

# 지하철 터널 환경에서 2.65GHz 대역신호의 경로손실 특성

준회원 조 한 신\*, 김 도 윤\*, 정회원 육 종 관\*

## Path Loss Characteristics in Subway Tunnel at 2.65GHz

Han-shin Jo, Do-youn Kim *Associated Members*, Jong-gwan Yook *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 측정을 통해 지하철 터널환경에서 위성 DMB 상용주파수 대역인 2.65 GHz 신호의 전파전파 특성을 분석하였다. 다양한 터널 구조에 따른 경로손실 특성을 분석하기 위해 직선터널과 곡선터널 및 직선, 곡선 구간이 함께 존재하는 혼합터널 내에서 수신 전력을 측정하였다. 측정을 수행한 모든 터널의 가시영역 경로손실 지수는 1.31~2.19로서, 실외 셀룰라 환경의 경로손실 지수(3~4)와 비교했을 때 터널의 가시영역은 신호의 감쇄가 매우 적은 채널환경임을 알 수 있었다. 직선터널과 곡률반경이 500 m, 200 m 인 두 곡선터널 비가시영역의 경로손실 지수는 각각 1.94, 2.92, 4.34로서 곡률반경이 작을수록 경로손실이 급격하게 발생하는 현상을 확인할 수 있었다. 한편 혼합터널의 곡선구간에 대한 경로손실 지수는 5.88로서 동일한 곡률반경을 갖는 곡선터널의 경로손실 지수 4.34 보다 큰 값을 보였다. 이를 통해 터널 환경에서의 경로손실 지수는 곡률 반경뿐만 아니라 송신기와 비가시영역 사이에 존재하는 가시영역의 거리에도 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다.

**Key Words** : Path loss, Path loss exponent, Satellite DMB, Subway tunnel, 2.65 GHz

### ABSTRACT

The research deals with the measurement of electromagnetic wave propagation in subway tunnels at 2.65 GHz. Measurements have been conducted in 4 different types of tunnel courses, a straight tunnel, two curved tunnels, with 245 m and 500 m radius of curvature, and a tunnel that has both straight and curved sections. we found that the path loss exponent for the line-of-sight(LOS) region inside all the tunnels is 1.31~2.19. The path loss exponents for LOS regions in the tunnel is lower than 3~4, which corresponds to the path loss exponent factor for outdoor cellular environments. The path loss exponents of the straight tunnel, two curved tunnels with 245 m and 500 m radius of curvature are 1.94, 2.92, and 4.34, respectively. This indicates that a smaller radius of curvature in tunnel results in a higher path loss exponent for nonline-of-sight(NLOS) region. The path loss exponents for the NLOS region in the combined and curved tunnel, which have the same radii of curvature, are 5.88 and 4.34, respectively. Therefore, it can be concluded that the path loss characteristics in tunnel environments are influenced by the radii of curvature as well as the LOS distance.

### I. 서 론

현재 이동통신서비스는 방송과 통신 무선랜 등 기존의 다양한 통신매체가 융합될 뿐만 아니라 '언제 어디서나 존재하는'이란 목표로 진화를 거듭해

나가고 있다. 이처럼 다양한 통신 시스템을 설계하기 위해 시스템이 운용될 채널 환경의 경로손실 특성에 대한 연구는 반드시 필요하다. 현재까지 2~3세대 셀룰러 이동통신 시스템을 위한 2 GHz 이하 주파수 대역 이하의 전파 채널 연구는 활발히 진행

\* 연세대학교 전기전자공학과 전파통신 연구실 (gminor@yonsei.ac.kr)

논문번호 : KICS2006-03-125, 접수일자 : 2006년 3월 14일, 최종논문접수일자 : 2006년 10월 9일

되었다<sup>[1-5]</sup>. 그리고 3세대 시스템의 뒤를 이을 차세대 무선통신시스템을 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 (Multichannel Multipoint Distribution Services)로 활용되고 있다. 또한 이 대역은 UMTS(Universal Mobile Telecommunication System)대역으로도 선정되어 무선 통신 및 방송시스템을 위해 활용도가 매우 높은 대역이다<sup>[8]</sup>. 한편 터널 환경은 무선 채널 환경 중 대표적인 음영지역으로서 실외 및 실내 환경의 무선 채널과는 다른 특성을 갖기 때문에 터널 환경에서 안정된 서비스 품질을 확보하기 위한 전파채널의 특성연구는 매우 중요하다.

터널환경에서 다른 주파수 대역에 대한 경로손실 특성은 해석, 측정, 시뮬레이션 방법을 통해 많이 연구되었다<sup>[9-11]</sup>. 한편 본 논문과 동일한 대역에 대한 기존의 연구<sup>[12][13]</sup>에서는 전파전파 시뮬레이션을 이용하여 채널 특성을 분석하였으며 [14]에서는 시뮬레이션과 측정을 병행하여 직선 및 곡선 터널의 특성을 분석하였다.

본 논문은 [14]에서 논의되지 않은 다양한 터널 구조 및 곡률반경에 따른 경로손실 특성을 제시하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 직선터널, 곡선터널, 직선구간과 곡선구간으로 구성되는 혼합터널에서 수신전력을 측정하였다. 그리고 측정자료를 바탕으로 곡률반경에 따른 경로손실 지수의 특성을 분석하였으며 곡선터널과 혼합터널의 곡선구간에서 관찰되는 경로손실 특성을 비교하였다.

## II. 위성 DMB 시스템 E

지하철 터널에서 2.65 GHz 신호의 경로 손실을 측정하기 위하여 그림 1과 같은 측정 시스템을 구현하였다. 측정 시스템은 크게 송신기, 수신기, 정보 저장 부분으로 구분할 수 있다. 야기(yagi) 안테나와

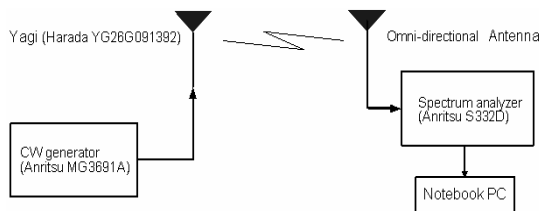


그림 1. 위성 송수신단의 블록다이어그램

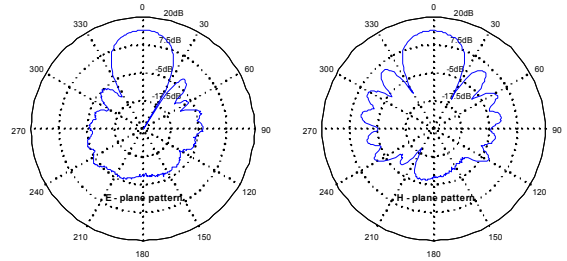


그림 2. 송신 안테나의 방사패턴

CW-generator로 구성하였다. CW-generator를 이용하여 20 dBm 전력의 2.65 GHz 단일 톤 신호를 송출한다. 송신 안테나는 지향성 이득은 9 dBi이며 방사 패턴은 그림 2에 나타내었다. 무지향성 수신 안테나와 스펙트럼 분석기로 수신기를 구성하였으며, 수신 안테나의 이득은 0dBi 이다. 측정에 이용된 스펙트럼 분석기는 전력이 -90~0 dBm인 신호를 측정할 수 있기 때문에 20 dBm의 최대 송신 전력과 9 dBi의 송신 안테나 이득을 고려할 경우 측정할 수 있는 최대 경로 손실은 119 dB이다. 스펙트럼 분석기를 통해 2 초 마다 측정된 수신전력 데이터는 노트북 컴퓨터에 저장된다.

## III. 측정 과정

인천 지하철 1호선 인천시청역에서 부평3거리 역까지의 구간의 지하철 터널 내에서 측정을 수행하였다. 측정지역 터널의 단면은 그림 3에 묘사된 것과 같이 아치모양이고 터널의 최대 높이는 6.745 m 터널의 최대 폭은 7.8 m이다. 터널의 구성 재료는 4.0의 유전율과 0.1의 도전율을 갖는 콘크리트이다. 터널의 벽면에는 전력 공급 및 통신을 위한 다수의 케이블이 설치되어있다. 3가지 형태의 터널 선로를 갖는 환경에서 측정을 수행하였으며, 측정 선로 환경에 대한 정보는 그림 4와 같다.

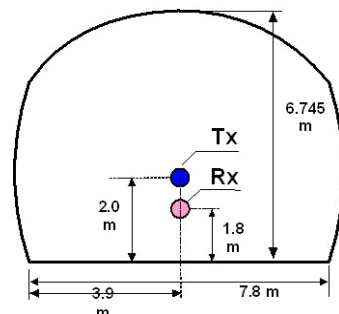


그림 3. BER 시뮬레이터의 구조

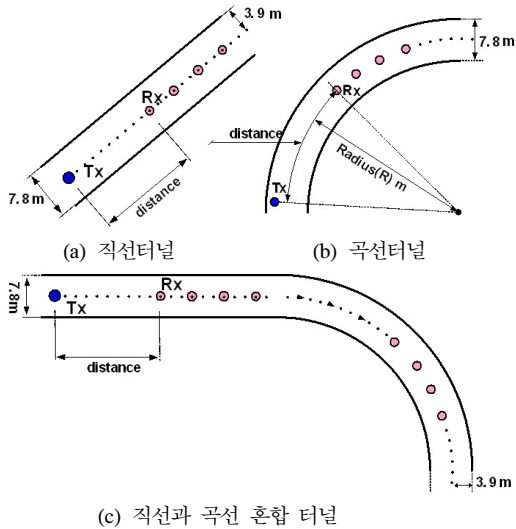


그림 4. 터널의 평균구조 및 송수신기 위치

그림 4-(a)에 묘사된 터널은 길이 560 m 구간의 직선 터널이고 그림 4-(b)에 묘사된 곡선터널의 길이는 300 m, 곡률반경은 245 m 이다. 그림 4-(c)에는 200 m 구간의 직선 터널과 곡률 반경이 500 m 이고 길이가 400 m 인 곡선터널로 구성되어 있는 혼합 터널이 묘사되어 있다. 모든 측정 과정에서 송신 안테나는 터널의 지면에서 2.0 m, 왼쪽 벽면에서 3.9 m 떨어진 지점에 위치시켰다. 또한 수신기는 터널 선로를 따라 등속도로 이동하였으며, 지면으로부터 1.8 m 높이에 고정했고, 터널의 왼쪽 벽면에서 3.9 m 떨어진 위치를 선택하였다. 송수신기 위치에 대한 정보는 그림 4를 통해 확인할 수 있다.

IV. 경로손실 특성

무선 채널 환경에서 송신된 전파는 반사, 산란, 회절 등의 물리적 현상을 겪으며 다중 경로를 통해 수

신되기 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-normal분포를 갖는 세도잉을 고려한 경로손실 모델은 식(12)와 같다<sup>[15]</sup>.

$$PL(d)[dB] = \overline{PL}(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (1)$$

위 식에서  $n$ 은 경로손실 지수이며 이 값은 송수신단간 거리의 증가에 따른 경로손실의 증가량을 의미한다. 즉  $n$ 이 큰 환경일수록 반사 및 산란체가 많이 존재하여 신호가 급격히 증가하게 된다.  $d_0$ 는 기준거리이며  $d$ 는 송수신기 간의 거리이다.  $X_\sigma$ 는 세도잉에 의한 손실값으로 표준편차가  $\sigma$ 이고 평균이 0인 가우시안 랜덤변수이다.

그림 5는 직선 터널(a)과 곡률 반경이 245 m인 곡선 터널의 경로 손실을 측정을 통해 분석한 결과이다. 여기서 직선 터널은 측정이 수행된 모든 구간에서 LOS가 보장되고, 곡선 터널은 송신기와 수신기 사이 거리가 87 m이내의 구간에서는 LOS 구간이고 그 이후는 NLOS 영역으로 판단할 수 있다. 우선 LOS영역에서는 직선 터널의 경로 손실 지수는 1.94이고, 곡선 터널에서는 1.31의 결과를 확인할 수 있다. 즉, 직선 터널이 곡선 터널의 LOS 영역보다 경로 손실 지수가 크다는 것으로 판단할 수 있다. 이런 현상은 2가지 이유로 설명이 가능하다. 첫째, 곡선 터널에서 볼록한 면에 반사가 일어날 경우에 그 반사파가 가지는 입사각은 직선 터널보다 항상 크다. 이렇게 반사파의 입사각이 클 경우, 반사파의 전력손실이 감소하기 때문에 경로손실이 직선터널보다 작아지게 된다. 둘째, 실제 측정에 사용된 아치형 터널은 옆면과 천정이 모두 오목한 특성

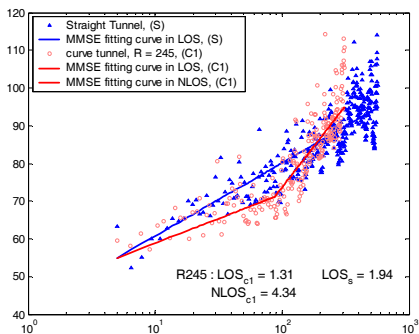


그림 5. 직선터널과 곡선터널(R=245m)의 경로손실

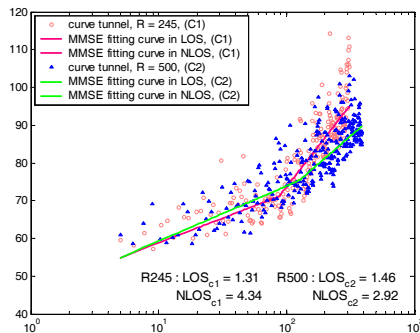


그림 6. 곡률반경에 따른 경로손실 특성

을 갖기 때문에 반사가 발생한 후에 에너지가 응축되는 현상이 발생한다. 곡선 터널의 경우에 곡률 반경이 존재하는 면에 대해서도 추가적으로 응축 현상이 발생하기 때문에 직선 터널에 비해 경로 손실이 적은 것으로 판단할 수 있다. 곡선 터널의 NLOS 영역에서는 LOS 성분이 존재하지 않기 때문에 결과 그림에서 break point가 확실히 나타난다. NLOS 구간에서 경로 손실 지수는 LOS 구간과 자유 공간에서의 경로 손실보다 큰 4.34 값을 갖는다.

그림 6은 곡률 반경이 서로 다른 곡선 터널에서 경로 손실 지수를 분석한 것이다. 곡률 반경이 245 m인 곡선 터널은 87 m를 기준으로 가시영역과 비가시영역이 나뉘고, 곡률 반경이 500 m인 곡선터널은 125 m를 기준으로 두 영역이 구분된다. 두 곡선 터널의 가시영역에서 경로손실 지수는 1.31, 1.46으로 유사한 값을 갖는다. 그러나 비가시영역에서는 곡률 반경이 245 m, 500 m인 터널의 경우 경로 손실 지수가 각각 4.34, 2.92로 큰 차이를 나타낸다. 이러한 현상은 곡선 터널의 비가시영역에서 곡률 반경이 작을수록 경로 손실 지수가 증가함을 의미한다. 곡선 터널의 비가시영역에 반사파가 도달할 경우에 곡선 터널의 곡률 반경이 클수록 반사파의 입사각도는 증가한다. 그러므로 비가시영역에서 반사파가 전파할 때에 입사각도가 크면 수신기에 도달할 때까지의 반사 횟수가 적고, 이에 따라 반사에 의한 전력 손실이 감소하게 된다. 이런 이유 때문에 곡률 반경이 클수록 경로 손실 지수는 감소하게 된다. 이는 곡률 반경에 따라 추가되는 손실을 수식으로 증명한 논문을 통해 측정 결과의 경향을 확인할 수 있다<sup>16)17)</sup>.

그림 7은 직선 구간과 곡선 구간이 연속적으로 연결된 혼합 터널과 직선 터널의 경로 손실을 분석한 것이다. 혼합 터널은 그림 4-6에서 볼 수 있듯이 직선 선로가 200 m거리까지 존재하고, 200 m이후에

는 곡률 반경이 500 m인 곡선 터널이 존재한다. 따라서 혼합터널에서 송신기와 수신기 사이의 가시영역은 직선구간에 해당하는 200 m보다 긴 254 m까지 존재하며 직선구간 전체와 곡선구간의 일부로 구성된다. 가시영역의 경로손실 지수는 혼합 터널에서 2.19, 직선 터널에서 1.94 로 계산되었다. 혼합 터널의 가시영역에는 곡선 구간이 포함되어 있지만, 실제 이 곡선 구간에서 반사된 전파가 가시영역 내에 위치하는 수신기에 도달하기 위해서는 반사파의 입사각이 커야한다. 그러나 반사파의 입사각이 크면 수신기에 도달하기 까지 반사 횟수가 증가하여 수신전력이 매우 감소하기 때문에 총 수신전력에는 거의 영향을 주지 않는다. 즉 가시영역 내에 포함되어 있는 곡선구간은 경로손실에 거의 기여를 하지 못한다. 따라서 혼합 터널의 가시영역에서 구한 경로 손실 지수는 직선 터널의 경로 손실 지수와 유사한 값을 보여야 하는데, 이는 시험 결과를 통해 확인할 수 있다. 또한 혼합 터널의 비가시영역에서 경로 손실이 급격히 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 결과적으로 터널에서는 가시 또는 비가시영역의 존재 여부가 경로 손실에 가장 큰 영향을 준다는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 혼합 터널에 존재하는 비가시영역과 곡선 터널에 존재하는 비가시영역에 대한 경로손실 지수의 특성을 나타낸다. 그림 8의 결과에서 주목할 사항은 동일한 곡률 반경을 갖는 곡선 터널이지만, 비가시영역 이전에 존재하는 가시영역의 길이에 따라 경로손실 지수가 차이를 보인다는 점이다. 즉 비가시영역 이전에 존재하는 가시영역의 길이가 증가할수록 비가시영역에서의 경로손실 지수는 증가한다. 이와 같은 현상이 발생하는 이유는 가시영역의 거리가 길수록 비가시 영역으로 진입한 전파가 터널 벽면에 반사될 때 입사각이 감소하기 때문이다.

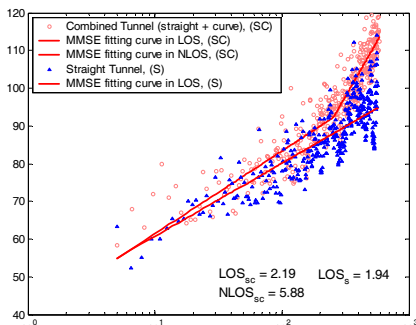


그림 7. 직선터널과 혼합터널의 경로손실 특성

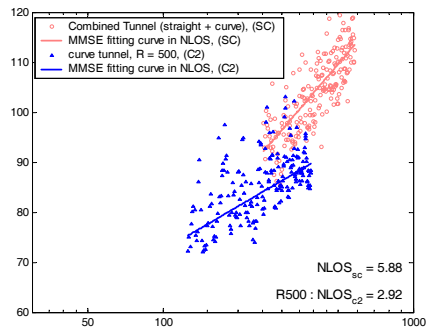


그림 8. 혼합터널과 곡선터널(R=500m)에서 비가시영역의 경로손실

즉 입사각이 감소하는 경우 동일한 거리를 진행하기 위해 전파가 벽면에 반사되는 횟수는 증가하므로 신호는 더욱 급격하게 감소하게 된다. 이와 유사한 현상은 코너가 존재하는 거리지역 마이크로셀 환경에서도 관찰되며 원인 또한 동일하다[7][18]. 따라서 터널 구간 내에 중계기를 설치하기 위해 시스템 링크버짓을 계산할 때 본 논문에서 제시된 경로 손실 특성을 고려한다면 보다 정확하고 효율적으로 중계기를 구성할 수 있을 것이다.

### V. 결론

본 논문에서는 측정을 통해 지하철 터널환경에서 위성 DMB 상용주파수 대역인 2.65 GHz 신호의 전파전파 특성을 분석하였다. 다양한 터널 구조에 따른 경로손실 특성을 분석하기 위해 직선터널과 곡선터널 및 직선, 곡선구간이 함께 존재하는 혼합터널 내에서 수신 전력을 측정하였다. 터널벽면의 웨이브가이드 효과로 인해 측정을 수행한 모든 터널의 가지영역에 대한 경로손실 지수는 1.31~2.19로 실외 셀룰라 환경의 경로손실 지수(3~4)와 비교했을 때 매우 작았다. 직선터널, 곡선터널 비가지영역(곡률반경 500 m), 곡선터널 비가지영역(곡률반경 245 m)의 경로손실 지수는 각각 1.94, 2.92, 4.34로서 곡률반경이 작을수록 경로손실이 급격하게 발생함을 알 수 있었다.

한편 혼합터널의 곡선구간에 대한 경로손실 지수는 5.88인 반면 동일한 곡률반경을 갖는 곡선터널의 경로손실 지수는 4.34로써, 송신기와 곡선터널의 비가지영역 이전에 존재하는 가지영역의 길이가 증가할수록 비가지영역에서의 경로손실 지수는 증가하는 사실을 확인할 수 있었다. 이와 같은 현상이 발생하는 이유는 가지영역의 거리가 길수록 비가지영역으로 진입한 전파가 터널 벽면에 반사될 때 입사각이 감소하여 전파가 동일한 거리를 진행하기 위해

겪게 되는 반사횟수가 증가하기 때문이다. 따라서 터널 환경에서의 경로손실 지수는 곡률 반경뿐만 아니라 송신기와 비가지영역 사이에 존재하는 가지영역의 거리에도 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다.

본 논문에서 분석한 2.65 GHz 대역은 현재 한국, 일본에서 위성 DMB 서비스를 위해 할당되어 있다. 따라서 본 연구 결과는 도심 지역의 대표적인 음영 지역인 지하철 터널에서의 안정된 위성 DMB 서비스를 제공하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] Byoung-Seong Park, Do-Hyung Choi, Kyung-Jae Kim, 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, September 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, Henry L. Bertoni, "Path-Loss Prediction Model for Microcells," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol 48, No. 5, September 1999.
- [6] 조한신, 박병성, 육종관, 박한규, 이정수, "3.4, 5.3, 6.4 GHz 대역 신호의 가지 및 비가지 구간에서의 경로손실 특성," 전자파학회 추계종합학술 발표회. Nov. 2002
- [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

표 1. 터널유형에 따른 경로손실 지수와 표준편차

터널 유형	영역	경로손실 지수(n)	표준편차(s)
직선터널	가지	1.94	5.47
곡선터널 (R=245 m)	가지	1.31	4.20
	비가지	4.34	7.50
곡선터널 (R=500 m)	가지	1.46	4.93
	비가지	2.92	5.26
혼합터널	가지	2.19	5.25
	비가지	5.88	4.83

8/LCCE/124 concerning frequency arrangements for the 2.6 GHz band”, 21. June. 2004.

[9] Satoshi Shinozaki, Masami Wada, Akio Teranishi, “Radio Propagation Characteristics in Subway Platform and Tunnel in 2.5GHz Band”, PIMRC’95 Sixth IEEE International Symposium on , Volume: 3 , 27-29 Sept. 1995.

[10] Martin Nilsson, Jesper Slettenmark, and Claes Beckman, “Wave Propagation in Curved Road Tunnels,” IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. 4, pp.1876-1879, Jun. 1998.

[11] Y.P. Zhang and Y. Hwang, “Characterization of UHF radio propagation channels in tunnel environments for microcellular and personal communications,” IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 47, no. 1, pp. 283-296, 1998.

[12] 김도윤, 조한신, 육종관, 박한규, “Ray-Launching 기법을 이용한 2.6 GHz 대역의 터널 내 경로손실 특성 분석”, 한국전자과학회 추계종합학술발표회. Nov. 2003.

[13] 조한신, 김도윤, 육종관, “터널 환경에서 2.6 GHz 대역신호의 전파전파 채널 특성”, 한국전자과학회 추계종합학술발표회. Nov. 2003.

[14] 최명선, 김도윤, 조한신, 문철, 육종관, 박한규, “지하철 터널 환경에서 2.65 GHz 대역신호의 전파전파 특성”, 한국전자과학회 논문지, vol. 16, no. 5, May 2005.

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

[16] Y.P. Zhang and Y. Hwang, “Characterization of UHF radio propagation channels in curved tunnel,” PIMRC’96, Seventh IEEE International Symposium, vol. 3, pp. 798-802, 1996.

[17] Martin Nilsson, Jesper Slettenmark, and Claes Beckman, “Wave Propagation in Curved Road Tunnels,” IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. 4, pp.1876-1879, Jun. 1998.

[18] Vinko Erceg et al., “Urban/Suburban Out-of-Sight Propagation Modeling”, IEEE Commun. Mag. pp. 56-61, June 1992.

조 한 신 (Han-shin Jo)

준회원



2001년 8월 연세대학교 전기전자공학과졸업(공학사)

2004년 2월 연세대학교 전기전자공학과졸업(공학석사)

2004년 9월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

<관심분야> 전파전파, 무선통신

채널모델링, MIMO/OFDM

김 도 윤 (Do-youn Kim)

준회원



2002년 8월 연세대학교 전기전자공학과졸업(공학사)

2004년 8월 연세대학교 전기공학과졸업(공학석사)

2004년 9월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

<관심분야> 전파전파, 무선통신

채널모델링, MIMO/OFDM

육 종 관 (Jong-gwan Yook)

정회원



1987년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1989년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(공학석사)

1996년 2월 University of Michigan(공학박사)

2000년 2월~현재 연세대학교교수

<관심분야> MEMS, 초고주파 회로, EMI/EMC, 초고주파 수치해석