

복도 내에서의 전파의 전파특성에 관한 연구

A Study on Radio Wave Propagation Characteristics in A Corridor

강 희 창

Hee-Chang Kang

요 약

본 논문은 구형단면(rectangular cross section) 모양의 복도 내에서의 전파의 전파특성을 축소된 모형터널을 이용하여 얻을 수 있는 방법을 모색하였다. 측정주파수는 마이크로웨이브 주파수범위(2~10 GHz)에서 수직편파방법으로 하였다. 터널모델에서의 감쇄정수와 전계강도에 대한 실험값은 이론값과 거의 일치됨을 보였고, 이 모델링에 의한 방법은 실제터널에서의 전파특성을 예측하는데에 잘 적용될 수 있음을 보였다.

Abstract

In this paper, radio-wave propagation characteristics in a rectangular corridor are investigated using a tunnel model of reduced dimensions. Measurements were carried out on vertical polarization characteristics in the frequency range from 2 GHz to 10 GHz. The experimental results for the propagation constant in tunnel model agree satisfactorily with theoretical prediction. It is shown that model method is applicable in determining the propagation characteristics in tunnel.

I. 서 론

최근에 터널, 지하도로, 지하철 및 실내복도 등에서의 무선전화 휴대폰과 같은 무선통신의 이용률이 급격히 증가하고 있다. 특히 재난 등의 위급 상황에서 무선통신의 역할은 중요하다. 또한 건물 내에서의 무선신호의 전파특성은 EMC(Electro-magnetic compatibility)문제에 중요한 요인이 되고 있다. 전파손실에 영향을 주는 요인으로는 터널벽의 전기적 성질, 터널의 단면의 모양, 크기 및 주파수 등이 있다.

이제까지 터널이나 지하도로에서의 전파특성에 대한 연구는 주로 실험적인 연구^{[1]~[3]}가 행해져 오고 있다. 실제의 터널 속에서는 이동물체가 존재하고 있기 때문에 실제적인 측정이 어려운 경우가 많고, 또한 터널이 만들어지기전 터널의 구조, 터널의 재료에 따른 전파손실 등의 전파특성을 예측하는 것이 필요하고, 실제터널에서의 전파특성을 측정하기가 어려운 경우가 많이 있다. 본 연구에서는 이론적인 방법^[3]을 이용하여 축소된 터널모델에 의하여 얻어진 전파특성값에 의해 실제터널에서의 전파특성값을 얻을 수 있는 방법을 제시하였다. 여기에서는 벽면의 거칠기와 벽면의 경사에 의한 손실(wa-

국립서울산업대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Seoul National Polytechnic University)

· 논문 번호 : 970804-049

· 수정완료일자 : 1997년 10월 29일

ll roughness and wall tilt loss)은 값이 적기 때문에 고려하지 않고 굴절에 의한 손실(refracted loss)만을 고려하였다. 터널의 재료는 콘크리트로 하였으며, 터널의 모양은 구형단면(rectangular cross section)으로 하였고, 측정주파수 범위는 2 GHz에서 10 GHz범위로 하였다. 축소된 터널모델에 의해 얻어진 전파특성값들을 변환시켜 얻은 값들이 실제터널에서 얻어진 값들과 거의 일치됨을 보였다.

II. 축소형 모형터널의 모델링 방법

2-1 터널 내의 전파특성

터널 내에서의 전파특성의 정확한 이론적인 해를 얻는 것은 경계조건을 정합시키는 어려움 때문에 쉽지 않다. 터널에서의 전파손실(propagation loss)값은 터널모양, 크기, 터널구조의 재료, 주파수 등의 많은 요인에 의존한다. 이제까지의 연구는 도파관방법^{[4], [6]}에 의하여 지하도나 건물 내의 복도에서의 전파특성을 조사해오고 있다.

이러한 연구들은 손실이 적은 유전체 재료에 의해 둘러싸인 구형도파관인 구조로 생각하였고, 이러한 조건에 따라 UHF의 파장이 터널의 크기보다 더 작기 때문에 터널에서의 전송은 도파관의 전파

형태를 취하는 것과 같이 하여왔다. 유전체로 둘러싸인 구형터널을 따라 진행되는 전자파는 산란에 의해 생긴 허용된 많은 도파관 모드가 존재할 수 있으며 이들 중 감쇄가 가장 작은 모드는 수직과 수평 방향으로 편파된 전계를 가진 두 모드가 있다^[3]. 이들 모드들은 터널의 벽에 부딪치는 파의 일부분이 터널을 에워싼 유전체에 부분적으로 굴절되고 또 다른 일부분은 도파관에서 반사되기 때문에 손실 모드가 된다. 굴절파는 도파관으로부터 멀리 전파되어 전파손실을 나타낸다.

터널 내에서는 수직으로 편파된 전계(E_v)를 가진 모드는 근사적인 TEM파로서 x, y, z방향의 전계와 자계성분들이 존재한다^[3]. 이들 중 주요 장 성분은

$$E_x = E_o \cos k_1x \cos k_2y \exp(-ik_3z) \quad (1)$$

$$H_y = \frac{k_o}{\omega\mu_o} E_o \cos k_1x \cos k_2y \exp(-ik_3z) \quad (2)$$

이다. 위의 성분 이외의 전자계 성분들이 있으나 이들값이 미약하기 때문에 고려하지 않는다^[3].

도파관방법에 의해 $y = \frac{d_2}{2}$ 에 경계조건은 E와 H의 접선성분을 연속이 되게 하며 다음과 같은 조건식이 필요하게 된다.

$$k_2 \tan\left(\frac{k_2 d_2}{2}\right) = ik_o(K-1)^{1/2} \quad (3)$$

$$k_1 \tan\left(\frac{k_1 d_1}{2}\right) = \frac{ik_o(K-1)^{1/2}}{K} \quad (4)$$

$$k_3 = \beta - j\alpha = (k_o - k_1^2 - k_2^2)^{1/2} \quad (5)$$

여기에서 K 는 터널의 비유전율, k_1 은 x방향의 전파정수, k_2 는 y방향의 전파정수, k_3 는 파의 진행방향 즉 z방향의 전파정수이고, $k_o \left(= \frac{2\pi}{\lambda} \right)$ 는 자유공간의 파수이다. 이들 특성방정식에 의해 수직편

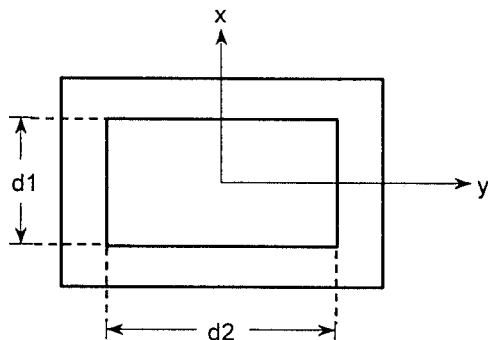


그림 1. 터널의 구형단면

Fig. 1. Cross section of a rectangular tunnel.

파전계 E_V 에 대한 손실은 다음과 같이 된다.³⁾ 이 손실을 굴절에 의한 손실(refracted loss)이라고 한다.

$$l_{EV} = 4.343\lambda^2 z \left(\frac{1}{d_1^3(K-1)^{1/2}} + \frac{K}{d_2^3(K-1)^{1/2}} \right) \quad (6)$$

터널벽에서 전파의 흐트러짐(diffuse)을 일으키는 벽면의 거칠기(wall roughness)와 벽면의 경사(wall tilt)에 의한 손실은 다음과 같이 나타낸다.

$$l_{roughness} = 4.343\pi^2 h^2 \lambda \left(\frac{1}{d_1^4} + \frac{1}{d_2^4} \right) z \quad (7)$$

여기에서 h 는 root-mean-square roughness 이고 이 roughness loss는 파장의 크기에 따라 값이 변한다. 즉 파장의 증가에 따라 커진다. 터널벽의 tilt는 전파되는 모드의 power를 전파방향으로부터 굽이지게하여 전파손실을 가져온다. wall tilt에 의한 손실값은

$$l_{tilt} = \frac{4.343\pi^2 \theta^2 z}{\lambda} \quad (8)$$

이 된다.³⁾ 여기에서 θ 는 root-mean-square tilt이다. 보통 모든 전파손실값은 위의 refraction loss, roughness loss와 tilt loss의 합으로 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 터널면의 굴곡이 적고 거칠지 않은 평면이므로 roughness loss와 tilt loss를 고려하지 않는다.

2-2 축소모델과 실제 복도와의 관계

본 논문에서는 축소모델을 이용하여 터널형의 실제복도에서의 전파특성을 예측하기 위하여 축소모델에서의 손실값과 실제 복도에서의 손실값과의 수식적 관계를 먼저 유도하였다.

축소형 모형에서 E_V 모드의 refraction loss는

$$l_{Evm} = 4.343\lambda^2 m z_m \left(\frac{1}{d_{1m}^3(K_m-1)^{1/2}} + \frac{K_m}{d_{2m}^3(K_m-1)^{1/2}} \right) \quad (9)$$

여기에서 $\lambda_m, K_m, d_{1m}, d_{2m}, z_m$ 은 각각 축소모델에서의 파장, 비유전율, 그리고 모델의 각변의 길이를 나타낸다.

축소모델의 손실과 실제 터널에서의 손실과의 비율은 식 (9)와 식 (6)의 비로 나타낼 수 있다.

$$\frac{l_{EV}}{l_{Evm}} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 \cdot \left(\frac{z}{z_m} \right) \cdot \frac{\frac{1}{d_1^3(K-1)^{1/2}} + \frac{K}{d_2^3(K-1)^{1/2}}}{\frac{1}{d_{1m}^3(K_m-1)^{1/2}} + \frac{K_m}{d_{2m}^3(K_m-1)^{1/2}}} \quad (10)$$

관계식이 성립한다. 실제터널과 모형의 크기의 비를 $d_{1m} = \frac{d_1}{\alpha}, d_{2m} = \frac{d_2}{\alpha}, z_m = \frac{z}{\alpha}$ 로 하고, 실제터널과 모형터널의 source를 동일파장으로 하면 식 (10)은, 즉 변환계수 T 는

$$T = \frac{l_{EV}}{l_{Evm}} = \frac{1}{\alpha^2} \cdot \frac{\frac{1}{d_1^3(K-1)^{1/2}} + \frac{K}{d_2^3(K-1)^{1/2}}}{\frac{1}{d_{1m}^3(K_m-1)^{1/2}} + \frac{K_m}{d_{2m}^3(K_m-1)^{1/2}}} \quad (11)$$

이 된다. 식 (11)을 이용하여 모형터널에서 측정한 손실값으로 실제터널에 적용하면 다음과 같다.

① $K = K_m$ 인 경우

식 (11)에 $K = K_m$ 을 대입하면

$$l_{EV} / l_{Evm} = 1 / \alpha^2$$

이 되므로 실제터널의 손실 l_{Ev} 는

$$l_{Ev} = \frac{1}{\alpha^2} \cdot l_{Evm} \quad (12)$$

가 되며, 여기에서 l_{Evm} 은 식 (9)이다.

② $K \neq K_m$ 인 경우

실제터널의 손실 l_{Ev} 는

$$l_{Ev} = l_{Evm} \cdot \frac{1}{\alpha^2} \cdot \left(\frac{\frac{1}{d_1^3(K-1)^{1/2}} + \frac{K}{d_2^3(K-1)^{1/2}}}{\frac{1}{d_1^3(K_m-1)^{1/2}} + \frac{K_m}{d_2^3(K_m-1)^{1/2}}} \right) \quad (13)$$

Ⅲ. 실험 및 결과

3-1 실험

측정대상인 실제터널(복도)은 그림 2와 같이 벽, 바닥, 천장 모두 동일한 콘크리트로 되어 있으며 비유전율 $K=5$ 인 일직선으로된 실내복도이다. 복도 통로의 길이는 60 [m]이고, 폭 $d_1=3$ [m], 높이 $d_2=4$ [m]로 되어있다. 또한 복도의 양끝에는 나무와 유리로된 출입문으로 만들어져 있고, 통로의 문들은 나무로 되어 있으며 문 사이의 간격은 10~15 [m]로 되어있다. 측정시에는 복도 양단의 문을 완전히 열어놓은 상태에서 측정하였다. 복도의 문이 실제로는 나무로 되어 있으나 문의 폭과 높이가 복도 길이에 비해 훨씬 작으므로 복도 전체를 균일한 콘크리트로 생각하였고, 복도와 축소된 터널의 면은 굴곡이 적고 표면이 거칠지 않은 평면으로 되어 있다.

본 논문에서는 수직방향으로 우세하게 편파된 전계를 가진 모드, 즉 우세모드인 수직편파모드가 되

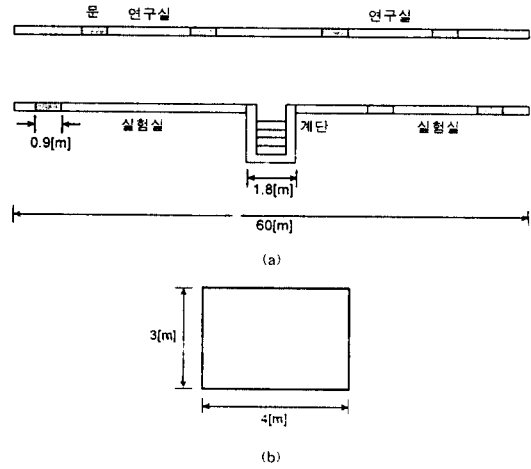


그림 2. 복도 : (a) 평면 (b) 단면

Fig. 2. Corridor : (a) plane view (b) cross section.

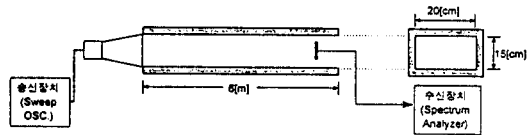


그림 3. 축소된 터널모델

Fig. 3. A miniature tunnel model.

도록 송수신 안테나의 방향을 맞추어 수직전계강도 (E_v)를 측정하였다. 이를 측정하기 위한 측정장비로 송신장치(signal source)는 sweep oscillator로 하고, 수신장치는 spectrum analyzer를 사용하였다. 안테나는 수직다이폴안테나와 혼(Horn)안테나를 사용하였다. 수직다이폴안테나를 가진 수신장치를 사용하여 통로의 중앙선을 따라 일정한 간격으로 전계강도를 측정하였다. 측정주파수는 2 [GHz]와 3 [GHz]로 하였다.

실제터널에서의 전파의 전계강도와 감쇄정수를 얻기 위하여 이용한 축소된 터널모델은 그림 3과 같이 만들었으며, 실제터널과 모형의 축소비율(α)은 1/20으로 하여, 폭 $d_{1m}=15$ [cm], 높이 $d_{2m}=20$ [cm], 길이 6 [m]로 되어 있다.

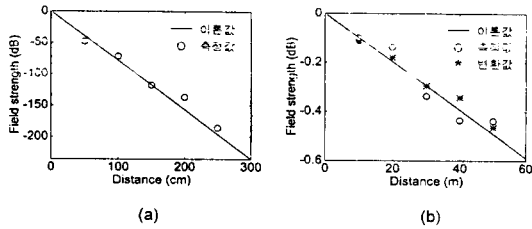


그림 4. 주파수 2 [GHz]에서의 수신된 전계강도 (E_V)
 (a) 축소된 터널모델
 (b) 복도

Fig. 4. Field strength received for frequency of 2 [GHz]. (E_V)
 (a) The miniature model tunnel.
 (b) The corridor.

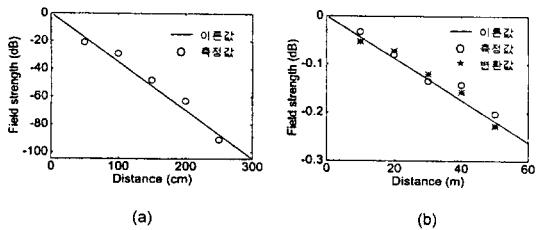


그림 5. 주파수 3 [GHz]에서의 수신된 전계강도(E_V)
 (a) 축소된 터널모델
 (b) 복도

Fig. 5. Field strength received for frequency of 3 [GHz]. (E_V)
 (a) The miniature model tunnel.
 (b) The corridor.

3-2 결 과

축소된 터널모델에 의해 얻어진 값을 변환에 의해 실제터널의 값을 얻기 위해 그림 4와 그림 5는 복도와 축소된 터널모델의 수직성분 전계강도(E_V)의 이론치와 측정치를 나타내었다. 그림 4는 2 [GHz]인 때이고 그림 5는 3 [GHz]인 때이다. 그림 4(a)와 5(a)에서와 같이 축소된 터널모델에 의

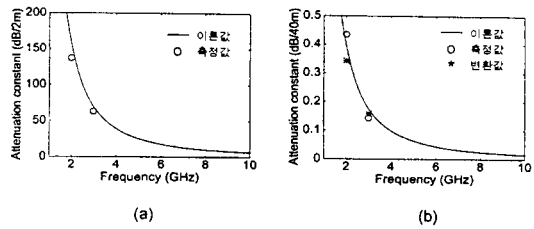


그림 6. 감쇄정수의 주파수 특성
 (a) 축소된 터널모델
 (b) 복도

Fig. 6. Frequency characteristics of the attenuation constant.
 (a) The miniature model tunnel.
 (b) The corridor.

해 측정된 전계의 값은 전계값의 변동(fluctuation)이 거의 나타나지 않으나, 그림 4(b)와 5(b)에서처럼 실제 복도에서의 측정값들은 전계값의 변동을 가진다. 이러한 현상은 실제 복도의 문, 계단 등의 영향에 의한 것으로 생각된다. 그림 4(a)와 5(a)에 표시되어진 축소모델의 측정값을 변환식 (11)에 의해 변환된 값이 그림 4(b)와 5(b)에 나타내져 있다. 이 변환값들은 실제복도에서의 측정값에 거의 근접한 값을 알 수 있다.

감쇄정수는 수신 전계강도로부터 계산될 수 있고 전계강도는 거리에 반비례함을 알 수 있다. 그림 4와 5에 의하여 얻어진 수직성분전계의 감쇄정수는 그림 6(a)와 (b)에 나타내져 있다. 그림 6(b)는 2 [GHz]와 3 [GHz]에 대한 실제 복도에서 측정에 의해 얻어진 감쇄정수 값과 그림 6(a)에 나타난 축소된 터널모델에 의한 값을 변환하여 얻어진 값을 나타내었다. 이 변환값은 실제 측정값과 거의 가까이 접근되어 있음을 볼 수 있다. 이들 값 차이는 벽면의 거칠기와 벽면경사 및 나무문의 영향에 의한 것으로 생각된다.

IV. 결 론

터널 및 복도에서의 전파손실값은 터널의 크기, 구조, 재료 및 주파수 등에 따라 정해진다. 콘크리트로 만들어진 실제 터널(복도)의 전파특성을 축소된 모델링에 의해서 얻을 수 있는지를 이론과 실험적인 방법을 통해서 알아보았다. 축소된 모형터널에 의해서 얻어진 이론값과 실험값들을 변환시킴으로써 실제터널에서의 근사적인 전파손실값을 얻을 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 얻어진 모델링 방법을 이용하여 터널 및 복도 등을 건설하기 전에 전파특성을 예측할 수 있고, 기존 터널에서도 보다 낮은 비용과 적은 시간으로 전파특성을 조사할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] B. Jacard, A. Valenzula, and O. Maldonado, "Parallel planes approximation for propagation in rectangular tunnel," *Electron. Lett.*, vol. 18, pp. 1011-1012, 11th. Nov. 1982.

[2] S. F. Mahmoud and J. R. Wait, "Geometrical optical approach for electromagnetic wave propagation in rectangular mine tunnel," *Radio Sci.*, vol. 9, pp. 1147-1158, Dec. 1974.

[3] A. G. Emslie, R. L. Lagace, and P. F. Strong, "Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-23, no. 2, pp. 192-205, Mar. 1975.

[4] Yoshio Yamaguchi, Takedo Abe, and Toshio Sekiguchi, "Radio propagation characteristics in underground street crowded with pedestrians," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 30, no. 2, pp. 130-136, May 1988.

[5] Y. Yamaguchi, T. Abe, and T. Sekiguchi, "Improvement of attenuation characteristics in tunnels (I)," *IECE of Japan, Tech. Rep. Antennas Propagat.*, A, p. 83-11, May, 1983.

[6] Jiro Chiba, Tatsuo Inaba, Yoshitomo Kuwamoto, Osamu Banno, and Risaburo Sato, "Radio communication in tunnel," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-26, no. 6, June, 1978.

강 회 창



1945년 6월 18일 생

1964년 2월 : 한국항공대학 전자공학
학과(공학사)

1988년 9월 : 단국대학교 대학원
전자공학과(공학박사)

1982년 9월~1983년 2월 : 미국
Southern Illinois University 객원교수

1997년 1월~1997년 2월 : 미국 Oregon State University 객원교수

1980년~현재 : 서울산업대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 전자파전달, EMC/EMI, 초고주파회로