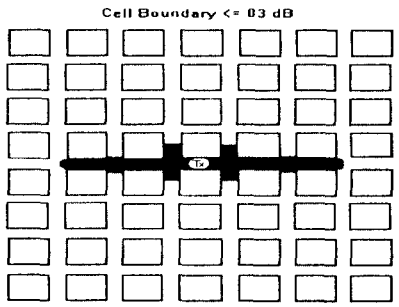
그림 7은 송신기 위치를 달리하여 셀 경계에서 전파 손실을 83 dB로 가정하여 옥외에서의 셀 모양을 예측한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 송신기에 대해 가시 영역인 경우는 셀 경계가 송신기에서 상당히 먼거리에 있고 비가시 영역인 경우는 건물 형태에 따라 셀의 모양이 달라짐을 알 수 있다. 또 그림 a와 b를 비교하여 보듯이 송신기에 대한 건물 블럭의 상대적인 위치에 따라 셀 모양이 크게 달라짐을 알 수 있다. 그러나 공통적으로 시뮬레이션에 적용한 모델에서의 셀 모양은 송신기에 대해 가시 영역인 경우는 직선으로 비가시 영역인 경우는 마름모 형태로 나타내어짐을 알 수 있다. 그러므로 시스템 설계시 가시 영역과 비가시 영역 두 부분을 고려하여 셀을 배치하여야 한다. 가시 영역인 경우는 신호의 간섭때문에 같은 주파수를 사용하는 셀을 상당히 먼 거리에 배치하며, 비가시 영역인 경우는 주파수 사용 효율을 높이기 위하여 마름모 형태의 셀을 가시 영역에 비하여 가까운 거리를 두고 배치하여야 한다.

5.2 옥내 마이크로셀 시스템의 시뮬레이션 결과

옥내인 경우는 실제 측정 실험이 이루어진 서강대학교 K관 건물을 시뮬레이션에 적용하였다. 그림 8에서 보듯이 서강대학교 K관 건물은 가로 105m×세로35m 넓이를 가지며 지하 1층, 지상 5층의 콘크리트 구조물이다. 건물 주위 10m 거리에 인접된 건물이 있으며 인접 건물의 높이로 볼 때 인접 건물의 반사로 인한 전파 영향을 크게 고려하지 않아도 된다. 건물내 천장의 높이는 지하 4m 이고 지상은 3m이다. 중앙 복도는 4m~4.3m 의 넓이를 가지며 중앙 복도를 따라 평균 9.6m×9m 넓이의 방들이 위치한다. 각 방들의 내벽은 콘크리트와 철문으로 이루어져 있고 외벽은 창문과 콘크리트로 이루어져 있다. 방안에는 평균 0.5m 높이의 책상들이 놓여 있고 이것은 전파 진행을 차단하지 않으리라 예상하여 시뮬레이션에서는 건물에 대한 Database는 고려하지 않았다. 하지만 이러한 부분이 방안에서 측정 결과와 예측 결과



(a) 송신기가 교차로에 위치한 경우
(a) In Case That Base Station is Located at the Intersection



(b) 송신기가 건물블럭 중간에 위치한 경우
(b) In Case That Base Station is Located at the Middle of a Block

그림 7. 셀 경계 전파손실 83 dB인 예측한 셀 모양
Fig. 7. The Predicted Cell Shape That the Pathloss at Cell Boundary is 83dB

www.dbpia.co.kr

사이의 오차에 영향을 주리라 예상할 수 있다.

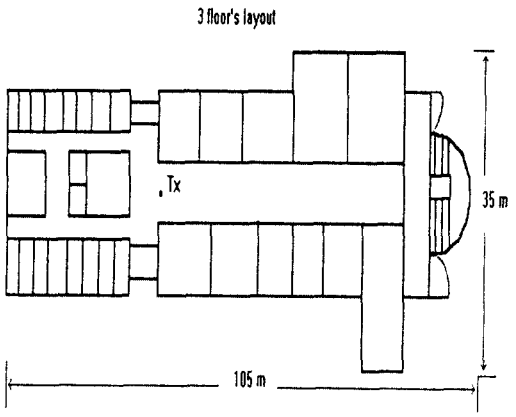


그림 8. 시뮬레이션에 적용한 서강대 K관 3층 평면도
Fig. 8. The Layout of K Hall's 3rd Floor in Sogang Univ

옥내 3층에 위치한 송신기에 대해 가시 영역인 중앙 복도에서의 전파손실 시뮬레이션 결과는 아래 그림 9에서 보듯이 측정 결과와 다소간의 오차를 보이지만 거리에 따라 비슷한 전파손실 기울기를 가짐을 알 수 있다. 3층 중앙 복도에서의 실측 결과는 복도가 마치 Wave Guide와 같은 역할을 함으로써 자유공간 전파손실인 20dB/dec 보다 더 작은 거리에 따라 14dB/dec 기울기와 3.97dB의 표준편차를 나타내었다. 이와 유사하게 시뮬레이션 결과는 15dB/dec의 기울기와 2.1dB의 표준편차를 나타내었다. 실측 결과에 대한 예측 결과의 RMS Error는 3.17dB로 이러한 오차 원인은 건물 벽의 표면이 고르지 않은 점과 천장에 있는 전파를 산란시키는 많은 부착물 때문으로 추정할 수 있다. 그러므로 이러한 복도 바닥과 천장에 산재하는 전파 차단물에 대한 고려는 정확한 예측을 위해서는 추가되어야 할 것이다.

송신기와 같은 층의 비가시 영역인 3층 옆 복도(참조 : 그림 8에 K관 3층 평면도)에서의 전파손실 예측값과 실측값을 그림 10에 도시하였다. 그림에서 보듯이 예측값과 실측값이 유사하며 실측값에 대하여 예측값이 8.7 dB RMS Error를 나타낸다. 이러한 오차의 원인은 중앙 복도와 마찬가지로 건물 벽면이 고르지 않은 점과 천장에 있는 전파를 산란시키는 많은 부착물때문으로 추정할 수 있다. 위에서 살펴본 가시 영역과 비가시 영

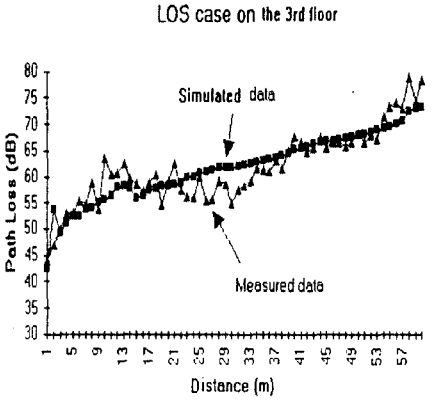


그림 9. 가시 영역에서의 전파손실(3층 중앙복도)
Fig. 9. The Pathloss for Line-of-Sight(At the Main Corridor on the 3rd Floor)

역에서의 예측 결과에 대한 검증은 송신기가 위치한 층에서의 전파손실을 시뮬레이션을 통하여 3.0~9.0 dB 오차를 가지고 예측할 수 있음을 보여주었다.

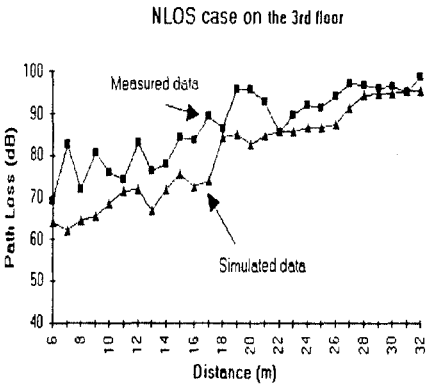


그림10. 비가시 영역에서의 전파손실 (3층 인접 복도)
Fig. 10. The Pathloss for Non-Line-of-Sight(At the Side Corridor on the 3rd Floor)

송신기가 3층 중앙 복도에 위치하였을 때 4층 중앙 복도에서의 전파손실 예측 결과와 실측 결과를 그림 11에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 송신기에 가까운 지점은 어느 정도 예측 결과가 실측 결과에 가까워지다가 30 m 이후에는 많은 오차를 보였다. 실측 결과에 대한 예측 결과의 RMS Error는 14.5dB 이다.

www.dbpia.co.kr

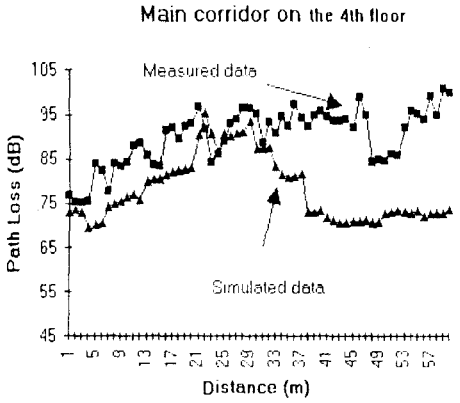


그림11. 4층 중앙 복도에서 전파손실(송신기 3층 위치)
Fig. 11. The Pathloss at the Main Corridor on the 4th Floor(the Base Station is Located on the 3rd Floor)

또 송신기가 3층에 위치한 경우에 4층 옆 복도에서 전파손실 예측 결과와 실측 결과를 그림 12에 도시하였다. 4층 중앙 복도와 마찬가지로 15.5dB RMS Error를 가졌다. 4층에서의 두가지 결과를 살펴볼 때 4층에서의 시뮬레이션을 통한 예측 결과가 실측 결과에 비하여 15dB 정도 RMS Error를 가지므로 시뮬레이션에 대한 많은 수정. 보완이 필요하다. 오차 원인으로는 다음 몇 가지를 생각할 수 있다. 먼저 층에 의한 투과손실 실측 결과를 분석하여 보면 평균 25.1dB 결과를 가진다. 그러나 시뮬레이션에는 외국 실험 측정 결과인 15dB 층간의 투과손실을 적용하였고 벽의 두께에 따른 투과손실의 변화도 고려하지 않았다. 그러므로 이러한 차이를 시뮬레이션 결과에 고려하여야 할 것이다. 또 다른 오차의 원인으로는 앞에서 살펴본 Fresnel 공식을 통한 반사계수의 오차를 들 수 있다. 정확한 반사 계수를 시뮬레이션에 고려하기 위하여는 Fresnel 공식에서 Horizontal Polarization 경우에 대한 수정이 필요하다. 3차원 안테나 패턴 또한 예측 결과의 오차로 영향을 미친다. 그러므로 정확한 안테나 패턴에 대한 정보가 시뮬레이션에 적용되어야 할 것이다.

그림 13의 (a)는 K관 3층에서 전파손실 89dB를 경계로 하는 셀 모양을 실측 결과에 의해 도시한 그림이고 (b)는 동일한 셀 모양을 시뮬레이션을 이용하여 예측한 결과이다. 두 그림은 송신기가 설치된 3층에서의 셀 모양은 Ray Tracing 방법을 사용한 시뮬레이션을 이용

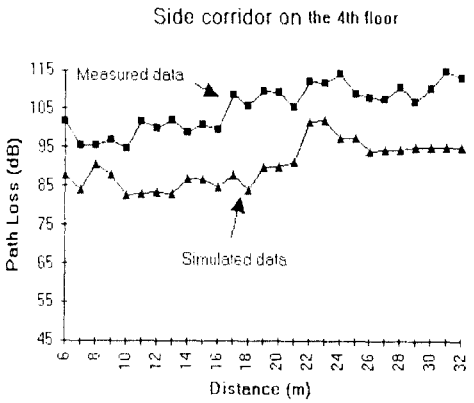
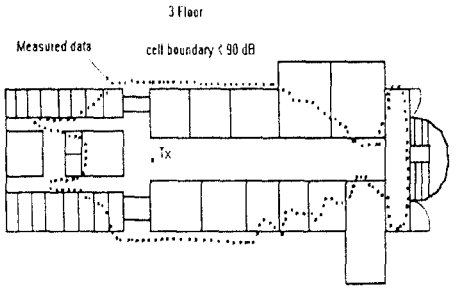
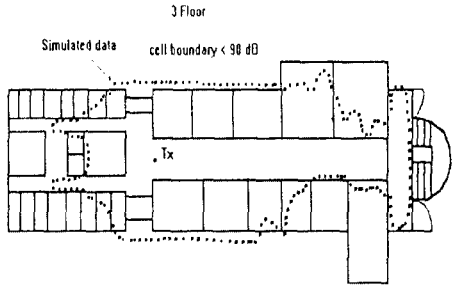


그림12. 4층 옆 복도에 전파손실 (송신기 3층 위치)
Fig. 12. The Pathloss at the Side Corridor on the 4th Floor(The Base Station is Located on the 3rd Floor)

하여 거의 정확하게 예측할 수 있는 것을 보인다. 또 그림에서 알 수 있듯이 옥내에서는 셀 모양이 매우 불규칙한 모양을 가지게 되며 송신기 위치와 건물 내부 구조물



(a) 측정 결과에 근거한 셀 모양
(a) The Cell Shape Based on Measured Data



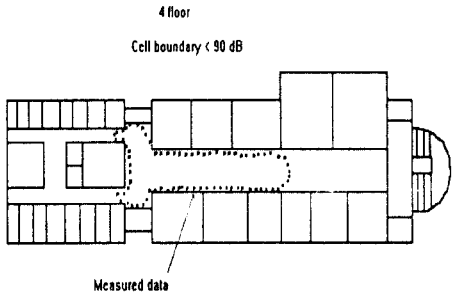
(b) 예측 결과에 근거한 셀 모양
(b) The Cell Shape Based on Simulated Data

그림 13. 셀 경계에 전파손실 89dB인 셀 모양(3층)
Fig. 13. The Cell Shape That the Pathloss at Cell Boundary is 89dB(on the 3rd Floor)

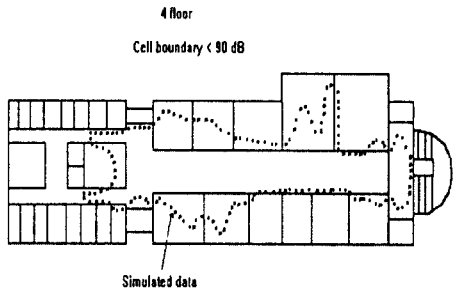
www.dbpia.co.kr

에 의해 크게 변하게 됨을 보여준다. 그러므로 옥내에서 정확한 셀 모양 예측을 위해서는 송신기 위치와 건물 내부 구조가 함께 고려되어야 한다. 이러한 불규칙한 셀 모양은 시스템 설계시 하나의 기지국에 대한 서비스 지역의 결정과 주파수 재사용을 위한 기지국 배치에 어려움을 주게 된다. 그러므로 특정한 건물 형태와 기지국 위치에 대하여 정확하게 서비스 지역을 예측할 수 있는 Ray Tracing 전파모델이 옥내 시스템 설계를 위해서는 효율적이다.

송신기가 3층에 위치한 경우에 4층에서 셀 경계에서의 전파손실이 89 dB 인 실측 결과에 의해 도시한 셀 모양 (a)과 시뮬레이션 예측 결과에 의해 도시한 셀 모양 (b)을 그림 14에 도시하였다. 두 그림을 비교하여 보면 4층인 경우는 셀의 모양 예측 결과와 실측 결과 사이에 많은 차이를 나타낸다. 이는 앞의 그림 11과 12에서 이미 예상된 결과이다.



(a) 측정 결과에 근거한 셀 모양
(a) The Cell Shape Based on Measured Data

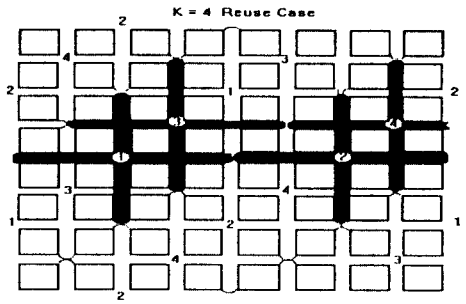


(b) 예측 결과에 근거한 셀 모양
(b) The Cell Shape Based on Simulated Data

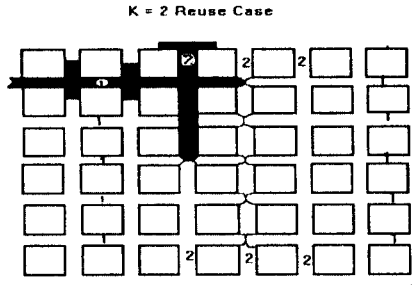
그림 14. 셀 경계에 전파손실 89dB인 셀 모양(4층)
Fig. 14. The Cell Shape That the Pathloss at Cell Boundary is 89dB(on the 4th Floor)

Ⅵ. 시뮬레이터를 이용한 신호대 간섭비(C/I) 예측

적은 수의 기지국으로 통신이 안되는 지역 없이 좋은 품질의 서비스를 제공하기 위하여 Ray Tarcing을 적용한 시뮬레이션을 이용하여 주파수 재사용 패턴에 따른 신호대 간섭비를 예측하였다. 도심지 형태를 맨하탄 모델로 가정하고 아래 그림 15와 같이 기지국과 사용 주파수를 배치하였다. 각각의 경우는 DECT(Digital European Cordless Telecommunications) Spec에 근거, 일정한 셀 모양을 가질 수 있도록 셀 경계에서의 전파손실이 83 dB로 가정하였다. (a)는 기지국이 교차로에 위치하였고 주파수 재사용 패턴 K=4인 경우이고 (b)는 기지국이 건물 블럭의 중간에 위치하였고 주파수 재사용 패턴 K=2인 경우이다.



(a) 주파수 재사용이 4인 경우
(a) Frequency Reuse Pattern is 4



(b) 주파수 재사용이 2인 경우
(b) Frequency Reuse Pattern is 2

그림15. 기지국 위치에 대한 셀 모양과 주파수 재사용 패턴
Fig. 15. The Cell Shape and Frequency Reuse Pattern According to the Base Station's Position

각각의 경우 서비스 셀에 10000명의 사용자를

www.dbpia.co.kr

Uniform 하게 발생하였고 각 사용자에 대해 신호대 간섭비를 시뮬레이터를 이용하여 계산하였다. 한가지 방법으로 시스템 성능은 서비스 셀안의 사용자 99%가 만족시키는 최소 신호대 간섭비 (99%-tile C/I)로 나타내어진다. 먼저 주파수 재사용 패턴이 4인 경우에 99%-tile C/I가 3.3 dB이고 주파수 재사용이 2인 경우에 0.13 dB 이다. 일반적인 결과와 일치하듯이 재사용 패턴이 4인 경우가 성능이 좋아짐을 확인할 수 있었다. 시스템이 양질의 통화 품질을 제공하기 위해 요구되는 99%-tile C/I (예 : DECT에서 제안한 11.0 dB)를 만족시키기 위하여는 주파수 재사용 패턴을 크게 하거나 방향성 안테나를 사용하여 섹터로 분할하는 방법을 시스템 설계시 고려하여야 한다.

요구되는 99%-tile C/I를 만족하기 위하여 90°방향성 안테나를 사용하여 4개의 섹터로 분할한 경우에 99%-tile C/I를 시뮬레이션을 통하여 도출하였다. 주파수 재사용 패턴이 4이고 4개의 섹터로 분할한 시스템의 주파수 패턴을 그림 16에 도시하였다. 그림에서 보듯이 가시 영역에서의 간섭을 최소로 줄이기 위하여 가시 영역에서는 동일 주파수의 섹터를 사용하지 않았다.

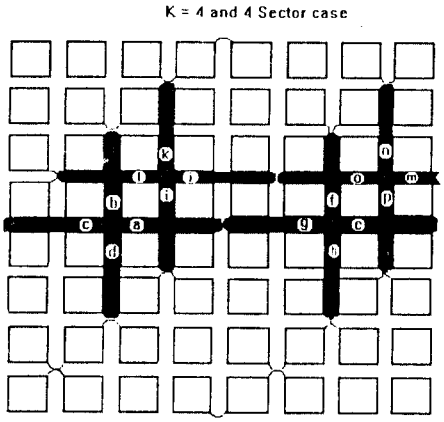


그림16. 재사용 패턴 4와 4 섹터로 분할한 경우
Fig. 16. In Case of Planning 4 Sector and 4 Frequency Reuse Pattern

시뮬레이션에 적용한 90°방향성 안테나는 아래 식 9와 같은 근사식에 의해 2차원 평면에서 안테나 이득이 표현된다.[10]

$$G(\theta) = 1 - \frac{1-b}{(\Pi/3)^2}\theta^2 \quad |\theta| \le \sqrt{\frac{1-a}{1-b}}\frac{\Pi}{3}$$
$$= a \qquad otherwise \tag{9}$$

여기서 a는 Front-to-Back Ratio이고 b는 Sector Crossover를 나타낸다. 시뮬레이션에서는 90°방향성 안테나를 나타내기 위하여 a는 -15 dB, b는 -9 dB 값을 적용하였다.

이 경우에도 위와 마찬가지로 서비스 셀에 10000명의 사용자를 Uniform하게 발생하였고 각 사용자에 대해 신호대 간섭비를 시뮬레이터를 이용하여 계산하였다. 시뮬레이션 결과는 99%-tile C/I가 17.6 dB로 나타났다. 결국 섹터 안테나를 사용함으로써 C/I 값이 크게 개선됨을 알 수 있었다.

신호대 간섭비(C/I) 예측을 위하여 본 연구에서 개발된 시뮬레이션이 매우 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서는 셀의 모양이 그런대로 비슷한 모양으로 나타나는 옥외 시스템의 경우를 예로 사용하였다. 셀의 모양이 매우 불규칙해지는 옥내 시스템의 경우 이 시뮬레이션이 더욱 유용하게 적용될 수 있으리라 기대되며 이 시뮬레이션을 이용하여 옥내에서의 기지국의 배치 등 시스템의 설계를 최적화하는 옥내 셀 설계 기법에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

Ⅶ. 결 론

마이크로셀 환경에서 기존의 통계적 특성을 이용한 전자파 전파 예측 모델과는 달리 Ray Tracing 알고리즘을 이용하여 전자파 전파 예측 모델을 설정하였고 또 송신기의 위치와 건물 특성에 따른 전파손실과 셀 모양을 예측하는 시뮬레이션을 개발하였다.

옥외는 2차원 좌표에서 송신되는 전파경로를 추적하여 옥외 도심지에서의 전파손실과 셀 모양을 예측하였다. 옥내는 3차원 좌표에서 송신되는 전파의 경로를 추적하여 서강대학교 K관 건물 내부에서의 전파손실과 셀 모양을 예측하였다. 시뮬레이션 예측 결과의 검증을 위해서 옥외인 경우는 여러 외국 논문에서 발표되었던 실측 결과의 통계적 특성에 근거한 전파모델의 시뮬레이션 결과를 이용하였다. 옥내인 경우는 시뮬레이션에 적용한

www.dbpia.co.kr

서강대 K관 건물 내부에서 전파손실 측정 실험을 수행하였고 시뮬레이션 예측 결과를 실측 결과와 비교하여 검증하였다.

예측 결과와 실측 결과의 비교를 통하여 Ray Tracing 알고리즘을 이용한 전파 모델이 옥외와 옥내에서 효과적으로 전파손실과 셀 모양을 예측할 수 있음을 확인하였다.

그리고 기지국 배치와 주파수 재사용 패턴 결정 등의 최적화된 시스템 설계를 위하여 옥외인 경우에 제안된 기지국 위치와 셀 모양에 대하여 주파수 재사용 패턴에 따른 신호대 간섭비를 시뮬레이션을 이용하여 예측하였다. 시뮬레이션 예측 결과를 볼 때 주파수 재사용 패턴이 증가할수록 신호대 간섭비가 증가함을 확인할 수 있었고 동일한 주파수를 가시 영역에서 사용하는 경우에 간섭 영향이 매우 큼을 알 수 있었다. 결론적으로 마이크로셀 시스템을 설계할 때 성능을 예측하고 또 설계를 가장 효율적으로 하기 위하여 여기서 개발된 시뮬레이션이 매우 유용하게 사용될 수 있음을 보였다.

참고문헌

1. R. J. C. Bultitude and G. K. Bedal, "Propagation Characteristics on Microcellular Urban Mobile Radio Channels at 910 MHz," IEEE J. Select. Areas Comm., Vol. 7, pp. 31-39, Jan. 1989.
2. S. Y. Seidel, T. S. Rappaport, "900 MHz Path Loss Prediction Models for Wireless Communication in Multifloored Buildings," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 40, No. 2, Feb. 1992, pp. 207-217.
3. J.W. McKown, and R.L. Hamilton, "Ray Tracing as a Design Tool for Radio Networks," IEEE Network Magazine, Vol. 5, No. 6, Nov 1991, pp. 27-30.
4. N.Papadakis, T.Sofos, "Material Characterisation", 44th IEEE Vehicular Technology Conference, Stockholm, June 1994, pp. 1771-1774.
5. S. Jenvey, "Ray Optics Modelling for Indoor Propagation at 1.8GHz", 44th IEEE Vehicular Technology Conference, Stockholm, June 1994, pp. 1750-1753.
6. A. Youssef, J.P. Mon, O. Meynard, "Indoor Wireless Data Systems Channel at 60GHz Modeling by a Ray-tracing Method", 44th IEEE Vehicular Technology Conference, Stockholm, June 1994, pp. 914-154.
7. W. Honcharenko, and H.L. Bertoni, " Mechanism Governing UHF Propagation on Single Floors in Modern Office Buildings, "IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 41, No. 4, November 1992, pp. 496-504.
8. A. J. Rustako, Tr., M. 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, No. 1, Feb. 1991, pp 203-210.
9. H. Boregeon, C. Bergljung, L. J. Olsson, "Outdoor Microcell Measurements at 1700 MHz," 42nd IEEE Vehicular Technology Conference, Denver, May 1992, pp. 927-931.
10. Szu-Wei Wang, Irving Wang, "Effect of Soft Handoff, Frequency Reuse and Non-ideal Antenna Sectorization on CDMA System Capacity," 43rd IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 850-854, May 1993.
11. M. Gudmundson, "Cell Planning in Manhattan Environments," 42nd IEEE VTC, Denver May 1992, pp. 435-438.
12. J.F. Wagen, K. Rizk, "Ray Tracing Based Prediction of Impulse Responses in Urban Microcells", Proceedings IEEE ICUPC'94, San Diego, California, pp. 210-214, 1994.

www.dbpia.co.kr

李 栗 魯 (Youl No Lee) 정회원

1993년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (학사)
1995년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (석사)
1995년 3월~현재 : 한국이동통신 중앙연구원 무선망설계팀

※주관심 분야 : 이동통신

洪 大 亨 (Dae Hyoung Hong) 정회원

1977년 2월 : 서울대학교 공과대학 전자공학과(학사)
1977년 3월~1981년 7월 : 공군사관학교 교수부
1982년 2월 : State University of New York (미국) 전기공학과(석사)
1986년 8월 : State University of New York (미국) 전기공학과(박사)
1986년 6월~1992년 2월 : (미) Motorola 연구소
1992년 3월~현재 : 서강대학교 전자공학과 교수
※주관심 분야 : 이동통신 시스템

www.dbpia.co.kr