

곡선형 지하철 터널환경에서 전파 특성의 측정과 분석

정희원 정 회 동*, 박 노 준**, 강 영 진***, 송 문 규****

Measurement and Analysis of Propagation Characteristics in Curved Subway Tunnel Environments

Heoi Dong Jung*, Noh Joon Park**, Young Jin Kang***, Moon Kyou Song**** *Regular Members*

요 약

이 논문에서는 최근 무선 통신 환경으로 증가하고 있는 지하철 터널 환경에서의 전파 특성을 측정하고 분석하였다. 측정은 지하철 터널에서 2.45GHz와 5.8GHz의 주파수 대역을 가지고 수행하였다. 측정을 위해 사용된 터널의 길이는 LOS(line of sight: LOS)가 175m이고, NLOS(non line of sight: NLOS)가 270m이다. 지하철 터널은 곡선형이며, 그 단면은 마제형(horseshoe type)이다. 측정 시스템은 협대역 시스템과 광대역 시스템을 이용한다. 협대역 시스템은 경로손실(path loss: PL) 측정을 위해 사용되고 광대역 시스템은 전력지연프로파일(power delay profile: PDP) 측정을 위해 사용된다. 특히, 광대역 시스템은 슬라이딩 코릴레이션 기법을 기반으로 80MHz 칩율과 1023길이의 PN 시퀀스 발생기로 구성하였다. 안테나 빔 형태에 따른 전파특성을 분석하기 위해서 무지향성 안테나와 지향성 안테나를 사용하였다. 경로손실은 터널 환경의 순수한 경로손실만을 나타내었다. 지연 프로파일은 평균초과지연(Mean Excess Delay)와 RMS 지연확산(RMS delay spread)에 대해서 분석하였다.

Key Words : subway tunnel; path loss; sliding correlation; mean excess delay; RMS delay spread

ABSTRACT

In this paper, we measured and analyzed propagation characteristics in a subway tunnel that is recently increasingly becoming one of the radio communication environments. The measurements are carried out in a subway tunnel with frequency bands of 2.45GHz and 5.8GHz. The length of tunnel we used for this study is 175m of LOS (Line-of-sight) and 270m of NLOS (Non Line-of-Sight). The subway tunnel is curved and its cross section is horseshoe type. The measurement systems we employ in this study are a narrow-band system and a wide-band system. The narrow-band system is used to get path loss measurement and the wide-band system is used to figure out delay profile measurement. In particular, the wide-band system consists of 1023 length PN sequence generator using a chip rate of 80MHz based on a sliding correlation technique. The omni-directional antennas and directional antennas are used to analyze propagation characteristics for beam type of antenna. The path loss displays only pure path loss of a tunnel environment. The delay profile indicates the mean excess delay and RMS (root mean square) delay spread.

1. 서 론

최근 몇 년 동안 무선통신 기술이 빠르게 발전해

왔으며, 대중으로의 보급 또한 매우 빠르게 확산되고 있어 그 수요 면에서 이미 유선통신을 앞선 상태이 다^[1]. 산업과 과학이 발전함에 따라 대중의 활동 영

* (주)나리직은 FSB/DEG2(ggamsa@hanmail.net), ** 원광대학교 전자공학과 초고주파 및 광통신연구실(parknohjoon@hanmail.net)

*** 원광대학교 공과대학 전기전자 및 정보공학부(yjkang@wonkwang.ac.kr)

**** 원광대학교 공과대학 전기전자 및 정보공학부(mksong@wonkwang.ac.kr)

논문번호 : 030432-1006, 접수일자 : 2003년 10월 6일

*이 논문은 2004년도 원광대학교의 교비 지원에 의해서 수행됨.

역은 실내외 환경을 넘어서 지하 환경으로까지 확대되고 있다. 이로 인하여 무선통신의 환경도 음영 지역으로 간주되고 있는 지하 환경으로 확대되고 있다. 그러나 지하 환경이 실내외 환경에 비해 무선 통신 서비스를 위한 유용한 자료들이 현저하게 적으며, 외국과 비교해서도 부족한 것이 국내의 현실이다^[2]. 최근 국내외적으로 많은 통신 연구자들에 의해 지하 환경에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이에 대한 관심도 증가하고 있다^{[3][4]}. 무선 통신에 있어서 전파전파에 영향을 미치는 요인들이 많으며, 그 예로는 송수신기 사이의 거리, 송수신기 사이에 존재하는 장애물, 안테나의 종류, 전파 환경 등이 있다. 이런 여러 가지 요인들로 인하여 전파는 반사, 회절, 산란 등의 현상을 일으킨다^{[6][8]}. 반사, 회절, 산란의 전파 특성들은 전파의 세기를 감쇄시키고 다중 경로를 발생한다. 수신기 측면에서 다중 경로를 통한 전파들의 수신들은 서로 다른 위상과 크기를 가지며, 이 위상들의 합에 의해 전파의 경로손실이 달라지기도 한다. 그리고 다중 경로의 전파들은 서로 다른 경로 길이를 가지고 있으므로 수신기 측면에서 서로 다른 시간 지연을 가지고 수신된다.

무선통신에 있어서 전파전파의 정확한 예측은 최적의 기지국 위치, 기지국의 종류, 셀 등을 구축하는데 있어 매우 유용한 자료가 된다. 또한 이것은 가입자와 서비스 제공자 모두에게 장점을 제공한다. 가입자는 음영 지역이 해소됨으로써 양질의 통신 서비스를 제공받을 수 있고, 서비스 제공자는 기지국의 수를 감소시킴으로써 경제적인 장점을 얻을 수 있게 된다.

본 논문은 지하철 터널 환경에서 2.45GHz와 5.8GHz 주파수 대역을 통한 무선통신 서비스를 위해서 안테나 종류, 송신기와 수신기 사이의 거리, 전파 환경의 요인들에 따른 경로손실과 지연 프로파일 특성을 측정하고 분석한다. 경로손실 측정에서는 안테나의 이득이나 시스템 상에서 얻어지는 이득과 손실을 제외하고 순수하게 지하철 터널환경의 경로손실만을 나타내었으며, 안테나가 LOS와 NLOS 구간에 존재할 경우 경로손실 특성을 분석하였다. 지연 프로파일은 평균초과 지연과 RMS 지연 확산을 누적 분포 함수 그래프로 나타내어 지연 특성을 분석한다. 그리고 이들을 통한 코히어런스 대역폭을 분석한다.

본 논문의 II장에서는 본 연구에서 사용된 측정 시스템을 소개한다. 특히 지연 프로파일 특성을 측정하기 위한 슬라이딩 코릴레이션(Sliding Correlation)기반

의 광대역 시스템을 설명하고^[9], 각 측정에서 사용된 안테나를 설명한다. III장에서는 측정이 수행된 지하철 터널환경에 대해 설명하고, IV장에서는 측정과정을 설명한다. V장은 측정 결과를 분석하고, 마지막으로 VI장에서 결론을 맺는다.

II. 측정 시스템

본 논문에서는 전파의 경로손실과 지연 프로파일 특성을 측정하였다. 경로손실을 측정하기 위하여 협대역 측정시스템을 구성하였고, 지연 프로파일 측정을 위하여 광대역 측정 시스템을 구성하였다. 그림 1은 측정을 위해 구성된 실제 송수신기 시스템이다.



(a) 송신기 시스템
(a) Transmitter system



(b) 수신기 시스템
(b) Receiver system

그림 1. 송수신기 시스템
Fig. 1. Transmitter and receiver system

1. 협대역 측정 시스템

전파의 경로손실을 측정하기 위한 협대역 측정 시스템은 그림 2와 같이 구성된다.

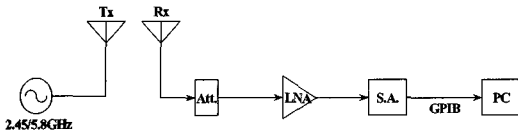


그림 2. 협대역 측정시스템
Fig. 2. Narrowband measurement system

2.45GHz와 5.8GHz 주파수를 발생하는 Giga-tronics GT 900s 신호 발생기, HP 8495D 감쇄기, 수신기 안테나에 수신된 신호를 증폭시키는 MSH-4572301 LNA(Low Noise Amplifier, LNA), 신호의 검출을 위한 HP 8563 주파수 분석기, 검출된 데이터들을 저장하기 위한 GPIB 카드와 PC, 그리고 송수신을 위한 안테나로 구성된다. LNA는 주파수에 따라 그 증폭률이 다르고, 이것이 일정한 증폭률로 동작하기 위해서는 요구되는 레벨이 입력 되어야한다. 이를 위해 LNA 앞단에서 감쇄기를 사용한다. 감쇄기는 10dB 단위로 조절이 가능하며, 송수신기 사이의 거리와 전파 환경에 따라서 조정한다. 일반적인 실외 환경이나 실내 환경에서는 송신단에 고출력 증폭기(High Power Amplifier)를 사용한다. 그러나 본 전파 측정을 위한 지하철 터널환경에서는 경로손실이 크지 않기 때문에 고출력 증폭기를 사용하지 않았다.

2. 광대역 측정 시스템

지연 프로파일 특성을 측정하기 위한 광대역 측정 시스템은 그림 3처럼 구성된다.

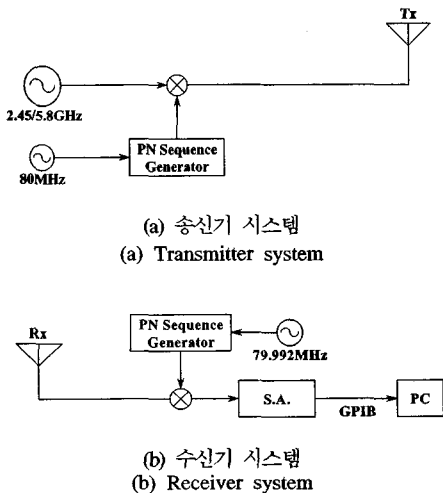


그림 3. 광대역 측정시스템
Fig. 3. Wideband measurement system

이 시스템은 슬라이딩 코릴레이션 기법을 기반으로 구성되었다^{[10][11]}. 여기서 반송파 신호는 빠른 PN 시퀀스와 믹싱되어 확산하고 안테나를 통해 전송된다. 대역 확산된 신호의 전력 스펙트럼은 $2R_c$ 의 대역폭을 가진다^{[6][12]}. R_c 는 PN 시퀀스 코드의 칩율을 나타낸다. 그림 2에서 두개의 PN 시퀀스가 동일하나 송신기와 수신기의 칩 클럭이 약간의 차이를 갖는다. 송신에서는 80MHz, 수신에서는 79.992MHz를 사용하였다. 이 시스템에서 시간 분해능은 다음과 같다.

$$\Delta\tau \approx 2T_c = \frac{2}{R_c} \tag{1}$$

여기서, T_c 는 칩 주기이며 시간 분해능은 다중경로 성분을 분해할 수 있는 능력으로 $\Delta\tau$ 초 이상의 시간 간격을 가지고 수신되는 신호들을 분해할 수 있다.

표 1. 광대역 측정시스템 파라미터
Table 1. Parameters of the wideband channel

파라미터	값
R_c	80 MHz
T_c	12.5 ns
$\Delta\tau$	25 ns
ΔT	12.7875 us
α	80 MHz
β	79.992 MHz
γ	10000
n	10
N	1023

또한 슬라이딩 코릴레이션의 최대값은 주기적으로 반복하게 되는데 그 시간 간격은 ΔT 로 다음 식처럼 나타낼 수 있으며, 이것은 측정 가능한 최대 지연 시간을 의미한다.

$$\Delta T = T_c \gamma N = \frac{\gamma N}{R_c} \tag{2}$$

여기서, N 은 시퀀스 길이이고 γ 는 슬라이딩 변수이며 각각은 다음과 같다.

$$N = 2^n - 1 \quad (3)$$

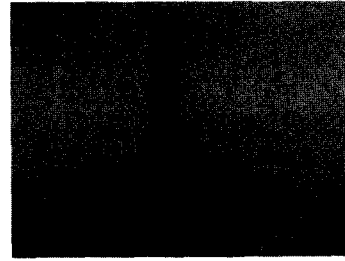
$$\gamma = \frac{\alpha}{\alpha - \beta} \quad (4)$$

여기서 α 는 송신기 칩율이고, β 는 수신기 칩율이다. n 은 PN 시퀀스 발생기의 쉬프트 레지스터 수이다. 표 1은 광대역 채널 파라미터이다.

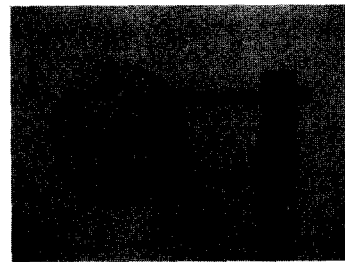
3. 안테나

측정에 사용된 안테나는 모두 상용 안테나로서 선형편파 특성을 갖는 지향성 안테나(directional antenna)와 무지향성 안테나(omnidirectional antenna)이고, 무지향성 안테나의 경우에는 수직편파(vertical polarization: VP)와 수평편파(horizontal polarization: HP)로 나누어 편파에 의한 영향을 고찰하였으며 송신기에서 사용한 안테나와 동일한 안테나를 수신기에서 사용하였다.

송신기와 수신기 안테나는 측정시 서로가 마주 볼 수 있도록 설치하였으며, 높이는 송수신기 모두 바닥으로부터 2.5m가 되도록 하였다. 그림 4는 실제 사용된 안테나이며 안테나 특성들은 표 2와 같다.

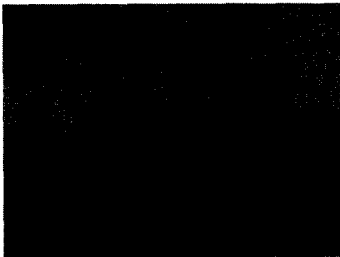


(c) 5.8GHz 무지향성 안테나
(c) Omnidirectional antenna for 5.8GHz

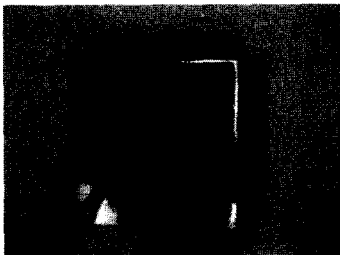


(d) 5.8GHz 지향성 안테나
(d) Directional antenna for 5.8GHz

그림 4. 안테나 형태
Fig. 4. Shape of antennas



(a) 2.45GHz 무지향성 안테나
(a) Omnidirectional antenna for 2.45GHz



(b) 2.45GHz 지향성 안테나
(b) Directional antenna for 2.45GHz

표 2. 안테나 특성

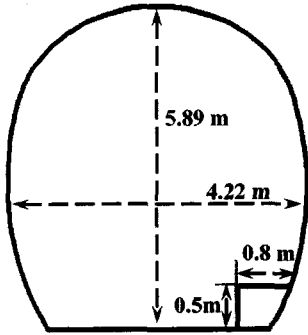
Table 2. Characteristics of the antennas

안테나	구분	2.45GHz	5.8GHz
무지향성	수평빔폭	360°	360°
	수직빔폭	18°	14°
	이득	8dBi	9dBi
지향성	수평빔폭	27°	34°
	수직빔폭	27°	30°
	이득	15.4dBi	16dBi

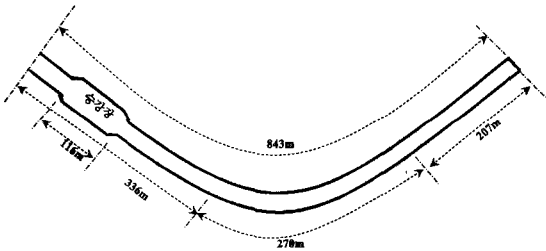
III. 측정 환경

본 연구를 위해서 측정을 수행한 지하철 터널은 대전역 부근의 제 4공사 구간이다. 이 공사 구간은 미완성 구간으로 내부에는 장애물이 거의 존재하지

않는다. 이 터널의 단면은 구간에 따라 원형과 아치형으로 구성되어 있으며, 평면은 곡선형이다. 터널 내에 공사를 위한 작은 장비들, 배열 전구, 그리고 전선들이 있다. 승강장 쪽은 공사가 진행 중이고, 비교적 크기가 큰 장비들이 존재한다. 그림 5는 터널의 단면도와 평면도이다.



(a) 단면도
(a) cross section



(b) 평면도
(b) Top view

그림 5. 터널의 단면도와 평면도
Fig. 5. Cross section and top view of the tunnel

터널의 길이는 승강장부터 총 843m이고 승강장의 반대편은 미 굴착 지점으로 막혀있다. 승강장의 길이는 약 116m이다. 직선 구간의 길이는 366m이고 곡선 구간의 길이는 270m이며 그 후에 직선 구간의 길이가 207m이다. 단면도를 보면 폭이 4.22m이고 높이는 5.89m이다. 터널의 존재하는 위치의 환경에 따라서 원형인 구간도 있고, 그림처럼 마제형인 구간도 존재한다. 대부분의 구간이 마제형으로 이루어져 있으며, 곡선형 터널이기 때문에 모든 구간이 매끄럽게 연결되지 못하고 약간의 도출부가 존재하기도 한다. 또한 터널 점점을 위해서 보수용 인도가 존재하며 그 높이는 0.5m이고 폭은 0.8m이다. 보수용 인도 쪽

의 벽면에 전선들과 백열전구가 존재하며 백열전구의 간격은 약 15m이다.

터널의 최대 곡률반경은 R350으로서 이것은 NLOS를 형성하는 곡선구간이 반경 350m인 원의 원주 상에 놓이게 됨을 의미한다. 만약 최대 곡률반경이 R350보다 작게 되면 운행속도가 약 80km/h인 지하철이 회전할 수 없게 되며, 따라서 현재 국내에 건설되어 있거나 건설 중에 있는 지하철 구간에는 R350 이하의 곡률반경이 존재하지 않는다. 이러한 이유로 이 터널을 선택하여 측정을 수행하였다. 터널의 휘어진 안쪽의 곡률반경은 R 341m이며, 바깥쪽의 곡률반경은 R 359m이다. 표 3은 터널의 특성을 나타낸다.

표 3. 터널의 특성
Table 3. Characteristics of the tunnel

내용	값
최대 곡률 반경	R341m, R350m, R359m
벽면 재료	240 강도 콘크리트
바닥 재료	300 강도 콘크리트
깊이	지하 30m
길이	843m
복소 유전율	7 - j0.8

IV. 측정 과정

측정은 총 445m 길이의 구간에서 실시하였으며, 곡선 구간은 270m이고 직선구간이 175m이다. 송신기 안테나의 위치는 승강장 끝에서 터널 안쪽으로 약 50m정도 떨어진 지점에 두었고, 수신기를 이동하면서 측정을 수행하였다. 그림 6은 측정을 위한 안테나 위치이다.

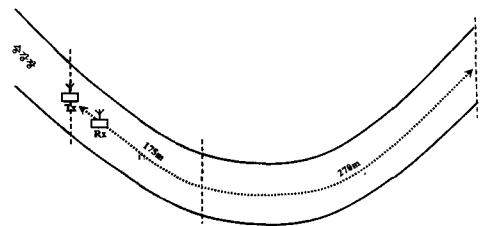


그림 6. 측정을 위한 안테나 위치
Fig. 6. Antenna positioning for measurements

경로손실 측정은 총 445m 구간을 2.5m씩으로 나누어 실시하였다. 또한 측정기점에서 11m 떨어진 지점부터 14m까지의 3m 구간을 미세 측정구간으로 정하고, 1cm씩 이동하며 고속 페이딩(fast fading)으로 인한 수신전력 레벨의 변화(level fluctuation)를 측정하였다. 터널 내에서 안테나는 중앙에 위치하도록 하였다. 송신기는 고정하고 수신기가 이동하면서 측정을 실시하기 때문에 주파수 대역과 안테나 종류에 따른 정확한 비교를 위해서는 매 거리마다 동일한 위치에서 측정을 실시해야한다. 이를 위해서 터널 내 중앙 부분에 미리 기준선을 설치하고 매 측정 위치에 기준점을 표시하였다. 안테나가 동일한 방향과 일정한 높이를 유지하고 수신기에 포함된 여러 가지 장비와 수신기 시스템의 이동을 용이하게 하기 위해서 안테나 밑대를 제작하였다. 경로 손실 측정은 한 구간에서 5회 측정하여 데이터를 저장하였다. 지연 프로파일은 총 445m를 10m 구간으로 나누어 측정을 수행하였으며, 한 구간에서 측정은 10회를 실시하여 데이터를 저장하였다.

측정 순서는 협대역 시스템으로 송신기가 위치한 곳에서부터 멀어지는 방향으로 경로손실을 측정한 후, 광대역 시스템으로 변경하여 송신기 방향으로 수신기를 이동하면서 지연 프로파일을 측정하였다. 획득되는 데이터들은 GPIB 카드를 통해서 PC에 자동으로 저장된다. 이때 더욱 정확한 측정을 수행하고 이를 저장하기 위해서 측정 결과를 PC 화면에 나타내어 육안으로 확인하면서 실시하였다. PC 화면에 나타나는 그래프들은 주파수 분석기에 나타나는 화면과 동일한 화면을 표시하도록 프로그램 하였다. 측정을 수행하는 동안 PC에서 주파수 분석기를 제어하여 한 위치에서 일정한 시간동안 정해진 횟수를 측정하도록 프로그램 하였다. 측정을 수행하는 동안에 터널 내에서 사람이나 장비들의 이동을 자제하였으며, 터널 내 환경이 많이 변화하였을 경우에는 측정을 수행하지 않았다.

IV. 측정결과 및 분석

각 측정 데이터의 높은 신뢰성을 위해서 경로 손실의 경우 총 5회의 측정 데이터 중에서 최대값과 최소값을 제외한 3개의 값을 통해서 분석하였고, 지연 프로파일의 경우에도 동일한 방법을 사용하여 총 10회의 측정 데이터 중에서 8개의 값을 선택하여 분석하였다.

1. 경로손실

그림 7, 8, 9, 10은 각각 2.45GHz와 5.8GHz에서 안테나 종류에 따른 경로손실과 미세 측정구간을 통한 고속 페이딩 특성을 나타낸다. 이 그래프들은 안테나 이득, 송신기 출력 레벨, 감쇠기의 감쇠량, LNA의 이득, 케이블 손실을 고려하여 순수한 경로손실 값을 나타낸 것이다.

그림 7, 9의 그래프에서 점선은 각각의 주파수에 대한 자유공간의 전파경로손실 값 L_F 이며, 안테나 이득 $G=1$ 인 등방성 안테나를 사용하고 주파수 f 를 GHz, 거리를 km 단위로 하면 전파경로손실 L_F 는 다음 식으로 계산된다⁶⁾.

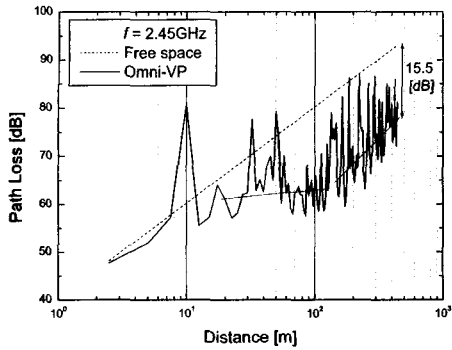
$$L_F = 20 \log f + 20 \log r + 94.44 \text{ [dB]} \quad (5)$$

따라서 그림 7, 9와 같이 거리를 로그스케일로 표현하면 경로손실 곡선은 직선이 된다.

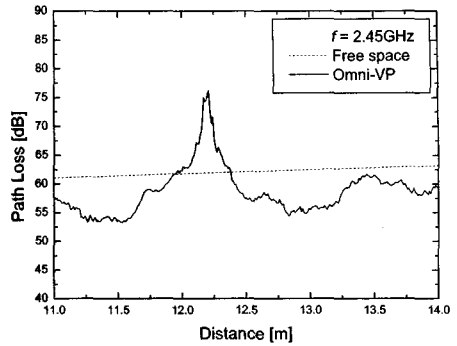
측정결과 터널내에서의 평균경로손실은 안테나와 주파수에 따라 자유공간에 비해 4~16dB가 적음을 확인하였는데, 이것은 터널이 갖는 도파관 구조에 의한 것으로 이해할 수 있으며 구체적인 분석결과는 다음과 같다.

LOS 구간에서는 각각의 주파수 대역에서 선형편과 특성을 갖는 지향성 안테나의 level fluctuation이 가장 적었고 미세 측정구간에서의 고속 페이딩은 라이시안 분포를 보였다. 반면에 무지향성 안테나의 고속 페이딩 특성은 라이시안 분포를 보이고 있으나 수직편파의 경우에는 가장 심한 level fluctuation을 관찰할 수 있는데, 그 이유는 안테나의 빔폭과 마제형 터널 구조로 인한 다중반사 때문으로 설명될 수 있다. 즉, 터널의 단면이 원형이 아니고 터널 폭보다 터널 높이가 큰 마제형인 경우에는 수평편파에 비해 수직편파의 다중반사가 많이 발생하기 때문이다. 또한 지향성 안테나와 달리 무지향성 안테나의 경우에는 송신안테나의 후방방사로 인한 다중반사 성분까지 수신안테나에 영향을 주게된다.

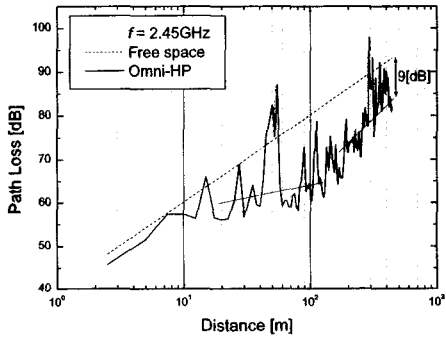
지향성 안테나의 fade margin은 2.45GHz와 5.8GHz에서 모두 ± 6 dB로서 실외 환경에서 셀룰러와 PCS의 일반적인 설계 값보다 약간 적었고 무지향성 안테나의 경우에는 ± 8 dB로서 실외환경과 비슷함을 보였다. LOS 구간에서의 평균경로손실은 4~8dB의 분포로서 자유공간의 경로손실곡선에 비해 기울기가 완만함을 확인하였으며, 또한 이것은 터널이 갖는 도파관 구조로 설명될 수 있다.



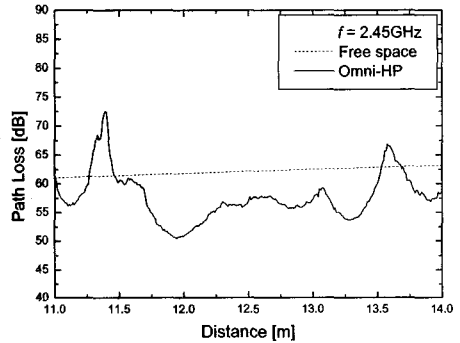
(a) 무지향성 수직편파 안테나
(a) Omnidirectional-VP antenna



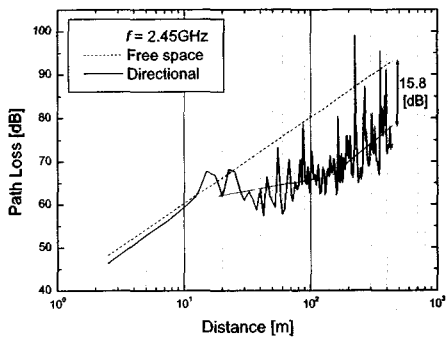
(a) 무지향성 수직편파 안테나
(a) Omnidirectional-VP antenna



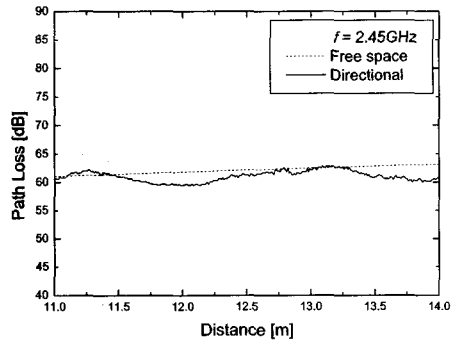
(b) 무지향성 수평편파 안테나
(b) Omnidirectional-HP antenna



(b) 무지향성 수평편파 안테나
(b) Omnidirectional-HP antenna



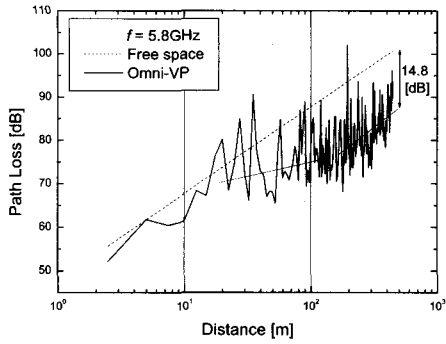
(c) 지향성 안테나
(c) Directional antenna



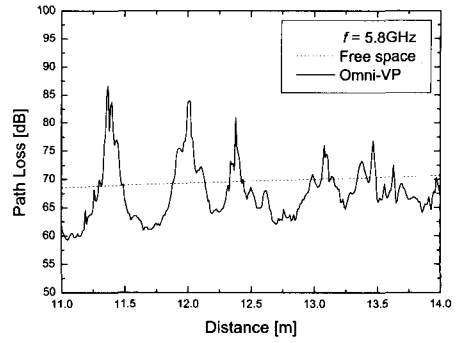
(c) 지향성 안테나
(c) Directional antenna

그림 7. 2.45GHz에서 안테나 형태에 대한 경로손실
Fig. 7. Path loss for antenna types at 2.45GHz

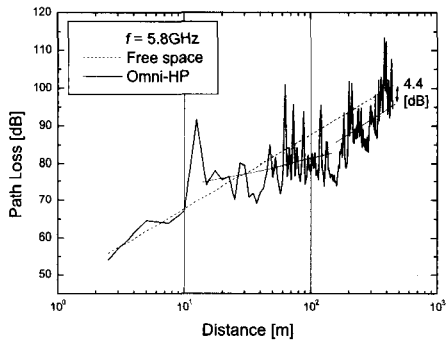
그림 8. 2.45GHz에서 고속 페이딩 특성
Fig. 8. Characteristics of fast fading at 2.45GHz



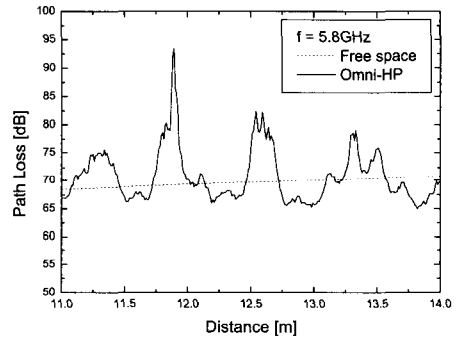
(a) 무지향성 수직편파 안테나
(a) Omnidirectional-VP antenna



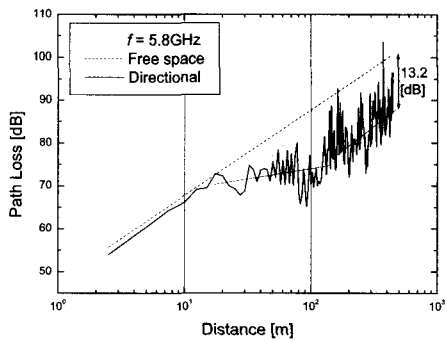
(a) 무지향성 수직편파 안테나
(a) Omnidirectional-VP antenna



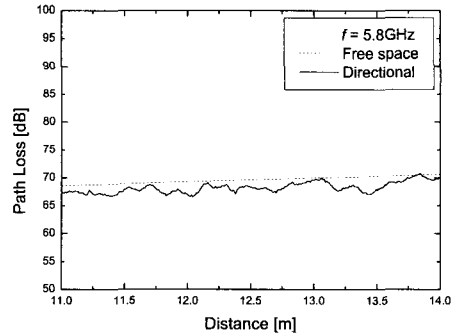
(b) 무지향성 수평편파 안테나
(b) Omnidirectional-HP antenna



(b) 무지향성 수평편파 안테나
(b) Omnidirectional-HP antenna



(c) 지향성 안테나
(c) Directional antenna



(c) 지향성 안테나
(c) Directional antenna

그림 9. 5.8GHz에서 안테나 형태에 대한 경로손실
Fig. 9. Path loss for antenna types at 5.8GHz

그림 10. 5.8GHz에서 고속 페이딩 특성
Fig. 10. Characteristics of fast fading at 5.8GHz

NLOS 구간에서는 다중경로에 기인한 반사파의 증가로 인하여 자유공간과 마찬가지로 급격하게 증가하는 경로손실이 확인되었다. 2.45GHz에서 무지향성 수직편파 안테나와 수평편파 안테나의 평균경로손실 값은 각각 자유공간의 평균경로손실에 비해 15.5dB와 9dB가 낮았고 5.8GHz에서는 각각 14.8dB와 4.4dB가 낮았다. 따라서 NLOS 터널환경에서 무지향성 수평편파는 수직편파에 비해 10dB 이상 큰 경로손실을 갖으며, 이 값은 앞에서 살펴본 바와 같이 터널의 단면에 따라 변화할 것으로 예측된다.

NLOS 터널환경에서 지향성안테나의 평균경로손실 값은 2.45GHz와 5.8GHz에서 각각 15.8dB와 13.2dB로서 무지향성 수직편파와 비슷한 경향을 보였다.

모든 주파수에서 지향성 안테나의 경우 약 20m 이전에서는 자유공간에서의 경로손실 값과 유사한 증가율을 갖는 것을 확인 할 수 있다. 이는 안테나의 빔폭과 터널의 크기에 관련이 있으며, 터널에 안테나의 빔이 꼭 찬 후 반사 수신되기 시작하는 부분이 약 20m 부근이기 때문이다. 이 구간 이후에는 경로손실이 자유공간이나 실내외 환경에서보다 좋은 결과를 보인다. 이는 앞에서 살펴본 바와 같이 단면이 마제형인 터널의 구조가 도파관과 같은 역할을 하고 있기 때문이다. 자유 공간에서 주파수가 높을수록 경로손실 값이 크다⁶⁾. 터널에서 수행된 측정결과에서도 2.45GHz보다 5.8GHz에서의 경로손실 값이 큰 것을 확인할 수 있었다.

2. 지연 프로파일

지연 프로파일 특성은 전파전파의 반사와 산란 등에 의해 발생하는 다중 경로로부터 기인한다. 수신기 측면에서 직접신호가 수신된 후 간접신호의 수신들을 통해 얻어지는 값이다.

광대역 다중경로채널의 시간분산 성질은 일반적으로 평균초과지연과 RMS 지연확산으로 수량화되며 평균초과지연은 PDP의 1차 모멘트로서 다음과 같다⁶⁾.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (6)$$

여기서, τ_k 는 k 번째 다중경로 성분의 시간지연이고 a_k^2 는 k 번째 다중경로 성분의 전력이다. RMS 지연확산은 PDP의 2차 중심모멘트의 제곱근으로서 다음과

같이 표현된다.

$$\sigma_\tau = \sqrt{\tau^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (7)$$

여기서,

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

그림 11은 평균 초과 지연을 누적 분포 함수로 나타낸 그래프이다. 대부분의 지연 성분들이 짧은 시간에 집중되어 있으며 라이시안 분포를 갖는 것을 확인할 수 있다. 각 주파수에서 지향성 안테나의 평균 초과 지연 특성은 10ns 이내에 존재할 만큼 좋은 지연 특성을 갖는다. 무지향성 안테나들도 90% 이상이 50ns 이내에 존재한다. 즉 평균초과 지연 특성은 주파수에 관계없이 무지향성 안테나보다 지향성 안테나가 좋은 지연특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

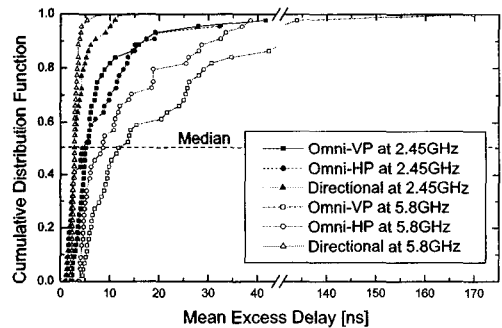


그림 11. 평균초과지연의 누적분포함수
Fig. 11. CDF of mean excess delay

그림 12는 RMS 지연 확산을 누적 분포 함수로 나타낸 그래프이다. RMS 지연 값을 보면 일반적으로 5.8GHz 주파수 대역보다 2.45GHz 주파수 대역에서 더 작은 값을 가지며 라이시안 분포를 가진다.

즉, 무지향성 안테나보다는 지향성 안테나의 RMS 지연 특성이 우수하다. 지향성 안테나에 비하여 무지향성 안테나의 CDF 곡선의 기울기가 완만한 이유는 안테나의 빔 형태로 인한 반사파의 증가와 송신안테나에 후방 방사된 전파의 다중반사성분까지 수신안테나에 도달하여 평균지연시간이 늘어났기 때문으로 분석된다.

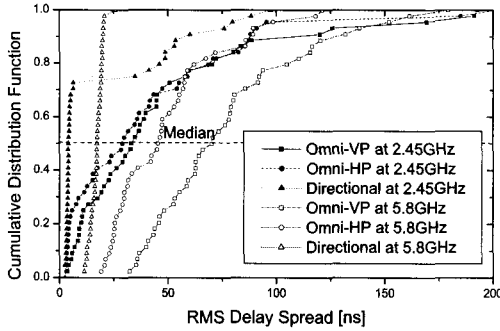


그림 12. RMS 지연확산의 누적분포함수
Fig. 12. CDF of RMS delay spread

표 4에 주파수와 안테나 종류에 대한 평균초과지연값과 RMS 지연확산 값의 중앙값(median value)을 나타내었으며 이들 중앙값은 CDF 그래프에서 전체 지연성분의 50%가 몇 ns 안에 들어오는지 알 수 있는 척도가 된다. RMS 지연확산은 평균초과지연의 분산 값에 해당된다.

경로손실 분석결과에서는 무지향성 수직편파와 지향성 안테나에 비하여 무지향성 수평편파의 경로손실 값이 가장 크게 나타났으나, CDF의 중앙값을 통한 지연특성 분석에서는 무지향성 수평편파가 수직편파에 비하여 우수한 것으로 나타났다. 측정된 터널에서 무지향성 안테나의 평균초과지연은 지향성 안테나에 비하여 2.45GHz에서 약 1.5배, 5.8GHz에서 약 3.5배의 지연성분을 갖는다.

표 4. 지연특성 중앙값

Table 4. Median value of the delay characteristics

		무지향성 수직편파	무지향성 수평편파	지향성 선형편파
평균초과지연	2.45GHz	5.15ns	4.46ns	2.8ns
	5.8GHz	11.77ns	8.62ns	2.86ns
RMS 지연확산	2.45GHz	33.19ns	29.08ns	4.16ns
	5.8GHz	70.2ns	45.45ns	17.28ns

3. 코히어런스 대역폭

시간영역에서 다중경로의 발생으로 인하여 수신기가 이동하는 경우 심한 고속 페이딩 현상이 일어난다.

다. 이것은 주파수 선택적인 페이딩 채널로써 주파수 응답에서 심한 페이딩 현상을 발생시키며, 이로 인해 신뢰성 있는 데이터 전송을 위한 사용가능한 주파수 대역폭은 제한된다. 코히어런스 대역폭 B_c 는 채널 주파수응답이 다른 주파수에 대하여 높은 상관관계가 있는 대역폭이다. 다중경로 채널의 주파수 상관함수 $R_T(f)$ 는 전력지연 프로파일의 근사적으로 정규화된 푸리에 변환이다^[10]. 만일 코히어런스 대역폭의 주파수 상관함수 $R_T(f)$ 가 0.9보다 크다면, 다음과 같은 식이 성립한다.

$$B_c \cong \frac{1}{50\sigma_r} \quad (8)$$

여기서 σ_r 는 RMS 지연확산 값이다. 또 만약 코히어런스 대역폭의 주파수 상관함수 $R_T(f)$ 가 0.5보다 크다면 RMS 지연확산과의 관계는 다음과 같다.

$$B_c \cong \frac{1}{5\sigma_r} \quad (9)$$

식 8과 9를 보면 RMS 지연확산 값이 증가할수록 코히어런스 대역폭은 작아지게 되고 이로 인해서 채널을 통해 전송되는 신뢰성 있는 데이터율은 감소하게 된다. 다음 표 5는 주파수와 안테나에 대한 코히어런스 대역폭을 나타낸 것이다.

표 5. 코히어런스 대역폭

Table 5. Coherence Bandwidth

$R_T(f)$	주파수 (GHz)	무지향성 수직편파 (MHz)	무지향성 수평편파 (MHz)	지향성 선형편파 (MHz)
$B_c \cong \frac{1}{50\sigma_r}$	2.45	0.42	0.48	1.03
	5.8	0.25	0.40	1.16
$B_c \cong \frac{1}{5\sigma_r}$	2.45	4.22	4.84	10.30
	5.8	2.56	4.03	11.66

표에서 보는 것처럼 지향성 안테나의 경우 무지향성 안테나보다 코히어런스 대역폭이 넓은 것을 확인할 수 있고 이것은 지향성 안테나가 채널을 통해 전송되는 신뢰성 있는 데이터율이 더 높다는 것이다. 또한 2.45GHz 주파수 대역보다 5.8GHz 주파수 대역

에서 코히어런스 대역폭이 넓은 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 단면이 원형이고 평면이 곡선형인 지하철 터널 환경에서의 전파전파 특성을 분석하기 위해서 측정을 수행하였다. 또한 지하철 터널 환경에서 주파수 대역과 안테나의 종류를 달리하며 측정하고 이들 결과 값을 분석하였다.

경로손실의 경우 곡선형의 지하 터널 환경이 자유공간이나 다른 실내의 환경에 비해 경로손실 값이 매우 작았으며, 전체적으로 약 1m당 0.1dB 정도의 손실 값을 갖는다. LOS에서는 지향성 안테나의 경로손실 특성이 우수하였으나 NLOS에서 급격한 경로손실 증가로 인해 무지향성 안테나 수직편파의 경로손실 특성과 유사하였다.

지연 프로파일의 경우에는 지하철 터널 환경이 매우 좋은 지연 특성을 갖는다는 것을 확인할 수 있었다. 누적 분포 함수는 라이시안 분포를 보였고, 평균 초과지연 값의 대부분이 10ns 이내에 존재할 만큼 작은 지연값을 갖는다. 특히 지향성 안테나의 경우 최대 평균초과지연 값이 20ns 이내에 존재할 만큼 좋은 지연 특성을 보였다.

RMS 지연확산은 코히어런스 대역폭으로 그 값들의 특징을 분석할 수 있었으며, 주파수 대역과 안테나 종류에 모두 영향을 받고 있다. 주파수 대역에 대해서 2.45GHz보다는 5.8GHz에서 더 넓은 코히어런스 대역폭을 가졌으며, 무지향성 안테나에 비해 지향성 안테나가 약 2배 이상의 코히어런스 대역폭을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

[1] Y. P. Zhang and Y. Hwang, "Time Delay Characteristics of 2.4GHz Band Radio Propagation Channels in Room Environments," *IEEE International Symposium*, vol. 1, pp. 18-23, Sep. 1994.

[2] 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.

[3] Y. P. Zhang, Z. R. Jiang, T. S. Ng and J. H.

Sheng, "Measurements of the Propagation of UHF Radio Waves on an Underground Railway Train," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 4, July, 2000.

[4] J. S. Lamminmaki and J. J. A. Lempiainen, "Radio Propagation Characteristics in Curved Tunnels," *IEE Proc.-Microw, Antennas Propag.*, vol 145, no. 4, Aug. 1998.

[5] 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.

[6] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, London, U.K. : Pentech, 1992.

[7] Brian L.F. Daku, Warren Hawkins, and Arnfinn F Prugger, "Channel Measurements in Mine Tunnels," *IEEE 55th. Vehicular Technology Conference*, pp. 380-383, May, 2002.

[8] Y. Hwang, Y. P. Zhang, and Robert G. Kouyoumjian, "Ray-Optical Prediction of Radio-Wave Propagation Characteristics in Tunnel Environments Part 1: Theory," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, no. 9, pp. 1328-1336, september, 1998.

[9] R. C. Dixon, *Spread Spectrum System*, 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York, 1984

[10] D. C. Cox, "Delay Doppler Characteristics of Multipath Delay Spread and Average Excess Delay for 910MHz Urban Mobile Radio Paths," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-20, No. 5, pp. 625-635, Sep. 1972.

[11] D. J. Devasirvatham, M. J. Krain and D. A. Rappaport, "Radio Propagation Measurements at 850MHz, 1.7GHz and 4.0Gz Inside Two dissimilar Office Buildings," *Electronics Letters*, Vol. 26, No. 7, pp. 445-447, 1990

[12] 박시우, PCS 무선채널의 다중경로 전파시간 지연 특성에 대한 분석연구, 고려대학교 대학원 박사학위 논문, 1995. 12.

정 회 동(Heoi Dong Jung)

정회원

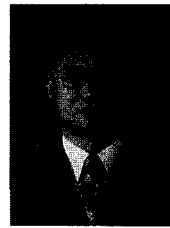


2002년 2월 : 원광대학교
제어계측공학과 졸업
2004년 2월 : 원광대학교
제어계측공학과 공학석사
2004년 1월~현재 : (주)나리지*은
FSB/DEG2 연구원

<관심분야> 무선통신, 전파측정 및 모델링

송 문 규(Moon Kyou Song)

정회원



1988년 2월 : 고려대학교
전자공학과 졸업
1990년 2월 : 고려대학교
전자공학과 공학석사
1994년 2월 : 고려대학교
전자공학과 공학박사

1994년 3월~현재 : 원광대학교 전기전자 및
정보공학부 부교수

1997년 10월~1998년 12월 : 한국전자통신연구원
초빙연구원

1999년 9월~2000년 8월 : 캐나다 빅토리아대학교
전기 및 컴퓨터공학과 객원교수

<관심분야> 무선통신, 디지털 통신시스템 설계,
채널 부호화

박 노 준(Noh Joon Park)

정회원



1993년 2월 : 원광대학교
전자공학과 졸업
1995년 2월 : 원광대학교
전자공학과 공학석사
2004년 8월 : 원광대학교
전자공학과 공학박사

<관심분야> 안테나 설계, 전자파 수치해석, 전파
측정 및 모델링

강 영 진(Young Jin Kang)

정회원



1974년 2월 : 광운대학교
무선통신공학과 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

<관심분야> 광집적소자, 광통신시스템