

# 지하철 터널 환경에서 2.65 GHz 대역신호의 전파전파 특성

## Radio Propagation Characteristics in Subway Tunnel at 2.65 GHz

최명선 · 김도윤\* · 조한신\* · 문 철\*\* · 육종관\* · 박한규\*

Myung-Sun Choi · Do-Youn Kim\* · Han-Shin Jo\* · Cheol Mun\*\* · Jong-Gwan Yook\* · Han-Kyu Park\*

### 요 약

본 논문에서는 모의 실험과 측정을 통해 단면이 직사각형인 터널에서 위성 DMB 상용 주파수 대역인 2.65 GHz 신호의 전파전파 특성을 분석하였다. 스펙트럼 분석기와 위성 DMB 단말기를 이용하여 직선 터널과 300 m의 곡률 반경을 갖는 곡선 터널에서 수신 전력을 측정하여 경로 손실 특성을 비교 분석하였다. 또한 동일한 환경에 대해 ray-launching 방법을 이용한 모의 실험을 수행하여 경로 손실을 예측하고 측정 결과와 비교 분석하였다.

모의실험을 통한 수신신호의 평균 전력은 측정 결과와 2 dB 이내의 오차를 보였으며 이를 통해 시뮬레이터의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 측정 결과를 통해 직선 터널과 곡선 터널의 경로 손실 지수는 3.21, 3.98로 차이가 발생함을 알 수 있었다. 이는 곡선 터널의 경우 직접파는 존재하지 않으며 다수의 벽면 반사로 감쇄되어 수신되는 반사파만이 수신기에 도달하기 때문이다. 모의 실험 결과 또한 직선 터널과 곡선 터널의 경로 손실 지수는 3.2, 3.95로 예측할 수 있었으며 이 값은 측정 결과와 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

### Abstract

The research deals with the prediction and the measurement of electromagnetic wave propagation in rectangular shaped tunnels at  $f=2.65$  GHz. The received power level was measured in the straight and the curved tunnel by using a spectrum analyzer and Satellite DMB mobile phone. Thus we have gotten the data for two cases, the straight and the curved tunnel whose radius is 300 m. In addition, the prediction of wave propagation was conducted based on the ray-launching method, in same tunnel where measurement was performed.

A good agreement of the measured and the predicted path loss could be confirmed. The measured path loss shows a marked difference in propagation loss: the path-loss exponent, 3.21, and 3.98, for a straight and a curved tunnel, respectively. The reason that path-loss exponent is high in a curved tunnel is that there is no direct wave but only the reflected waves, which attenuates rapidly with distance due to multiple reflections. Also the predicted path loss shows path loss exponent, 3.2 and 3.95, for a straight and a curved tunnel which are similar to the simulation results.

Key words : Satellite DMB, 2.65 GHz, Path Loss, Tunnel, Ray-Launching Method

### I. 서 론

현재 이동 통신 서비스는 방송과 통신 무선랜 등 기존의 다양한 통신 매체가 융합될 뿐만 아니라 ‘언제 어디서나 존재하는’이란 목표로 진화를 거듭해

나가고 있다. 이처럼 다양한 통신 시스템을 설계함에 있어서 공통적으로 고려해야 하는 중요한 변수로 BER(Bit Error Rate), PER(Packet Error Rate) 등이 있다. 그리고 이러한 변수를 평가하기 위해 전파 채널 특성에 관한 연구는 필수적이다. 현재까지 2~3세대

한국정보통신산업협회(Korea Association of Information & Telecommunication)

\*연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronics Engineering, Yonsei University)

\*\*충주대학교 전기전자정보공학과(Department of Electronic Communication Engineering, Chungju National University)

· 논문 번호 : 20050401-042

· 수정완료일자 : 2005년 5월 12일

셀룰러 이동 통신 시스템을 위한 2 GHz 이하 주파수 대역 이하의 전파 채널 연구는 활발히 진행되었다<sup>[1]</sup> ~<sup>[5]</sup>. 그리고 3세대 시스템의 뒤를 이을 차세대 무선 통신 시스템을 위한 3 GHz 이상 주파수 대역의 전파 채널 연구도 진행되어 왔다<sup>[6],[7]</sup>.

2.6 GHz 주파수 대역은 현재 한국, 일본에서 위성 DMB(Digital Multimedia Broadcasting) 서비스를 위해 이용하고 있으며 북미 지역에서는 MMDS(Multi-channel Multipoint Distribution Services)로 활용되고 있다. 또한 이 대역은 UMTS(Universal Mobile Telecommunication System) 대역으로도 선정되어 무선 통신 및 방송 시스템을 위해 활용도가 매우 높은 대역이다<sup>[8]</sup>.

한편 터널 환경은 무선 채널 환경 중 대표적인 영지역으로서 실외 및 실내 환경의 무선 채널과는 다른 특성을 갖기 때문에 터널 환경에서 안정된 서비스 품질을 확보하기 위한 전파 채널의 특성 연구는 매우 중요하다. 기존의 연구<sup>[9],[10]</sup>에서는 전파 전파 시뮬레이션을 이용하여 채널 특성을 분석한 반면 본 논문에서는 시뮬레이션과 측정을 병행하여 보다 실제 환경에 적합한 경로 손실 특성을 분석하였다.

본 논문에서는 전파 채널 특성을 분석하기 위해 모의 실험 및 측정을 통해 경로 손실을 예측하였다. 모의 실험을 위해 ray-launching 기법을 적용하였으며, 곡면 환경에 대한 정확한 모의 실험 결과를 얻고자 RDN(Ray Density Normalization) 개념을 도입하였다<sup>[11]</sup>. 그리고 기존의 연구 결과와의 비교를 통해 모의 실험 용 시뮬레이터의 신뢰성을 확보하였다. 이를 바탕으로 직선 및 곡선 터널에 대해 모의실험과 측정을 병행하여 터널 환경에서의 경로 손실 특성을 분석하였다.

## II. 광학적 전파 전파 모델

송수신단간의 전파 경로에서 각각의 레이(ray)는 여러 전파 현상을 나타내게 된다. 송신 안테나에서 방사되는 전파는 far field 영역 내에 위치하는 시작 점에 대해 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\vec{E}(r) = \sqrt{\frac{P_T G_T Z_{w0}}{2\pi}} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \vec{C}_T = e^{-jk_0(r-1)} T_{D,0} \vec{E}_0 \quad (1)$$

위 식에서  $G_T$ ,  $P_T$ ,  $Z_{w0}$ 는 송신 안테나 이득, 송신 전력, 그리고 자유공간 특성저항(free-space characteristic impedance)을 의미한다. 또한  $T_{D,0}$ 는 발산 전달 요소(divergence transfer factor)로서, 1 m/r 값을 의미한다. 따라서, 전파 경로를 따라  $N$ 번의 전파 현상(반사, 산란, 회절 등)을 발생한 경우 수신기에서의 전파 분포는 다음 식 (2)로 유도할 수 있다.

$$\vec{E}(r) = \vec{E}_R = e^{-jk_0(r-1)} \left( \prod_{j=0}^N \overline{T}_{D,j} \overline{T}_{P,j} \right) \vec{E}_0 \quad (2)$$

이때  $\overline{T}_{D,j}$ 는 자유공간에서 전파의 발산 정도를 나타내는 복소수 값이며,  $\overline{T}_{P,j}$ 는 반사현상에 의한 전파의 변화를 의미하는 다이애딕 복소수이다. 즉, 한 경로를 따라 진행하는 전파는 수신단까지 전파되는 과정에서 발생하는 반사에 의한 영향과 발산에 의한 영향값을 모두 곱한 식으로 표현된다. 예를 들면 송신기로부터 발생한 레이가 10번의 반사를 통해 수신기로 도달했을 경우 수신기에서 얻어진 전파의 세기는 10번의 반사에 의한 영향을 모두 곱해준 형태로 나타나게 된다.

수신 안테나에 전달되는 전력은 식 (3), (4)를 통해 얻을 수 있다.  $A_{eR}$ 은 수신 안테나의 유효 면적,  $P$ 는 최대 유효 전력을 의미한다<sup>[12]</sup>.

$$A_{eR} = \frac{\lambda_0^2}{4\pi} G_R |\vec{C}_R| \quad (3)$$

$$P = \frac{|V|^2}{8 \operatorname{Re}\{Z\}} \quad (4)$$

여기서 식 (3), 식 (4)를 통해 수신 안테나에서의 전압을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_R = \sqrt{\frac{\lambda_0^2}{4\pi} G_R \frac{4 \operatorname{Re}\{Z_R\}}{Z_{w0}}} \vec{C}_R \cdot \vec{E}_R \quad (5)$$

위 식에서  $G_R$ ,  $Z_R$ ,  $\vec{C}_R$  값은 각각 수신 안테나의 이득값과 임피던스 및 complex vector directional pattern을 나타낸다. 결과적으로 수신 안테나를 통해 전달되는 파워는 식 (6)으로 표현된다<sup>[12]</sup>.

$$P_R = \frac{\lambda_0^2}{8\pi} G_R \frac{1}{Z_{w0}} |\vec{C}_R \cdot \vec{E}_R|^2$$

$$= \left( \frac{\lambda_0}{4\pi} \right)^2 G_R G_T P_T \left| \bar{C}_R \cdot T_D \bar{T}_P \cdot \bar{C}_T \right|^2 \quad (6)$$

위 식을 통해 하나의 레이가 채널을 통해 전파된 후 수신 안테나를 통해 전달되는 파워를 구할 수 있다. 이렇게 구한 수신 파워를 통해 수신기에 도달한 레이이 여러 개인 경우 적용하는 방법은 다음과 같다. 각각의 경로를 따라 도달한 레이의 전자장 분포는 벡터로 표현되며, 다중 경로를 통해 도달한 레이들은 각각의 벡터값들을 합하는 방식으로 표현할 수 있다. 따라서 수신 안테나를 통해 전달된 총 전압은 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{R, total}^C &= \frac{|V_{R, total}|^2}{8 \operatorname{Re}\{Z_R\}} = \frac{1}{8 \operatorname{Re}\{Z_R\}} \left| \sum_{l=1}^n V_{R,l} \right|^2 \\ &= \left( \frac{\lambda_0}{4\pi} \right)^2 G_R G_T P_T \left| \sum_{l=1}^n e^{-jk_e r_l} \bar{C}_{R,l} T_{D,l} \bar{T}_{P,l} \bar{C}_{T,l} \right|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

### III. Ray Launching Method

각 신호의 경로를 정확히 찾아주는 image method와 달리 ray-launching 방법은 수많은 신호가 송신기에서 방사된 후 수신기에 도달한 신호를 합하여 결과를 얻는다. 일반적으로 ray launching method는 shooting and bouncing ray(SBR) method라고도 한다. 본 논문에 사용된 ray-launching 방법의 특성은 다음과 같다.

#### 3-1 고정된 수신 반경

일반적으로 레이의 수신 여부 판정에 사용되는 방법은 수신단의 수신 반경을 경로에 따라 변화시켜 주는 것이다. 이때 각 레이의 수신 여부는 경로의 총 이동 거리에 따른 함수인 수신 반경의 내부에 대한 레이의 통과 여부에 따라 판별한다. 그러나 이 방법은 근접한 레이이 대표하는 영역이 겹치는 사례가 발생하기 때문에 중복 수신 가능성이 존재하는 문제가 있다. 이와 같이 유동적 수신 반경을 사용해 레이의 수신 여부를 판단하는 방법은 곡면 구조에 적용할 경우 중복 수신 문제가 증가하게 되는 단점을 갖는다.

따라서, 본 논문에서는 이 문제점을 해결하기 위

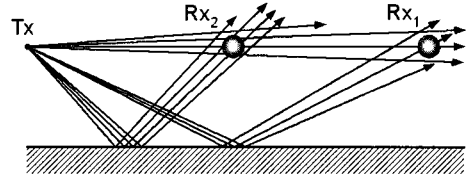


그림 1. 고정된 수신 반경

Fig. 1. Reception spheres with constant size.

해 수신구의 수신 반경을 항상 고정하는 방식을 적용한다. 여기서 수신 반경을 상수값으로 고정했을 때 발생하는 문제에 대해 생각할 볼 필요가 있다. 그림 1을 살펴보면, 수신 반경이 상수값으로 정해진 경우의 문제점을 발견할 수 있다. 즉 첫 번째 수신기에 도달하는 직접파가 2개 이상 존재하게 된다는 사실을 확인할 수 있다. 따라서 이를 위한 해결책으로 제시된 방법이 수신 레이에 따라 레이 단면 밀도(Ray Density Normalization: RDN)를 적용하는 것이다<sup>[11]</sup>. 결과적으로 송신된 레이 중에서 직접파로 수신된 레이 수가 5일 경우, 이 5개의 레이에 대한 RDN값은 5에 근접하게 되며, 이를 통해 수신 레이의 보정이 가능하게 된다. 이 방식은 곡면 구조에 대해서 쉽게 적용이 가능하다는 장점을 갖는다.

#### 3-2 Ray Density Normalization(RDN)

앞 절에서 언급한 중복 수신 문제를 해결하기 위한 방안으로 등장한 개념이 ray density normalization(RDN)이다<sup>[11]</sup>. RDN은 송신단에서 발생한 레이의 개수를 송신단의 면적으로 나누어 단위면적당 레이의 개수값 즉, 레이 밀도값을 나타낸다.

RDN을 적용하기 위해서 우선적으로 필요한 조건은 송신단에서 발생하는 레이 분포가 등방형으로 동일하게 분포해야 한다는 것이다. 즉 각 레이이 대표하는 레이 튜브의 면적이 발생할 때 동일한 면적으로 표현되어야 하는 것이다. 평면에서 레이를 발생시킬 때에는 deterministic하게 정해진 총 레이수에 따라 진행 방향을 정해줄 수 있지만 RDN을 적용할 경우는 동일한 방법을 적용할 수 없다. 이는 수학적으로 deterministic하게 레이이 분포할 경우, 각 레이이 대표하는 면적은 레이의 수가 증가하더라도 동일해 질 수 없기 때문이다. 따라서 확률적으로 랜덤하게 레이의 방향을 결정하는 Monte-Carlo method를

이용하여 레이를 발생시켜야 한다.

레이가 전파되는 환경이 평면만으로 구성된 경우 식 (1)과 같이 송신 파워를 결정하는 요소 중 발산 전달 요소값( $T_D$ )은  $1/r$ 로 표현할 수 있다. 그러나 주어진 환경에 곡면이 포함된 경우  $T_D$ 값은 레이 밀도 값을 이용해 구해야 한다<sup>[12]</sup>.

$$T_D = \sqrt{\frac{\rho_{1,m}^r \rho_{2,m}^r}{\rho_{1,m}^r + s_m \rho_{2,m}^r + s_m} \dots \frac{\rho_{1,1}^r \rho_{2,1}^r}{\rho_{1,1}^r + s_1 \rho_{2,1}^r + s_1} \frac{1}{r_1^2}} \quad (8)$$

식 (8)은 레이 밀도에 관련된 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_D = \sqrt{\frac{4\pi}{N} n_d} \quad (9)$$

따라서 위 값을 이용해 수신단에 도달한 총 파워를 구하면 다음과 같다.

$$P_{R,total}^C = \left| \sum_{l=1}^M \frac{V_{R,l}^C}{V_0} \right|^2 = \left( M \frac{V_R^C}{V_0} \right)^2 = (M)^2 T_p^2 \frac{4\pi}{N} n_d X_F^{C2} \quad (10)$$

여기서,  $X_F^C$  값은 RDN을 적용했을 때 수신 파워 계산에 추가해야 하는 가중치를 의미하며 식 (11)로 정의할 수 있다.

$$X_F^C = \frac{1}{M} = \frac{1}{n_d A}, \quad X_F^I = \frac{1}{\sqrt{M}} = \frac{1}{\sqrt{n_d A}} \quad (11)$$

#### IV. 모의 실험 및 측정 과정

##### 4.1 전파전파채널 모델링 기법의 검증

터널 내의 전파전파 채널을 모델링하기 위해 이용한 ray-launching 기법의 정확성을 검증하기 위해 다음과 같은 환경을 가정하였다. 터널은 그림 2와 같이 단면이 정사각형인 직선구조이다. 터널의 폭과 높이는 4 m이며 송신단은 좌측면에서 1.1 m, 바닥에서 2.1 m 떨어진 지점에 위치한다. 수신단은 좌측면에서 1.9 m, 바닥에서 1.7 m 떨어진 지점에 위치한다. 벽면의 재질은 복소유전율이  $5-j0.1$ 인 콘크리트로 설정하였으며 중심주파수는 1 GHz이다. 송수

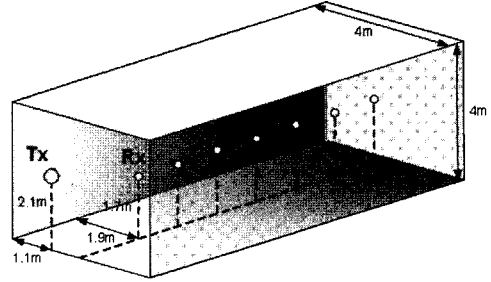


그림 2. 터널의 구조  
Fig. 2. Geometry of the rectangular straight tunnel.

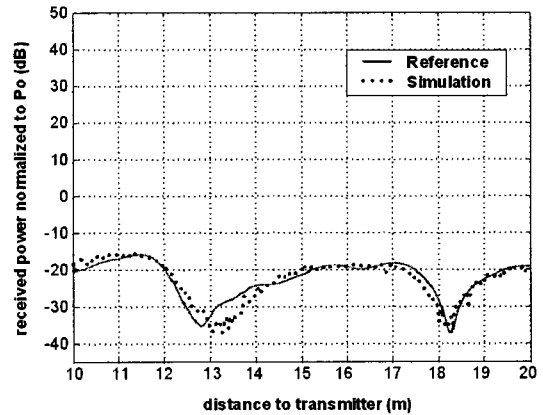


그림 3. 송수신단간의 거리에 따른 수신전력  
Fig. 3. Received power as distance.

신단은 수직 편파를 갖는 등방성 안테나를 가정하였으며 송신단에서 천오백만 개의 레이를 발사하였다. 또한 수신구의 크기는 10 cm, 최대 반사 횟수는 10번으로 결정하였다. 위의 가정 하에 얻은 그림 3의 결과는 참고문헌 [13]의 결과와 일치함을 알 수 있다.

##### 4.2 모의실험 환경

모의 실험에 이용한 터널은 단면 모양이 직사각형이며 횡면의 형태에 따라 2가지 터널로 구분하였다. 여기서 편의상 횡면이 직선인 터널을 직선 터널, 곡선인 터널을 곡선 터널이라 칭한다.

직선 터널 내에서의 전파 채널의 특성을 분석하기 위해 터널의 크기, 곡률 반경 및 송수신단의 위치를 그림 4, 5와 같이 설정하였다. 직선 및 곡선 터널의 높이는 6.745 m, 폭은 7.8 m이며 곡선 터널의 곡률 반경은 임의의 R을 갖는다.

두 터널 모두 송신단은 터널의 바닥으로부터 2.7

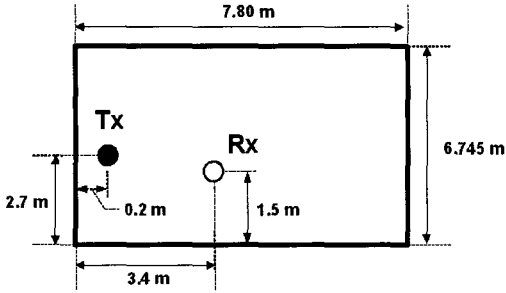


그림 4. 터널 단면구조와 송수신 단 위치  
Fig. 4. The position of both Tx and Rx in the straight tunnel.

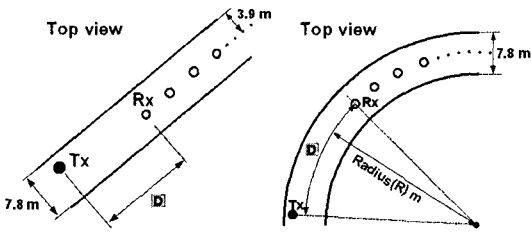


그림 5. 터널의 평면구조 및 송수신 단 위치  
Fig. 5. The position of both Tx and Rx and in the straight and curved tunnel.

m, 좌측벽으로부터 0.2 m 떨어진 지점에 위치한다. 또한 수신단은 터널의 바닥으로부터 1.5 m, 좌측벽으로부터 3.4 m 떨어진 지점에 위치한다. 송신 단위 위치는 실제 중계기를 설치하는 범위 내에서 설정하였으며 바닥을 기준으로 한 수신단의 높이는 측정 상황을 고려하여 설정하였다. 그림 5의 변수  $D$ 는 송수단 간의 거리를 의미한다. 송신단은 측정 환경과 동일하게 지향성을 갖는 Yagi 안테나를 가정하였다. 터널 벽면의 재질은 복소 유전율이  $5-j0.1$ 인 콘크리트로 설정하였으며 레이의 중심 주파수는 2.65 GHz이다. 송신단의 위치는 일정하며 수신단의 높이는 1.5 m로 고정한 후, 변수  $D$ 를 변화시키며 각 수신 지점에서 수신 전력 및 전기장 값을 얻었다.

### 4.3 측정 환경

지하철 터널에서 2.65 GHz 신호의 경로 손실을 측정하기 위하여 그림 6과 같은 측정 시스템을 구현하였고, 자세한 사항은 다음과 같다. 실제 위성 DMB 중계기를 통해 터널 내부로 신호가 방사되었으며, 이때 송신 안테나는 터널 방향으로 그림 7의

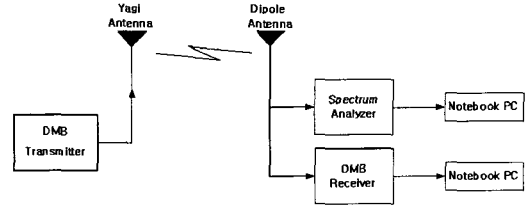


그림 6. 송수신단의 블록다이아그램  
Fig. 6. The block diagram of a measurement system.

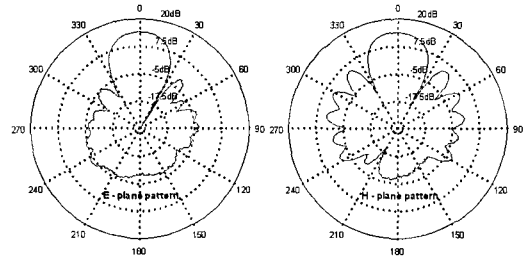


그림 7. 송신 안테나의 방사 패턴  
Fig. 7. The radiation pattern of transmit antenna.

지향성을 갖는 Yagi 안테나가 사용되었다. 수신단은 spectrum analyzer와 DBM 단말기를 통해 동시에 수신 신호를 측정하였다. 이는 DMB 단말로 측정된 신호 레벨의 신뢰성을 높이기 위한 것으로서, 수신 신호 전력의 절대 레벨을 스펙트럼 분석기의 결과로 보정하였다.

## V. 경로 손실 특성

무선 채널 환경에서 송신된 전파는 반사, 산란, 회절 등의 물리적 현상을 겪으며 다중 경로를 통해 수신되기 때문에 수신 신호의 강도는 시간에 따라 변동하는 특성을 보인다. 따라서 측정된 신호 또한 시간에 따라 변동하므로 일정 시간에 대한 평균 수신 강도로부터 경로 손실 모델을 얻을 수 있다. 경로손실 지수와 log-normal 분포를 갖는 웨도잉을 고려한 경로 손실 모델은 식 (12)와 같다<sup>[14]</sup>.

$$PL(d)[dB] = \overline{PL}(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_n \quad (12)$$

위 식에서  $n$ 은 경로 손실 지수이며 이 값은 송수신단간 거리의 증가에 따른 경로 손실의 증가량을 의미한다. 즉  $n$ 이 큰 환경일수록 반사 및 산란체가

많이 존재하여 신호가 급격히 증가하게 된다.  $d_0$ 는 기준거리이며  $d$ 는 송수신단 간의 거리이다.  $X_\sigma$ 는 세도잉에 의한 손실값으로 표준편차가  $\sigma$ 이고 평균이 0인 가우시안 랜덤 변수이다.

본 연구는 직선과 곡선 터널에서 수신 전력의 감쇄 현상을 분석하기 위해 인천 지하철 부평 삼거리역에서 인천 시청 역까지의 구간에서 측정을 시행하였다. 또한 터널의 단면을 직사각형이라 가정하고, ray-launching 기법을 사용해 동일 구간에 대한 수신 전력을 예측하였다.

직선 터널과 곡률 반경이 300 m인 곡선 터널에 대한 경로 손실 결과는 각각 그림 8, 9와 같다. 측정 및 시뮬레이션을 통해 얻은 수신 전력 데이터에 대해 regression 방법을 이용하여 식 (12)와 같은 모델의 경로 손실 지수를 도출하였다. 굵은 실선과 굵은 점선은 모의 실험 결과와 측정 결과의 regression fitting curve를 나타낸다. 두 regression curve로부터 모의 실험을 통한 수신 전력은 측정 결과와 2 dB 이내의 오차로서 거의 비슷한 세기를 가지며 이를 통해 시뮬레이터의 신뢰성을 확인할 수 있다. 한편 측정 결과를 통해 각 터널 구조에 따른 직선 터널의 경로 손실 지수는 3.21이고 곡선 터널의 경로 손실 지수는 3.98임을 확인할 수 있었다. 또한 모의 실험에 의한 경로 손실 지수는 직선 터널이 3.2, 곡선 터널이 3.95로서 측정 결과와 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 끝으로 터널내의 경로 손실 지수는 3~4 정도로 이는 일

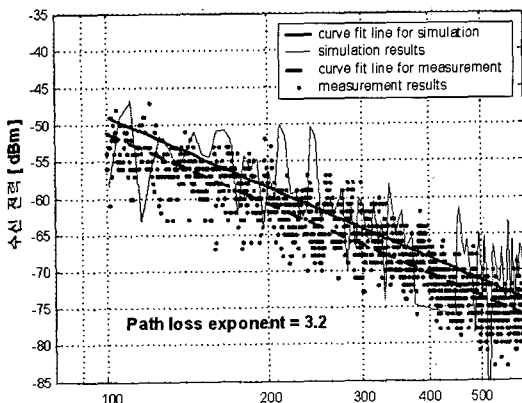


그림 8. 직선터널에서 측정 및 모의실험에 의한 수신 전력  
Fig. 8. Comparison of measurement and simulation in a rectangular straight tunnel.

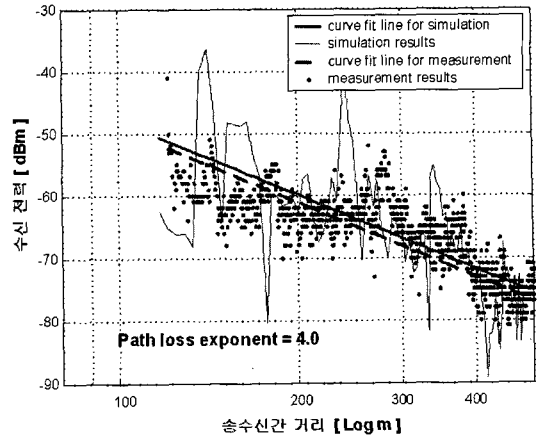


그림 9. 곡선터널에서 측정 및 모의실험에 의한 수신 전력(반경=300 m)  
Fig. 9. Comparison of measurement and simulation in a rectangular curved tunnel(radius=300 m).

반적인 실외 무선 환경에서의 경로 손실 지수(3.0~5.0)와 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

## VI. 결 론

본 연구는 경로 손실 모의실험을 위해 ray-launching 기법을 사용하였으며, 곡면 환경에 대한 정확한 실험 결과를 얻고자 RDN(Ray Density Normalization) 개념을 도입하였다. 모의 실험에 사용된 터널의 구조는 단면을 직사각형 구조로 가정하였으며 터널의 선로는 직선과 곡선으로 구분하였다. 또한 측정 구간은 인천 지하철 부평 삼거리역에서 인천 시청역 구간 사이의 직선과 곡률 반경 300 m의 곡선 터널을 사용하였으며, 이 측정 결과를 통해 모의 실험 결과에 신뢰성을 확인할 수 있었다. 모의 실험과 측정을 통해 직선 터널과 곡선 터널에서 경로 손실 지수는 약 3.2, 4.0임을 확인할 수 있었으며, 이 값은 일반적인 실외 무선 환경에서의 경로 손실 지수(3.0~5.0) 범위를 벗어나지 않았다. 또한 직선 및 곡선 터널 환경에 따른 경로 손실 지수의 차이는 NLOS 영역의 유무에 따른 것으로 판단할 수 있었다.

본 논문에서 분석한 2.65 GHz 대역은 최근 한국, 일본에서 위성 DMB 시스템 서비스를 위해 할당되었다. 따라서 본 연구 결과는 도심 지역의 대표적인 음영 지역인 지하철 터널에서의 안정된 서비스 품질을 확보하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

측정에 도움을 주신 TU미디어에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] Byoung-Seong Park, Do-Hyung Choi, Kyung-Jae Kim, and Han-Kyu Park, "The fading characteristics in the microcellular environments using deterministic prediction model", *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 740-744, May 2000.

[2] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel Second Edition*, 1990.

[3] EURO-COST 231, "Urban transmission loss models for mobile radio in the 900 and 1800 MHz bands", Revision 2, The Hague, Sep. 1991.

[4] T. S. Rappaport, S. Y. Seidel, and T. Singh, "900-MHz multipath propagation measurements for U. S. digital cellular radiotelephone", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 39, pp. 132-139, May 1990.

[5] Dongsoo Har, Howard H. Xia, and Henry L. Bertoni, "Path-loss prediction model for microcells", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 5, Sep. 1999.

[6] 조한신, 박병성, 육종관, 박한규, 이정수, "3.4, 5.3, 6.4 GHz 대역 신호의 가시 및 비가시 구간에서의 경로손실 특성", 한국전자과학기술 종합학술발표회,

2002년 11월.

[7] Hironari Masui et al., "Microwave path-loss characteristics in urban LOS and NLOS environments", *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 1, pp. 6-9, May 2001.

[8] ITU Document 8F/TEMP/115-E, "Summary of ITU Member States responses to Circular Letter 8/LCCE/124 concerning frequency arrangements for the 2.6 GHz band", Jun. 2004.

[9] 김도윤, 조한신, 육종관, 박한규, "Ray-Launching 기법을 이용한 2.6 GHz 대역의 터널내 경로손실 특성 분석", 한국전자과학기술 종합학술발표회, 2003년 11월.

[10] 조한신, 김도윤, 육종관, "터널 환경에서 2.6 GHz 대역신호의 전파전파 채널 특성", 한국전자과학기술 종합학술발표회, 2003년 11월.

[11] Dirk Didascalou, "Ray-density normalization for ray-optical wave propagation modeling in arbitrarily shaped tunnels", *IEEE Trans. on AP.*, vol. 48, no. 9, pp. 1316-1325, Sep. 2000.

[12] C. A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design*, John Wiley & Sons, New York, 1997.

[13] Dirk Didascalou, *Ray-Optical Wave Propagation Modeling in Arbitrarily Shaped Tunnels*, Ph. D. thesis, University Karlsruhe, Germany, 2000.

[14] Theodore S. Rappaport, *Wireless Communications Principles and Practice*, Prentice Hall, 1996.

최 명 신



1979년: 사무관 (기술고등고시 14회)  
 1990년: 전파연구소 김정과장 (정보통신 서기관)  
 1992년: 연세대학교 산업대학원 전자공학과 (공학석사)  
 1993년: 전파방송관리국 주파수 과장

1998년: 전파연구소장  
 2001년: 전북체신청장, 충청체신청장 (정보통신 이사관)  
 2004년: 연세대학교 전기전자공학과 (박사수료)  
 2003년~현재: 한국정보통신산업협회 상근 부회장  
 [주 관심분야] 전파전파, 전자파 이론

김 도 윤



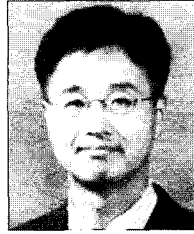
2002년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)  
 2004년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
 2004년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 전파전파, 무선 통신 채널 모델링, MIMO/OFDM

조 한 신



2001년 8월: 연세대학교 전기전자 공학과 (공학사)  
2004년 2월: 연세대학교 전기전자 공학과 (공학석사)  
2004년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정  
[주 관심분야] 전파전파, 무선 통신 채널 모델링, MIMO/OFDM

육 중 관



1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
1996년 2월: University of Michigan (공학박사)  
2000년 2월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 조교수  
[주 관심분야] MEMS, 초고주파 회로, EMI/EMC, 초고주파 수치해석

문 철



1995년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
2001년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)  
2001년 3월~2002년 2월: 삼성전자

네트웍사업부  
2002년 3월~2003년 7월: 호남대학교 전파공학과 교수  
2003년 8월~현재: 충주대학교 전기전자정보공학부 교수  
[주 관심분야] 전파전파, 무선 통신 채널 모델링, MIMO/OFDM

박 한 규



1964년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)  
1968년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학석사)  
1975년: 불란서 파리 6대 대학 (공학박사)  
1976년~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수  
1979년~1980년: 스탠포드대학교 교환교수  
1989년~1994년: 대통령 21세기 위원회 위원  
1995년~1997년: 정보통신부 전파위원회 위원장  
1997년~현재: 한국과학재단 이사  
[주 관심분야] 마이크로파 소자, 스마트 안테나, 전파 전파, SAR