

# 무선채널에서의 회절손실 예측

## Prediction of Diffraction Loss in Radio Channels

백정기\* · 이형수\*\*\* · 김혁제\*\*\* · 이성재\*\*

Jeong-Ki Pack\*, Hyung-Soo Lee\*\*\*, Hyuk-Je Kim\*\*\*, Sung-Jae Lee\*\*

### 요 약

본 논문에서는 대표적인 회절공식들을 살펴보고, 쐐기 형태의 구조물에 대한 회절손실 예측치를 비교해 보았다. 또한 시뮬레이션 결과를 측정치와 비교, 분석하였다. 많은 산란체가 회절체 부근에 존재하는 실제 환경에서 수직편파에 대한 회절손실은 단순한 knife-edge 공식이 측정치와 잘 일치하였다.

### Abstract

In this paper, several diffraction formulas are discussed and diffraction losses predicted from each formula for a wedge are compared with each other. Simulation results are also compared with measured ones. It turns out that in real situations, where many scatterers are located around a diffracting wedge, the prediction from the simple knife-edge formula for vertical polarization agrees well with the measured loss.

### I. 서 론

무선통신채널에서 특히 비가시거리 통신인 경우 전파경로상의 장애물에 의한 회절손실의 정확한 계산은 채널의 전송손실뿐만 아니라 지연분산 특성의 예측을 위해 매우 중요하다. 지금까지 지상 마이크로파통신, 옥내/옥외의 이동 및 고정통신에서 회절손실의 예측에 사용된 회절이론은 근사적인 Kirchhoff 회절이론(knife-edge 모델), 완전도체 쐐기를 가정한 UTD(Uniform Theory of Diffraction), 그리고 유한한 전도도 및 표면 거칠기를 근사적으로 고려한 Luebbers의 UTD 등이다<sup>[1]-[5]</sup>.

최근 Whittaker는 쐐기형태의 회절면상의 반사를 고려함으로써 Kirchhoff의 회절이론을 적절히 수정한 회절이론을 제안하였고<sup>[6]</sup>, Tiberio는 쐐기면을 임피던스면으로 보고 이에 대한 경계조건을 적용시켜 얻어진 Maliuzhinets의 적분식으로부터 점근적분방법에 의해 UTD 표현식과 유사한 회절공식을 유도하였다<sup>[7],[8]</sup>. 그러나 이러한 회절공식들은 모두 유한한 전도도를 갖는 회절 쐐기에 대한 근사식이므로 실제 전파환경에 대한 적용범위 및 오차를 비교, 분석해 볼 필요가 있다.

본 논문에서는 전술한 회절이론들을 일반 무선환경 하에서의 전형적인 구조물에 대해 적용시켜 회절각에 따른 회절손실 예측치의 차이를 살펴보고,

\* 충남대학교 전파공학과(Dept. of Radio Sciences and Engineering, Chungnam Nat'l Univ.)

\*\* 충남대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Chungnam Nat'l Univ.)

\*\*\* 한국전자통신연구원 전자파공학연구실(Electromagnetics Science Section, ETRI)

· 논문번호 : 970326-018

· 수정완료일자 : 1997년 5월 26일

또한 예측치와 측정치를 비교해 봄으로써 그 적용 범위 및 오차를 분석하고자 한다. 실제 경로손실의 계산을 위해서는 영상법에 의한 광선추적기법을 사용하였다<sup>[10],[11]</sup>.

## II. 회 절 이 론

### 2-1 Kirchhoff의 회절이론

Kirchhoff의 회절이론을 그림 1과 같은 칼날형 모서리(knife-edge)에 적용시키면 관측점 P에서 전계에 대한 표현식은 입사파가 구면파인 경우  $d_1, d_2 \gg h$ 의 조건을 만족할 때

$$U_{KE}(P) = \frac{e^{-jk(d_1+d_2)}}{d_1+d_2} \frac{1+j}{2} \int_x^\infty e^{-j(\pi/2)t^2} dt, \quad (1)$$

$$\nu = \sqrt{\frac{2(d_1+d_2)}{\lambda d_1 d_2}} h$$

로 주어진다. 이러한 knife-edge 회절공식은 스크린의 매질변수 및 편파와 무관하며, Kirchhoff의 경계조건은 그림자영역은 완전도체, 조사영역은 완전흡수체의 경우와 동일하다.

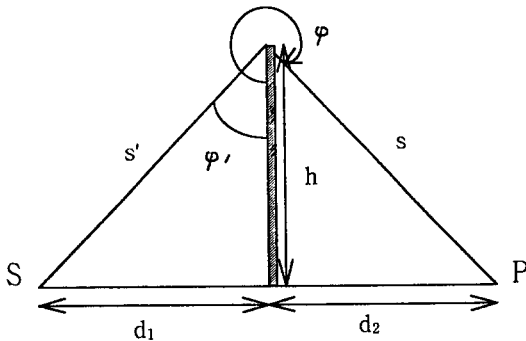


그림 1. 칼날형 모서리에 대한 회절경로  
Fig. 1. Diffraction geometry for a knife-edge.

### 2-2 완전도체에 대한 UTD

그림 2와 같이 내각이  $\alpha$ 인 완전도체 쐐기로부터의 회절문제에 대해 Kouyoumjian과 Pathak은 균일점근적분(uniform asymptotic integral)을 이용하여 전 영역에서 유효한 UTD 이론을 도입함으로써 Keller의 GTD 이론의 단점을 보완하였다<sup>[4]</sup>.

$$U_{UTD}^d = U^i(Q_e) D_{UTD} A(s) e^{-jks} \quad (2)$$

의 형태로 주어지며,  $U^i(Q_e)$ 는 회절점  $Q_e$ 에서의 입사파,  $A(s)$ 는 확산계수(spreading factor)를 나타낸다. 그리고  $D_{UTD}$ 는 회절계수로서

$$D_{UTD} = D_1 + D_2 + R(D_3 + D_4) \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $R$ 은 편파에 따른 완전도체에 반사계수( $\pm 1$ )를 나타내며  $D_1, D_2, D_3, D_4$ 는 내각  $\alpha$ (또는  $n=2-\alpha/\pi$ ),  $\phi, \phi', s, s'$ 의 함수로서  $D_3, D_4$ 는 그림 1의 o-face로 전자파가 입사한 경우의 ISB 및 RSB와 관계되고,  $D_1, D_2$ 는 n-face로 입사한 경우의 ISB 및 RSB와 관계된다. 따라서  $D_1, D_2, D_3, D_4$ 는 각각 n-face 입사, o-face 입사, n-face 반사, o-face 반사 회절계수로 볼 수 있다.

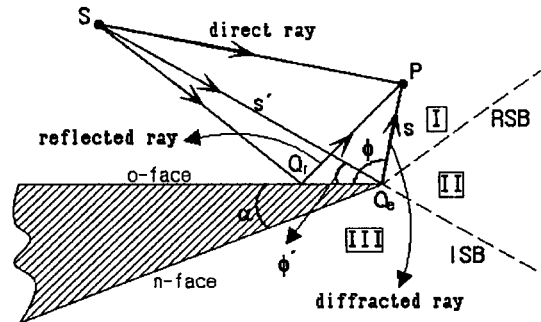


그림 2. 쐐기에 입사하는 파의 반사 및 회절  
Fig. 2. Geometry for wedge diffraction.

### 2-3 Luebbers의 UTD

Luebbers는 썩기가 유한한 전도도를 갖는 경우, 식 (3)의 UTD 회절계수를 단순히 일반화시켜 반사계수  $R$ 을  $D_3$ 에는 n-face의 평면파 반사계수,  $D_4$ 에는 o-face의 평면파 반사계수로 대체한 근사식을 제안하였다(heuristic approach)<sup>[5]</sup>. 즉,

$$D_{LB} = D_1 + D_2 + R_n D_3 + R_o D_4 \quad (4)$$

위 식에서 평면파의 반사 계수  $R_o$ ,  $R_n$ 은 썩기면으로부터의 각도를  $\Psi$ 라 할 때

$$R_s = \frac{p \sin \Psi - \sqrt{\hat{\epsilon}_r - \cos^2 \Psi}}{p \sin \Psi + \sqrt{\hat{\epsilon}_r - \cos^2 \Psi}},$$

$$p = \begin{cases} 1, & (\text{수직편파}) \\ \hat{\epsilon}_r, & (\text{수평편파}) \end{cases} \quad (5)$$

로 주어지며 썩기의 유전상수를  $\epsilon_r$ , 전도도를  $\sigma$ , 입사파의 파장을  $\lambda$ 라 할 때 유효유전상수  $\hat{\epsilon}_r$ 는  $\hat{\epsilon}_r = \epsilon_r - j60\sigma\lambda$ 로 나타낼 수 있다. 위 식에서  $R_s$ 는 거울면 반사(specular reflection)의 경우를 나타내며 썩기의 표면이 거친 경우는 표면 거칠기도 고려할 수 있는 근사식을 제안하고 있다.

### 2-4 Whittaker의 회절공식

그림 3과 같이 전자파의 진행방향을  $x$ 축, 장애물의 높이 방향을  $z$ 축으로 할 때 입사파가 구면파인 경우 입사각과 회절각이 작다고 가정하면 knife-edge 회절에서와 같이 Fresnel 근사(small angle approximation)를 적용시켜서 회절면의 반사를 고려한 관측점  $P$ 에서 전계(또는 자계)는 다음과 같이 주어짐을 보일 수 있다. Whittaker는 실제 Kirchhoff의 스칼라 회절공식을 반사계수를 통해 벡터

회절공식으로 일반화하고 있다<sup>[6]</sup>.

$$U_w(x_2, z_2) = \left( \frac{jkx_1}{2\pi x_2 d_2} \right)^{1/2} e^{-jkd_2} \times \int_h^\infty U(x_1, z_1) g(z_1, z_2) e^{-jk(z_2 - z_1)^2 / 2d_2} dz_1 \quad (6)$$

위 식에서  $g$ 는 입사각  $\Psi$ 가 작다고 가정할 경우,

$$g(z_1, z_2) = 1 + R_s e^{-j2k(z_1 - h)(z_2 - h) / d_2} \quad (7)$$

로 주어지며,  $R_s$ 는 반사계수로서 식 (5)와 같다.

그림 3에서와 같이 모서리가 여러 개 있는 경우는 식 (6)을 연속적으로 적용시키면 되며, 반사를 무시할 경우 Vogler의 다중 칼날형 모서리(multiple knife-edge)에 대한 회절공식과 동일한 결과를 얻을 수 있다.

### 2-5 Tiberio의 UTD

그림 2와 같은 썩기의 모서리에 수직으로 평면파가 입사하는 경우 입사파는  $U^i = Ae^{jk\cos(\phi - \phi')}$ 으로 나타낼 수 있다. 1958년 Maliuzhinets는 썩기면이 임의의 임피던스를 가질 경우의 회절문제에 대해 평면파의 선형조합형태로 표현하여 해를 구하였다<sup>[7]</sup>. 즉,

$$U_M(P) = \frac{1}{4\pi j} \int_\gamma p(w + n\pi / 2 - \phi) e^{jk\cos w} dw \quad (8)$$

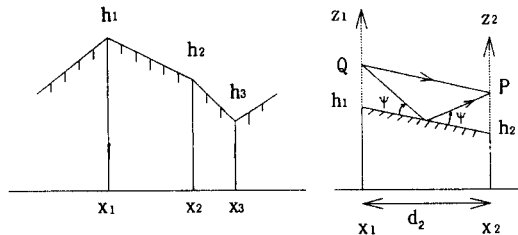


그림 3. Whittaker의 회절 모델

Fig. 3. Whittaker's diffraction model.

위 식에서  $\gamma$ 는 Sommerfeld의 적분계적을 나타내며 미지의 함수  $p(z)$ 는 Helmholtz 방정식과 방사조건, 그리고 o-face와 n-face에서 임피던스 경계조건

$$\frac{1}{s} \frac{\partial U_m}{\partial \phi} \pm jk \sin\theta_0 \cdot n U_M = 0, (\phi=0, n\pi) \quad (9)$$

를 만족시켜야 한다는 조건으로부터 구할 수 있다. 위 식에서  $\theta_o$ 와  $\theta_n$ 는 o-face와 n-face에서의 Brewster 각으로서 수직편파와 수평편파에 대해서 각각  $\sin\theta=1/\sqrt{\epsilon_r}$ ,  $\sqrt{\epsilon_r}$ 로 주어진다.

Tiberio 등은 Maliuzhinets의 적분식으로부터 점근적분방법을 사용하여 식 (7)과 유사한 UTD 표현식을 얻었다<sup>[8]</sup>. 이때 회절계수  $D_M$ 은

$$D_M = \exp [M(\phi, \phi'; \theta_o) + M(n\pi - \phi, n\pi - \phi'; \theta_n)] \times \{C(\phi, \phi'; \theta_o, \theta_n)[D_2 + \Gamma(\phi', \theta_o)D_4] + C(n\pi - \phi, n\pi - \phi'; \theta_n, \theta_o)[D_1 + \Gamma(\phi', \theta_n)D^+(\beta^+; ks)]\} \quad (10)$$

의 형태로 주어지며  $D_1, D_2, D_3, D_4$ 는 식 (3)의 완전도체에 대한 UTD 계수와 동일하다. 식 (8)의 함수  $M$ 은 복잡한 적분형태로 주어져서 일반적인 경우 광선추적프로그램 등에 이용하기가 거의 불가능하나 썸기형태가 평면, 90° 썸기, 반평면( $n=1, 3/2, 2$ )인 경우는 적분표현식이 단순한 형태로 주어지고, 특히 90° 썸기인 경우는  $M$ 에 대한 표현식이 닫힌 형태(closed form)로 주어진다.

### III. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 앞에서 언급한 회절공식들의 회절손실에 대한 예측정확도를 비교해 보고자 한다. 간결한 표현을 위해 칼날형 모서리는 KE, UTD(완전도체)는 UTD, Luebbers의 방법은 UTD-LB, Whitteker의 방법은 WH, Tiberio(Maliuzh-

inets)의 방법은 MAL로 나타내기로 한다. 그리고 특별한 언급이 없는 한 주파수는 2 GHz이다.

먼저 완전도체로 된 썸기에 대한 KE, UTD, WH의 차이를 알아보았다(완전도체의 경우 MAL은 UTD와 동일하다). KE의 경우 칼날형 모서리는 썸기 내부의 증상에 있는 것으로 가정하였다. 썸기의 o-face로부터 45°의 각도로 평면파가 입사하고 모서리로부터의 거리가 100 m일 때 각  $\phi$ 의 변화에 따른 회절특성을 그림 4에 보였다. 그림에서 각도  $\phi$ 의 기준점은 o-face의 연장선상에 있으며 음의 값은 그림자영역을 나타낸다. 반평면 스크린의 경우와 마찬가지로 WH는 UTD와 거의 일치하며 수평편파(hard polarization)경우 UTD에 비해 손실이 약간 적게 나타난다. 그리고 KE는 수직편파(soft polarization)와 수평편파 사이의 값을 보여주고 있다.

다음은 90° 임피던스 썸기에 평면파가 입사한 경우의 회절특성을 살펴보았다. 썸기의 유전상수  $\epsilon_r=7.0$ , 전도율  $\sigma=0.02$ [S/m]일 때 KE, UTD, UTDLB, MAL에 의한 회절특성은 그림 5와 같다. 그림 5에서 수직편파이고 전도율이 0.02일 때 MAL, UTD-LB, UTD, KE의  $\phi=-80^\circ$ 에서의 회절손실은 각각 -47.6, -43.1, -49.7, -40.24 dB로서 MAL을 기준으로 한 각 근사방법의 오차는 Luebbers 방법은 3.5 dB, 완전도체로 가정했을 때 2.1 dB, 칼날형 모서리로 가정한 경우는 7.4 dB로

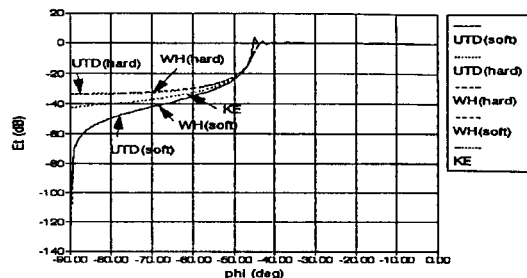


그림 4. 완전도체의 90° wedge에 대한 회절특성

Fig. 4. Diffraction characteristics for perfectly conducting 90° wedge.

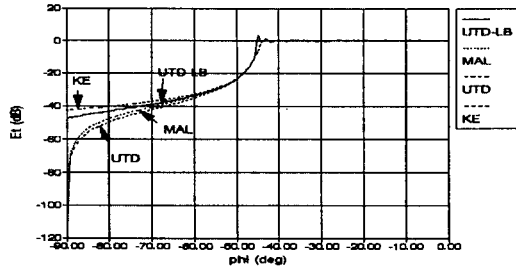


그림 5. 임피던스 썩기에 대한 회절특성(수직편파).  
Fig. 5. Diffraction characteristics for an impedance wedge(soft polarization).

서 KE의 오차가 가장 크다.

#### IV. 측정치와의 비교 및 검토

다음은 전형적인 90° 썩기 형태의 건물에 대한 회절손실의 측정치와 시뮬레이션 결과를 비교해 보았다. 이 경우 입사파는 구면파이며 편파는 수직편파이다. 시뮬레이션에 사용된 건물 벽면의 매질변수는  $\epsilon_r=3.4$ ,  $\sigma=0.001$ , 지면의 경우는  $\epsilon_r=10.0$ ,  $\sigma=0.01$ 이며 벽면과 지면의 반사를 모두 고려하였다 (따라서 비가시영역에서 지면에 의한 반사-회절파, 또는 회절-반사파가 포함되었음). 그리고 앞에서 언급했듯이 MAL의 경우는 회절계수가 평면파에 대한 것이며, 이를 구면파로 확장하여 사용했기 때문에 이로 인한 오차를 감안해야 한다. 또한 측정치와 비교한 데이터에서 송신안테나의 위치( $X_T, Y_T$ ) 및 수신안테나의 위치( $X_R, Y_R$ ), 그리고 수신기가 이동한 방향은 그림 6과 같으며 모서리를 좌표원점으로 잡았다.

첫번째 측정데이터는  $X_T=-7.846$  m,  $Y_T=-6.2$  m,  $X_R=2.5$  m,  $f=1823$  MHz이고 송신안테나는 지향성 안테나를, 수신안테나는 등방성(omni directional) 안테나를 사용하여 Anderson이 측정한 데이터이다.<sup>[12]</sup> 송신안테나의 높이  $h_T=2.0$  m, 수신안테나 높이  $h_R=1.5$  m이며 측정데이터와 MAL, UTD-LB, KE에 의한 시뮬레이션 데이터는 그림 7

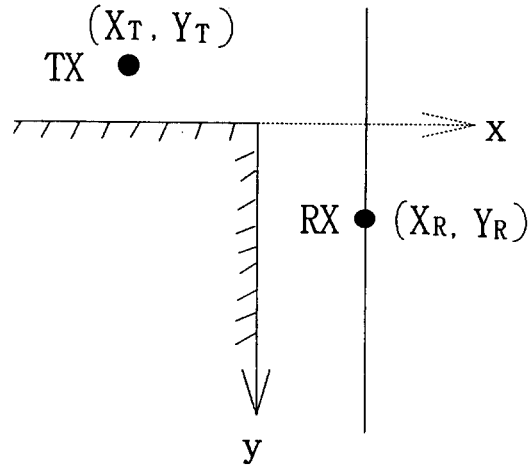


그림 6. 회절손실 측정경로  
Fig. 6. Path for diffraction loss measurements.

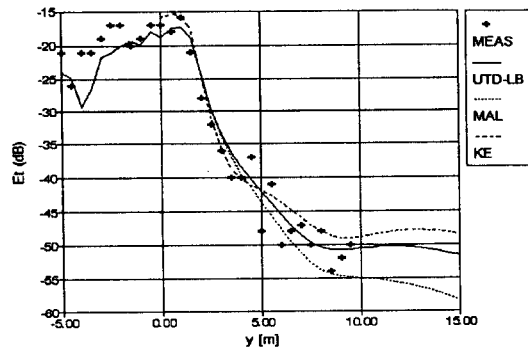


그림 7. Anderson의 측정데이터(MEAS)와 시뮬레이션 데이터의 비교  
Fig. 7. Comparison of Anderson's measurement data(MEAS) and simulation data.

과 같다.

측정데이터와 시뮬레이션 결과를 비교해 보면 UTD-LB가 가장 잘 맞는다. 이때 실제 건물의 매질변수는 Anderson의 논문에서 UTD-LB가 잘 맞도록 적합시킨 데이터를 사용하였으며 건물의 전도율을 증가시키면 회절손실이 증가된다. MAL의 경

우는 앞에서 언급했듯이 구면파에 대한 UTD 형태에 표현식은 아직 없으며 충분히 원거리장이 아닌 영역에 평면파 회절계수를 사용하였기 때문에 회절 각도가 큰 영역에서 회절손실이 측정치에 비해 다소 크다. KE의 경우 회절손실이 측정치보다 적으며  $y=9$  m에서 세가지 예측방법의 오차는 약 5 dB 정도이다.

두번째 측정데이터는 충남대학교 기초과학관에서 측정한 것이며 건물모서리에 나무가 있어서 가시경로에서 예측치보다 손실이 더 클 수 있고, 또한 나무에 의한 산란파로 인해 비가시영역에서의 회절 손실은 감소할 것으로 예상된다.

$X_T = -3.74$  m,  $Y_T = -3.3$  m,  $X_R = 9.3$  m,  $f = 900$  MHz,  $h_T = h_R = 0.75$  m이며 송, 수신안테나는 모두 수직편파의 표준 반파장 다이폴 안테나이다. 측정치와 시뮬레이션값은 그림 8과 같다. 이 경우는 KE가 가장 잘 맞으며 그 이유는 건물모서리 근처에 있는 나무의 영향 때문인 것으로 판단된다.

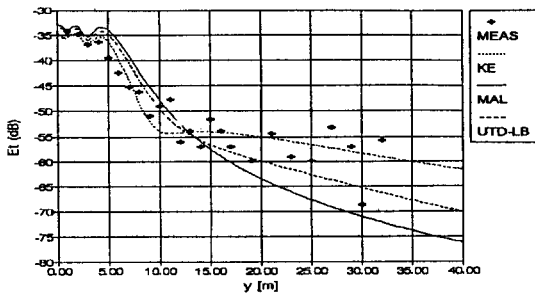


그림 8. 기초과학관 측정데이터 및 시뮬레이션 데이터 (90° wedge)

Fig. 8. Measurement data and simulation results for the science building (90° wedge).

세번째 측정데이터는 충남대학교 기초과학관에서 모서리가 약간 잘린 형태(mitered wedge)의 건물에 대해 측정한 데이터이다.  $X_T = -6.1$  m,  $Y_T = -4.65$  m,  $X_R = 7.0$  m이며 나머지는 앞과 동일하다. 측정치와 시뮬레이션 결과는 그림 9와 같다.

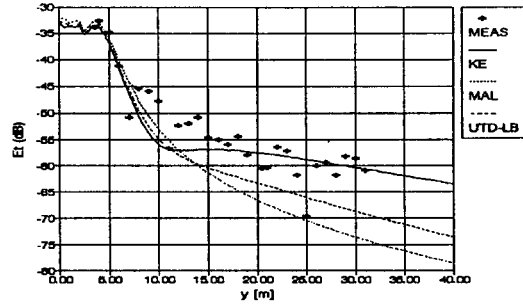


그림 9. 기초과학관 측정데이터 및 시뮬레이션 데이터 (mitered wedge)

Fig. 9. Measurement data and simulation results for the science building (mitered wedge).

## V. 결 론

앞에서 언급한 대표적인 회절이론들을 이론적인 관점에서 비교해 볼 때 회절각이 큰 경우 회절공식에 따라 10 dB 이상의 오차도 가능하다. Tiberio의 회절공식은 일반적인 썰기에 대한 표현식이 복잡하고 UTD 형태로 광선추적에 사용하기 위해서는 입사파가 평면파인 경우로 제한된다. Luebbers의 UTD는 다소 오차는 있으나 모든 경우에 적용시킬 수 있다는 장점이 있다. Whittaker의 회절공식은 완전도체가 아닌 경우 반사계수가 적분변수의 함수이므로 수치적분이 필요하다. 그리고 가장 간단한 Kirchhoff 회절공식을 이용한 knife-edge 모델은 오차가 크다.

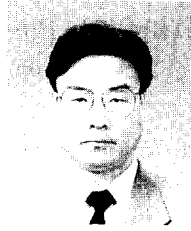
수직편파에 대한 여러 가지와 비교해 본 결과 knife-edge 모델이 대부분의 측정치와 비교적 잘 맞는, 이론과 다소 모순된 결과가 얻어졌다. 그러나 이론적으로 정확히 모델링할 수 있는 단순한 구조물에 대한 측정데이터는 Luebbers 이론과 잘 일치하였으며 knife-edge 모델은 손실을 실제보다 적게 예측하였고 Tiberio의 회절공식은 평면파에 대한 회절계수를 사용하였기 때문에 손실을 더 크게 예측하였다.

Luebbers의 UTD가 적용범위가 넓고 정확하나 예측의 정확도를 높이기 위해서는 장애물의 구조 및 매질변수에 대한 정확한 모델링이 필요함을 말해준다. 정확한 모델링이 어려울 경우 knife-edge 모델을 사용할 수도 있으나 실제 손실보다 적게(수직편파의 경우) 또는 크게(수평편파의 경우) 예측할 가능성이 상당히 큰 점을 감안하여야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] E. Wolf and E. W. Marchand, "Comparison of the Kirchhoff and the Rayleigh-Sommerfeld Theories of Diffraction at an Aperture," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 54, no. 5, pp. 587-594, 1964.
- [2] F. Kottler, "Diffraction at a Black Screen. Part I : Kirchhoff's Theory," *Progresses in Optics IV*, pp. 283-314, 1985.
- [3] J. B. Keller, "Geometrical Theory of Diffraction," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 52, no. 2, pp. 116-130, 1962.
- [4] R. G. Kouyoumjian and P. H. Pathak, "A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface," *Proc. IEEE*, vol. 62, pp. 1448-1461, 1974.
- [5] R. J. Luebbers, "Finite Conductivity Uniform GTD Versus Knife Edge Diffraction in Prediction of Propagation Path Loss," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 32, no. 1, pp. 70-76, 1984.
- [6] J. H. Whittaker, "Fresnel-Kirchhoff Theory Applied to Terrain Diffraction Problems," *Radio Sci.* vol. 25, no. 5, pp. 837-851, 1990.
- [7] G. D. Maliuzhinets, "Excitation, Reflection and Emission of Surface Wave from a Wedge with Given Face Impedances," *Sov. Phys. Dokl. (mathematical Physics)*, vol. 3, pp. 752-755, 1958.
- [8] R. Tiberio, G. Pelosi, and G. Manara, "A Uniform GTD Formulation for the Diffraction by a Wedge with Impedance Faces," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 33, no. 8, pp. 867-873, 1985.
- [9] L. E. Vogler, "An Attenuation Function for Multiple Knife-Edge Diffraction," *Radio Sci.*, vol. 17, no. 6, pp. 1541-1546, 1982.
- [10] J. P. Rossi and A. J. Levy, "A Ray Model for Decimetric Radiowave Propagation in an Urban Area," *Radio Sci.*, vol. 27, no. 6, pp. 971-979, 1992.
- [11] S. Y. Tan and H. S. Tan, "A Theory for Propagation Path-Loss Characteristics in a City Street Grid," *IEEE Trans. Electromagnet. Compat.*, vol. 37, no. 3, pp. 333-342, 1995.
- [12] H. R. Anderson, "The Use of Ray-Tracing Methods for Site-Specific PCS Propagation Prediction," *MCS Manual, ED-X, Eng.*, 1994.

백 정 기



1978년 : 서울대학교 전자공학과 (학사)  
1985년 : Virginia Tech (석사)  
1988년 : Virginia Tech (박사)  
1978년 3월 ~ 1983년 2월 : 국방과학연구소

1988년 10월 ~ 1989년 2월 : 한국전자통신연구원  
1989년 3월 ~ 1995년 2월 : 동아대학교 전자공학과  
1995년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 전파공학과 부교수  
[주 관심분야] 전자파 전파, 초고주파 회로

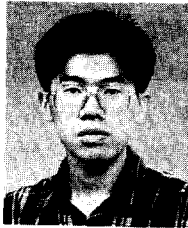
이 형 수



1980년 : 경북대학교 전자공학과 (학사)  
1985년 : 연세대학교 전자계산학과 (석사)  
1995년 : 성균관대학교 정보공학과 (박사)

1983년~현재 : 한국전자통신연구원 선임연구원  
[주 관심분야] 전파전파특성, 스펙트럼 관리기술, 무선망 설

김 혁 제



1993년 : 충남대학교 전자공학과 (학사)  
1995년 : 충남대학교 전자공학과 (석사)  
1995년~현재 : 한국전자통신연구원 연구원

[주 관심분야] 전파전파특성, 무선망 설계, 수동초고주파 공학

이 성 재



1980년 : 서울대학교 전자공학과 (학사)  
1982년 : 한국과학기술원 전기 및 전자과 (석사)  
1982년 4월~1985년 6월 : 국방과학연구소

1990년 : University of Florida 전기과 (박사)  
1990년 7월~1992년 8월 : 삼성반도체 기흥연구소 화합물 반도체 부문  
1992년 9월 ~ 현재 : 충남대학교 전자공학과 조교수  
[주 관심분야] EMI / EMC, 고회도 LED 설계