

터널에서의 전파경로손실 분석

正會員 金旻宰*, 尹怜重**, 朴漢奎**

Radio Propagation Path Loss in a Tunnel

Kyung-Jae Kim*, Young-Joong Yoon**, Han-Kyu Park** Regular Members

要 約

터널에서 이동통신 전파의 경로손실을 분석하였다. 터널을 구형도파관으로 간주하여 진행파 방향의 거리에 따른 감쇄량을 계산하였고, 구축된 전파측정시스템을 이용하여 거리에 따른 전계강도를 측정하여 이를 이론치와 비교분석하였다. 전파의 경로손실이 측정된 터널은 금화터널로 총 길이가 550m, 폭이 8.8m, 높이가 6.8m이었다. 얻어진 측정데이터를 통계분석방법인 회귀분석방법으로 해석하여 터널에서 전파의 경로손실을 예측할 수 있도록 하였다.

ABSTRACT

A prediction of propagation loss in a tunnel is useful when implementing continuous mobile communication. The tunnel was modeled as a rectangular waveguide and the path loss was calculated using the model. The rate of loss of signal strength along a tunnel depends on both frequency and transverse dimensions. Measurements of propagation path loss were made in the 550m long Kumwha tunnel. This tunnel is 6.8m high and 8.8m wide. The results from the field strength measurement in the Kumwha tunnel, were analyzed by using a regression method. The statistical model developed by a regression method can be used to predict the path loss of radio propagation in a tunnel.

*연세대학교 전자공학과
Dept. of Electronic Eng., Yonsei Univ.

**연세대학교 전파공학과
Dept. of Radio Comm. Eng., Yonsei Univ.

論文番號 : 95144-0413

接受日字 : 1995年 4月 3日

I. 서 론

전파는 통신의 수단으로 지금까지 사용되어 왔으며, 고도 정보화사회를 앞두고 무선통신의 수요가 급격히 늘어나고 있다. 그러나 건물내부, 터널, 지하주차장, 지하철 등 폐쇄공간에서는 지상의 전파가 차폐되어 지상의 정보통신 수단을 이용하지 못하는 경우가 발생한다. 이러한 폐쇄공간은 지상계의 정보통신보다 통신품질이 약화되어, 통신장애가 발생될 수 있다. (언제, 어디서나, 누구에게나) 통신이 가능한 수단을 확보하기 위해서는 이러한 폐쇄공간에서 통신장애를 해결하는 것이 급선무일 것이다. 특히 터널을 통행하는 사람들에게 정보통신 수단의 확보는 전파이용의 지속적인 지원을 도모하기 때문에 유의하다고 볼 수 있다. 폐쇄공간의 전파특성에 대한 연구동향을 살펴보면, 국외의 경우 2차 세계대전이후 일찍이 무선통신에 관심을 가졌던 미국과 일본은 최근 발달된 무선통신 기술을 응용서비스 사업에 이용하여 개인통신망서비스 구현을 서두르고 있다. 이를 실현시키는데 있어 건물내부 또는 터널과 같은 전파차폐지역에서 전파중계시스템 개발은 상당한 연구성과를 이루고 있는 실정이다.^{[1][2]} 또한, 터널내의 전파 특성에 관한 많은 실험데이터를 보유하고 있어 터널에서 이동통신 서비스를 제공하는 데 있어 이들 자료를 충분히 활용하고 있다. 반면에 우리나라의 무선통신부문은 오랜 남북한 대치상황으로 인하여 국가안보차원외에는 그 사용이 많은 제약이 있었으며, 국내에서 건물내부 또는 터널에서의 전파 특성에 대한 이론적 해석과 실험데이터의 축적은 매우 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 터널에서의 전파전파 현상을 전자계 해석 방법인 도파관해석과 통계분석방법인 회귀해석으로 이론적으로 고찰하고, 전파측정 시스템을 구축하여 터널에서의 전파특성을 측정하였다. 전파현상 자체를 결정하는 데 많은 변수가 고려되기 때문에 정확한 예측 모델은 정확한 실험데이터에 기초를 두어야 한다. 구현된 전파측정시스템은 전계강도를 측정하여 데이터를 컴퓨터로 수집할 수 있는 시스템으로 터널 측정시 자동차에 탑재하여 터널내부에 전파특성을 측정할 수 있었다. 본 연구결과는 전파불감지대의 원활한 무선통신망을 구축하는 데 도움이 될 것이다.

II. 터널에서의 전파경로손실 모델링

터널내에서의 전파는 크게 세가지 다른 모드에 의해 특징지워지는 주파수대역에서의 전파를 생각할 수 있으며, 차단주파수가 존재한다. 이러한 전파특성에 가장 크게 영향을 미치는 것은 터널의 횡단면이 된다. 최근까지 터널내의 전파통신 문제는 TEM전파를 위한 누설동축케이블의 사용으로 해결하려고 하였다. 이 TEM모드는 차단주파수가 없다는 사실과 주파수의 증가에 따른 감쇄가 크다는 사실에 기초를 두고 있다. 그러나, 주파수가 충분히 클 때, TE, TM인 자연전파모드는 나타나게 되며 이는 TEM모드에 간섭을 주게된다. 이론적인 모델링은 터널을 빈공간을 지닌 도체로 생각하여 해석할 수 있다. 이러한 도파관 모델링에서 주파수가 특정모드의 차단주파수보다 높은 값을 가질 때 TE모드와 TM모드가 전파될 수 있다. 여기서 차단주파수의 값은 주어진 모드에 따라 정해지며 또한, 지하터널의 모양과 크기에 의해 좌우된다. 예를 들어 횡단면이 사각형으로 되어있는 터널에서 차단주파수는 사각형 도파관의 차단주파수 공식에서 유추할 수 있으며, 터널내 필드의 감쇄는 터널의 횡단면의 크기의 함수로 표현된다. 벽의 전기적 특성은 터널 건설시 사용되었던 철근 및 콘크리트의 특성을 의미하며 이 또한 필드에 영향을 준다.^{[6][10][14]}

- 터널전파의 도파관해석

터널을 도파관 이론을 도입하여 해석하는 방법은 초기부터 시도되어져 온 방법으로, 터널을 도파관으로 간주하면, 터널 사이즈와 단면적에 의해 결정되는 차단주파수 이상에서만 전파가 가능하다고 볼 수 있다.^[3] 이것은 방송 신호가 터널 내부에서는 잘 잡히지 않는다는 사실과도 일치한다. 자연전파(Natural propagaton)라는 용어는 대부분의 경우 차단주파수 이상에서의 전파를 설명하는데 사용된다. 그러한 높은 주파수에서는 많은 고차 모드가 존재하며, 이것은 심한 페이딩 현상을 야기시킨다. 전자파의 자연전파는 지하터널내에서 무선통신의 연결고리를 구축하는 가장 간단한 방법처럼 보인다. 그러나 과거의 실험결과는 만족할만한 성과를 거두지 못하였다. 오늘날 터널내에서 무선 통신의 문제는 TEM 모드의 전파를 지원하는 누설 동축 케이블을 사용하여 그 해답을 찾고 있다.^[4] 이러한 모드들은 차단주파수가 없고, 주파수가 증가함에 따라 감쇄 또한 증가한다는 사실로 특징지을 수 있다. 이론적인 견지에서 터널은 하나의 도파관으로 간주할 수 있다. 그 결과 주파수가 특정 모

드의 차단주파수보다 높아지게 되면 TE 모드와 TM 모드의 전파가 가능하게 된다. 이러한 차단주파수의 값은 주어진 모드에 따라 결정되며, 터널의 크기와 횡단면의 모양에 의하여 결정된다. 구형 도파관의 차단파장은 일반적으로 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda_{mn} = \frac{2\sqrt{ab}}{\sqrt{m^2 \frac{b}{a} + n^2 \frac{a}{b}}} \quad (1)$$

여기서 a와 b는 각각 도파관의 폭과 높이이고, m, n은 TM_{mn} 모드의 경우 1, 2, 3, ... 이고, TE_{mn} 모드의 경우 0, 1, 2, ... 이다. 차단주파수 이하에서는 전자파의 전파가 불가능하며, 필드의 감쇄는 단지 터널 횡단면의 함수이다. 차단주파수 이상에서는, 각각의 모드의 감쇄는 주파수, 도파관의 모양, 횡단면의 면적, 그리고 도파관의 전기적 성질에 의해 결정된다. 구형 도파관의 경우 감쇄상수는 TM_{mn} 모드에 대해 다음과 같다.

$$\alpha = 8.69 \frac{2R}{\zeta a} \left(\frac{m^2 + n^2 \frac{a^3}{b^3}}{m^2 + n^2 \frac{a^2}{b^2}} \right) \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{\lambda}{\lambda_{mn}})^2}} \quad (\text{dB/m}) \quad (2)$$

여기서, ζ : 전파매질의 고유임피던스 ($=\sqrt{\mu/\epsilon}$)

R : $10.88 \times 10^{-3} \sqrt{(10^7/\sigma)(1/\lambda)}$ ohms

σ : 도파관벽의 도전을 mho/m

μ : 전파매질의 투자율 henry/m

ϵ : 전파매질의 유전율 farad/m

한편, TE_{mn} 모드의 경우 감쇄상수는 다음과 같다

$$\alpha = 8.69 \frac{R}{\zeta b} \left[\frac{\epsilon_n m^2 \frac{b}{a} + \epsilon_m n^2}{m^2 \frac{b}{a} + n^2 \frac{a}{b}} \sqrt{1 - (\frac{\lambda}{\lambda_{mn}})^2} + \frac{(\epsilon_n + \epsilon_m \frac{b}{a})(\frac{\lambda}{\lambda_{mn}})^2}{\sqrt{1 - (\frac{\lambda}{\lambda_{mn}})^2}} \right] \quad (\text{dB/m}) \quad (3)$$

여기서 m = 0 이면 $\epsilon_m = 1$ m ≠ 0 이면 $\epsilon_m = 2$ 이다.

- 터널전파의 회귀해석

앞에서 설명한 도파관 해석과는 달리 회귀해석은 실험 결과에 기초하여 분석하는 방법이다. 먼저 거리에 따라 변화하는 전계강도를 측정하여야 하며, 이를 기초로 거

리에 대한 변수로 주어지는 전계강도 즉 경로손실변화 그래프를 유추하는 방법이다. 통계분석 방법 중의 한 방법인 회귀해석은 하나 또는 그 이상의 변수들이 서로 관계를 가지고 변화할 때 그 관련성을 규명하는 경우가 발생하는 데, 변수들간의 관련성을 자료를 통하여 알 수만 있다면 한 변수의 변화를 관찰하여 다른 변수의 변화를 예측할 수도 있다는 사실에 근거하고 있다. 즉, 변수들간의 함수관계를 추구하는 통계적 방법이 바로 회귀분석이다.^[5] 이중 단순회귀분석은 하나의 독립변수와 하나의 종속변수들 간의 관련성을 수학적 모형을 이용하여 측정된 변수들의 자료로부터 추정하고 분석하는 통계적인 방법을 말한다. 따라서 이 방법을 터널의 전파경로손실을 해석하는 데 이용하면 다음과 같다. 거리를 x변수 전계강도를 y변수라 하고, 이에 대한 직선회귀모형을 유추하는 경우에는 일반적으로 다음과 같은 가정이 선행되어야 한다.

(가정1) 변수 x와 y사이에 존재하는 관련성을 주어진 x의 값에서 y의 기대치를 $\mu_{x,y}$ 라고 할 때, $\mu_{x,y} = \beta_0 + \beta_1 x$ 와 같은 선형식으로 적절히 표현될 수 있다.

(가정2) 주어진 x의 값에서 변수 y는 정규분포를 하며, 평균은 x에 따라서 변하나 분산은 x값에 관계없이 일정하다.

(가정3) 독립변수 x는 오차없이 측정할 수 있는 수학 변수이며, 종속변수 y는 측정오차를 수반하는 확률변수이다. 또 y의 측정오차들은 서로 독립이다.

위의 가정아래 단순회귀모형을 표현하면 다음과 같다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i \quad (4)$$

여기에서 y_i는 i번째 측정된 y의 값, β₀와 β₁은 모집단의 회귀계수이고, x_i는 i번째 주어진 고정된 x의 값이고, ε_i는 i번째 측정된 y의 오차항으로 확률분포는 N(0, σ²)이며, 다른 오차항과는 상관관계가 있다. 이로부터 회귀선의 추정은 표본회귀식 $\hat{y} = b_0 + b_1 x$ 을 찾는 방법으로 이중에서 최소자승법은 오차(ε_i = y_i - \hat{y}_i)의 자승합을 최소로 하는 표본회귀식 \hat{y}_i 을 찾는 방법이다.

$$Q = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (\beta_0 + \beta_1 x)]^2 \quad (5)$$

위의 식을 최소로 하기 위해 β₀와 β₁에 대해 Q를 편미분하면

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) = 0 \quad (6-1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta_1} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) = 0 \quad (6-2)$$

위의 식을 만족하는 β_0 와 β_1 을 각각 b_0 와 b_1 라고 하면, 다음과 같은 표본회귀식의 회귀계수를 구할 수 있다.

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7-1)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (7-2)$$

Ⅲ. 터널에서의 전파특성 측정

폐쇄공간 중 터널에서의 전파특성을 이해하기 위해서 도심지역내의 실제 터널에서 터널 길이에 대한 수신전계 강도를 측정하였다. 측정되어진 터널은 금화터널로 터널의 총길이는 550m이고, 폭은 8.8m, 높이는 최대 6.8m인 천정이 약간 타원형태의 구조를 가지고 있다. 금화터널의 단면도와 평면도는 아래 그림 1과 같다.

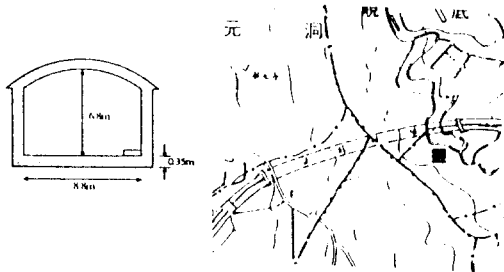


그림 1. 금화터널
Fig. 1. Kumwha tunnel

표 1. TE, TM 모드별 감쇄량
Table 1. Attenuation versus Mode

감쇄량 모드	dB/100M 모드 도진율(σ) : 0.5, 주파수(879.9MHz)
TE ₀₁	21.87
TE ₁₀	28.27
TE ₁₁	48.53
TM ₁₁	51.72

터널을 금속도파관으로 간주하여 감쇄정수를 유도하여 터널에서 전자파의 경로손실을 정량적으로 표현하면 그림 2와 같다. 이는 단면이 사각형구조로 폭이 8.8m이고, 높이가 6.3m인 터널에서 주파수에 따른 TE모드의 감쇄와 TM모드의 감쇄를 나타낸 것이다.

도파관 해석결과 100M당 감쇄량은 아래 표 1과 같이 도진율(σ)이 0.5일 때 주파수 879.9MHz에서 TE₀₁모드가 21.87dB로 가장 적은 감쇄량을 나타내고 있다.

터널에서의 전파경로손실 측정시스템은 자동차에 탑재가 가능하도록 구현되어졌다. 사용된 안테나는 먼저 상용화되고 있는 셀룰라이동통신용 반파장 Collinear 수직 다이폴 배열안테나로 동작주파수 대역이 820~895MHz이다. 그리고 수신데이터는 자동차의 이동속도를 고려하여 16.5msec당 한개의 데이터를 획득하도록 하였다. 수신데이터는 노트북 컴퓨터에 내장된 GPIB card를 구동하는 프로그램을 통하여 수신전계강도를 거리에 따라 샘플 수를 조정하면서 획득하였다. 한편, 수신전계강도 레벨을 아날로그로 받아들이는 방법으로 Recorder를 이용하는 방법을 검토할 수 있었으나, 자동차의 이동으로 인한 진동이 레코더의 계측을 불안정하

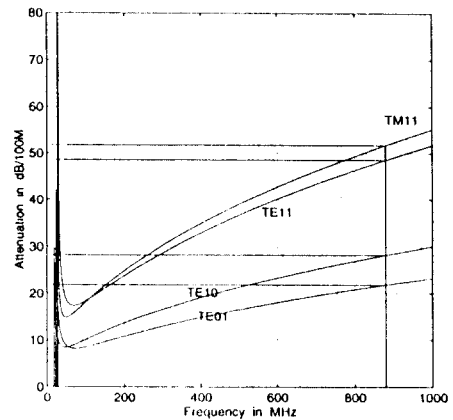


그림 2. 주파수에 따른 TE, TM 모드의 감쇄
Fig. 2. Attenuation versus frequency in Kumwha tunnel

게 하여 측정치의 신뢰도를 감소시키므로 레코더에 의한 측정은 정지상태의 측정에 이용할 수 밖에 없었다.⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾

급화터널내의 전파측정은 자동차에 설치된 안테나의 위치에 따른 경로손실과 수신안테나의 안테나 다이버시티에 의한 수신감도의 향상을 이해하기 위해서 두가지 방법으로 측정되었다. 첫번째 방법은 수신안테나를 자동차의 뒷트렁크의 우측에 설치하였으며 수신안테나의 높이는 지면에서 1.8m이었다. 또다른 방법은 트렁크의 좌측에 위의 안테나와 1.25m 간격을 두고 설치하여 측정하였다. 측정주파수는 이동통신 행촌기지국의 Setup

주파수 879.9MHz이었다. 터널측정(1)은 자동차에 설치된 수신안테나가 우측에 있는 경우로 총 550m의 길이에 대한 경로손실 측정치이며, 터널측정(2)는 수신안테나가 좌측에 있는 경우로 터널측정(1)과 같은 경로손실 측정값이다. 그리고 각각의 그림에 포함되어 있는 선형회귀 분석결과는 수신안테나가 우측에 설치되어 측정된 터널측정(1)인 경우 16.61(dB/100M)이었고 수신안테나가 좌측에 설치되어 측정된 터널측정(2)인 경우 13.5(dB/100M)로서 터널측정(1)이 더 가파른 경로손실 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다.⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾

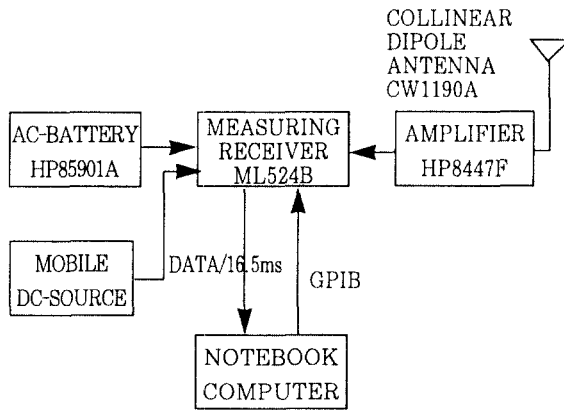


그림 3. 자동차 탑재용 전파측정 시스템
Fig. 3. Block diagram of measurement system

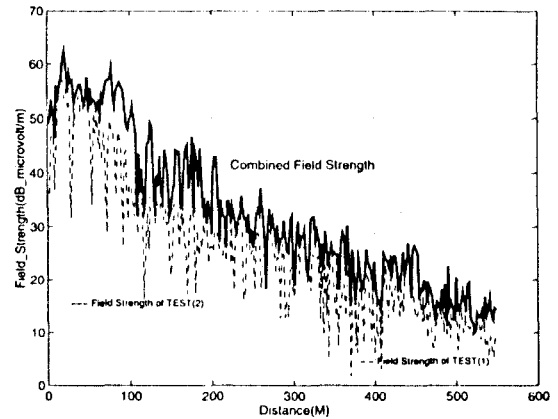
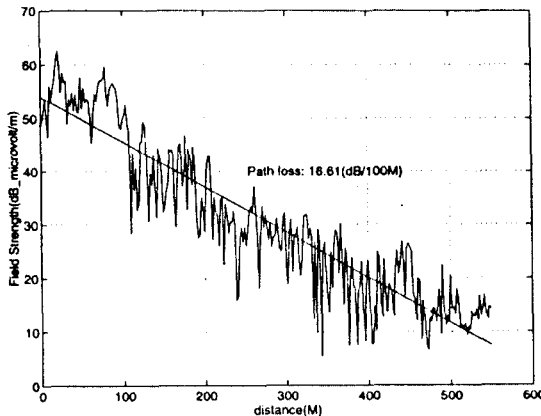
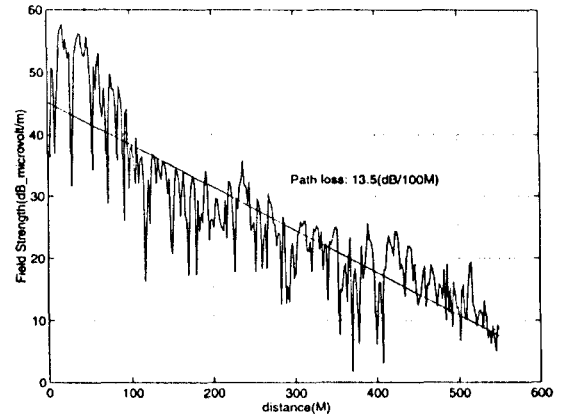


그림 5. 안테나 다이버시티를 이용한 수신전계강도 향상
Fig. 5. Antenna diversity effect in Kumwha tunnel



(a) 터널측정(1)
(a) Measurement(1)



(b) 터널측정(2)
(b) Measurement(2)

그림 4. 터널에서 전계강도 측정 및 회귀분석 결과
Fig. 4. Results of the measured electric field and regression analysis

경로손실 그래프를 기초로 수신안테나의 안테나 다이버시티에 의한 수신전계강도의 수신품질 향상을 연구하였다. 사용된 결합(Combine)기술은 두 개의 반파장 Collinear 수직 다이폴 배열안테나로 수신되는 수신전계를 동시에 비교하여 큰값을 수신하도록 하는 가장 이상적인 결합(Combine)기술로 컴퓨터 프로그램에 의해 구현시킨 방법이었다.

VI. 결 론

터널내의 도파관 전파현상을 금화터널에 대하여 적용하여 해석하였다. 금화터널을 구형도파관으로 간주하여 터널내의 879.9MHz의 전파특성인 모드별 감쇄정수를 구해보면 TE_{01} , TE_{10} 모드가 우세모드로 작용하는 것으로 나타났다. 처음 100m까지는 우세모드에서 100m당 감쇄량과 측정감쇄량이 거의 같은 값을 가짐을 알 수 있으나, 다음 450m 구간에서는 도파관 해석에 의한 감쇄량이 측정 경로손실 기율기보다 10-20dB 크게 나타났다. 따라서 도파관 전파현상을 기초로 하여 해석된 경로손실과 실제 측정된 경로손실과의 사이에 발생된 오차를 줄이는 한 방법으로, 측정결과에 주된 관심을 가지고 해석하는 선형회귀 분석방법을 도입하여 금화터널내에서 수신안테나의 위치별로 13.50~16.61(dB/100M)의 경로손실을 계산할 수 있었다. 측정으로부터 경로손실 기율을 결정하는 것이 가장 정확한 해석이 될 수 있지만 시간과 비용이 많이 드는 단점이 있다. 따라서 도파관 해석을 보완하는 방법이 검토되고 있다. 위의 실험적 결과와 이론적 결과를 연결하는데 가장 어려운 문제는 TEM 모드가 도파관 모드와 동시에 존재한다는 것이며, 또한 터널 벽면의 전기적 특성에 관한 정보가 일반적으로 없다는 것이다. TEM모드가 대부분의 터널내에서 존재하는 이유는 파이프나 트랙, 자동차, 전선 등이 터널내에 존재하기 때문이다. 본 연구에서는 국내에서 터널에서의 전파특성에 대한 이해를 도모하였다. 따라서 본 연구의 결과는 터널에서의 원활한 이동통신망을 구축하는데 도움이 되리라 본다.

참고문헌

1. Benjamin Jacard and Oscar Maldonado, "Microwave Modeling of Rectangular Tunnels",

IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-32, pp.576-581, June., 1984.

2. Paul Delogne, "EM Propagation in Tunnels", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 39., pp.401-405, March., 1991.
3. Louis Deryck, "Natural Propagation of Electromagnetic Waves in Tunnels", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. VT-27, pp.145-150, August., 1978.
4. Andre Levisse, "Leaky or radiating Radiation mechanisms of radiating cables and leaky feeders - channel tunnel applications", *International Wire & Cable Symposium Proceedings*, pp.739-747, 1992.
5. G. Barrie Wetherill, "Regression Analysis with Applications", *Chapman and Hall*, 1986.
6. Alfred G. Emslie et al., "Theory of propagation of UHF Radio Waves in Coal mine Tunnels", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. AP-23, pp.192-205, Mar., 1975.
7. Fumio Ikegami, "Theoretical Prediction of Mean Field Strength for Urban Mobile Radio", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. AP-39, pp.299-302, Mar., 1991.
8. P. F. M. Smulders, "Wideband Indoor Radio Propagation Measurements at 58GHz", *Electronics Letters*, vol. 28, Jun., 1992.
9. Jean-Francois Lafortune, "Measurement and Modeling of Propagation Losses in a Building at 900MHz", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. VT-39, pp.101-108, May., 1990.
10. Louis Derycx, "Natural Propagation of Electromagnetic Waves in Tunnels", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. VT-27, pp.145-150, Aug., 1978.
11. Joram Walfisch et al., "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 36, pp.1788-1796, Dec., 1988.

12. Ulrich Dersch et al., "Simulations of Time and Frequency Selective Outdoor Mobile Radio Channel", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 42, pp.338-344, Aug., 1993.

13. James H., "Measurements of Path Loss at 910MHz for Proposed Microcell Urban Mobile

Systems", *IEEE Trans. Veh. technol.*, vol. 17, pp.125-129, Aug., 1988.

14. Paul Delogne, "Basic mechanisms of tunnel propagation", *Radio Science*, vol. 11, pp.295-303, April., 1976.



金 兪 宰(Kyung-Jae Kim) 정회원

1967년 1월 29일생
 1990년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1992년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1992년~현재 : 연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정
 ※주관심 분야 : 이동통신 전파특성



尹 愉 重(Young-Joong, Yoon)정회원

1959년 3월 9일생
 1981년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1986년 9월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1991년 12월 : Georgia Institute of Technology 졸업(Ph.D.)

1992년 3월~1993년 2월 : 한국전자통신연구소 위성통신기술 연구단 선임연구원

현재 : 연세대학교 전파공학과 조교수
 ※주관심 분야 : 안테나, 전파전파, 위성통신 등임.



朴 漢 奎(Han-Kyu Park) 정회원

1941년 6월 21일생
 1964년 2월 : 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)
 1968년 2월 : 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

1973년 : 불란서 파리대학교(소르본 대학교) 박사과정 수료(DEA)

1975년 : 불란서 파리6대학교(Ph.D.)

1976년~1992년 : 연세대학교 전자공학과 교수

1992년~현재 : 연세대학교 전파공학과 교수

※주관심 분야 : 마이크로파, 전파전파, 안테나