

# 마이크로파 대역에서 실내 환경의 경로손실인자를 사용한 통계적 모델링

이 권 익\*\* · 홍 성 옥\*\* · 강 부 식\*\* · 김 흥 수\*\*\*

## Statistical Modeling using Path Loss Factor in Indoor Environment at Microwave Band

Kwoun-Ig Lee\*\*, Seong-Wook Hong\*\*, Boo-Sik Kang\*\* and Heung-Soo Kim\*\*\*

### ABSTRACT

In this paper, indoor propagation characteristics are analyzed for various environments such as corridors, walls and corners at microwave band. In order to present the statistical model for indoor environments the loss factors of each case are obtained by linear regression analysis method with the function of logarithmic distance between transmitter and receiver. Comparisons of our predicted results to measurements indicate that improvements in accuracy over conventional statistical models are achieved.

Key Words : Indoor propagation, Statistical model, Linear regression analysis

### 1. 서 론

현재의 무선 통신망은 음성과 저속 데이터 서비스를 위주로 이동전화 및 무선 패킷 데이터 망, 그리고 무선 LAN 등을 주축으로 성장하고 있으며, 무선 멀티미디어 서비스에 대한 요구가 증대됨에 따라

IMT-2000과 무선 ATM 통신망 등에 대한 연구 및 개발이 이루어지고 있다. 무선 ATM 시스템은 Radio ATM과 Mobile ATM라는 두 개의 부 시스템을 통합한 개념으로 볼 수 있으며, 각 부 시스템은 각각 무선 접속을 통해 고정망의 ATM 서비스를 무선 구간으로 확장하여 ATM 단말기에 이동성 기능을 제공한다<sup>1)</sup>.

일반적인 무선 ATM 물리 계층의 요구사항은 셀 반경이 100~500m인 마이크로 셀을 기본으로 하여 25Mbps이상의 전송률과 100mW이하의 송신전력 및 낮은 에러율 등으로 요약된다. 무선 물리계층에 필요한 기술적인 사항은 적절한 주파수 대역, 안테나 특성, 무선 셀 반경, 전력, 주파수 재사용을 고려한

\* 본 논문은 1998년도 정보통신 우수시범학교 지원사업에 의해 연구되었음.

\*\* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

\*\*\* 제주대학교 통신공학과, 산업기술연구소

Dept. of Telecommunication Eng., Res. Inst. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.

마이크로 셀 할당<sup>1)</sup> 등이다. 사용 주파수 대역과 안테나 특성 그리고 전력을 적절하게 선택하여 주어진 전파 환경에서의 셀 반경을 예측하여야 한다. 주파수 재사용을 고려한 마이크로 셀 할당에 대한 계획을 세우기 위해 실내외에 대한 전파 전파에 영향을 주는 여러 요인에 대한 분석과 다양한 환경에서의 전파 모델을 제시할 필요가 있다.

건물 내에서 송·수신기 주변의 물체는 무선 채널에서의 전파 특성에 심각한 영향을 미친다. 따라서 물리적인 주위 환경이 전파 환경에 어떻게 영향을 미치는가를 이해하는 것이 중요하다. 다수의 연구자들이 건물 내에서의 무선 전파를 측정하여 결과를 통계적으로 모델링<sup>2)-5)</sup> 하였고 벽, 천장, 바닥 등의 대표적인 전파 장애물을 유한 두께와 유한 전도도를 갖는 매질에서의 반사와 투과 현상을 2차원 또는 3차원 전파 경로 추적 방법(ray tracing method)을 이용하여 수신 전력을 예측<sup>6)-9)</sup> 하였다.

본 연구에서는 2.4GHz 주파수 대역에서 CW 신호를 사용하여 건물 내에서 복도에서 전파 감쇠 특성, 벽면에 대한 투과 특성 및 모퉁이에서 회절 현상에 대한 전파 특성을 분석하고, 경로손실에 대한 통계적 모델을 예측하기 위해 손실인자를 제시하였다. 통계적 분석은 각각의 환경에서 송·수신간의 대수 거리에 대한 선형회귀분석법을 적용하였다. 이러한 손실인자로부터 구한 예측치와 실내 환경에서의 측정치와 비교, 분석하였다.

## II. 건물내 전파의 통계적 모델

건물 내에서의 전파전파 특성은 송신기와 수신기 주변의 환경에 의해 큰 영향을 받는다. 따라서 건물내의 전파전파 특성을 분석하기 위해서는 건물 내부의 환경에 대한 이해가 필요하며 각 환경이 전파전파 특성에 미치는 영향을 분석<sup>10)</sup> 하는 일은 매우 중요한 과제이다.

### 2.1. 통계적 모델

일반적으로 전파경로 손실은 주파수가 높아지거나 또는 전파 경로가 길어질수록 급격히 증가하여 전파

전파는 식(1)과 같이 거리가 증가함에 따라 거리의  $n$ 승에 비례하여 경로손실이 증가한다.

$$\overline{PL}(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \quad (1)$$

여기서  $\overline{PL}$ 은 평균 경로 손실이고  $n$ 은 평균 경로 손실 계수이다.  $d_0$ 는 기준 거리이고,  $d$ 는 송·수신 구간 거리이다.

자유공간에서의 전파 손실은 송신 전력, 안테나 이득, 주파수 및 송·수신 사이의 거리의 함수이다. 두 개의 파라미터  $L_{OB}$ 와  $G_{RM}$ 은 각각 장애물과 다중 반사에 의한 이득에 기인한 손실 항이다. 따라서 수신 전력  $P_R$ 을 나타내면 다음 식과 같다.

$$P_R = P_T + G_T + G_R + L_F + L_{OB} + G_{RM} \quad (2)$$

여기서

$P_T, P_R$  = 송·수신 전력

$G_T, G_R$  = 송·수신 안테나 이득

$L_{OB}$  = 장애물에 의한 손실

$G_{RM}$  = 반사에 의한 손실

이고 자유공간 손실  $L_F$ 는 다음과 같다.

$$L_F = 20 \log_{10}(\lambda / 4\pi d) \quad (3)$$

본 연구에서는 건물내의 환경에 대한  $L_{OB}$ 와  $G_{RM}$  값을 결정한다. 각각은 선형회귀분석법에 의해  $y = a + b \log_{10}(d)$ 로 모델링 한다.

### 2.2. 복도에서의 전파 전파

복도에서의 전파전파 분석은 거리에 따른 자유공간 전파식과 측정 수신 전압의 차인  $\Delta G_{RM}$ 을 결정하고 대수 거리  $d$ 와  $\Delta G_{RM}$ 의 관계로부터 선형회귀 분석식을 계산하여 반사에 의한 손실  $G_{RM}$ 을 구한다. 측정을 위하여 콘크리트벽과 목재문으로 구성되어 있는 복도 환경을 선택하였고 Table 1에 각 복도의 크기를 나타내었다. 복도A 구조는 송·수신기 후면은 대부분 차폐되어 있고 일부가 개방되어 있는 환경이며, 송신기로부터 20-35m 거리에는 트인 공간

이 있는 구조이다. 복도 B는 송신기 후면은 트여 있고 수신기 후면은 차폐되어 있는 구조이다.

Table 1 Dimensions of corridors

Dimension Environment	Height (m)	Width (m)	Length (m)
Corridor A	3	2.44	64
Corridor B	3	2.30	44

Table 2는 각 복도별로 자유공간 전송 손실값과 측정값의 차를 대수 거리에 대해 선형회귀계수를 나타내었다. Table 2에 나타난 것처럼 복도별 경로손실 기울기는 평균 7.045dB이며 상관계수는 -0.6정도이다.

Table 2 Linear regression coefficient of corridors

Coefficient Environment	a	b	Correlation
Corridor A	4.95	-5.41	-0.6
Corridor B	10.16	-8.68	-0.63
Average	7.41	-7.045	

2.3. 벽에 의한 투과 손실

벽 투과에 의한 전파 환경은 Fig. 1과 같이 실험실과 연구실들로 배치되어 있는 공간에 대해서 Table 3과 같은 구조를 갖는 장소를 선정하였다. 송신기는 ROOM1~ROOM3내에 고정점에 설치하였으며 수신기는 ROOM4에서 일정한 간격으로 Rx1~Rx5까지 고정 측정하였다.

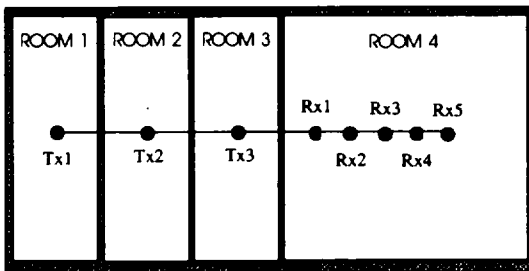


Fig. 1 Geometry of rooms for transmission

Table 3 Dimensions of rooms and wall for transmission

Dimension Room	Length (m)	Height (m)	Width (m)	Thickness of wall(m)
1, 2, 3	3.40	3	7.40	0.25
4	13.6			

Fig. 1과 같은 전파 환경에 대해서 벽면 투과에 의한 손실을 구하기 위해서 자유공간에서의 경로손실값과 고정지점에서 측정한 데이터와의 비교를 통해 선형회귀분석식을 이용하여 각각의 환경에서 대수 거리에 대한 계수를 구하여 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Linear regression coefficient of wall n

Coefficient Wall	a	b
1	16.5	-42.9
2	12.3	-40.4
3	4.8	-45.1

2.4. 비가시거리(NLOS) 손실

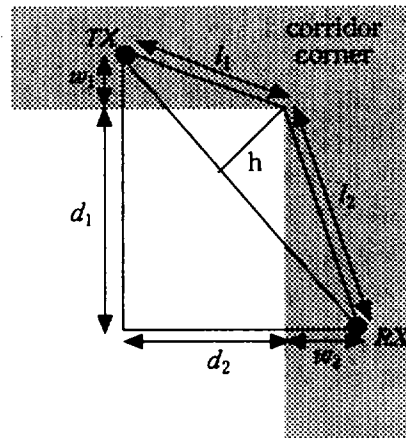


Fig. 2 Geometry of transmitter and receiver system at a corner for obtaining diffraction loss

복도의 모퉁이에서 거리에 따른 회절 손실을 구하

기 위한 송·수신기 위치를 Fig. 2에 나타내었다. 회절 높이  $h$ 를 사용하여 회절 이론식에 의해 구한 값과 측정 데이터와의 차를 이용하여 선형회귀분석식을 구하고 이식으로부터 회절 손실을 구하였다.

Fig. 2에서 장애물 높이  $h$ 는 회절 손실을 계산하는데 이용되는 파라미터로서 이 값과 측정값과 이론값의 차를 나타내는  $\Delta L_{OB}$ 에 의해 Table 5와 같은 회절 환경에 대한 회귀분석식의 계수를 구하였다.

Table 5 Linear regression coefficient for non-line of sight

Coefficient	a	b	Correlation (R)
corner	0.51	-6.06	-0.97

### III. 측정결과 및 고찰

측정은 모든 환경에 대해서 수신기를 일정한 간격으로 이동하면서 그 위치에 대해 고정점 측정을 하였으며, 송신출력은 10dBm이고 주파수는 2.4GHz 이다. 송수신 안테나의 높이는 동일하게 1.5m로 설정하였고 안테나는 송수신점 모두 다이폴 안테나를 사용하였다. 그리고 측정 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 고정점에 대해 반복 측정하였으며 측정점마다 300개 이상의 데이터를 수집하였다.

건물내 전파전파의 통계적 예측 모델을 얻기 위하여 복도내에서의 전파, 벽에 의한 투과 및 회절 현상을 분석하고 대수 거리에 의한 선형회귀 분석식을 적용하여 식(2)의  $L_{OB}$ 와  $G_{RM}$ 을 구하였다. 그리고 이러한 손실 인자값을 계산하여 복도와 모퉁이에 대해서 예측치와 측정치를 비교, 분석하였다.

#### 3.1. 복도에서의 예측 모델

Fig. 3은 복도 A에 대한 대수 거리에 따른 측정값과 이론값의 차  $\Delta G_{RM}$ 과 이값에 대한 선형회귀 직선을 나타낸 것이다. 복도 A는 복도의 끝 부분과 송수기로부터 20~35m 구간에서는 비교적 트인 공

간을 갖고 있어 일반적으로 구형으로 이루어진 복도에 비해  $\Delta G_{RM}$ 값이 선형회귀직선에 대해 큰 변동이 발생하는 것을 볼 수 있다.

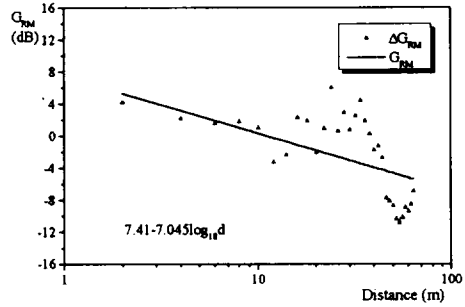
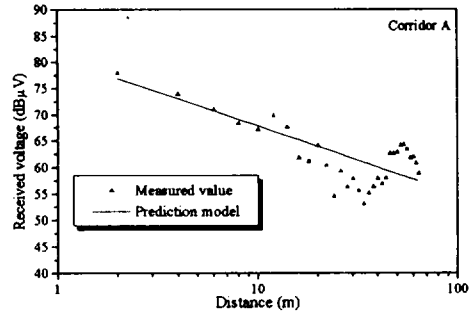
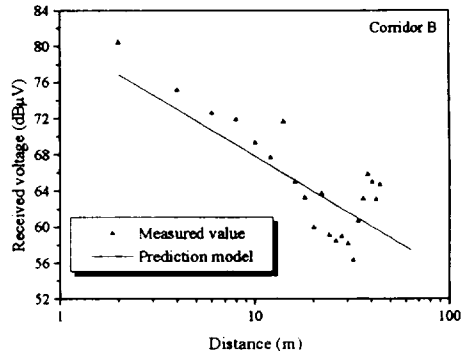


Fig. 3 Attenuation versus logarithm distance in corridor A



(a) Corridor A



(b) Corridor B

Fig. 4 Comparison between measured and predicted value in corridors

Fig. 4는 본 연구에서 제시한 손실 인자를 적용한 예측값과 복도 A, B에서 측정한 측정값을 나타내었다. 복도 A인 경우 Fig.4 (a)에서 알 수 있듯이 송신점으로부터 20m 까지는 예측오차가 평균  $\pm 3\text{dB}$ 이지만 20m 이상부터는 그 이전보다는 트인 공간이라는 주변환경으로 인해 최대  $\pm 8\text{dB}$ 정도의 큰 예측오차를 보이고 있다. 복도 B인 경우 Fig.4 (b)에서는 송신점으로부터 20m 까지는 예측 오차가 평균  $\pm 4\text{dB}$  오차를 보이고 있지만 거리가 20m 이상부터는 복도 A와 비슷한 주변환경으로  $\pm 6\text{dB}$ 정도의 오차가 발생함을 확인할 수 있다.

### 3.2. 벽 투과에 의한 예측 모델

Fig. 5는 Table 4의 세가지 환경에서 동일한 송·수신 거리에 대한 손실 계수 값  $a$ 와 이 값에 대한 선형회귀분석값을 나타내었다. 벽 투과에 의한 손실은 벽면 투과시 발생하는 손실과 거리에 의해 발생하는 경로손실을 모두 고려해야 한다. Table 2에서 각 벽면에 의해 생기는 손실 기율기 값의 평균을 구하고 Fig. 5의 선형회귀분석 직선의 방정식으로부터 투과에 의한 경로 손실을 구하면 다음식과 같다.

$$L_{OB} = 22.9 - 5.9n + 42.8 \log_{10}(d) \quad (4)$$

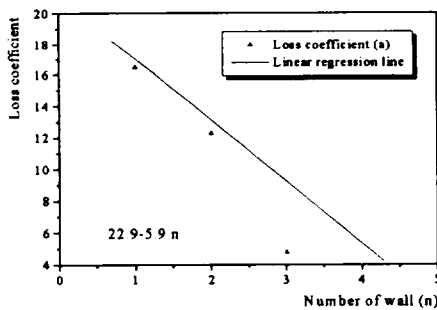


Fig. 5 Loss coefficient of loss for number of wall

Fig. 6에서와 같이 벽면에 의한 투과환경에서 투과 벽 수가 같은 동일 공간 내에서는 거리가 증가함에 따라 예측값 및 측정값은 완만하게 감소하면서  $\pm 2\text{dB}$ 정도의 오차가 발생하였지만 벽 수가 증가함에

따라 벽 수에 의한 경로 손실이 약  $10\text{dB}$ 정도의 추가 감소 손실이 발생함을 확인할 수 있었다.

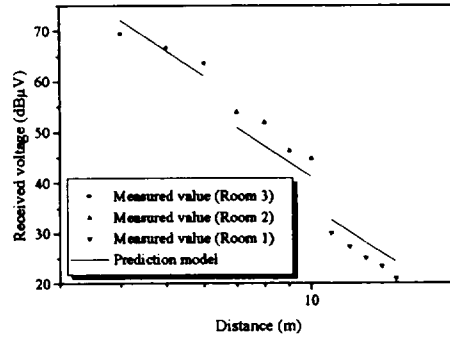


Fig. 6 Comparison between measured and predicted value for transmission through wall in each room

### 3.3. 모퉁이에서의 예측 모델

쇄기형 장애물에 대한 회절 이론에서 장애물의 높이를 나타내는 파라미터항  $h$  변화에 따른 자유공간에 대한 초과 경로 손실을 통계적으로 모델링 하였다. Fig. 7로부터 회절에 의한 경로 손실항인  $L_{OB}$ 는 최대  $\pm 2\text{dB}$ 정도의 오차가 발생함을 확인할 수 있다.

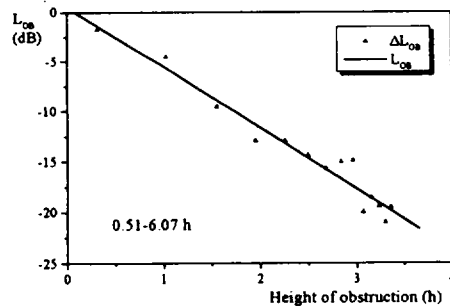


Fig. 7 Attenuation in excess of free space loss for non-line of sight

Table 6은 송·수신기의 위치 변화에 따른 회절 높이  $h$ 의 변화 값에 대한 회절 이론식에 의한 이론적인 값과 측정값 및 경로 손실 인자인  $L_{OB}$ 를 적용한 예측값을 나타낸 표이다. 예측값 오차에서 알 수 있듯

Table 6 Comparison between measured and predicted value for corner

Height of obstruction (h)	Received Voltage (dBμV)			Prediction error
	Theoretical	Measured	Predict	
0.3	71.1	69.4	69.7	0.7
1.0	69.8	65.3	64.2	-1.1
1.5	68.7	59.1	59.8	0.7
1.95	67.6	54.7	56.3	1.6
2.25	66.6	53.7	53.4	-0.3
2.5	65.7	51.3	51.0	-0.3
2.68	64.8	49.1	49.1	0
2.96	63.3	49.0	47.3	-1.7
3.07	62.6	48.4	45.8	-2.6

이 본 연구에서 제시한 경로 손실 인자를 적용한 예측 방법이 측정치와 잘 일치함을 알 수 있었다. 예측 값과 측정값의 비교 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

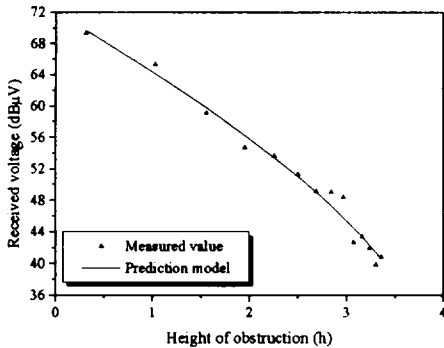


Fig. 8 Prediction curve and measured values versus diffraction height by corner

송·수신점 전파 경로상의 직선 경로에 대한 장애물의 높이를 나타내는  $h$ 가 증가함에 따라 수신전계강도 값은 급격하게 감소하고 있으며 예측치는 측정치와 평균  $\pm 2\text{dB}$  정도의 오차를 가졌다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 마이크로파 대역에서 실내 전파 환

경에 대한 전파 특성을 예측하기 위하여 실내 각 환경에 대한 측정 데이터를 선형회귀분석법에 의해 분석하고 실내 환경에 대한 경로 손실 인자를 구하였다. 이러한 손실 인자를 적용하여 실내 환경에 대한 수신 전계강도를 예측할 수 있는 예측 모델식을 제시하였다.

복도 환경에서 대한 경로 손실 인자인  $G_{RM}$ 과 벽면에 대한 투과 손실과 모서리 회절에 의한 추가 손실을 나타내는 손실인자  $L_{OB}$ 를 구하고 각 실내 전파환경을 통계적으로 분석하여 그에 대한 전파특성을 제시하였다. 그리고 복도, 벽 투과와 모서리 회절 환경에 대해서 각각의 경로 손실 인자인  $G_{RM}$ 과  $L_{OB}$ 를 적용하여 구한 예측치와 측정치를 비교, 분석하였다. 이것으로부터 예측 오차의 범위는 복도 환경에서는  $\pm 4\text{dB}$  정도이다. 벽면에 의한 투과환경에서 투과 벽 수가 같은 동일한 공간 내에서의 예측값 및 측정값은 완만하게 감소하면서  $\pm 2\text{dB}$  정도의 오차가 발생하였지만 벽 수가 증가함에 따라 벽 수별로 약  $10\text{dB}$  정도의 추가 감소 손실이 발생하였고 모서리 회절 환경에서는  $\pm 2\text{dB}$  정도의 오차가 발생함을 확인할 수 있었다. 이것은 복도의 벽면에 나무문과 기둥 등이 있고 복도 끝 부분에서의 반사를 고려하면 측정 환경에 따라 예측치 범위를 약간 벗어날 수 있음을 나타낸다. 본 연구에서 제시한 마이크로파대 실내환경 전파 예측 모델식은 통계적 모델링을 사용함으로써 좀 더 정확한 수신 신호를 예측할 수 있다.

#### 참고문헌

- 1) 한국전자통신연구원, 1998, 무선 ATM 기술개론, 진한도서, pp. 1-9.
- 2) Seidel, S.Y. and Rappaport, T.S., 1992, 914 MHz Path prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings, *IEEE Trans. A.P.* Vol. 40, No.2, pp. 207-217.
- 3) Rappaport, T.S., 1989, Characterization of UHF multipath radio channels in factory

- building, *IEEE Trans. A.P.*, Vol.37, pp. 1058-1069.
- 4) Jean, F.L., and Michel, L., 1990, Measurement and modeling of propagation losses in a building at 900MHz, *IEEE Trans. V.T.* Vol. 39, No.2, pp. 101-108.
- 5) Cheung, K.W., Jonathan, H.M. and Murch, R.D., 1998, A new empirical model for indoor propagation prediction, *IEEE Trans. V.T.* Vol. 47, No.3, pp. 996-1001.
- 6) Jenvey, S., 1994, Ray optics modelling for indoor propagation at 1.8GHz, *Proc. 44th IEEE Veh. Tech. Conf.*, pp. 1750-1753.
- 7) Wang, C.F., Wu, B.C. and Ko, C.J., 1998, A ray tracing method for modelling indoor wave propagation and penetration, *IEEE A.P.*, Vol. 46, No.6, pp. 907-919.
- 8) 송기홍, 함영권, 이혁재, 1996, 개선된 영상기법을 이용한 마이크로셀 환경에서의 전파경로 추적 모델링, *한국전자과학회논문집*, Vol.7, No.1, pp. 15-25.
- 9) 고옥희, 1999, 실내 환경에서의 3차원 전파예측 모델, *한국전자과학회논문집*, Vol.10, No.1, pp. 133-141.
- 10) Santamaria, A. and Lopez-Hernandez, F.J., 1993, *Wireless LAN Systems*, Artech-House, pp. 129-133.