

논문 2006-43TC-5-20

지하철 터널 환경에서 다양한 안테나에 따른 2.45GHz 대역의 경로손실 및 지연 특성

(Path Loss and Delay Characteristics According to Various Antennas
at 2.45GHz in Subway Tunnel Environment)

공민한*, 박노준**, 강영진**, 송문규***

(Min Han Kong, Noh Joon Park, Young Jin Kang, and Moon Kyou Song)

요약

전파 특성의 이해는 무선 통신 시스템의 설계와 서비스의 구축을 위해 매우 중요하다. 본 논문에서는 곡선형 지하철 터널 환경에서 2.45GHz 주파수 대역의 전파 특성을 측정하고 분석하였다. 슬라이딩 코릴레이션 기반의 채널 측정 시스템을 구성하고 안테나의 빔 형태에 따른 특성을 비교하기 위해 5 종류의 안테나를 사용하였다. 터널내 경로손실은 자유공간에 비하여 안테나에 따라 평균 4.38~14.41dB가 적고 원편파 안테나의 경로손실이 가장 적다. 또한 곡선구간에서 수신 안테나의 위치가 바깥쪽에 위치할 때 경로손실이 가장 적다. 모든 안테나의 지연성분의 90%가 20ns 이내에 존재하며, 지향성 안테나가 무지향성 안테나보다 더 넓은 코히어런스 대역폭을 갖는다. 측정결과 경로손실과 지연 특성을 고려할 때 지하철 터널에서는 원편파 안테나를 사용하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

Abstract

Understanding of propagation characteristics is very important for the wireless communication system design and wireless communication service construction. In this paper, propagation characteristics is measured and analyzed at 2.45Ghz frequency band under curved subway tunnel environment. We constituted channel measurement system with sliding correlation and five different kind of antennas. The purpose of five different type of antennas is to compare propagation characteristics according to beam shape of antennas. The path loss under tunnel environment is average 4.38~14.41dB lower than free space and circular polarization antenna marked smallest path loss. Also, path loss is smallest when the receiver antenna located outside of tunnel in th curved section. 90% of delay components of all antennas measured within 20ns and directional antenna has more wide coherence bandwidth than omni-directional antenna. According to measured result, when we consider path loss and delay characteristics, circular polarization antenna is most suitable under tunnel environment.

Keywords : channel measurement, path loss, delay profile, mean excess delay, rms delay spread

I. 서론

최근 몇 년 동안 무선통신 기술은 빠르게 발전해 왔

으며, 매우 빠르게 확산되고 있다. 또한 무선통신을 이용한 서비스 환경도 지하철 등의 지하 환경으로 확대되고 있다. 일반적으로 전파 특성의 이해는 무선 통신 시스템의 설계와 서비스의 구축을 위해 매우 중요하다^{[1][2]}. 특히, 터널과 같은 폐쇄공간 환경에는 LOS(Line of sight) 및 NLOS(Non-line of sight) 그리고 터널의 벽, 천장, 바닥 등 전파 경로에 영향을 끼치는 요인들이 존재하고 있으므로 전파는 반사와 회절을 겪으며 전파하게 된다. 이러한 다중경로 전파는 경로손실 및 신호지연을 일으켜 통신품질에 영향을 주게 되므로 전파 특성

* 학생회원, 원광대학교 제어계측공학과
(Dept. of Control and Instrumentation Engineering,
Wonkwang University)

** 정회원, *** 평생회원, 원광대학교 전기전자및정보공학부
(Dept. of Electrical, Electronic and Information
Engineering, Wonkwang University)

※ 이 논문은 2005년도 원광대학교의 교비 지원에 의해서 수행됨

접수일자: 2005년12월15일, 수정완료일: 2006년5월15일

을 정확하게 이해하는 것은 무선통신 시스템을 터널 내에서 운용하는데 있어 선행되어야 할 과제이며, 터널내의 경로손실에 대한 연구가 보고 되고 있다^[3~6]. 국내에서는 문헌 [7, 8]에서 지상의 터널에서의 경로손실을 측정하였다. 지하 터널에서의 전파측정은 문헌 [9, 10]에서 찾을 수 있다. 문헌 [9]는 무지향성 안테나와 지향성 안테나를 문헌 [10]은 지향성 안테나의 경로손실과 광대역 채널 특성을 비교하였다.

본 논문에서는 지하철 터널 환경에서 2.45GHz 주파수 대역의 전파 측정 결과를 제시한다. 터널에서 안테나의 편파 및 빔 형태에 따른 비교를 위해 5가지 안테나를 사용한다. 측정에 사용한 안테나는 무지향성 안테나 수직편파와 수평편파 그리고 지향성, 팬빔, 원편파를 갖는 지향성 안테나를 사용한다. 경로손실을 측정하기 위해 협대역 측정 시스템을 구성하고 송신기와 수신기의 거리에 따른 측정결과를 제시하고 그 결과를 분석한다. 특히 곡선 구간에서 수신 안테나의 위치에 따른 측정결과를 분석한다. 광대역 채널 특성을 분석하기 위해 슬라이딩 코릴레이션 기반의 측정 시스템을 구성하여 지연 프로파일을 측정한다. 이를 이용하여 평균 초과지연과 rms 지연 확산의 누적분포함수를 구하고 각 안테나에 따른 코히어런스 대역폭을 계산하였다.

II. 측정 시스템

측정 시스템은 Cox가 제안한 슬라이딩 코릴레이션 기법을 기반으로 구성하였으며, 시스템의 측정 원리와 성능은 문헌 [11~12]에 기술되어있다. 그림 1과 2는 각각 경로손실과 광대역 채널 측정 시스템의 측정을 위해 구성한 시스템의 블록 다이어그램을 보인 것이다. 주목할 점은 실내의 환경에 비하여 적은 경로손실을 갖기 때문에 증폭기가 불필요하며, 동일한 이유로 경로손실 측정 시스템에서 LNA의 선형 증폭 범위를 만족하기 위해 감쇄기를 사용한 것이다.

그림 2의 광대역 채널 측정 시스템의 송신기에서 반송파는 PN 시퀀스에 의해 BPSK 변조되고, 수신된 BPSK 신호는 필터링과 함께 송신기에서 사용한 PN 시퀀스를 사용하여 역확산한다. 이때, 송신기와 수신기의 PN 시퀀스는 동일하나 칩 율(chip rate)에 차이를 갖으며 이로 인해 서로 다른 시간 지연을 가지고 수신된 신호는 수신기의 PN 시퀀스와 서로 다른 시간에 최대의 상관값을 갖는다. 이 과정은 슬라이딩 변수에 의해 시간 스케일 된 채널 임펄스 응답의 연속적인 평가

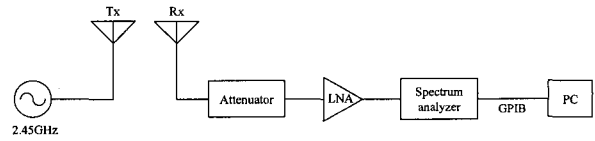


그림 1. 경로손실 측정 시스템
Fig. 1. Path loss measurement system.

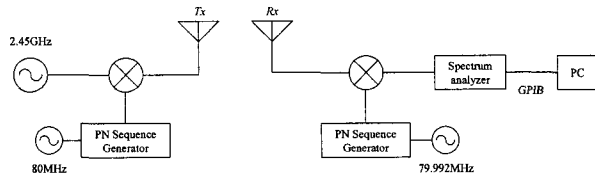


그림 2. 광대역 채널 측정 시스템
Fig. 2. Wideband channel measurement system.

표 1. 시스템 파라미터
Table 1. System parameters.

중심 주파수	2.45GHz
칩 율	80MHz (송신기) 79.992MHz (수신기)
코드 길이	1,023
슬라이딩 변수	10,000
대역폭	160MHz
송신전력	+10dBm (경로손실 측정 시) +4dBm (지연 프로파일 측정 시)
지연 분해능	25ns
측정 가능한 초과지연	12.7875us

표 2. 안테나 특성
Table 2. Characteristics of the antennas.

안테나 종류		특성	
		HPBW	이득[dBi]
무지향성		18° (수직) 360° (수평)	8
지향성	지향성	27° (수직) 27° (수평)	15.4
	팬빔	66° (수직) 46° (수평)	10.8
	원편파	30° (수직) 30° (수평)	11.7

를 산출한다.

본 논문에서 구성한 측정 시스템에서 송신기 PN 시

퀀스의 칩 율(Rc_Tx)과 길이는 각각 80MHz와 1,023이며, 수신기 PN 시퀀스의 칩 율(Rc_Rx)은 79.992MHz이다. 따라서 식 $Rc_Tx/(Rc_Tx-Rc_Rx)$ 로 주어지는 슬라이딩 변수는 10,000이다. 이 경우 측정 가능한 최대 지연 시간은 12.7875us이며, 분해능은 25ns이다. 표 1은 구성된 광대역 측정 시스템의 파라미터를 보인 것이다.

본 논문에서는 측정을 위해 무지향성 안테나와 지향성 안테나를 사용하였으며, 지향성 안테나로는 수직편파 특성을 갖는 지향성, 팬빔, 원편파 안테나를 사용하였다. 표 2는 측정에 사용된 안테나의 특징을 보인 것이다.

III. 측정 환경 및 절차

채널 측정을 수행한 터널의 기하학적인 특징은 그림 3과 같다. 터널의 길이는 116m의 승강장과 곡률반경이 350m인 곡선구간을 포함하여 843m이며, 승강장의 반대편은 미 굴착 지점으로 막혀있다. 터널의 단면은 폭이 4.22m이고 높이는 5.89m인 마제형이고 보수를 위한 인도가 존재한다.

채널 측정 구간은 843m의 전체 구간 중에 445m이며, 승강장에서 약 50m 떨어진 곳에 송신기를 고정시키고 수신기를 이동하면서 측정하였다. 송신기를 기준으로 175m는 LOS 구간이며, 270m는 NLOS 구간이다. 수신기의 이동 거리와 측정횟수는 경로손실 측정의 경우 2.5m마다 5회씩, 광대역 채널 측정의 경우 10m마다 10회씩 측정하였다. 송신 안테나는 터널 바닥에서 2.5m가 되도록 터널의 중앙에 설치하였다. 수신 안테나 역시 터널의 중앙에 위치하도록 터널바닥에 기준선을 설치하고 수신기의 이동성을 위해 운반 장치를 제작하였다.

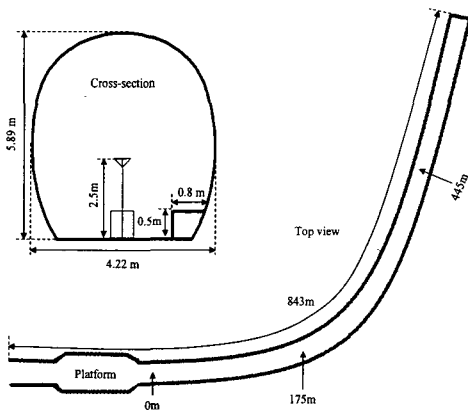


그림 3. 터널의 기하학적인 특징
Fig. 3. Geographical feature of the tunnel.

추가적으로 곡선구간에서는 안테나의 위치에 따른 경로손실을 측정하기 위해 터널의 안쪽, 중앙, 바깥쪽 세 지점을 통과하도록 하였다. 이렇게 측정된 데이터는 GPIB 카드를 통해서 PC에 자동으로 저장된다.

IV. 측정결과 및 분석

1. 경로손실

그림 4와 5는 각각 무지향성 안테나와 지향성 안테나의 경로손실을 보인 것이다.

측정 결과 터널내에서의 경로손실은 자유공간에 비하여 적은 것을 알 수 있으며 이는 터널이 갖는 도파관 구조에 의한 것으로 분석할 수 있다. 그림 4와 5에서 알 수 있듯이 무지향성 수평 편파 안테나의 레벨 변동이

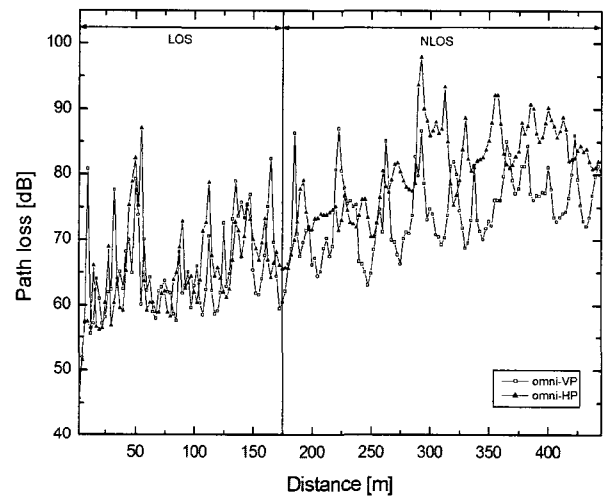


그림 4. 무지향성 안테나의 경로손실
Fig. 4. Path loss for omni-directional antennas.

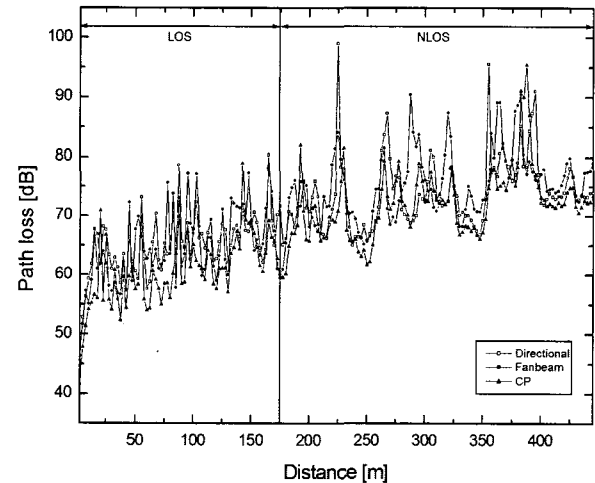


그림 5. 지향성 안테나의 경로손실
Fig. 5. Path loss for antennas with directional beam.

가장 심하다. 이것은 터널의 높이보다 폭이 좁은 마체형 구조에서는 수평 편파의 다중 반사파가 많이 발생하기 때문이다. 측정된 신호의 페이딩 특성을 분석하기 위한 표준편차는 식 (1)과 같다. 표준편차는 전체 445m의 측정 구간을 20m씩 22구간으로 나누고 각 구간에 대해 계산하였다^[4].

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n}} \quad (1)$$

식(1)에서 X는 수신된 신호세기이고, 바는 평균값을 의미한다. 그림 6과 7은 무지향성 안테나와 지향성 안테나의 송수신 거리에 따른 표준편차를 도시한 것이다.

그림 6과 7에서 상대적으로 큰 표준편차 값을 갖는 구간은 페이딩 현상이 심한 것을 의미한다. 무지향성

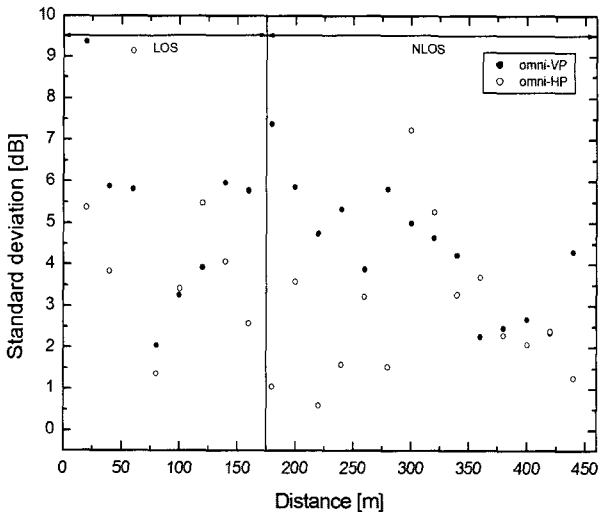


그림 6. 무지향성 안테나의 표준편차
Fig. 6. Standard deviation of omni-directional antennas.

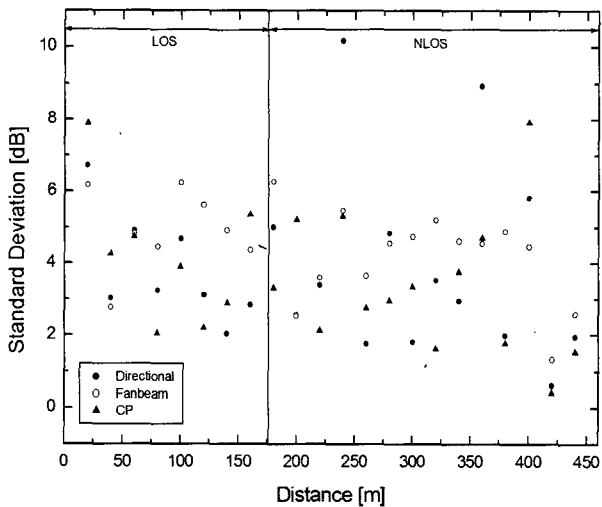


그림 7. 지향성 안테나의 표준편차
Fig. 7. Standard deviation for antennas with directional beam.

안테나보다 지향성 안테나가 상대적으로 작은 표준편차 값을 갖으며 변동폭도 적다. 또한 LOS 구간에서 송수신기 거리가 가까운 경우 더 큰 표준편차 값을 갖는 경향을 보이며 이것은 송신기에서 가까운 거리에서는 직접파와 반사파간의 위상 변화가 크게 나타나는 사실로 설명할 수 있다^[4].

거리에 따른 경로손실의 관계는 일반적으로 식 (2)에 의하여 표현된다^[13].

$$L(d)[dB] = L(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2)$$

여기에서 n은 거리에 따른 경로손실의 증가 속도를 나타내는 경로손실 지수이며 d₀는 기준거리, d는 송신기와 수신기 사이의 거리이다. 그림 8은 각 안테나에

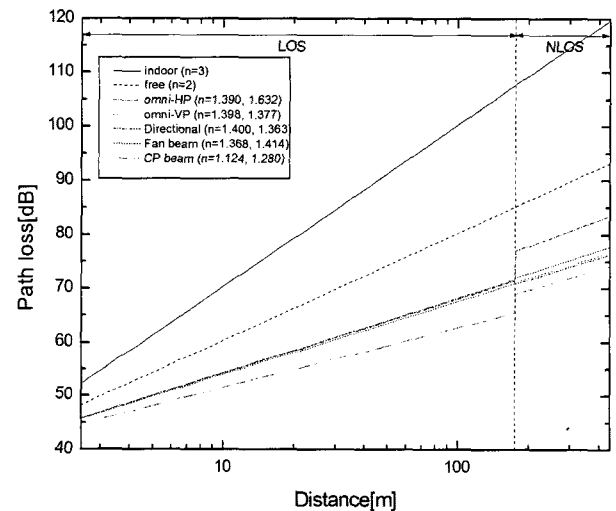


그림 8. 경로손실 지수에 따른 경로손실
Fig. 8. Path loss according to the path loss exponent.

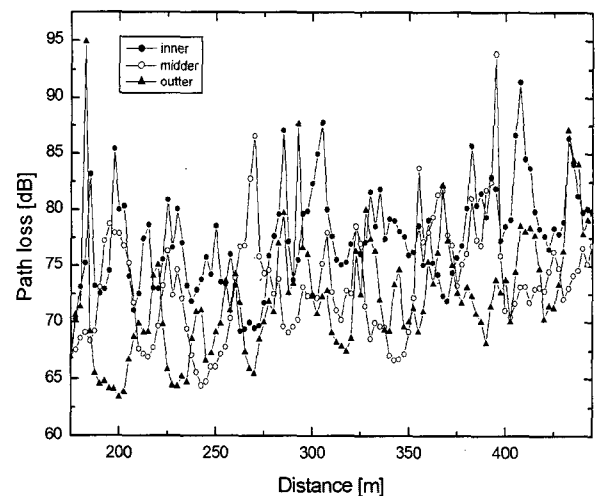


그림 9. 안테나의 위치에 따른 경로손실
Fig. 9. Path loss according to the antenna location.

대한 경로손실 지수를 구하고 이를 이용하여 계산된 경로손실을 로그스케일로 표현한 것이다. LOS와 NLOS 구간에서 계산된 n 은 괄호안에 표시하였다. 일반적으로 자유 공간에서의 n 은 2, 실내 환경에서는 3이다. 터널에서의 경로손실은 자유공간과 실내 환경에 비하여 적고 그 증가율도 낮음을 알 수 있다. 무지향성 수직편파, 지향성, 팬빔 안테나의 경로손실 율은 LOS와 NLOS구간에 대하여 거의 일정함을 알 수 있다. 원편파 안테나는 가장 낮은 경로손실을 갖는 반면에 NLOS 구간에서 급격한 경로손실 상승을 보인다. 이러한 현상은 무지향성 수평편파에서도 나타난다.

그림 9는 곡선 구간에서 수신 안테나가 터널의 안쪽, 중앙, 바깥쪽에 위치한 경우에 따른 경로손실을 비교한 것이다. 일반적으로 안테나의 위치는 반사각에 관련되며 반사각이 좁을수록 더 높은 반사 계수를 가지므로 터널의 바깥쪽에 안테나가 위치하는 것이 더 효율적임을 알 수 있다^[5].

2. 광대역 채널 특성

광대역 다중경로 채널의 시분산 특성은 평균 초과 지연(mean excess delay) $\bar{\tau}$ 와 rms 지연 확산(rms delay spread) σ_τ 로 표현될 수 있다. 평균 초과 지연은 광대역 채널 측정 시스템을 이용하여 측정한 전력 지연 프로파일의 1차 모멘트이며, rms 지연 확산은 2차 중심 모멘트의 제곱근으로서 코히어런스 대역폭을 결정하는데 활용된다^[14]. 평균 초과 지연과 rms 지연 확산은 각각 식 (3)과 (4)로 주어진다.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (3)$$

여기에서, τ_k 는 k 번째 다중경로 성분의 시간지연이고 a_k^2 는 k 번째 다중경로 성분의 전력이다.

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} \quad (4)$$

여기에서 $\overline{\tau^2}$ 는 식 (5)와 같다.

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k^2}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (5)$$

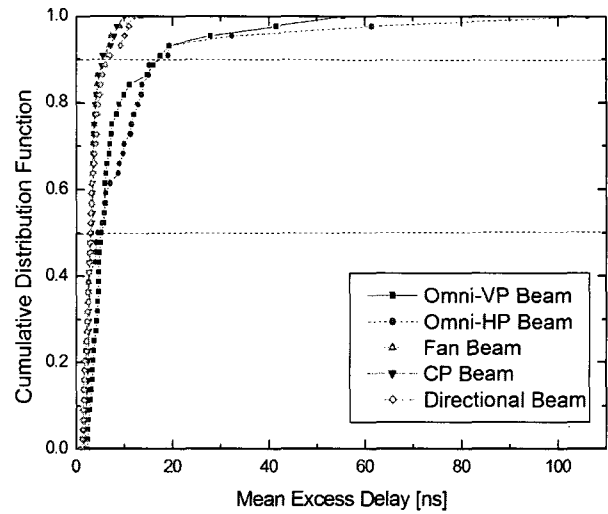


그림 10. 안테나에 따른 평균 초과 지연의 CDF
Fig. 10. CDF of mean excess delay spread according to antennas.

표 3. 안테나에 따른 상관 대역폭
Table 3. Coherent bandwidth according to antennas.

	Omni-HP	Omni-VP	Directional	Fan beam	CP
$B_c \cong 1/50\sigma_\tau$	0.42	0.48	1.76	1.20	1.03
$B_c \cong 1/5\sigma_\tau$	4.22	4.85	17.59	12.03	10.30

일반적으로 실외 환경에서의 RMS 지연확산 값은 μ sec 단위이며 실내 환경에서는 nsec 단위가 된다. 측정된 평균 초과 지연의 누적 분포 함수(CDF)를 그림 9에 보인다. 그림 10에서 알 수 있듯이 모든 안테나에서 지연성분의 대부분, 약 90%는 20ns 이내에 존재한다.

표 3은 안테나에 대한 상관 대역폭을 계산한 것이다. 상관 대역폭 B_c 는 채널의 주파수응답이 다른 주파수에 대하여 높은 상관관계가 있는 대역폭을 의미한다. 표 3에서 알 수 있듯이 지향성 안테나의 경우 무지향성 안테나보다 코히어런스 대역폭이 넓은 것을 확인할 수 있고, 이것은 지향성 안테나가 채널을 통해 전송되는 신뢰성 있는 데이터율이 더 높다는 것을 의미한다.

V. 결 론

본 논문에서는 지하철 터널 환경에서 2.45GHz 주파수 대역의 채널 측정을 수행하였다. 측정을 위해 무지향성 안테나와 세 가지 형태의 지향성 빔을 갖는 안테나를 사용하였다. 첫 번째로 송신기와 수신기 사이의

거리와 곡선 구간에서 수신 안테나의 위치에 따른 경로 손실을 측정하고 그 특성을 분석하였다. 측정결과 터널 내에서의 경로손실은 자유공간과 비교하여 안테나에 따라 평균 4.38~14.41dB가 적다. 특히 원편파 안테나의 경로손실이 가장 적었다. 광대역 채널 측정 결과 모든 안테나의 지연 성분의 90%는 20ns 이내에 존재하며 지향성 안테나가 무지향성 안테나보다 더 넓은 코히어런스 대역폭을 갖음을 알 수 있었다. 측정결과 경로손실과 지연 특성을 고려할 때 지하철 터널에서는 원편파 안테나를 사용하는 것이 적합한 것으로 판단된다. 본 논문은 지하 터널내의 채널 특성을 위한 자료가 될 수 있으며, 이후 지하터널에서 무선 통신 시스템의 활용과 서비스 구축에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] D. Porrat and Donald C. Cox, "UHF propagation in indoor hallways," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 5, pp. 1188-1198, Jul. 2004.
- [2] S. Shinozaki, M. Wada, A. Teranishi, "Radio Propagation Characteristics in Subway Platform and Tunnel in 2.5GHz Band," *IEEE PIMRC'95*, vol. 3, pp. 27-29, Sept. 1995.
- [3] Y. P. Zhang and Y. Hwang, "Theory of the Radio-Wave Propagation in Railway Tunnels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 47, no. 3, pp. 1027-1036, 1998.
- [4] Satoshi Shinozaki, Masami Wada, Akio Teranishi, Hiroshi Furukawa and Yoshihiko Akaiwa, "Radio Propagation Characteristics in Subway Platform and Tunnel in 2.5GHz Band," in *Proc. PIMRC'95*, vol. 3, pp. 1175-1179, Sep. 1995.
- [5] J. S. Lamminmaki and J. J. A. Lempinen, "Radio propagation characteristics in curved tunnels," in *Proc. Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 145, no. 4, pp. 327-331, Aug. 1998.
- [6] Dirk Didascalou, Jurgen Maurer, and Werner Wiesbeck, "Subway Tunnel Guided Electromagnetic Wave Propagation at Mobile Communications Frequencies," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, No. 11, Nov. 2001.
- [7] 김경재, 윤영중, 박한규, "터널에서의 전파경로손실 분석," *한국통신학회 논문지*, 제10권, 제1호, pp. 37-43, 1993. 1.
- [8] 김기래, 한경구, T. Matsunaga, K. Uchida, K. Yasumoto "굴곡 및 굴절형 터널 내의 전파 전파의 전송 효율에 관한 연구," *대한전자공학회논문지*, 제33권 A편, 제12호, pp. 2333-2340, 1996. 12.
- [9] "곡선형 지하철 터널환경에서 전파 특성의 분석과 측정," *한국통신학회논문지*, 제29권, 제8A호, pp. 950-961, 2004. 8.
- [10] "IEEE 802.11 무선랜을 위한 지하철 터널 환경에서 다양한 지향성 빔의 전파 측정," *한국해양정보통신학회논문지*, 제8권, 제2호, pp. 232-238, 2004. 4.
- [11] D. C. Cox, "Delay Doppler Characteristics of Multipath Propagation at 910MHz in a Suburban Mobile Radio Environment," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 20, no. 5, pp. 625-635, Sep. 1972.
- [12] J. Talvitie, P. Leppanen, T. Poutanen, "A Wideband Channel Measurement System for Aircraft Air-to-Ground Links," in *Proc. IEEE ISSSTA 92*, pp. 187-190, Nov. 1992.
- [13] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, "900MHz Path Loss Measurements and Prediction Techniques for In-Building Communication System Design," *proc. IEEE VTC'91*, pp. 613-618, May 1991.
- [14] J. D. Parsons, *The Mobile Radion Propagation Channel*, John Wiley & Sons, 2/E, 2000.

저 자 소 개



공민한(학생회원)
 2001년 2월 원광대학교
 전기공학부 졸업
 2003년 2월 원광대학교 제어계측
 공학과 공학석사
 2003년 3월~현재 원광대학교
 제어계측공학과 박사과정

<주관심분야: 디지털 통신시스템 설계, 채널 부호화>



박노준(정회원)
 1993년 2월 원광대학교
 전자공학과 졸업
 1995년 2월 원광대학교
 전자공학과 공학석사
 2004년 8월 원광대학교
 전자공학과 공학박사

1995년 8월~현재 원광대학교 전기전자 및
 정보공학부 시간강사/강의교수
 <주관심분야: RF 수동소자 및 안테나 설계, 전
 파 측정 및 채널 모델링>



강영진(정회원)
 1974년 2월 광운대학교 무선통신
 공학과 졸업
 1980년 2월 건국대학교
 전자공학과 공학석사
 1990년 2월 건국대학교
 전자공학과 공학박사

1993년 1월~1994년 1월 일본 동경공업대학
 객원연구원
 1981년 3월~현재 원광대학교 전기전자 및
 정보공학부 교수
 <주관심분야: 광집적소자, 광통신시스템>



송문규(평생회원)
 1988년 2월 고려대학교
 전자공학과 졸업
 1990년 2월 고려대학교
 전자공학과 공학석사
 1994년 2월 고려대학교
 전자공학과 공학박사

1999년 9월~2000년 8월 캐나다 빅토리아대학교
 전기및컴퓨터공학과 객원교수
 1994년 3월~현재 원광대학교 전기전자및정보
 공학부 교수
 2006년 2월~현재 미국 스탠포드 대학교
 전기공학과 방문교수
 <주관심분야: 무선통신, 디지털 통신시스템 설계,
 채널 부호화>