

# 8 GHz 대역에서의 마이크로셀용 전파전파 예측 모델 개발

## Development of Microcellular Radio Propagation Prediction Model in the 8 GHz Bands

송 기 홍

Ki-Hong Song

### 요 약

마이크로웨이브 대역은 무선 서비스의 수요가 많은 대역이지만 주로 장거리 고정 통신용으로 이용되어 전파 모델에 대한 연구가 VHF/UHF 대역보다 적게 이루어졌으나, 최근 마이크로웨이브 대역을 이용한 이동 통신 서비스가 증가됨에 따라 보다 정확성 있는 전파 예측 모델의 개발이 요구되어 왔다. 이동 전파 환경에서 신뢰성 있는 전파 예측 모델을 개발하기 위해서는 다양한 전파 환경에서 신호의 반사, 회절 및 산란에 따른 전파 특성에 대한 측정 및 분석이 필요하다. 제시된 8 GHz 대역용 전파 예측 모델은 가시거리 영역과 비가시거리 영역에 맞는 모델을 구분하여 개발된다. 가시거리 영역용 예측 모델은 직접파, 지면 반사파 및 도로 양쪽 건물 반사파에 의한 해석적 결과에 측정된 경로 손실 지수를 적용하여 신호 세기를 예측하고, 비가시거리 영역용 예측 모델은 회절 후 신호 변화 현상에 대한 분석 결과를 이용하여 수신 전력을 예측한다.

### Abstract

Microwave(M/W) bands, though having great demand in wireless services, have been used mostly for long distance communications. As a result, the studies on their mobile radio models have been made less than on VHF/UHF. However, as the mobile communication services with M/W bands have been increasing, the development of a more accurate prediction model of the mobile radio environments has been demanded. The development of a reliable radio prediction model in the mobile radio environments requires the measurement and analysis of the characteristics of the radio waves according to reflection, diffraction and scattering of radio signals in various mobile radio environments. The proposed 8 GHz band radio prediction models have 2 different categories: (1) LOS model and (2) non-LOS model. The LOS model predicts signal strength using the analytic result with measured pathloss exponents for the waves direct and reflected by ground and buildings, and the non-LOS model suggests a prediction model of received power by calculating the signal variations after diffraction.

Key words : M/W Band, Radio Propagation Prediction Model, Ray-Tracing Technique, LOS/non-LOS Model

### I. 서 론

최근 디지털 셀룰러 이동 통신, 개인 휴대 통신뿐만 아니라 무선 랜, 휴대 인터넷 등 무선 통신 서비스가 매우 다양해지면서 전파에 대한 수요 및 무선국 수가 급증하고 있다. 그러나 주파수 자원은 한정

되어 있고, 특히 대부분의 서비스가 VHF/UHF 대역을 선호하기 때문에 이 대역에서의 자원은 다른 어느 대역보다 더욱 부족한 실정이다<sup>[1],[2]</sup>. 따라서 새로운 주파수 대역을 개발하여 신규 서비스를 수용하거나 기존 서비스의 확장에 대비하여야 한다.

마이크로웨이브(M/W) 대역은 VHF/UHF 대역 다

「이 연구는 2005년 한국전자통신연구원 연구 용역을 통해 수행한 연구 결과임.」  
 동의과학대학 정보통신과(Dept. of Information Communication, Dong-Eui Institute of Technology)  
 · 논 문 번 호 : 20061011-126  
 · 수정완료일자 : 2006년 12월 8일

음으로 무선 서비스의 수요가 많은 대역이지만 주로 장거리 고정 통신용으로 사용되어서 전파 모델에 대한 연구가 VHF/UHF 대역보다 적게 이루어져 왔다. 이동 통신 환경에서 신뢰성 있는 M/W 대역용 전파 예측 모델을 개발하기 위해서는 다양한 전파 환경에서 신호의 반사, 회절 및 산란 특성 등에 대하여 측정 및 분석하는 것이 필요하나 마이크로웨이브 대역에서의 측정 예는 매우 드물다.

마이크로웨이브 대역용 전파 예측 모델 개발을 위한 8 GHz 대역에 대한 전파 측정은 측정 시스템이 설치된 차량을 이용하여 이동 측정을 수행하였는데, 차량 이동에 따른 도플러 효과를 최소화하고 많은 측정 데이터를 확보할 수 있도록 4 km/h 이하의 속도로 저속 운행하면서 정밀한 측정을 수행하였으며, 측정 위치에 대한 정밀도를 높이기 위해 DGPS를 사용하여 좌표를 획득하였다. 측정 결과의 분석은 측정을 통해 획득한 실측 데이터를 모폴로지별, 경로별로 LOS(Line-Of-Sight)/NLOS(Non Line-Of-Sight) 환경에서의 이격거리에 따른 전계 레벨의 분포를 분석하고, 기존 전파 예측 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와의 비교 작업을 수행하였다.

기존의 M/W 대역용 전파 예측 모델은 변곡점(breakpoint) 전후에서의 경로 손실 지수를 이용한 경로 손실 예측 모델로서<sup>[3],[4]</sup> 경로 손실뿐만 아니라 페이딩 현상을 예측하고자 하는 제안 모델과는 차이가 있다. 즉, 제안 전파 예측 모델은 이동체 주변 환경에 따른 신호 변화 현상을 고려하기 위한 모델로서 가시거리 영역과 비가시거리 영역에서의 모델로 구분하여 개발하였다. 가시거리 영역용 예측 모델은 직접파, 지면 반사파 및 도로 양쪽 건물 반사파들에 의한 신호 세기를 계산하는 해석적 방법에 측정된 경로손실 지수를 적용한 모델이며, 비가시거리 영역용 예측 모델은 반사 및 회절 현상을 수식화하였으며, 특히 회절 후 신호 변화 현상을 수식화한 수신 전력 예측 방법을 제시하였다.

## II. 이동 통신 전파 환경

일반적으로 이동 통신 환경에서는 기지국과 이동 중인 이동체 사이에 무선 통신 채널이 형성되며, 이동체와 기지국 사이의 통신 신호는 직접파, 건물과

지형에 의한 반사, 회절, 투과 및 산란 현상에 의해 생성되는 다중 경로를 통해 전달된다<sup>[5],[6]</sup>.

이동 통신 신호의 전파 전파 특성은 해당 신호의 주파수뿐 아니라 전파되는 지역의 물리적 환경에 크게 영향을 받는다. 기지국에서 송신된 전파 신호는 높이가 낮은 이동체 안테나에 도달하는 동안 대기층에서의 전파 현상에 의한 경로 손실뿐 아니라 지형 구조에 따른 신호 감쇄 효과를 동시에 겪는다. 이러한 손실은 자유 공간 경로 손실과 결합된 새로운 전파 경로 손실을 유발할 뿐 아니라, 여러 가지 형태의 산란 및 다중 경로 현상에 의해 특성이 변하는 페이딩 현상을 겪는다. 장애물에 의해 발생하는 반사, 회절 및 산란 특성 등 전파 특성 파라미터는 이동 전파 신호를 형성하는 데 있어서 매우 중요한 역할을 담당한다.

그림 1은 장애물 주위에서 수신되는 전파의 종류에 따라 세 가지 영역으로 분류한 것이다. 그림에서 신호원에 대하여 장애물 표면에서 반사파가 차단되는 경계면을 나타내는 RSB(Reflection Shadow Boundary)까지의 영역인 가시거리 영역 I은 직접파, 반사파 및 회절파 등 모든 전파가 도래하는 영역으로서 가장 양호한 신호를 수신할 수 있으며, RSB에서 직접파 차단 경계면(ISB: Incident Shadow Boundary)까지의 영역인 영역 II는 직접파와 회절파가 도래하는 영역이다.

ISB에서 경계면까지의 영역인 영역 III은 회절파만 도래하는 영역으로서 가장 약한 신호가 수신되는

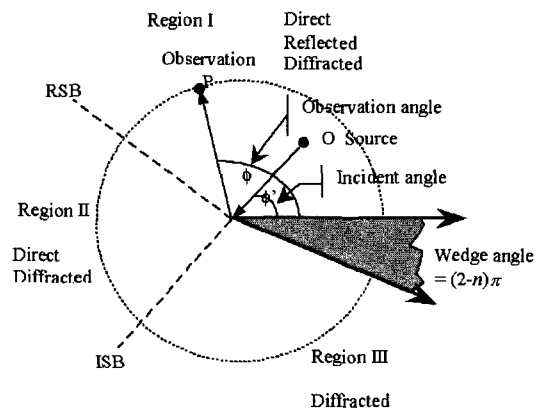


그림 1. 장애물 주변 도달 전파 신호의 분류  
Fig. 1. Classification of received radio signal around clutter.

영역이다. 이러한 도달 특성은 송수신기 주변의 전파 환경과 같으므로 전파 환경에 따른 도달 신호의 종류와 신호 세기를 예측할 수 있다.

### Ⅲ. 8 GHz대 전파 신호 측정

#### 3-1 8 GHz 대역 전파 측정 시스템 구성

통신 정보량뿐만 아니라 서비스 영역의 크기가 다양해짐에 따라 정보량에 따른 서비스 영역을 정확하게 예측할 수 있는 예측 모델의 개발이 필수적이다. 이를 위해서는 실제 전파 신호를 측정하고 분석한 결과를 이용하여 기존의 모델을 보완하거나 해석적 모델에 측정 데이터 분석 결과를 더한 새로운 실험식이 개발되어야 한다. 따라서 정확한 예측 모델의 개발을 위해서는 무엇보다도 정확한 전파 신호를 측정할 수 있는 신뢰성 있는 측정 시스템의 구성이 요구된다.

전계 강도 측정 시스템은 크게 송신부와 수신부로 구성되어 있다. 송신부는 원하는 주파수에서 CW(Continuous Wave)신호를 발생시킬 수 있는 신호 발생기와 신호 발생기의 출력을 보다 크게 증폭하기 위한 증폭기, 그리고 측정 대역에서 이용 가능한 송신 안테나용 혼(horn) 안테나로 구성되어 있으며, 안테나를 약 9 m까지의 높이로 조절하여 전파를 송신하도록 하는 안테나 마스트(antenna mast)로 이루어져 있다.

수신부는 임의의 위치에서 8 GHz 대역 전파 신호의 spectrum을 측정하기 위한 시스템으로 다음과 같이 구성하였다. 즉, 미약한 전파 신호를 수신하기 위하여 50 dB 이득의 저잡음 증폭기(LNA)를 사용하였으며, 전파 신호의 스펙트럼을 측정할 수 있는 spectrum analyzer, 보다 정확하게 측정 지점의 위치를 파악하기 위한 DGPS, GPIB를 이용하여 전파 신호의 레벨을 저장하고 제어하기 위한 노트북 PC로 구성되며, GPS 좌표값과 spectrum 관련 데이터를 지도상에 표현하기 위한 GUI 프로그램으로 구축되었다.

#### 3-2 전파 환경별 신호 측정

##### 3-2-1 전파 환경별 분류

8 GHz 대역을 이용한 마이크로셀용 전파 예측 모델을 개발하기 위하여 다양한 전파 환경에서 수신

표 1. 국내 전파 환경별 분류 및 측정 지역

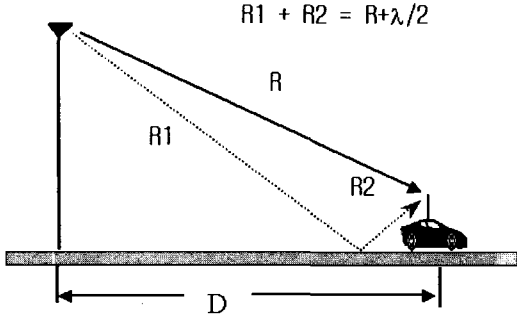
Table 1. Radio environmental classifications and measured area.

대 분류	소 분류	특징	측정 지역
주거 지역	고층 아파트 지역	-10층 이상의 고층 아파트 지역으로 건물 사이의 간격이 넓음 -유사 구조의 건물이 규칙적으로 배치 -기지국 보다 주위 아파트 건물이 높음	부산 화명동
	저층 아파트 지역	-4~10층 정도의 저층 아파트 (연립 주택) 밀집지역 -연립주택 밀집지역은 도로의 폭이 좁고 건물 밀집	부산 반여동 왕자맨션
	저층 주택 지역	-4층 이하의 단독주택 지역	창원 주택가
상업 지역	도심 지역	-10층 이상의 고층 빌딩이 많은 도로를 중심으로 밀집 -낮 시간의 활동인구가 많아서 통신 수요가 가장 많은 지역 -대로 주위 고층건물 뒷편은 4~10층의 저층 건물 형성	부산 서면
	부도심 지역	-10층 이하의 빌딩이 도로를 따라 형성 -대로 주위 건물 뒷편은 2~5층의 저층 건물 형성	부산대 앞
공업 지역	산업 단지 지역	-소규모 또는 대규모 공장들이 분포 -도로가 비교적 직선, 격자형 구조	녹산공단
녹지 지형	개활 지역	-논, 밭, 농장 등이 넓은 지역에 분포되어 있는 평탄한 지역	김해

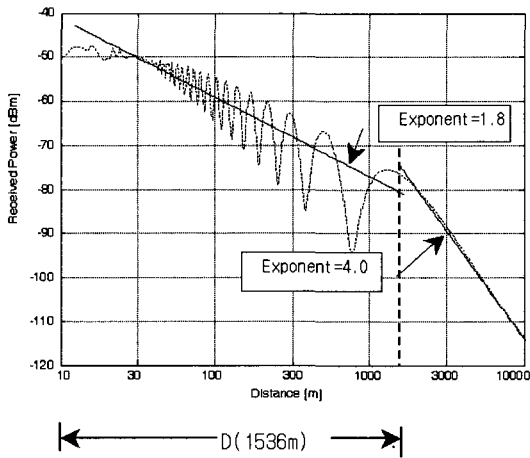
전력 레벨을 측정하고 분석하였다. 표 1은 예측 모델 개발을 위한 도시 구성 환경별 분류 및 특징을 나타낸다. 8 GHz 대역에 대한 전파 측정은 표 1과 같이 4개의 대분류 및 8개의 소분류로 분류된 특징에 맞는 국내 전파 환경에 대한 지역을 선정하여 수행하였다<sup>[7],[8]</sup>.

##### 3-2-2 서비스 영역 및 수신 전력 레벨 측정

그림 2(b)는 그림 2(a)와 같은 전파 환경에서 직접파와 지면 반사파의 합에 의해 만들어지는 신호에 대한 수신 전력을 나타낸 그림으로서 송신 안테나 높이가 9 m, 수신 안테나 높이가 1.5 m이고 주파수가



(a) 직접파와 지면 반사파에 의한 전파 신호 수신  
 (a) Received signal by the direct and ground reflected waves



(b) 변곡점 거리 산출  
 (b) Calculation of breakpoint distance

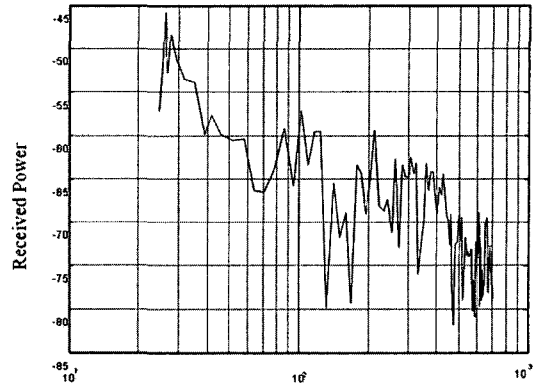
그림 2. 직접파와 지면 반사파에 의한 수신 신호 세기 변화

Fig. 2. Received signal fluctuation by the direct and ground reflected waves.

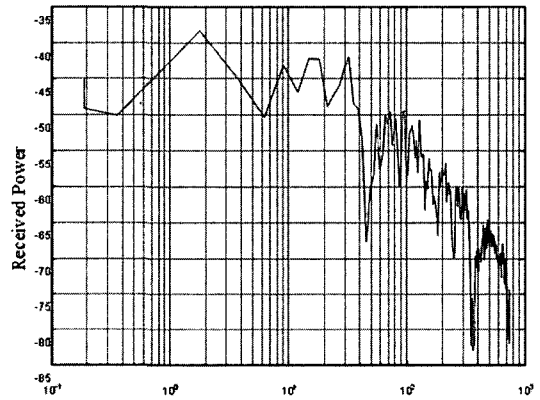
8 GHz일 때 전파 경로 추적 방법(ray-tracing Technique: RTT)에 의한 시뮬레이션 결과이다<sup>[9],[10]</sup>.

이 경우, 변곡점 거리는 1536 m가 되며 변곡점 전후에서 경로 손실 지수가 약 2에서 4로 급격하게 변하는 것을 볼 수 있다. 변곡점 거리(D)는 지면이 첫 번째 프레넬 영역(first Fresnel zone)을 차단하기 시작할 때의 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 거리를 말한다. 마이크로파 대역을 이용한 이동 통신 시스템에서의 서비스 영역은 일반적으로 변곡점 이내로 정한다<sup>[9],[10]</sup>.

그림 3은 각 전파 환경별 측정 결과를 나타낸다. 측정 데이터의 변화 특성을 파악하기 위한 송수신



(a) 도심 지역(서면)  
 (a) Urban area(Seomun)



(b) 개활 지역(김해)  
 (b) Open area(GimHae)

그림 3. 전파 환경별 측정 결과  
 Fig. 3. Measured data to the radio environments.

이격 거리는 변곡점 이내인 약 1 km 내외로서 대부분의 측정 결과들이 이 구간 내에서 이루어진다. 측정은 도심지역, 고층아파트 지역 등 표 1에 나타난 환경에 대하여 안테나 높이 등을 변화시키면서 전파 특성을 측정하고 분석한다. 이 때 수신 안테나 높이는 1.5 m이다.

그림에서 도심 지역에서의 측정 결과가 평야 지역에서의 측정 결과에 비해 급격한 신호 변화 현상이 심하게 일어나는 것을 볼 수 있다.

#### IV. 측정 결과 분석 및 고찰

##### 4-1 경로 손실 지수

표 1에 나타난 측정 환경의 분류 지역에 따라 수

표 2. 측정 환경별 경로 손실 지수

Table 2. Pathloss exponents to the radio environments.

구분	고층 아파트	저층 아파트	단독 주택	도심	부도심	공단	평지
경로 손실 지수	2.1	1.8	2.0	1.8	1.8	2.2	2.0

신 신호 세기를 측정하였으며, 경로 손실 측정을 위한 송 수신 안테나 높이는 각각 9 m, 1.5 m로서 경로 손실 지수가 크게 차이가 나는 프레넬 변곡점(Fresnel break distance) 거리가 약 1,536 m이며, 대부분의 측정 거리는 약 800 m 근처로서 변곡점 거리 이내에서 이루어므로 경로 손실 지수는 약 2가 된다. 표 2는 측정 데이터의 경로 손실 분석 결과를 나타낸다.

#### 4.2 지면 반사파 효과 및 지면 형태별 신호 특성

마이크로셀에서는 가시거리 영역 내에서의 통신이 빈번하고 안테나 높이가 낮기 때문에 직접파 및 지면 반사파의 영향을 많이 받는다. 이러한 특성은 경로 손실 기울기가 주변 구조물에 의한 다중 경로 반사파보다는 직접파 및 지면 반사파에 크게 영향을 받는 것을 의미하므로 지면 반사파가 수신 전력에 미치는 효과를 정확하게 분석하여 예측 모델에 적용하는 것이 중요하다<sup>[11]</sup>.

지면 특성에 의한 신호 변화 현상을 파악하기 위하여 아스팔트, 시멘트, 흙 및 잔디로 이루어진 지면에서 측정을 수행하였다. 그림 4는 각 지면의 종류에 따른 수신 신호 세기를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 신호 세기의 변화는 지면이 깨끗하고 딱딱할수록 변화가 크게 나타난다. 즉, 수신 신호 세기의 평균치는 유사하나 페이드 폭이 큰 차이를 가지며, 변화폭은 표 3과 같다.

#### 4.3 건물 모서리에서의 회절 특성

도심지 마이크로셀에서의 회절 현상은 기지국 안테나가 주위의 건물 높이가 유사하고 이동체 안테나가 높이가 매우 낮기 때문에 건물 옥상 모서리에 의한 회절보다는 건물 측면 모서리에서의 회절 현상

표 3. 지면 형태에 따른 페이드폭

Table 3. Fade depth to the ground types.

지면종류	페이드 폭[dB]	지면 종류	페이드 폭[dB]
아스팔트	13	흙	10
시멘트	13	잔디	8

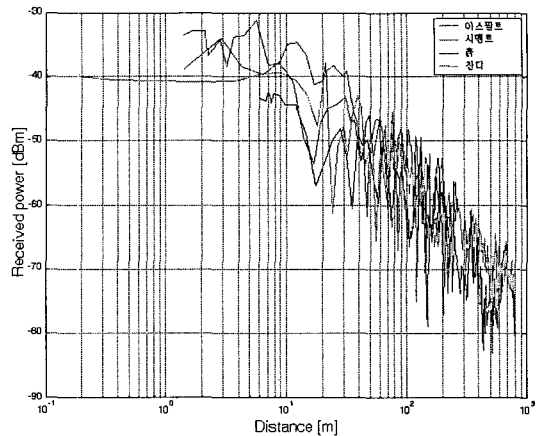


그림 4. 지면의 종류에 따른 수신 신호 특성

Fig. 4. Received signal characteristics according to the ground types.

이 우세하다<sup>[11]</sup>.

그림 5에서 수신 신호 세기의 분포는 회절점 이후에서 급격히 떨어진다. 즉, 수신기가 회절점을 통과한 후의 신호 세기는 이전의 신호 세기에 비해 매우 큰 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이것은 수신기가 회절점을 통과한 후에는 직접파와 반사파는 대부분 차단되고, 회절파만 신호 세기에 영향을 주기 때문이다.

그림 6은 측정 결과와 RTT 방법을 이용한 예측 결과를 비교한 그림이다. 그림에서 측정 결과와 전파 경로 추적 방법에 의한 예측 결과를 보면 가시거리 영역에서는 두 경우 모두 유사한 신호 세기의 변화를 가지나, 비가시거리 영역에서는 차이가 생기는 것을 볼 수 있다. 즉 예측 결과는 회절점 전후의 신호 세기 차가 약 40 dB가 생기나 측정 데이터는 약 20 dB의 차가 발생한다. 이것은 예측시 반사파와 회절파만 고려하였으나, 실제 환경에서는 반사파와 회절파뿐만 아니라 건물 침투에 의한 투과파, 옥상 회절파, 산란파 등 무수히 많은 전파가 수신기에 도

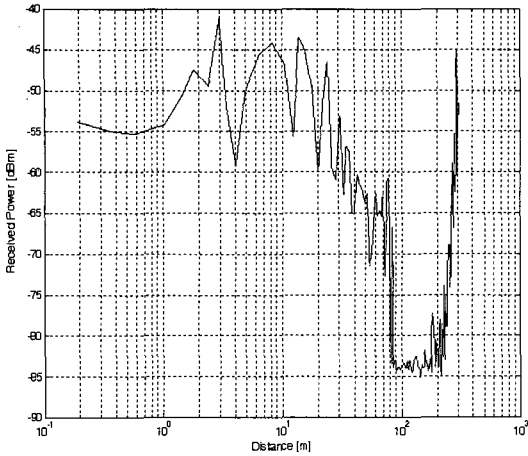


그림 5. 아파트 모서리에서의 측정 결과  
Fig. 5. Measured data at the angle of the apartment.

달하여 신호 세기에 영향을 미치기 때문이다. 또한 수신기의 수신 임계치가  $-115$  dBm으로서 그 이하의 신호 세기는 측정이 불가능하기 때문에 두 경우 모두 임계치 근처에서 신호 세기가 머물러 있는 것을 볼 수 있다.

측정 결과에서 회절점 전후의 수신 전력을 비교해 보면 회절점 이전의 가시거리 영역에서는 주파수가 두 배 증가할 때 신호 세기는 약 6 dB 감소하나, 비가시거리 영역인 회절점 이후의 영역에서는 9 dB 감소하며, 회절점 전후에서 신호 세기는 약 40 dB 정도 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

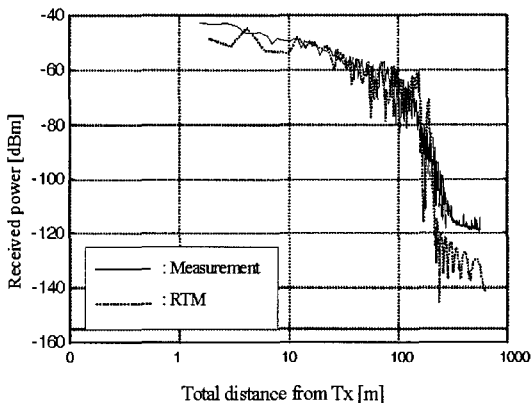


그림 6. 150 m 지점의 회절점에 의한 수신 전력 분포  
Fig. 6. Received power at the 150 m diffraction point aparted from the transmitter.

## V. 8 GHz 대역용 전파 예측 모델 개발

기존의 M/W용 전파 예측 모델은 변곡점 전후에서의 경로 손실 기율기에 대한 측정 결과를 이용하여 경로 손실치를 예측하는 경로 손실 예측 모델로서 송수신기 주변 환경에서의 신호 변화 현상을 예측하기 곤란하다<sup>[3],[4]</sup>.

제안 모델은 송수신기 주변 환경에 의한 신호 변화 현상을 예측하기 위한 모델로서 전파 환경의 특성에 따라 가시거리 영역에서의 모델과 비가시거리 영역에서의 모델로 구분하여 개발하였다. 즉, 직접파, 지면 반사파, 안테나 높이에 의한 신호 변화 및 도로 양쪽에 위치한 건물들에 의한 반사파가 주요 영향 요소가 되는 가시거리 영역에서의 전파 예측 모델과 회절 후 직접파, 지면 반사파 및 도로 옆 건물 측면 반사파가 주요 요소가 되는 비가시거리 영역에서의 예측 모델로 구분하여 개발한다. 비가시거리 영역에서 안테나 높이의 변화는 수신 전력에 거의 영향을 미치지 않으므로 고려하지 않는다.

### 5-1 가시거리 영역에서의 전파 예측 모델

#### 5-1-1 직접파와 지면반사파에 의한 수신 전력 예측

마이크로셀 환경에서의 수신 전력은 주변 환경에 의해 수많은 다중 경로 파들이 서로 더해진 형태로 구성된다. 이 중 가시거리 영역에서 다중 경로파에 의한 페이딩 신호는 직접파외에 지면 반사파와 도로 양쪽 건물에 의한 반사파에 의해 생성되며 신호 세기의 변화가 빠르게 변하지만, 페이딩 신호의 변화 특성은 직접파와 지면 반사파에 의한 결과 신호를 잘 따라 가므로 마이크로셀 영역에서의 수신 전력 예측 모델을 개발하는 데 있어서 직접파와 지면 반사파에 의한 예측 모델을 기본으로 하고 도로 양쪽 건물 반사파의 영향을 포함한다<sup>[9],[10]</sup>.

가시거리 영역에서 직접파와 지면 반사파에 의한 수신 전력은 식 (1)과 같다.

$$P_r = 10 \log \left[ \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{P_t G_b G_m}{d^n} |1 + \Gamma_{v,h} d^{j\beta\Delta} d^2| \right] \quad (1)$$

여기서  $P_r$ 은 직접파와 지면 반사파와의 간섭에 따른 공간에서의 수신 신호 전력을 뜻하고,  $d$ 는 송수신기

간 거리[m],  $n$ 은 이동체 주변의 환경적 특성에 따른 경로 손실 지수로서 표 2에 나타난 결과를 이용한다.  $P_t$ 는 송신 전력[W],  $G_b$ 는 기지국 안테나 이득,  $G_m$ 은 이동체 안테나 이득을 나타낸다. 또한  $\Gamma_{v,h}$ 는 지면 반사 계수로서  $\Gamma_v$ 는 수직 편파에 대한 반사 계수,  $\Gamma_h$ 는 수평 편파에 대한 반사 계수를 나타낸다.  $\beta\Delta d$ 는 직접파와 지면 반사파 사이의 위상 차이이며,  $\Delta d$ 는 직접파와 지면 반사파 사이의 거리 차,  $\beta(=2\pi/\lambda)$ 는 전파 상수(wave number)를 뜻한다. 식 (1)에서 직접 파 도달 거리와 지면 반사파 도달 거리의 차를 나타내는  $\Delta d$ 는 다음과 같다.

$$\Delta d = \sqrt{d^2 + (h_t + h_m)^2} - \sqrt{d^2 + (h_t - h_m)^2} \approx \frac{2h_t h_m}{d} \quad (2)$$

여기서  $d \gg (h_t + h_m)$ 이라고 가정한다. 그러므로

$$\beta\Delta d = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{2h_t h_m}{d} \quad (3)$$

이 된다.

식 (1)에서 계산을 보다 용이하게 하기 위하여 다음과 같은 형태로 변환한다.

$$P_{Los}(d) = 10 \log \left[ \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{P_t G_b G_m}{d^2} \cdot F_{mf} \right] \quad (4)$$

여기서  $F_{mf}$ 는 직접파와 지면 반사파에 의해 발생하는 페이딩 신호의 변화량을 나타낸다. 식 (1)과 식 (4)를 비교하면 식 (4)의  $F_{mf}$ 는 식 (5)와 같이 표현되며, 계산의 편의를 위해 근사화 시키면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{mf} = |1 + \Gamma_{v,h} e^{j\beta(\Delta d)}|^2 \quad (5)$$

$$F_{mf} \approx \left| 1 + \Gamma_{v,h} \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2h_t h_m}{d} \right) \right|^2 \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에서 반사 계수  $\Gamma_{v,h}$ 는 매질로의 입사각, 전도도 및 유전체 상수를 고려하여 얻을 수 있으나 계산의 편의를 위하여 반사 계수를 1로 설정한다. 즉, 지면 재질에 의한 신호 변화량은 무시한다.

### 5-1-2 도로 옆 건물 반사파를 포함한 수신전력 예측

도로 옆 건물군에 의한 수신 전력의 변화를 예측

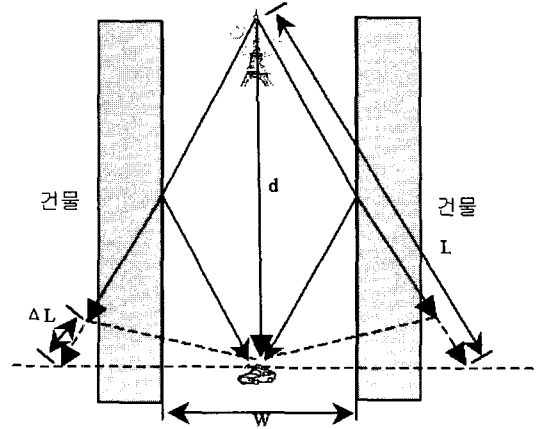


그림 7. 도로 측면 반사파의 전파 거리  
Fig. 7. Propagation distance of the building reflected waves across the street.

모델에 포함하기 위하여 그림 7과 같이 도로 양쪽에 균일하게 건물이 분포한 전파 환경을 가정한다.

그림 7은 기지국으로부터의 전파가 도로 양쪽에 위치한 건물 측면에 부딪쳐 이동체에 수신되는 현상을 나타내는 그림으로서 도로 양쪽의 건물 군에 의한 반사파 계산을 용이하게 하기 위하여 다음과 같은 가정을 적용한다.

- 도로 왼쪽의 건물군에 의한 반사파와 도로 오른쪽 건물군에 의한 반사파의 전파거리는 동일하다.
- 도로 양쪽 건물군의 건물 매질이 동일하다.
- 건물군의 형태는 건물군의 존재 여부와 건물 분포에 따른 밀집율로 나타낸다.

위와 같은 가정을 이용하여 직접파 도달 거리인  $d$ 와 반사파 거리  $L$ 의 거리 차이  $\Delta L$ 을 계산하면 다음과 같다.

$$\Delta L = L - d \approx \sqrt{d^2 + W^2} - d \quad (7)$$

여기서 반사파는 건물에 한번 반사되는 반사파만을 고려한다. 도로 중앙을 중심으로 도로 양쪽 건물에 의한 반사파는 건물의 분포에 따라 다르게 나타난다. 즉 건물들이 도로 양쪽에 잘 배열되어 있는 경우, 2개의 반사파가 수신되며, 도로의 한쪽에만 건물이 있을 경우 1개의 반사파가 발생한다. 이러한 반사파를 식 (1)에 포함하여 나타내면 식 (8)과 같다.

$$P_r = 10 \log \left[ \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{P_t G_b G_m}{d^n} |1 + \Gamma_{v,h} e^{i\beta \Delta d} + D \cdot A \cdot \Gamma_{v,h} e^{i\beta \Delta a}|^2 \right] \quad (8)$$

$$\approx 10 \log \left[ \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{P_t G_b G_m}{d^n} F_{mf} \right]$$

$$F_{mf} \approx \left| 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2h_s h_m}{d} \right) + D \cdot A \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{d^2 + W^2} - d) \right) \right|^2 \quad (9)$$

식 (8)과 (9)의 절대항 속에 있는 3번째 항이 건물 반사파를 나타낸다. 3번째 항의 A는 건물 분포 형태를 나타낸다. 따라서 식 (9)에서 도로 양쪽을 따라 건물이 모두 분포하고 있는 경우에는 A=2가 되며, 도로 한쪽에 건물이 있으면 1이 되고, 건물이 없으면 A=0이 되어 도로 양쪽 건물에 의한 반사파가 생성되지 않는다.

또한 D는 도로 양쪽에 위치한 건물군의 밀집도에 따른 파라미터로서 건물 분포 정도에 따라 0~1 사이에 존재한다. 이상과 같이 가시거리 상태에서의 신호 세기는 직접파, 지면 반사파 및 건물 반사파들의 합으로 구성된 신호 세기를 예측한다.

### 5-1-3 가시거리 영역에서의 수신 전력 예측치와 측정치 비교

#### 5-1-3-1 도로 주변에 건물이 없을 경우(LOS, A=0, D=0)

먼저 송수신기 주변에 장애물이 거의 없는 상태에서의 수신 신호 세기를 비교하기 위한 측정 결과와 예측 결과를 비교한다.

그림 8은 송신 안테나 높이가 9 m, 수신 안테나 높이가 1.5 m이고, 송수신기가 가시거리 경로상에 있으며 도로 주변에 가로수가 일정 간격으로 배치되어 있으나, 건물은 거의 없는 구간에서의 계산 결과이다. 즉, 직접파와 지면 반사파에 의한 예측치와 측정치를 비교한 결과로서 매우 유사한 신호 변화 특성을 가지고 감쇄하는 것을 볼 수 있다. 이 때 경로 손실 지수는 개활 지역에서의 분석치인 2를 적용한다.

그림 9는 송신 안테나 높이를 4.5 m와 9 m로 하여 측정된 결과와 예측치를 비교한 그림이다. 그림에서 두 경우 모두 경로 손실 기율기 및 페이딩 발생 지점 등이 상당히 유사한 형태를 가진다. 즉, 제안 모델의

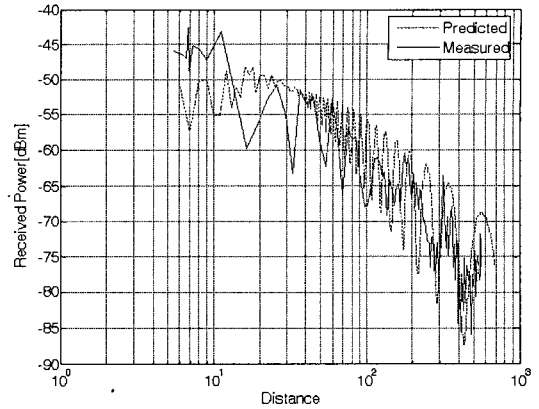
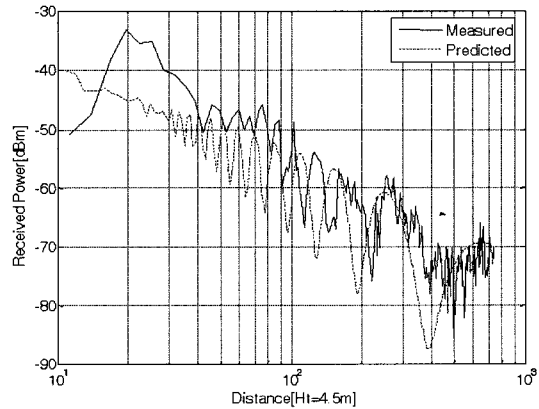
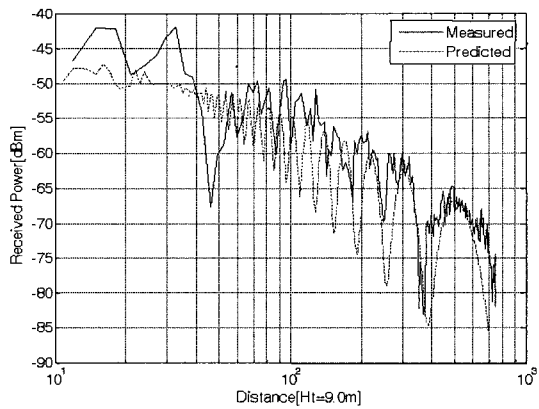


그림 8. 도로 주변에 건물이 없는 가시거리 상태에서의 수신 신호 세기  
Fig. 8. Received signal strength on LOS sight on the street.



(a)  $h_r=4.5$  m



(b)  $h_r=9.0$  m

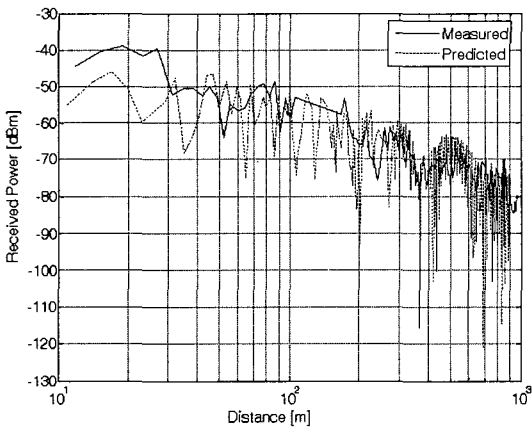
그림 9. 안테나 높이에 따른 예측치와 측정치 비교  
Fig. 9. Comparison between predicted and measured results to the various antenna heights.



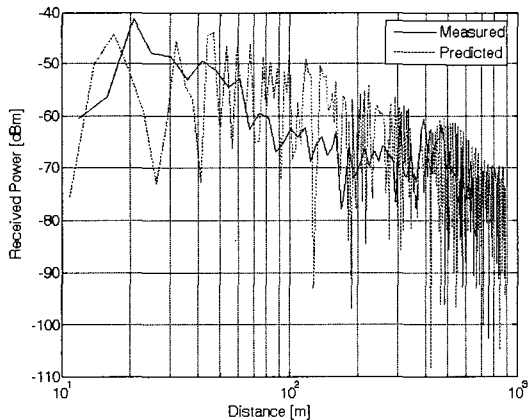
예측 결과는 안테나 높이의 변화에 대해서도 측정 결과를 잘 따라 가는 것을 볼 수 있다.

5-1-3-2 도로 양쪽 건물의 분포 및 밀집도에 따른 비교

그림 10은 송수신 안테나 높이가 9 m, 1.5 m이며, 도로 양쪽에 분포한 건물의 밀집율이 50 %인 경우 (그림 10(a))에 대한 가시거리 상태에서의 수신 전력 과 도로 양쪽 모두 건물이 분포(건물 밀집율 100 %)



(a) 건물 밀집율: 50 %  
(a) Building density: 50 %



(b) 도로 양쪽 모두 건물 분포  
(b) Completely distributed building to the both sides of street

그림 10. 도로 양쪽 건물의 분포 정도에 따른 수신 전력 예측치와 측정치 비교

Fig. 10. Comparison between predicted and measured results to the distribution grades of buildings across the street.

하는 경우(그림 10(b))에 대한 예측치와 측정치를 비교한다. 이 때 경로 손실 지수는 고층 아파트 지역에서의 분석치인 2.1을 적용한다.

그림 10(a)의 측정치는 고층 아파트 단지 사이의 도로로서 도로 양쪽에 아파트가 도로를 따라 연속되는 방향으로 분포해 있으므로 건물 밀집율이 상대적으로 낮은 지역이다. 전체적으로 그림 9에 비해 건물 반사파로 인한 페이딩 현상이 심하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

그림 11(b)는 도로 양쪽에 건물이 조밀하게 분포하며, 송수신기가 서로 가시거리 상태에 있을 때의 수신 신호 세기를 나타낸다. 페이딩 현상이 그림 9에 비해 심하게 나타난다. 그림 10에서 측정치의 신호 변화가 느리게 나타나는 것은 측정 데이터의 취득 속도가 느리기 때문이다.

5-2 비가시거리 영역에서의 전파 예측 모델

비가시거리 영역에서의 수신 신호 세기는 회절파가 가장 큰 영향을 미치므로 회절파에 의한 수신 전력 예측 모델을 제안한다. M/W 대역에서의 이동 통신 서비스는 송신 안테나가 주변 건물보다 같거나 낮은 경우가 대부분이므로 건물 측면 모서리에 의한 회절파에 대한 예측 모델을 제시한다.

5-2-1 비가시거리 영역에서의 수신 전력 예측

마이크로셀 이하의 서비스 영역을 가진 8 GHz 대역용 이동 통신 시스템의 특성상 송신 안테나 높이가 주변 건물 높이보다 같거나 낮기 때문에 건물 측면 모서리에 의한 회절 현상이 대부분을 차지하므로 이에 따른 수신 전력 예측 방법을 제시한다.

회절에 의한 수신 전력 세기에 영향을 미치는 파라미터로는 주파수, 회절점과 송수신기가 이루는 각, 회절점과 송수신기와의 거리 및 회절점의 수 등으로 구분할 수 있다. 여기서 회절점이란 수신기 주위에 위치하며 수신 전력의 크기에 영향을 미칠 수 있는 범위 내에 있는 건물 모서리 지점을 말한다.

측정 데이터의 분석 결과에서 비가시거리 영역에서의 주파수 변화에 따른 신호 변화는 주파수가 두 배 증가하면 신호 세기는 약 9 dB 감소하여 주파수의 세제곱에 반비례하며, 거리에 대해서도 세제곱에

반비례하는 30 dB/dec의 값을 가진다<sup>[11]</sup>. 또한 회절점 이후에서의 신호 세기는 회절점 이전의 신호 세기보다 약 40 dB 감소한다.

이상의 결과를 이용하여 회절파에 의한 수신 신호 세기를 계산하기 위한 계산식을 구하면 식 (10)과 같다.

$$P_{diff} = \frac{\lambda}{(2\pi)^2} \frac{P(d_{diff})F_{diff}}{d_{dist}} \quad (10)$$

여기서  $d_{dist}$ 는 회절점에서 Rx까지의 거리를 나타내고,  $P(d_{diff})$ 는 가시거리 영역에서의 수신 전력 계산 방법을 이용한 회절점에서의 수신 전력으로서 주파수와 거리의 제곱에 반비례한다. 식 (10)에서 보는 바와 같이 신호 세기는 회절점인 이차 전원점에서 인 송신 출력을 갖는 신호가 수신기에 도달하는 경우가 된다. 즉, 주파수 및 거리의 제곱에 반비례하는 계산식을 볼 수 있다. 식 (10)에서 회절 후 직접파와 건물 반사파에 의해 발생하는 페이딩 신호의 변화를 나타내는  $P(d_{diff})$ 는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{diff} \approx \left[ \begin{aligned} &1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{2h_{diff}h_m}{d_{dist}}\right) + \\ &D \cdot A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{d_{dist}^2 + W^2} - d_{dist})\right) \end{aligned} \right]^2 \quad (11)$$

식 (11)에서 두 번째 항은 회절 후 지면 반사파에 의한 영향을 나타내고, 세 번째 항은 회절 후 건물 반사파를 나타낸다. 회절점 이후 회절점 반대측에 건물이 없을 경우  $F_{diff}$  내의 세 번째 항의  $A$  및  $D$ 가 영이 된다. 즉 여기서  $A$ 는 회절점 이후의 도로 양쪽의 건물 존재 여부를 나타내는 요소로서 건물이 분포하면 1, 건물이 없으면 0이 된다. 또한  $D$ 는 건물의 밀집율로서 밀집율에 따라 0에서 1사이의 값을 가진다. 식 (11)에서도 지면 및 건물 반사 계수를 1로 설정한다.

### 5-2-2 비가시거리 영역에서의 수신 전력 예측

첫번째 회절점이 시작점에서 150 m 지점에 위치하고, 안테나 높이가 평균 건물 높이보다 낮아 건물 측면 모서리에 의한 회절이 발생하고 회절점 높이는 지면으로부터 30 m로 가정한다. 가시거리 상태에서의 도로 주변은 밀집율 100%, 비가시거리 상태에서의 도로 주변에 건물이 없을 경우와 밀집해 있을 경

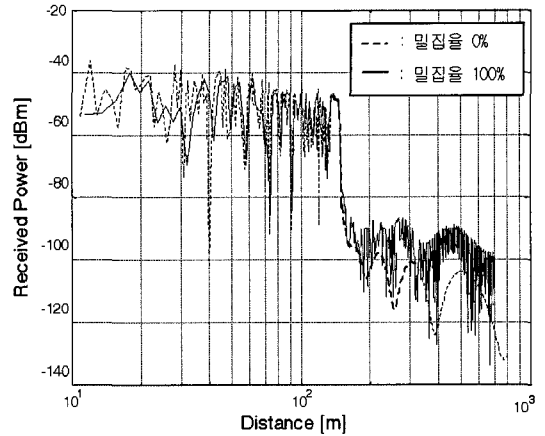


그림 11. 건물 측면 모서리 1회 회절 현상에 의한 예측치 비교

Fig. 11. Predicted results of the first diffracted waves by the angle of the building.

우에 대한 예측 결과치를 그림 11에 나타낸다. 이 때 송수신 안테나 높이는 9 m, 1.5 m로 설정한다.

비가시거리 영역에서 도로 양쪽 건물의 형태에 따라 회절 이후 신호 분포 형태가 달라지는 것을 볼 수 있다.

회절이 두 번 발생하는 경우로서 건물 모서리 회절 현상이 일어나며, 첫 번째 회절점이 150 m 지점에 위치하고 회절점 높이가 30 m이며, 두 번째 회절점이 300 m 지점에 위치하고 회절점 높이가 20 m인 경우로 가정한다. 가시거리 상태 도로 주변은 밀집

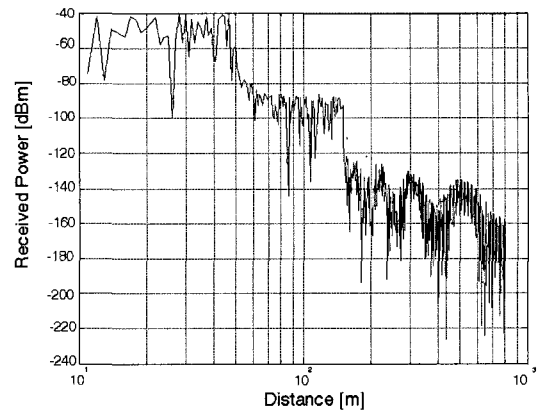


그림 12. 건물 측면 모서리 2회 회절 현상에 의한 예측치 비교

Fig. 12. Predicted results of the twice diffracted waves by the angle of building.

을 100 %, 비가시거리 상태에서의 건물 밀집율도 100 % 일 때를 그림 15에 나타낸다. 이 때 송수신 안테나 높이는 9 m, 1.5 m로 설정한다.

비가시거리 영역에서 건물 밀집율이 100 % 이므로 이에 따른 반사파로 인해 페이딩 현상이 크게 발생하는 것을 볼 수 있다.

### 5-3 제안 모델의 예측 결과 고찰

제안 모델은 해석적 예측 방법과 통계적 예측 방법을 결합한 모델로서 다음과 같은 형태로 구성되어 있다.

- 각 전파 환경에 대한 경로 손실 지수를 측정 결과를 통해 도출하여 해석적 방법에 적용한다.
- 계산 시간을 줄이기 위해 적용 반사파의 수를 최소화하였으며, 단순화하였다.
- 회절점 이후의 신호 세기 예측을 위해 측정 데이터의 분석 결과를 적용하여 모델링하였다.
- 분석 결과, 지형 구조 및 다중 경로파 사이의 위상 변화에 의해 달라지는 페이딩 현상에 대해서도 비교적 정확한 결과를 얻었다.
- 페이딩에 의한 음영 지역의 파악이 가능하므로 수신 요구 성능에 맞는 다양한 임계 레벨의 예측이 가능하다.

## VI. 결 론

이동 통신용 전파 예측 모델에 대한 연구가 부족한 대역인 마이크로웨이브 대역을 이용한 마이크로셀 및 피코셀용 전파 예측 모델을 제안하였다. 제안된 모델을 개발하는 데 있어서 전파 예측 모델의 신뢰성을 높일 수 있도록 하기 위하여 마이크로웨이브 대역인 8 GHz 대역 전파 신호를 측정하고 분석한 결과를 제안 모델에 적용하였다.

제시된 전파 예측 모델은 가시거리 영역과 비가시거리 영역에 맞는 모델로 구분하여 개발되었으며, 각 경우에 대하여 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교하여 정확성을 검증하였다.

가시거리 영역용 모델에는 경로 추적 방법을 토대로 하여 건물 반사파의 영향을 포함하였으며, 비가시거리 영역용 모델에서 반사 및 회절 특성을 분석하여 수식화하였다. 특히 비가시거리 영역용 모델

에는 반사파가 도달하는 영역에 대해서는 건물 반사파를 포함하였고, 회절 후 발생하는 각 다중 경로파에 의한 신호 변화 현상을 포함하여 보다 정확하게 신호 변화 현상을 예측할 수 있도록 하였다. 제안 모델에 의한 측정치와의 비교 결과, 결과치가 신호 변화 추이뿐만 아니라 페이딩 현상을 잘 따라가므로 정확성이 높다고 할 수 있다.

실제 도심지 전파 환경내에서의 마이크로셀 및 피코 셀용 이동 통신 시스템의 무선망 설계를 위한 기지국 위치 및 최적 출력을 선정하는 데는 셀 내 전파 환경 형태, 즉 도로폭, 건물 분포 형태 및 건물의 밀집 정도가 수신 전력의 레벨을 결정하는 데 매우 중요한 파라미터로 작용하므로 이를 이용한 제안 모델이 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano, and K. Fukuda, "Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile service", *Review of the Electrical Communication Laboratory*, vol. 16, no. 9-10, pp. 825-873, 1968.
- [2] Hata, "Empirical formula for propagation loss in mobile radio services", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. VT-29, pp. 317-325, 1980.
- [3] 조한신, 육종관, "마이크로셀룰라 환경에서의 차세대 이동통신을 위한 전파전파 특성", 한국전자과학기술논문지, 17(5), pp. 430-439, 2006년 5월.
- [4] H. Masui, M. Ishii, K. Sakawa, H. Shimizu, T. Kobayashi, and M. Akaike, "Microwave pathloss characteristics in urban LOS and NLOS environments", in *Proc. 53rd IEEE VTC*, vol. 1, pp. 395-398, 2001.
- [5] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, Pentech Press, 1992.
- [6] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, John Wiley & Sons Inc.
- [7] ITU, Recommendation ITU-R P. 1411-2, 2005.
- [8] ITU, Recommendation ITU-R P. 1238-3, 2005.
- [9] H. H. Xia et al., "Radio propagation characteristics for line-of-sight microcellular and personal commu-

nications", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 41, no. 10, Oct. 1993.

- [10] J. Walfisch, H. L. Bertoni, "A theoretical model of UHF propagation in urban environments", *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol. 36, no. 12,

pp. 1788-1796, 1988.

- [11] H. Masui, T. Kobayashi, and M. Akaike, "Microwave path-loss modeling in urban line-of-sight environments", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 20, pp. 1151-1155, Aug. 2002.

## 송 기 흥



1988년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1990년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)

2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)

1998년 3월~현재: 동의과학대학

정보통신과 부교수

[주 관심분야] 전파채널모델, 무선망설계, 이동통신 시스템 설계