

곡선 터널 내에서 전파특성 분석

Analysis of Radio-Wave Propagation Characteristics in Curved Tunnel

김영문 · 정민석 · 진용옥 · 이범선

Y. M. Kim · M. S. Jung · Y. O. Chin · B. S. Lee

요 약

터널 내 직선구간과 곡선구간에 대한 전파특성을 분석하였다. 전파특성 분석모델로는 직선구간에서는 Ray-tracing 기법을 사용하였고, 곡선구간에서는 혼합도파관 모드와 Geometrical Optic(GO)을 결합하여 해석하는 모델을 이용하였다. 단면적이 3.5 m× 6 m이고, 벽의 두께가 유한한 구조의 터널 내 송·수신 안테나 사이의 거리에 따른 수신전력 측정값을 회귀 분석한 결과 직선구간의 경로손실은 0.19 dB/m이었고, 곡선구간의 경로손실은 0.68 dB/m이다. 터널 내 수신전력 측정값은 터널전파 모델의 시뮬레이션 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

Abstract

In this paper, we present the analysis of radio wave propagation characteristics in curved tunnels. Tunnel propagation models are performed in two cases which are using ray-tracing method for straight tunnels and geometrical optics extension to the standard hybrid waveguide model for curved ones. By regression analysis for measured power based on distance between the transmitter and the received antenna in tunnels that have 3.5 m× 6 m cross section and limited wall depth path loss are 0.19 dB/m for straight section and 0.68 dB/m for curved ones. By comparing model analysis with measurement in tunnels, it has been shown that the simulated results of tunnel propagation models are similar to the measured values.

Key words : Tunnel, Propagation, Reflection Coefficient

I. 서 론

오늘날의 방송, 통신 환경은 언제, 어디서나 고속 대용량 멀티미디어 데이터의 신뢰성 있는 전송을 요구하고 있다.

사람들이 생활하는 지하공간은 도로터널, 지하철 터널, 광산터널, 지하차도, 지하상가, 빌딩지하, 선 박 등이 있으며, 지하 공간에서 생활하는 시간이 점점 길어짐에 따라 통신 및 방송 서비스도 중단 없이 제공될 필요성이 증대되고 있다.

그러나 터널 내부의 전파환경은 자유공간의 전파 환경과 매우 다른 특성을 나타내고 있다. 터널 내부

로 전파 가능한 주파수는 터널의 단면에 따라 결정되어진다^{[1][4]}. 터널 내부에서 자유공간의 전파예측 모델을 적용하기에는 추가적으로 고려하여야 할 변수가 많이 있다^{[5][6]}. 터널 내부의 전파 전파는 직접파, 반사파, 회절파, 산란파 등에 따른 영향이 존재하며, 터널의 구부러짐 정도에 따라 전파특성이 변하게 된다. 터널의 전파특성에 가장 크게 영향을 미치는 파라미터들은 터널의 종단 및 횡단면 길이, 터널 내부의 매질, 터널천정, 벽면, 바닥의 표면거칠도, 터널 내부에 위치하는 물체, 터널 내부에서의 편파 등을 들 수 있다.

대부분의 터널은 구조상의 문제로 인하여 직선과

경희대학교 전파공학과(Dept. of Radio Engineering, Kyunghee University)

· 논문 번호 : 20020723-084

· 수정완료일자 : 2002년 10월 19일

곡선구간이 존재하는 형태로 건설되며, 단면의 형태도 직사각형, 아치형, 반원형 등 다양한 구조를 갖기 때문에 이에 대한 정량적인 분석이 필요한 상태이다^[6].

직선터널에 대하여는 혼합도파관 모델 또는 Ray-tracing 기법^{[4]~[9]}을 이용한 이론적 해석과 측정결과와의 비교분석에 대한 연구가 많이 수행되었지만, 곡선터널에 대한 연구는 터널단면, 곡률반경, 주파수 등을 달리하는 다양한 환경에서 수많은 측정 결과에 대한 통계적 분석이 많다^{[7],[9],[12]}. 직선구간의 전파손실은 곡선구간의 손실보다 적은 것으로 많은 연구에서 보고되었다^{[7],[9]}.

본 연구를 수행한 터널은 경기도 평택 시에 위치한 서해안고속도로 서해대교의 교량 점검용 지하통로로서 총 길이는 7.3 km이며 다수의 직선구간과 곡선구간으로 이루어져 있다.

직선구간에 대해서는 Ray-tracing 기법을 이용하여 이론적으로 송·수신 안테나 사이의 거리에 따른 수신 전력을 계산하였고, 곡선구간에 대해서는 참고문헌^[6]에 제시된 혼합도파관 모드와 Geometrical Optic(GO)을 결합한 모델을 적용하여 해석하였다. 터널 전파모델의 해석 결과의 검증을 위하여 직선구간과 곡선구간에서 측정된 결과와 비교하였다.

II. 터널 내 전파모델

2-1 터널 구조

본 연구를 수행한 터널은 그림 1과 같이 높이 3.5 m, 벽두께 380 mm, 바닥 폭 6 m, 바닥두께 200 mm, 천정 폭 7.5 m, 천정 두께 230 mm의 콘크리트 통로 구조로 이루어져 있다.

터널 내부에는 전력선, 통신선 포설을 위한 케이블 트레이가 2단으로 천정에 매달려 있으며, 교량 지지용 케이블이 상·하행 각 6조씩 벽면 가까이에 바닥에서 천정으로 연결되어 있다. 바닥에는 직사각형의 콘크리트 구조물이 일정한 간격으로 놓여 있으며 터널 길이 60 m 단위로 3 m 길이의 이음구간을 갖는다.

터널 내 직선구간과 곡률반경 800 m인 곡선구간

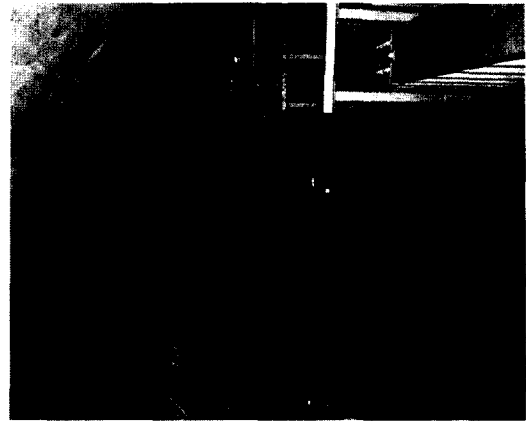


그림 1. 터널 단면도

Fig. 1. Cross section view of tunnel.

에서 측정을 수행한 경로와 터널의 구조는 그림 2와 같다.

2-2 터널 직선구간 전파 모델

터널 벽면의 콘크리트 매질에 대한 복소유전율 ϵ_r^* 은 식 (1)과 같이 상대유전율 ϵ_r' 과 매질의 도전율 σ 로 표시된다.

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (1)$$

여기에서 ϵ_0 는 자유공간의 유전율이며, ω 는 각속도이다. 식 (1)은 터널 내 벽면 반사계수 및 곡선터널 내 전파손실 계산에 사용된다.

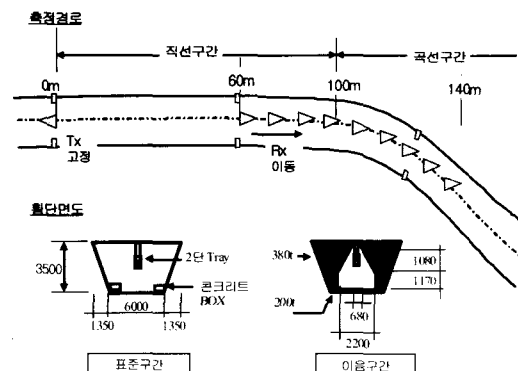


그림 2. 터널 구조(mm)

Fig. 2. Geographical Feature of Tunnel(mm).

이론적 해석의 편리를 위하여 터널 단면구조를 직사각형 구조로 근사화 하였으며, 터널 단면의 중앙에 송신 및 수신 안테나를 위치하는 것으로 가정 하였다.

터널 내 직선구간에서 송신안테나와 수신안테나 사이의 거리 r_0 만큼 떨어진 지점에서의 측정되는 수신전력 P_r 은 직접파, i 번 반사한 수직방향 반사파 및 수평방향 반사파 3가지 합인 형태로서 나타낼 수 있다^{[8],[9],[11]}.

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda_0}{4\pi} \right)^2 \cdot \left(\left| \frac{G_d e^{-jkr_0}}{r_0} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{G_{vi}(R_{vi})^i e^{-jkr_{vi}}}{r_{vi}} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{G_{hi}(R_{hi})^i e^{-jkr_{hi}}}{r_{hi}} \right|^2 \right) (W) \quad (2)$$

식 (2)에서 사용되는 기본파라미터는 표 1과 같으며 직접파 및 i 번 반사된 파에서 사용되는 파라미터는 다음과 같다.

① 직접파 ;

$G_d = \sqrt{G_t \cdot G_r}$: 송·수신 안테나 이득의 기하평균

② 터널 천정-바닥 면에서 i 번 반사된 파;

$R_{vi} = \sqrt{(R_0)^2 + (i \times H)^2}$: i 번째 파에서의 송·수신 안테나 사이의 경로 길이(m),

$G_{vi} = \sqrt{G_t \cos^n(\theta_{vi}) \cdot G_r \cos^n(\theta_{vi})}$: i 번째 파에서의 방향에 따른 송·수신 안테나 이득의 기하평균,

표 1. 수신전력 모델 파라미터
Table 1. Parameter of received power model.

P_t	송신 전력(W)
H	터널 높이(m)
W	터널 폭(m)
λ_0	자유공간에서의 파장(m)
r_0	송·수신 안테나 사이의 직접 거리(m)
G_t	송신 안테나 이득
G_r	수신 안테나 이득
k	파수

$\theta_{vi} = \tan^{-1} \frac{H(i+1)}{2R_0}$: i 번 반사된 파의 반사각도,

R_{vi} : i 번 반사된 파의 반사계수

③ 터널 벽면에서 i 번 반사된 파;

$R_{hi} = \sqrt{(R_0)^2 + (i \times W)^2}$: i 번째 파에서의 송·수신 안테나 사이의 경로 길이(m),

$G_{hi} = \sqrt{G_t \cos^n(\theta_{hi}) \cdot G_r \cos^n(\theta_{hi})}$: i 번째 파에서의 방향에 따른 송·수신 안테나 이득의 기하평균,

$\theta_{hi} = \tan^{-1} \frac{W(i+1)}{2R_0}$: i 번 반사된 파의 반사각도,

R_{hi} : i 번 반사된 파의 반사계수

i 번째 파에서 파의 반사각도에 따른 안테나의 이득 변화는 송·수신안테나의 중심 방향(boresight)에서부터 임의의 방향 θ 의 이득 값을 나타내는 방향성 함수인 $D(\theta, \phi)$ 을 이용하여 ②와 ③의 안테나 이득 기하평균의 차수 n 을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다^[2].

$$n = \frac{\log_{10} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)}{\log_{10} \left(\cos \sqrt{\frac{\pi}{D}} \right)} \quad (3)$$

2-2-1 터널 벽면 반사계수

식 (2)에서 터널 벽면에 i 번 반사된 파의 반사계수는 파를 반사하는 표면이 균일하지 못한 경우에는 표면 거칠도(roughness)를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다^{[6],[8]}.

$$R_i = \Gamma_i \cdot \rho \quad (4)$$

여기에서 Γ_i 는 유한 두께의 벽면 반사계수이고, $\rho = \exp \left\{ -2 \left(\frac{2\pi\sigma_h \sin(\theta_i)}{\lambda} \right)^2 \right\}$ 는 표면 거칠도에 의한 수정계수로서 표면거칠도의 표준편차 σ_h 의 함수이다^{[6],[8]}.

그림 2에서 터널의 천정, 바닥, 벽이 유한 두께를 갖고 있다. 이와 같이 층이 있는 매질 구조의 벽면

표 2. A, B, C, D 파라미터
Table 2. A, B, C, D parameter.

A	$\cos(\beta l)$
B	$jz_1 \sin(\beta l)$
C	$\frac{j \sin(\beta l)}{z_1}$
D	$\cos(\beta l)$

반사계수는 다음과 같다³⁾.

$$\Gamma_i = \frac{A + B/z_0 - z_0(C + D/z_0)}{A + B/z_0 + z_0(C + D/z_0)} \quad (5)$$

식 (5)에서 사용한 A, B, C, D 파라미터는 표 2와 같다.

여기에서,

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_r^*} \left[1 - \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r^*}} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_i \right) \right]^{1/2}$$

l : 매질의 두께이며 편파에 따라 자유공간에서와 매질 내에서의 파동 임피던스 z_0 , z_1 은 표 3과 같이 나타낼 수 있다¹³⁾.

2-3 터널의 전파 모델 시뮬레이션 결과

터널의 직선구간에 대한 수신 전력 모델 식 (2)에 터널 내 측정에서 사용하는 파라미터 값 표 4를 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과는 그림 3과 같다. 본 시뮬레이션에서는 파의 반사회수(i)를 25회, 터널의 구조는 높이 3.5 m, 폭 6 m인 직사각형 구조, 내부에는 장애물이 없는 경우로 가정하였다.

직선터널 내부에서 송·수신안테나 사이의 거리에 따른 수신전력 P_r 에 대한 시뮬레이션 결과 직접

표 3. 자유공간 및 매질 내에서의 파동 임피던스
Table 3. Wave impedance in free space and medium.

수직편파 (천정-바닥) 의 경우	$z_0 = \frac{120\pi}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{vi}\right)}$
	$z_1 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{vi}\right)}$
수평편파 (터널 벽면) 의 경우	$z_0 = \frac{1}{120\pi} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{hi}\right)$
	$z_1 = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{120\pi} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{hi}\right)$

표 4. 측정 및 시뮬레이션에 사용된 파라미터 값
Table 4. Parameter value for measurement and simulation of received power in tunnels.

송신 안테나	Yagi 안테나 (9 dB)
수신 안테나	Yagi 안테나 (9 dB)
송신 전력	5 W
사용주파수	444.125 MHz
터널 벽면의 복소 유전율	7.0 - j0.85
벽 두께	380 mm
바닥 및 천정 두께	200 mm

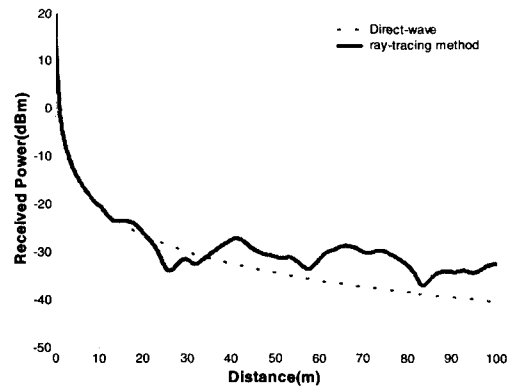


그림 3. 유한 두께의 벽으로 구성된 터널 내 송·수신 안테나 사이의 거리에 따른 수신전력 시뮬레이션 결과

Fig. 3. Simulation of received power depends on the distance between Tx and Rx antenna in tunnel with limited wall depth.

파와 반사파의 위상 차이에 의해 페이딩 현상이 나타나는 것을 알 수 있다.

2-4 터널 곡선구간 전파 모델

그림 2에서 터널 내 곡선구간의 벽면에 입사하는 파의 입사각(θ)의 변화는 그림 4와 같이 터널곡률 반경으로 인하여 직선구간에서 파의 벽면반사 때와는 다르다.

곡선구간에서는 송·수신 안테나 사이의 Line-of sight가 사라지게 되어 수신안테나에는 직접파는 도달하지 않고, 다중반사파 만이 수신되므로 인하여 전파경로 손실이 급격하게 증가한다^{16),19)}.

2-4-1 터널 곡선구간 전파경로 손실

터널의 곡선구간에 대한 전파경로 손실 예측은

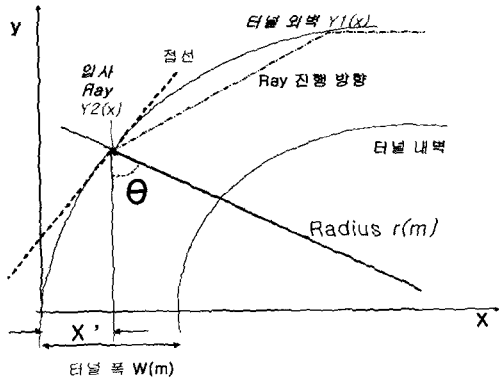


그림 4. 곡률반경 $r(m)$ 인 곡선터널
Fig. 4. Curved tunnel with radius $r(m)$.

참고문헌 [6]에 제시한 혼합도파관 모드와 Geometrical Optic(GO)을 결합하여 해석하는 모델을 이용하였다. 곡선구간의 전파경로손실은 식 (6)과 같이 굴절손실 $loss_{ref}(dB/m)$ 과 터널 곡률반경에 따른 감쇄손실 $loss_{curve}(dB/m)$ 의 합으로 표시할 수 있다^[6].

$$L = loss_{ref} + loss_{curve} \text{ (dB/m)} \quad (6)$$

식 (6)에서 굴절손실은 직선터널에 대하여 전파손실을 예측할 때 사용하는 것으로, 수직편파를 이용하는 혼합도파관 모드(EH_{m,n})에 복소유전율 식 (1)과 터널 높이(H) 및 폭(W)을 적용하여 식 (7)와 같이 계산할 수 있다^{[1],[6],[7]}.

$$loss_{ref} = 8.686 \left\{ \frac{(m\lambda)^2}{2W^3} \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r^* - 1}} \right\} + \frac{(n\lambda)^2}{2H^3} \operatorname{Re} \left\{ \frac{\epsilon_r^*}{\sqrt{\epsilon_r^* - 1}} \right\} \right\} \text{ (dB/m)} \quad (7)$$

식 (7)에서 사용하는 혼합도파관 EH_{m,n} 모드는 감쇄손실이 가장 작은 (1,1)이다^{[6],[7]}. 표 4에서 주어진 값을 이용하여 계산한 감쇄손실은 0.13(dB/m)이다.

2-4-2 곡률반경 $r(m)$ 인 곡선터널 손실

터널 내 곡선구간에서 입사파가 그림 4와 같이 벽면에 부딪치는 지점의 점선에 대한 입사각(θ)은 식 (8)과 같이 곡률반경(r) 및 터널 외벽과 입사하는 파(ray)와의 최대간격(x')으로 표시할 수 있다^[6].

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{r-x'}{\sqrt{r^2 - (x'-r)^2}} \right) \quad (8)$$

곡선구간에서 수직 편파가 벽면에 평행하게 입사할 경우 입사각(θ)의 변화는 파의벽면 반사계수(R_i) 값을 변화시킨다. 터널의 곡률반경에 따른 감쇄손실 (dB/m)은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다^[6].

$$loss_{curve} = \frac{Avg}{W} \{ 20 n_{ref} \log_{10}(R_i) \} \quad (9)$$

여기에서 $n_{ref} = \frac{1}{2\sqrt{r^2 - (x'-r)^2}}$ 은 그림 4와 같은 터널 곡선구간에서 하나의 입사파에 대한 단위미터(m)당 반사 횟수이며^[6], $Avg(\cdot)$ 는 터널 외벽과 입사파의 간격(x')이 터널 폭(W)까지 되는 여러 파들의 평균값이다.

그림 4와 같은 터널 곡선구간에서 벽면과 입사파의 간격(x')에 따른 입사각 (8)의 변화와 곡률반경에 따른 손실 식 (9)를 도식하면 그림 5와 같다.

2-5 곡선구간의 전파 모델 시뮬레이션 결과

터널의 곡선구간에서 전파경로손실 식 (6)에 표 4의 값과 곡률반경에 따른 곡선구간의 감쇄손실 식 (9)의 터널 폭(W)에 대한 평균값을 적용하여 계산한 결과는 0.62 dB/m이다. 이때 곡선구간의 벽면 표면

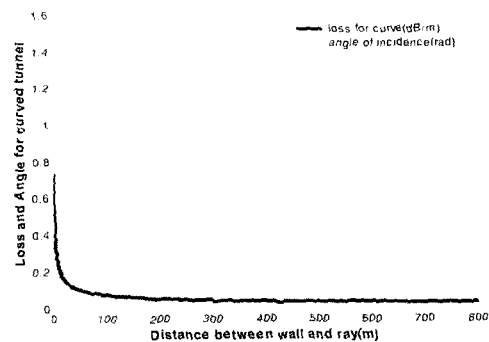


그림 5. 곡선구간에서 벽면과 파의 거리에 따른 파의 입사각 및 곡선터널 손실 변화(곡률반경 $r=800$ m)

Fig. 5. Ray's angle of incident and loss for curved tunnel power depends on the distance between wall and a ray in curved tunnel (curvature $r=800$ m).

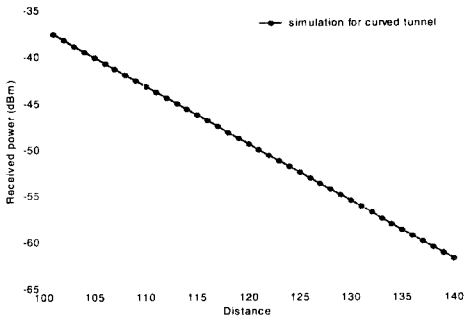


그림 6. 터널 곡선구간 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation for curved section of tunnel.

은 균일한 것으로 가정하였고, 100 m 지점에서의 수신 전력 값은 -37 dBm을 적용하여 140 m까지 시뮬레이션 한 결과는 그림 6과 같다.

Ⅲ. 터널 내 수신전력 측정

3-1 수신전력 측정 시스템 구성도

터널 내 송·수신안테나 사이의 거리에 따른 수신전력 측정시스템 구성도는 그림 7과 같다.

송신부는 신호발생기, 5 W용 Power Amplifier, 9 dB 이득의 야기안테나 및 Spectrum Analyzer로 구성 하였고, 수신부는 9 dB 이득의 야기안테나, 전계강도 측정기 및 레코더, Spectrum Analyzer로 구성하였다.

전계강도측정기(Anritsu ML524B)의 측정범위는 주파수 300 MHz ~ 999.99 MHz에서 최저 19 dB μ V/m ~ 32 dB μ V/m, 최대 114 dB μ V/m ~ 120 dB μ V/m의 신호전력 측정이 가능하며 Spectrum Analyzer는 HP8591E 모델로서 수신전력 측정범위는 9 kHz

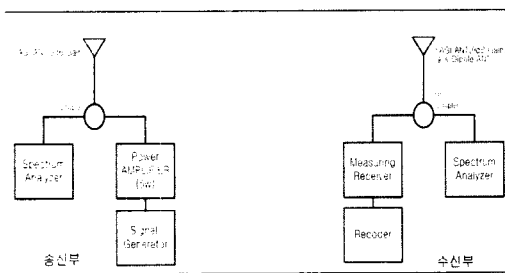


그림 7. 측정 시스템 구성도
Fig. 7. Diagram of measuring system.

~ 1.8 GHz에서 -128 dBm ~ $+32$ dBm의 신호 전력 측정이 가능하다.

3-2 측정결과

신호발생기에서 발생한 신호는 Power Amplifier를 거쳐 송신안테나에서 5 W로 방사된다. 송신안테나는 터널 중앙의 바닥에서 약 1.2 m 높이에 설치하였다. 수신안테나는 바닥에서 약 1.2 m 높이로 터널의 중앙에서 통로를 따라 이동하면서 측정하였다.

전계강도측정기의 최소 범위를 고려하여 직선구간은 송신안테나에서 60 m 떨어진 지점에서부터 100 m까지, 곡선구간은 140 m지점까지 측정하였다.

송·수신 안테나를 수직으로 세워 측정값에 대한 회귀분석 결과는 그림 8과 같다.

직선구간에 대한 경로손실은 0.19 dB/m, 곡선구간에서 경로손실은 0.68 dB/m으로, 곡선구간에서 손실이 직선구간에 비하여 매우 높다는 것과 두 구간의 경계지점에서 break point가 발생함을 알 수 있었다^{[7],[9]}.

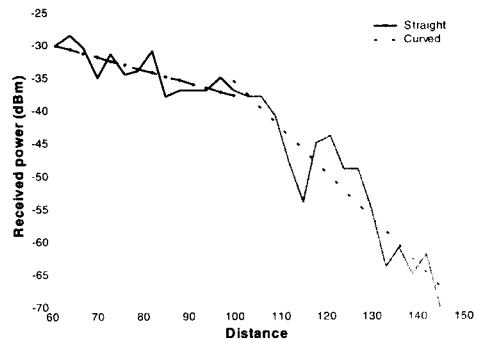


그림 8. 터널 내 직선 및 곡선구간 수신전력 측정값
Fig. 8. Measurement of received power in straight and curved section of tunnels.

Ⅳ. 시뮬레이션 및 측정값 비교 분석

터널의 직선구간과 곡선구간에 대한 시뮬레이션 값과 측정값을 비교한 그래프는 그림 9와 같다.

터널 내부의 송신안테나로부터 60 m 떨어진 지점의 수신 전력은 약 -30 dBm으로 송신안테나의 방사전력 37 dBm에 비하여 67 dB의 손실이 발생함을 알 수 있다. 이 값은 25번째까지 수직 및 수평으

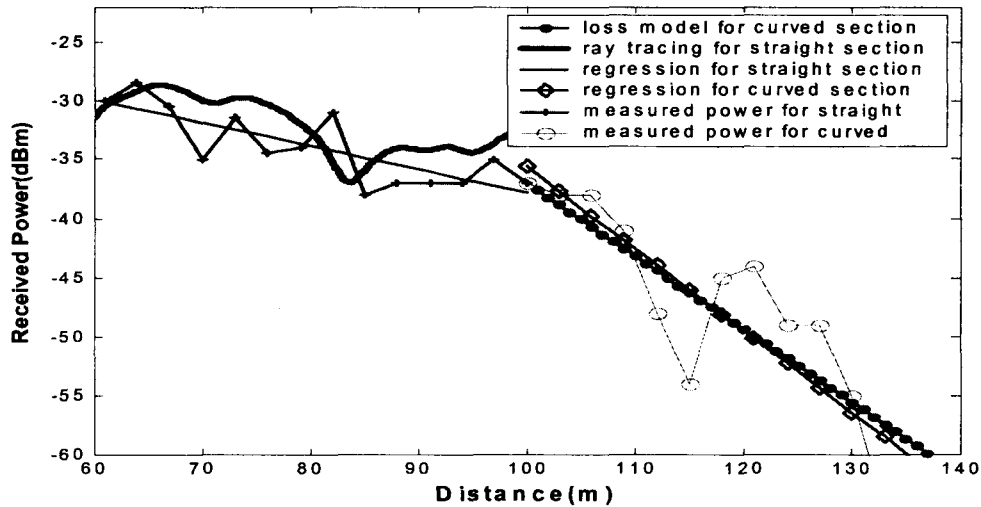


그림 9. 터널 직선 및 곡선구간 시뮬레이션 값 및 측정값 수신전력 비교

Fig. 9. Comparison of simulated and measured received power in straight and curved section of tunnels.

로 반사된 파의 수신전력 값을 합한 시뮬레이션 값 -30 dBm과 일치한다.

터널 내 직선구간인 60 m ~ 100 m 사이의 수신 전력측정값에 대한 회귀분석결과인 경로손실은 0.19 dB/m이고, 식 (7)에서 제시한 혼합도파관 모드의 감쇄손실 값인 0.13 dB/m과의 차이는 0.06 dB/m이었다.

곡선구간인 100 m ~ 140 m 사이의 수신 전력 측정값의 회귀분석결과 경로손실은 0.68 dB/m이고, 식 (6)에서 제시한 혼합도파관 모드와 Geometrical Optic (GO)을 결합하여 해석하는 곡선터널 감쇄손실(6) 값은 0.62 dB/m로 측정값과의 차이는 0.06 dB/m이다.

V. 결 론

터널 내 직선구간과 곡선구간에 대한 전파특성을 분석하였다.

터널 내 전파특성 분석모델로는 직선구간에 대해서는 Ray-tracing 기법을 곡선구간에 대해서는 참고 문헌 [6]에 제시한 혼합도파관 모드와 Geometrical Optic(GO)을 결합하여 해석하는 모델을 이용하였다.

터널 내 수신전력 측정값을 회귀 분석한 결과 직선구간의 경로손실은 0.19 dB/m이었고, 곡선구간의 경로손실은 0.68 dB/m로 직선구간에 비하여 손실이

매우 높다는 것을 알 수 있었다.

직선구간의 측정값은 Ray-tracing 모델의 시뮬레이션 결과와 매우 유사하였으며, 곡선구간의 측정값은 혼합도파관 모드와 Geometrical Optic(GO)을 결합하여 해석하는 모델 시뮬레이션 결과와 거의 일치하였다.

참 고 문 헌

- [1] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. 1998.
- [2] Robert E. Collin, *Antennas and Radiowave Propagation*, McGraw-Hill, Inc. pp. 25-27, 1985.
- [3] Akira Ishimaru, *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering*, Prentice Hall, pp. 16-17, 1991.
- [4] Ph. Mariage, M. Lienard and P. Degauque "Theoretical and experimental approach of the propagation of high frequency waves in road tunnels", *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. 42, no. 1, pp. 75-81, Jan. 1994.
- [5] Fernando Marti Pallares, Francisco J. Ponce Juan, "Analysis of path loss and delay spread at 900 MHz and 2.1 GHz while entering tunnels", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 50, no. 3, pp.

- 767-776, May 2001.
- [6] Martin Nilsson, Jesper Slettenmark and Claes Beckman, "Waves propagation in curved tunnels", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, pp. 1876-1897, 1998.
- [7] M. Lienard, S. Betrencourt and P. Degauque "Theoretical and experimental approach of the propagation at 2.5 GHz and 10 GHz in straight and curved tunnels", *IEEE VTC'99*, pp. 2268-2271, 1999.
- [8] Mohammad Haeri Kermani, Mahmuoud, "A ray-tracing method for predicting delay spread in tunnel environments", *IEEE Trans. ICPWC '2000*, pp. 538-542, May 2000.
- [9] Satoshi Shinozaki, Masami Wada, Akio Teranishi, Hiroshi Furukawa and Yoshihiko Akaiwa, "Radio propagation characteristics in subway platform and tunnel in 2.5 GHz bands", *IEEE VTC '95*, pp. 1175-1179, 1995.
- [10] Y. P. Zhang, Y. Hwang "Characteristics of UHF radio propagation channel in curved tunnels", *IEEE*, pp. 789-802, 1996.
- [11] Y. P. Zhang, Y. Hwang and J. H. Sheng, "Propagation characteristics of UHF simulcast signals in tunnel environments", *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. 14, no. 1 pp. 457-460, 1996.
- [12] Y. P. Zhang, G. X. Zheng and J. H. Zheng, "Radio propagation at 900MHz in underground coal mines", *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. 49, no. 5 pp. 757-762, May 2001.
- [13] "Simplified reflection and transmission coefficient formulas for a multi-layered medium", *ITU-R Contribution Doc 3K/15-E*, May 2002.

김 영 문



1992년 2월: 금오공과대학 전자공학과 (공학사)
 1996년 8월: 경희대학교 정보통신공학과 (공학석사)
 2000년 3월 ~ 현재: 경희대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 전파전파 및 ITS

진 용 옥



1968년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
 1975년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1981년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
 1979년 1월 ~ 현재: 경희대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 정보통신공학 및 시스템공학

정 민 석



2000년 2월: 경희대학교 우주공학과 (공학사)
 2002년 2월: 경희대학교 정보통신대학원 (공학석사)
 2002년 3월 ~ 현재: 경희대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 안테나 및 전파전파, RF회로

RF회로

이 범 선



1982년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1991년 8월: 네브래스카주립대 전자공학 (공학석사)
 1995년 5월: 네브래스카주립대 전자공학과 (공학박사)
 1995년 9월 ~ 현재: 경희대학교 전자정보학부 부교수

[주 관심분야] 안테나 및 전자파이론, 초고주파 수동회로