

## 터널 환경에서 2.6 GHz 대역 신호의 전파 전파 채널 특성

° 조 한 신\*, 김 도 윤\*, 육 종 관\*, 최 오 열\*\*

\* 연세대학교 전기전자공학과.

\*\* SK텔레콤 PMSB추진단

E-mail : [gminor@yonsei.ac.kr](mailto:gminor@yonsei.ac.kr)

### Characterization of Radio Propagation Channels in Tunnel Environments at 2.6 GHz

° Han-Shin Jo, Do-Youn Kim, Jong-Gwan Yook  
Yonsei University.

#### Abstract

Narrowband and wideband characterizations of radio propagation channels in tunnel environments are investigated by using ray tracing techniques. For a rectangular straight tunnel and a rectangular curved tunnel, received power is simulated when the receiver moves away from the transmitter. The fast fading statistics of the narrowband propagation are analyzed in terms of cumulative distribution function, level crossing rate and average fade duration. The tunnel wideband radio propagation channel is characterized in terms of mean excess delay and rms delay spread.

Key words : Fast fading statistics, Wideband channel characteristics, Tunnel environments, Ray tracing

#### I. 서 론

현재 이동통신 서비스는 방송과 통신 및 무선 랜 등 기존의 다양한 통신매체가 융합될 뿐만 아니라 '언제 어디서나 존재하는'이란 목표로 진화를 거듭해 나가고 있다. 그리고 이를 위해 도심지역이나 교외지역 등 개방된 지역에 대한 채널 연구 및 통신 시스템의 성능에 관한 연구는 활발히 진행되었다[1]~[5]. 반면 터널이나 지하철과 같은 폐쇄된 공간에 대한 연구는 부족한 상황이다. 서울의 경우 차량터널은 50개이며 총 연장이 약 29 km 이고, 지하철의 총 길이는 286.9 km이며 하루 이용객이 550만 명을 넘는다[6][7]. 또한 도로나 철도에 의한 소음을 줄이고 산림 및 환경 파괴를 방지하기 위해 터널의 건설이 증가하고 있는 현실이다. 즉 사람들이 폐쇄 공간 내에서 생활하는 시간이 증가할 것이고 이에 따라 터널 환경에서의 안정적인 통신에 대한 요구 또한 증가할 것이다

본 논문에서는 터널 환경에서의 페이딩 채널의 통계적 특성을 얻기 위해 곡면에서 전파의 반사현상에 대한

모델링이 가능한 ray launching 방법을 이용하였다. 또한 레이가 곡면을 반사한 뒤 밀도가 변하는 현상을 정확히 모델링하기 위해 ray density normalization (RDN)을 이용하였다[8].

단면이 직사각형인 직선 및 곡선터널의 가시영역 및 비가시 영역에 대해 위의 전파 모델링 방법을 적용하여 송수신단간의 거리를 변화시키며 수신 전력값을 얻었다. 그리고 이 값으로부터 추출된 fast fading의 1차 통계특성인 cumulative distribution function(CDF)와 2차 통계특성인 level crossing rate(LCR) 및 average fade duration(AFD)을 분석하였다. 또한 채널의 광대역 특성을 분석하기 위해 전력지연 프로파일을 구한 뒤 이로부터 mean excess delay 와 rms delay spread 값을 평가하였다.

#### II. 모의실험 환경

모의실험에 이용한 터널은 그림 1, 2 에서 볼 수 있듯이 평면이 직선인 형태와 곡선인 형태로 구분된다. 두

터널모두 단면의 모양은 직사각형이며 곡선터널은 곡률 반지름으로 정의된다. 편의상 횡면이 직선인 터널을 직선터널, 곡선인 터널을 곡선터널이라 칭한다.

직선 터널 내에서의 전파채널의 특성을 분석하기 위해 터널의 크기, 곡률반경 및 송수신단의 위치를 설정하였다. 직선 및 곡선 터널의 높이는 6 m, 폭은 8 m이며 곡선터널의 곡률 반경은 실제 지하철타널 건설시 많이 이용되는 800 m이다. 두 터널 모두 송신 단은 터널의 바닥으로부터 2.7 m, 좌측 벽으로부터 0.2 m 떨어진 지점에 위치한다. 또한 수신 단은 터널의 바닥으로부터 2.5 m, 좌측 벽으로부터 4 m 떨어진 지점에 위치한다. 송신단위 위치는 실제 중계기를 설치하는 범위 내에서 설정하였으며 바닥을 기준으로 한 수신단의 높이는 지하철타널에 탑승한 사람의 키를 고려하여 설정하였다.

송수신단은 수직편파를 갖는 등방성 안테나를 가정하였으며 송신 단에서 천오백만개의 레이를 발사하였다. 터널벽면의 재질은 복소 유전율이  $5 - j0.1$ 인 콘크리트로 설정하였으며 레이의 중심주파수는 2.6425 GHz이다. 송신단의 위치는 일정하며 수신단의 높이는 2.5 m로 고정한 후, 송수신단간의 거리를 변화시키며 각 수신지점에서 수신전력 및 전기장 값을 얻었다.

직선곡선 터널 모두 송신 단에서 천오백만개의 레이를 발사하였고 수신구의 반지름은 10 cm로 정하였다. 또한 터널의 구조 상 회절이 발생할 수 있는 모서리가 존재하지 않기 때문에 반사파 만을 고려하였으며 최대 10번 반사하는 레이까지 고려하였다.

Ray tracing 기법은 반사 횟수에 따라 수신신호의 세기가 변한다. 반사 횟수가 적으면 적은수의 레이만을 고려하기 때문에 결과를 얻는데 걸리는 시간은 줄지만 부정확한 결과가 나올 수 있다. 한편 반사 횟수가 많으면 결과는 정확하지만 결과를 얻기까지 오랜 시간이 필요한 단점이 있다. 또한 송수신단간의 거리가 증가할수록 반사 횟수를 증가시켜야 정확한 결과를 얻을 수 있다[9]. 본 실험에서는 송수신단 간의 최대 간격이 330 m이므로 최대 10번 반사만으로도 정확한 결과를 얻을 수 있다.

직선터널의 경우 송수신단의 거리를 1 m부터 130 m까지 5 cm( $\lambda/2$ )간격으로 변화시키면서 수신 전력 값을 얻었다. 곡선터널은 직선터널과 달리 가시영역(LOS) 뿐만 아니라 비가시 영역(NLOS)이 존재하며 각 영역의 전파 채널 특성이 다르기 때문에 각 경우에 대해 모의

실험을 수행하였다. 곡선터널의 곡률반경이 800 m인 경우 송수신단 간의 거리가 191 m 이하이면 가시영역, 이상이면 비가시영역이다. 또한 수신단간의 간격은 수신신호의 페이딩을 손실 없이 얻기 위해 송신파의 파장의 반값( $\lambda/2$ ) 이하로 설정해야 한다. 따라서 가시영역의 경우 D를 1 m부터 130 m까지 5cm 간격으로 증가시키며 수신 전력 값을 얻었으며, 비가시영역의 경우 송수신단 간의 거리를 200 m부터 330 m까지 5 cm간격으로 변화시키며 수신 전력 값을 얻었다

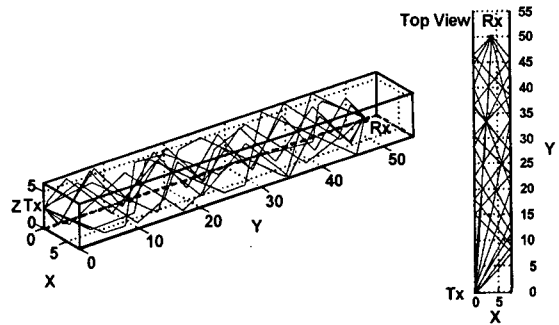


그림 1. 직선터널 형태 및 레이 경로

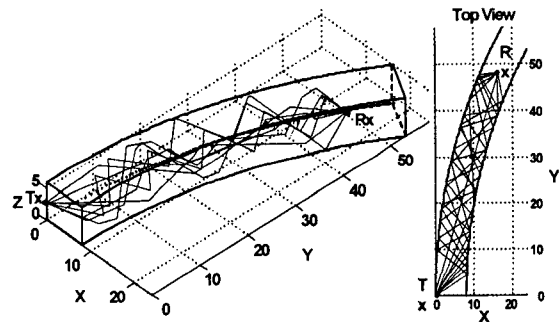


그림 2. 곡선터널 형태 및 레이 경로

### III. 터널환경의 협대역 채널 특성

그림 3은 직선 터널 내의 수신 전력과 slow fading 특성을 나타낸다. 수신 전력을 40  $\lambda$ 간격으로 평균을 취해 수신신호의 slow fading을 얻고 수신신호로부터 slow fading을 제거하여 fast fading을 얻는다[10]. 그림 4는 수신신호의 fast fading분포를 CDF곡선을 이용해 분석한 결과이다. 직선, 곡선터널에서 수신신호의 fast fading은 레일이 분포와 일치하지 않고 직선터널과 곡선터널(가시영역)의 fast fading은 거의 유사한 분포를 보인다. 이는 곡선터널의 반경이 송수신단 간의 거리에

비해 크기 때문에 거의 직선에 가까운 구조로 볼 수 있으며, 가시영역이므로 직선터널과 같이 직접파가 도달하기 때문이다. 또한 직선 및 곡선 가시구간 보다 곡선 비가시구간의 CDF가 레일리 분포에 근접함을 알 수 있다. 이는 비가시구간의 경우 직접파가 존재하지 않아 dominant path에 의해 도달하는 전력이 감소하기 때문이다.

LCR은 기준시간 동안 포락선이 특정한 값과 교차하는 횟수를 의미한다. AFD는 기준시간 동안 포락선이 특정한 값보다 작은 값을 갖는 시간의 비율을 의미한다. 포락선의 CDF는 전파의 산란환경에 의해 결정되지만 LCR, AFD는 산란환경 뿐만 아니라 수신단의 이동속도에 의해 결정된다. 따라서 만약 페이딩의 CDF가 일치하여도 LCR, AFD특성이 동일하지 않을 수 있기 때문에 페이딩 채널의 통계적 특성을 분석하기 위해서는 CDF뿐만 아니라 LCR, AFD도 함께 분석해야 한다.

그림 5, 6은 수신신호의 포락선 페이딩의 LCR, AFD 특성을 보여준다. 터널 환경의 LCR은 레일리 페이딩에 비해 작은 값이며 AFD는 큰 값을 보인다. 이를 통해 직선 및 곡선터널에서의 수신신호의 포락선 페이딩은 레일리 분포와는 일치하지 않음을 알 수 있다.

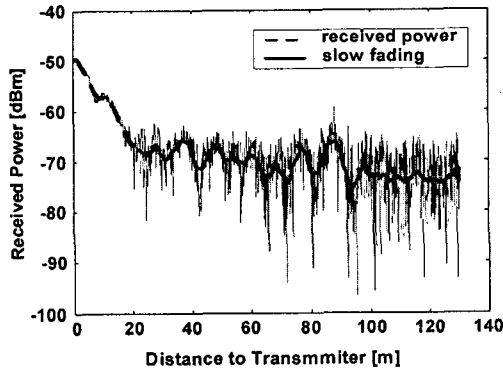


그림 3. 직선터널의 수신전력

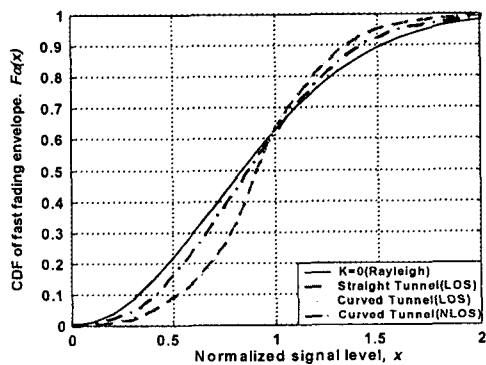


그림 4. 터널환경에서 수신 포락선의 CDF

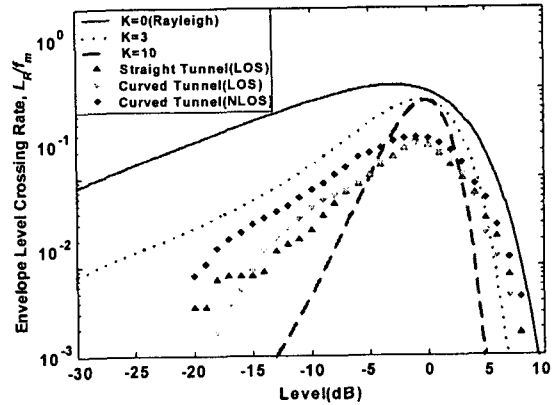


그림 5. 터널환경의 Normalized envelope level crossing rate

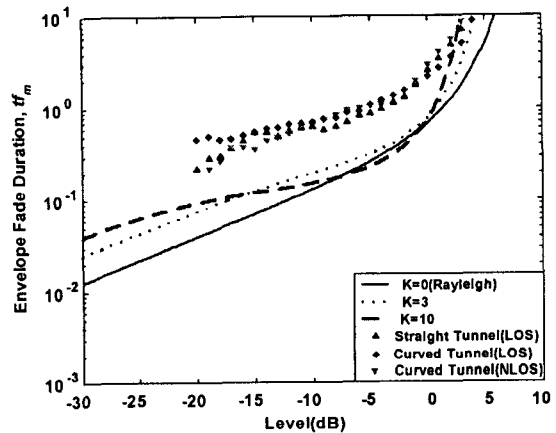


그림 6. 터널환경의 Normalized average envelope fade duration

#### IV. 터널환경의 광대역 채널 특성

그림 7, 8은 직선 터널에서 전력 지연 프로파일을 나타낸다. 송수신단간의 거리가 50 m 일 때 mean excess delay와 rms delay spread는 3.06 ns, 3.55 ns 이다. 송수신단간의 거리가 200 m 일 때 mean excess delay와 rms delay spread는 4.19 ns, 4.27 ns이다. 직선터널은 전 구간이 가시 영역이므로 직접파가 가장 먼저 도달하기 때문에 직접파의 Excess delay = 0이며, 이에 해당하는 레이의 수신 전력이 -33 dBm으로 가장 크다. 그림 9, 10은 곡선 터널에서 전력 지연 프로파일을 나타낸다. 송수신단간의 거리가 50 m 일 때 mean excess delay와 rms delay spread는 2.79 ns, 3.26 ns 이다. 송수신단간의 200 m 일 때 mean excess delay와 rms delay spread는 4.36 ns, 4.74 ns이다. 그림 11, 12는 송수신단간의

거리를 50 m부터 800 m까지 변화시키며 실험한 결과이다. 직선 터널에서 rms delay spread는 2.7 ns에서 4.4 ns까지의 분포를 보이며 곡선 터널에서 rms delay spread는 1.2 ns 에서 4.7 ns까지의 분포를 보인다. 이 값은 도심이나 교외 또는 실내 환경에서의 rms delay spread값보다 작는데[11], 이는 터널구조는 사방이 막혀있는 좁은 폐쇄공간이기 때문에 각 레이의 이동거리의 차가 비교적 크지 않기 때문이다.

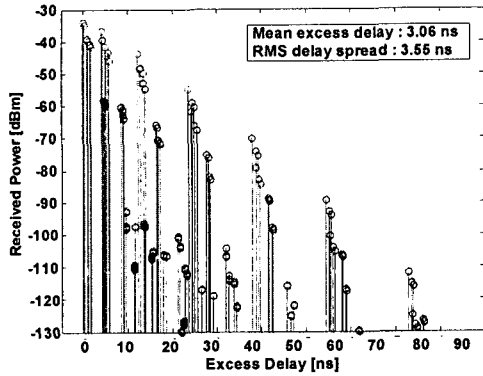


그림 7. 직선터널의 전력 지연 프로파일 (D=50 m)

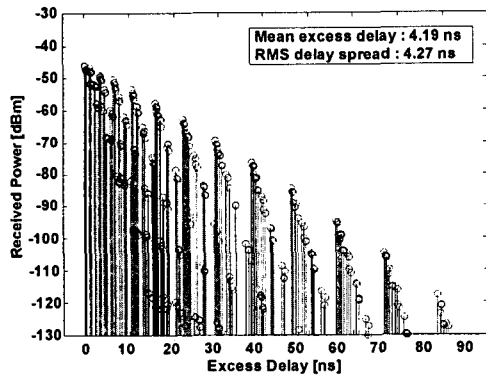


그림 8. 직선터널의 전력 지연 프로파일 (D=200 m)

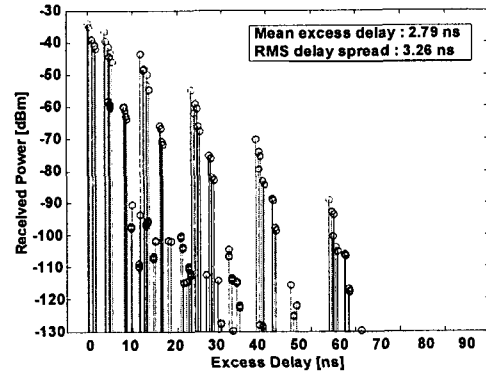


그림 9. 곡선터널의 전력 지연 프로파일 (D=50 m, 가시구간)

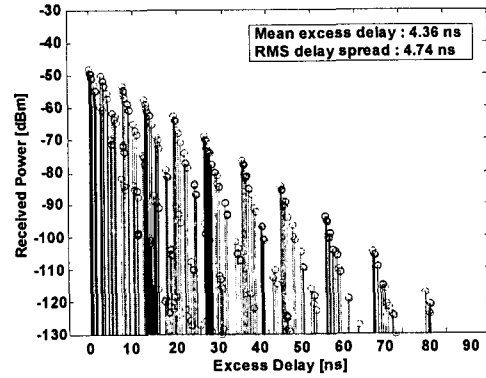


그림 10. 곡선터널의 전력 지연 프로파일 (D=200 m, 비가시구간)

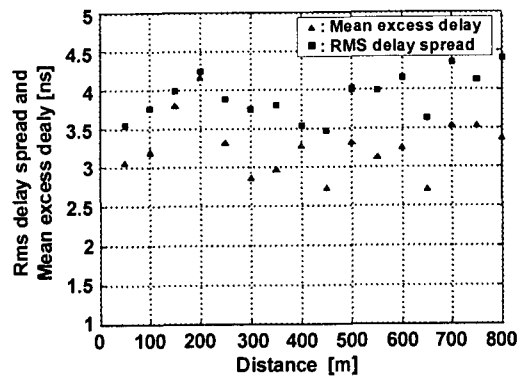


그림 11. 직선터널의 Mean excess delay 및 rms delay spread

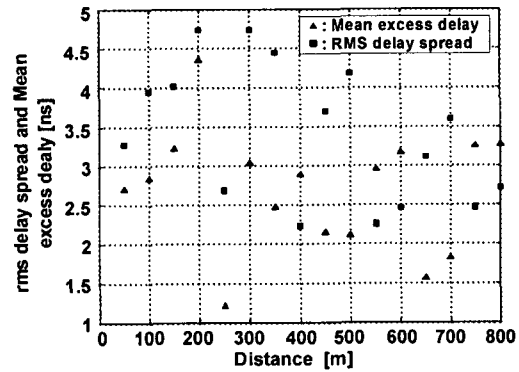


그림 12. 곡선터널의 Mean excess delay 및 rms delay spread

## V. 결론

터널 환경의 페이딩 채널의 통계적 특성을 얻기 위해 기하 광학이론에 근거한 ray tracing법을 이용하여 전파전파 현상을 모델링 하였다. Ray tracing법에는 영상

법과 ray launching법이 있는데 본 연구에서는 곡면에  
서 전파의 반사현상을 모델링 할 수 있는 ray launching  
방법을 이용하였다. 또한 곡면반사 시 레이의 밀도가  
변하는 문제를 해결하기 위해 RDN방법을 이용하였다

단면이 직사각형인 직선터널과 곡선터널의 가시영  
역 및 비가시 영역에 대해 위의 방법을 적용하여 송수  
신단간의 거리를 변화시키며 수신 전력 값을 얻었다.  
그리고 이 값을  $40\lambda$  간격으로 평균을 취해 수신신호의  
slow fading 을 얻고 수신신호로부터 slow fading을 제  
거하여 fast fading을 얻었다. Fast fading의 통계적 특  
성을 분석한 결과 터널 채널과 레일리나 라이시안 페이  
딩의 CDF, LCR, AFD 은 일치하지 않았다. 세 가지 터  
널 환경 모두에 대해 LCR은 레일리 페이딩에 비해 작  
았으며 AFD는 큰 값을 가졌다. 또한 직선터널과 곡선  
터널의 가시영역에서는 CDF, LCR, AFD특성이 거의  
유사하며 이 두 환경보다는 곡선터널의 비가시 영역에  
서의 통계적 특성이 레일리페이딩에 유사함을 알 수 있  
었다.

전력 지연 프로파일을 이용하여 터널채널의 광대역  
특성을 분석하였다. rms delay spread는 직선터널에서  
 $3.4 \sim 4.4$  ns였으며 곡선터널에서는  $1.2 \sim 4.7$  ns의 분포  
를 보였다.

### 감사의 글

본 연구는 SKTelecom 사의 지하철 및 터널 내 전파모델  
수립과 품질확보방안에 관한 연구의 지원으로 수행되  
었습니다.

### 참고문헌

[1] 조한신, 박병성, 육종관, 박한규, 이정수, "3.4,  
5.3, 6.4 GHz 대역 신호의 가시 및 비가시 구간  
에서의 경로손실 특성," 전자파학회 종합학술발  
표회 pp.127-131, 2002년 11월 2일.  
[2] 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.  
[3] S. Y. Tan and H. S. Tan, "A Microcellular  
Communications Propagation Model Based on  
the Uniform Theory of Diffraction and Multiple

Image Theory," IEEE Transactionson Antennas  
and Propagation, vol. 44, No. 10, pp.1317-1326,  
1996  
[4] P.G. Brown, C. C. Constantinou, "Investigation  
on the Prediction of Radiowave Propagation in  
Urban Microcell Environments using  
Ray-Tracing Methods," IEE Proc.-Microw.  
Antennas Propag. pp.36-42, February, 1996.  
[5] Julio Cesar R. Dal Bello, et al., "Theoretical  
Analysis and Measurement Results of  
Vegetations Effects on Path Loss for Mobile  
Cellular Communication Systems", IEEE  
Transactions on Vehicular Technology, vol. 49,  
No. 4, July, 2000.  
[6] 건설교통부 2003년 전국터널현황 조서, 2003년 5  
월 23일.  
[7] 지하철의 기네스북  
[8] D. Didascalou, M. Dottling, T. Zwick and W.  
Wiesbeck, "A novel ray-optical approach to  
model wave propagation in curved tunnels,"  
IEEE Vehicular Technology Conference, pp.  
2313-2317, May, 1999.  
[9] Dirk Didascalou, Ray-Optical Wave  
Propagation Modeling in Arbitrarily Shaped  
Tunnels, Prentice Hall, 1990  
[10] W.C.Y. Lee, Mobile Communications  
Engineering, McGraw-Hill, New York, 1982.  
[11] Theodore S. Rappaport, *Wireless  
Communications Principles and Practice*, Prentice  
Hall, 1996.