

도로터널 내의 전파손실 특성 분석

Analysis of Path Loss Characteristics in Road Tunnel

정민석

김영문

이범선

(경희대학교 전파공학과, 박사과정) (경희대학교 전파공학과, 박사과정) (경희대학교 전파공학과, 교수)

목 차

I. 서론	III. 터널 내 수신전력 측정 및 분석
II. 터널 전파 모델	1. 터널 내 수신전력 측정 시스템 구성도
1. 터널 전파 모델	2. 측정 및 결과
2. 터널 벽면 반사 계수	IV. 결론
3. 터널 전파모델 시뮬레이션	참고문헌

I. 서론

오늘날의 방송, 통신 환경은 어디서나 고속 대용량 멀티미디어 데이터의 신뢰성 있는 전송을 요구하고 있다. 그러나 많은 사람들이 이용하는 지하공간에서 신뢰성 있는 전파환경을 기대하기란 쉽지 않다.

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

그러나 터널 내부의 전파환경은 자유공간의 전파환경과 매우 다른 특성을 나타내고 있다. 터널 내부로 전파 가능한 주파수는 터널의 단면에 따라 결정되어진다 [1]-[5]. 터널 내부에서 자유공간의 전파경로 모델을 적용하기에는 추가적으로 고려하여야 할 변수가 많이 있다 [6][7].

터널내부의 전파 전파는 직접파 외에 벽면 반사, 터널 구조에 따른 회절 및 산란 등에 따른 영향이 존재하며, 터널의 구부러짐 정도에 따라 전파특성이 변하게 된다 [7]. 터널의 전파특성에 가장 크게 영향을 미치는 파라미터들은 터널의 종단 및 횡단면 길이, 터널내부의 매질, 터널천정, 벽면 및 바닥 표면거칠도, 터널 내부에 위치하는 물체, 터널내부에서의 편파 등을 들 수 있다. 터널 내에서 사용하는 전파의 파장보다 터널의 단면적이 매우 큰 경우 사용할 수 있는 전파특성 해석 방법으로는 Ray-tracing 기법 등이 있다 [5]-[10].

대부분의 터널내부의 전파환경 해석에서는 터널 길이를 직선으로, 횡단면은 직사각형 터널로 가정한다.

그러나 실제로 건설되는 터널은 구조상의 문제로 인하여 곡선터널로 건설되며, 단면의 형태도 직사각형, 아치형, 반원형 등 다양한 형태의 구조를 갖기 때문에 이에 대한 정량적인 분석이 필요한 상태이다 [7].

본 연구에서는 중부내륙고속도로에 하행선에 위치한 2차선용 아치형 터널인 가금터널에 대해 Ray-tracing 기법을 이용하여 송·수신 안테나 사이의 거리에 따른 수신 전력을 예측하였고 측정값과 비교 분석하였다.

II. 터널 전파 모델

1. 터널 전파 모델

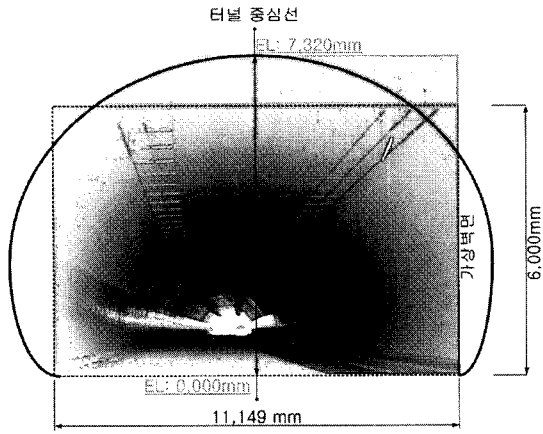
본 연구를 수행한 터널은 <그림 1>과 같이 폭이 11.149m, 가장벽면 높이 6m, 터널 중심선 높이 7.320m인 아치형 터널로서 길이는 860m이다.

이론적 해석의 편리를 위하여 터널 단면구조를 11.149m × 6m의 직사각형 구조로 근사화 하였으며 [4], 터널 단면의 중앙에 송신 및 수신안테나를 위치하는 것으로 가정하였다.

송신 안테나는 수직 편파를 가지며, 이 경우 수직 방향으로 반사되는 파는 Parallel 입사 경우가 되고, 수평 방향으로 반사되는 파는 Perpendicular 입사가 된다.

일반적으로 도로터널은 콘크리트 구조이므로 콘크리트 매질에 대한 복소유전율 ϵ_r^* 은 다음 식(1)과 같이 상대유전율 ϵ_r' 과 매질의 도전을 σ 로 표시된다.

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



〈그림 1〉 가끔 터널 단면도

여기에서 ϵ_0 는 자유공간의 유전율이며, ω 는 각속도이다. 식(1)은 터널 내 수직편파반사계수 및 수평편파반사계수 계산에 사용된다.

터널 내에서 송신안테나와 수신안테나 사이의 직선 거리 R_0 만큼 떨어진 지점에서의 측정되는 수신전력 P_r 은 직접파, i 번 반사한 수직방향 반사파 및 수평방향 반사파 3가지 합인 형태로 나타낼 수 있다[5].

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda_0}{4\pi} \right)^2 \cdot \left(\left| \frac{G_d e^{-jkR_0}}{R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{G_{vi}(\Gamma_{vi})^i e^{-jkR_{vi}}}{R_{vi}} + \sum_{i=1}^n \frac{G_{hi}(\Gamma_{hi})^i e^{-jkR_{hi}}}{R_{hi}} \right|^2 \right) \quad (W) \quad (2)$$

식 (2)에서 사용되는 기본파라미터와 직접파 및 i 번 반사된 파에서 사용되는 파라미터는 다음과 같다.

1) 기본 파라미터 :

- P_t : 송신 전력(W)
- H, W : 터널 높이, 폭(m)
- λ_0 : 자유공간에서의 파장(m)
- R_0 : 송·수신 안테나사이의 직선 거리(m)
- G_t, G_r : 송신, 수신 안테나이득
- k : 전파상수

2) 직접파 :

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

3) 터널 천정-바닥 면에서 i 번 반사된 파:

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

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

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

Γ_{vi} : i 번 반사된 파의 반사계수

4) 터널 벽면에서 i 번 반사된 파 :

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

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

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

Γ_{hi} : i 번 반사된 파의 반사계수

2. 터널 벽면 반사계수

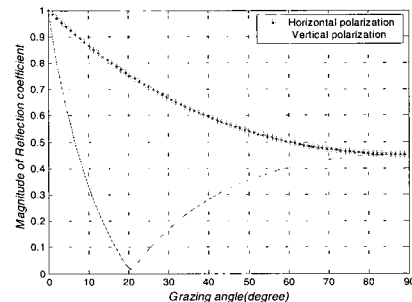
일반적인 도로의 터널은 산악 지역을 통과하면서 생기는 것으로 벽의 두께를 무한대로 가정 할 수 있다. 이와 같이 공기와 콘크리트 두개의 매질(two medium)로 구성되는 터널의 반사계수는 식 (1)을 적용하여 터널 천정-바닥 면의 수직반사계수는 식 (3), 터널 벽면의 수평반사계수는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다[2].

$$\Gamma_{vi} = \rho_{vi} e^{j\phi_{vi}} = \frac{\epsilon_r^* \sin(\theta_{vi}) - \sqrt{\epsilon_r^* - \cos^2(\theta_{vi})}}{\epsilon_r^* \sin(\theta_{vi}) + \sqrt{\epsilon_r^* - \cos^2(\theta_{vi})}} \quad (3)$$

$$\Gamma_{hi} = \rho_{hi} e^{j\phi_{hi}} = \frac{\sin(\theta_{hi}) - \sqrt{\epsilon_r^* - \cos^2(\theta_{hi})}}{\sin(\theta_{hi}) + \sqrt{\epsilon_r^* - \cos^2(\theta_{hi})}} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)에서 사용한 θ_{vi} , θ_{hi} 는 각각 수직 또는 수평으로 벽면 등에 입사하는 파의 grazing 각도이다.

벽의 두께가 무한대인 두개의 매질로 구성된 도로 터널 내에서 주파수 875MHz, 터널 벽면의 매질을 콘크리트($\epsilon_r^* = 7 - j0.8$)로 가정하였을 때 입사 각도에 따른 반사계수 값은 〈그림 2〉와 같다.



〈그림 2〉 두개의 매질에서의 반사계수

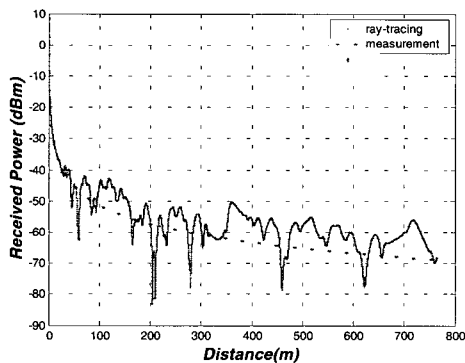
수평 반사계수 ($|Γ_{hl}|$) 값은 입사각도가 증가하면서 1에서 0.45로 줄어들지만 수직반사계수 ($|Γ_{vl}|$)의 값은 Brewster 각도를 중심으로 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 까지는 1에서 0.015로 급격하게 감소하다가 $20^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 사이에서는 0.015에서 0.45로 점차 증가한다.

3. 터널 전파모델 시뮬레이션

터널 내 수신 전력 식(2)에 측정에서 사용하는 파라미터 값을 표1과 같이 적용하여 송신안테나와 수신안테나간의 거리에 따른 터널 내 수신 전력 값에 대해 시뮬레이션 한 결과는 <그림 3>과 같다.

<표 1> 시뮬레이션 파라미터

구분	값
송신 안테나(Yagi) 이득	10dB
수신 안테나(Yagi) 이득	10dB
송신 전력	13dBm
사용주파수	875MHz
터널벽면의 복소유전율	$7.0-j0.85$
벽면 도전율	$0.0239S/m$
터널 횡단면적	$11.149m \times 6m$
파의 반사회수(i)	25회



<그림 3> 터널 내 수신전력 시뮬레이션 결과

<그림 3>으로부터 터널 내부의 수신전력 P_r 은 직접파와 반사파의 위상 차이에 의해 큰 폭의 감쇄가 주기적으로 발생하였고, 송신안테나와 수신안테나 사이의 거리가 길어질수록 직접파의 경로와 반사파의 경로의 차이가 작아짐으로 인하여 위상 차이에 의한 감쇄가 줄어들어 가는 것을 알 수 있다.

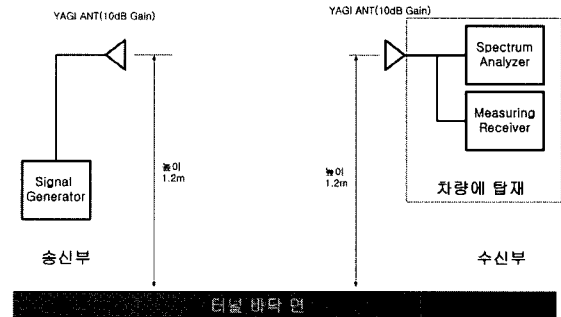
III. 터널 내 수신전력 측정 및 분석

1. 터널 내 수신전력 측정 시스템 구성도

터널 길이에 따른 수신 전력의 측정은 <그림 1>에서

와 같이 가급터널 내부에서 행하여 졌다. 중부내륙고속도로는 신설도로로서 측정 당시에는 차량이 다니지 않는 상태였으며, 터널내부에 전파를 방해하는 장애물이 거의 없는 매우 이상적인 환경인 빈 터널에서 행하여 졌다. 터널 내부에 차량이나 시설물 등 장애물이 없는 경우에는 전파손실이 적다고 보고되어 있다[4]. 장애물이 없다는 것은 파장보다 큰 표면의 거침도가 없는 경우로서 산란손실이 발생하지 않는다[10].

수신 전력측정 시스템은 송신부와 수신부로 그림 4와 같이 구성하였다. 송신부는 신호발생기(Credix SG-1610A: 200kHz~1100MHz), 야기 안테나로 구성하였으며 수신부는 야기안테나, Measuring Receiver (Anritsu ML524B: 300MHz~999.99MHz에서 최저 $19 dB\mu V/m \sim 32 dB\mu V/m$, 최대 $114 dB\mu V/m \sim 120 dB\mu V/m$) 및 Spectrum Analyzer(SA-7270A: 9kHz~2.7GHz)로 구성하여 차량에 탑재 하였다.

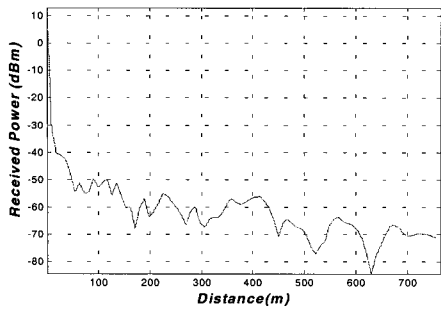


<그림 4> 수신전력 측정 시스템 구성도

2. 측정 및 결과

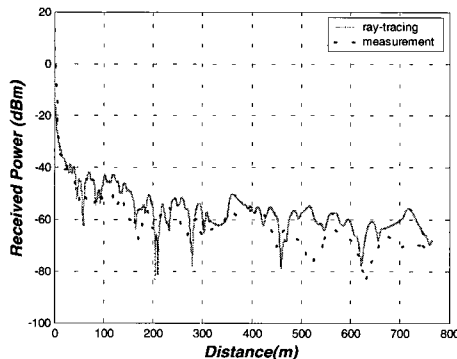
송신안테나의 설치 위치는 터널 입구로부터 120m 떨어진 지점의 중앙에 바닥에서 1.2m 높이에 설치하였다. 신호발생기에서 발생한 신호는 송신안테나에서 13 dBm으로 방사된다. 수신안테나는 바닥에서 1.2m 높이로 <그림 4>와 같이 차량에 고정하였으며 차량은 터널의 중앙에서 길이방향으로 이동하면서 9m간격으로 측정하였다. 9m간격의 표시는 터널 건설공사의 한 구간 표시이다.

터널 내에서의 송·수신안테나의 방향을 수직으로 세워서 측정한 결과는 그림 5와 같이 송신 안테나로부터 200m 떨어진 지점에서는 측정한 수신 전력은 $-60 dBm$ 으로 전파손실이 $73dBm$ 이다. 200m에서 400m 구간에서는 수신 전력은 $-60dBm$ 을 중심 값으로 $\pm 5dB$ 을 유지하였다. 400m 이후 구간에서 $20dBm$ 의 추가손실이 발생하였다.



〈그림 5〉 수신전력 측정값 (수직편파)

터널 내부에서 송신안테나와 수신안테나 사이의 거리에 따른 수신 전력에 대한 시뮬레이션 값과 측정값을 비교한 그래프는 〈그림 6〉과 같다. 두 값이 거의 유사하다는 것은 제안된 모델 식(2)를 터널 내부의 전파환경 분석에 편리하게 사용할 수 있을 것이다. 반사파의 수신 전력이 우세한 구간에서 측정값이 시뮬레이션 값보다 수dB정도 작은 차이발생은 모델 식 (2)에서는 아치형 터널구조를 직각사각형 터널 구조로 근사화 하였고, 시뮬레이션과 측정에서의 높이의 차이, 터널의 곡률반경과 표면거칠도 등을 반영하지 않는 결과이다(7). 이것은 터널 전파특성 해석에 고려하여야 할 항목들이 많다는 것을 의미한다.



〈그림 6〉 시뮬레이션 값 및 측정 값 수신전력 비교

IV. 결론

터널 내의 전파특성을 분석하기 위하여 Ray-tracing 기법을 이용한 이론적 모델해석과 측정을 수행하였다. 폭이 11.149m, 가상벽면 높이 6m, 터널 중심선 높이 7.320m인 아치형 터널인 가금터널에 대한 시뮬레이션 값과 측정값이 매우 유사하므로 제시된 모델을 도로터널의 전파환경 분석에 사용할 수 있을 것이다. 터널 내부의 수신전력 값은 송신 안테나와 수신안테나의 거리에 따라 직접파와 반사파의 위상 차이에 의해 큰 폭의 감쇄가 주기적으로 발생하였고, 송신 안테나와 수신안테나 사이의 거리가 길어질수록 직접파

의 경로와 반사파의 경로의 차이가 작아짐으로 인하여 위상 차이에 의한 감쇄가 줄어드는 것을 알 수 있다.

참고문헌

1. David M. Pozar, "Microwave Engineering," *Second Edition*, JOHN WILEY & SONS, INC. 1998
2. Robert E. Collin "Antennas and Radiowave Propagation," *McGraw-Hill*, Inc, 1985 pp. 345-346.
3. Michel Daoud Yacoub "Foundations of Mobile Radio Engineering," *CRC Press*, pp. 137-141, 1993.
4. Y. P. Zhang, Y. Hwang, and R. G. Kouyoumjian, "Ray-optical prediction of radio-wave propagation characteristics in tunnel environments-part 2: Analysis and measurement," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. 46, NO.9 pp.1337-1345, 1998
5. 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
6. Fernando Marti Pallares, Francisco J. Ponce Juan, "Analysis of path loss and delay spread at 900MHz and 2.1GHz while entering tunnels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.50, no3, pp. 767-776, May. 2001
7. Martin Nilsson, Jesper Slettenmark and Claes Beckman, "Waves propagation in curved tunnels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, pp. 1876-1897, 1998
8. 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
9. 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
10. Mohammad Haeri Kermani, and Mahmuoud, "A ray-tracing method for predicting delay spread in tunnel environments," *IEEE Trans. ICPWC'2000*, pp. 538-542, May. 2000
11. Pauli Aikio, Ralf Gruber and Pertti Vainikainen, "Wideband radio channel measurements for train tunnels," *IEEE. VTC'98*, pp.460-464, 1998