

論文96-33A-12-4

## 굴곡 및 굴절형 터널 내의 전파 전파의 전송 효율에 관한 연구

(A Study on the Transmission Efficiency of  
Electromagnetic Wave Propagation in Tunnels  
with Bend and Fold)金紀來\*, 韓卿求\*\*, 松永利明\*\*, 內田一德\*\*,  
安元清俊\*\*\*(Gi Rae KIM, Kyung Koo HAN, Toshiaki MATSUNAGA,  
Kazunori UCHIDA, and Kiyotoshi YASUMOTO)

## 요 약

직각 및 원형의 굴곡, 굴절을 갖는 2차원 터널 내의 전파 전파 문제를 FVTD (finite volume time domain)법을 적용하여 해석하였다. FVTD법은 임의의 미소 다면체 셀(cell)에 대하여 맥스웰 방정식(Maxwell's equation)을 체적 적분한 것에 이산화하여 나타낸 차분 방정식이다. 이 방식의 장점은 불균질 매질을 포함하는 임의 형태의 경계치 문제를 쉽게 계산할 수 있는데 있다. 본 논문에서는 FVTD법을 이용하여 직각 굴절형 터널과 해석적인 방법으로는 취급하기 어려운 원형 곡률을 갖는 터널 구조에 대해 전자파의 전파 현상을 수치 계산을 하고, 유효성을 검증하기 위해 실험치와 비교하였다. 수치 계산의 종단에 있는 흡수 경계 조건은 손실 매질에 있는 PML(Perfect Matched Layer) 흡수 경계 조건을 적용했다.

## Abstract

This paper is concerned with a finite volume time domain (FVTD) method for the analyses of transmission efficiency of electromagnetic wave propagation in tunnels with bend and fold. This method is based on the volume integrations of the Maxwell's equation with respected to arbitrary shaped small polyhedron cells. The advantages of the present method are that the algorithm is very simple since the coordinate system is restricted only to the cartesian, and so the arbitrary shaped boundaries can easily be dealt with since the fields at every center point of the cells are assigned in an average fashion.

## I. 서론

\* 正會員, 馬山專門大學 情報通信科

(Dept. of Information &amp; Communications, Masan J. College)

\*\* 福岡工業大學 情報工學科

(Dept. of Information &amp; Computer Engineering, Fukuoka Institute Technology)

\*\*\* 九州大學校 情報工學科

(Dept. of Information Engineering, Kyushu Univ.)

接受日字: 1996年4月19日, 수정완료일: 1996年12月5日

최근 자동차 전화, 열차 전화 및 휴대 전화 등의 이동 통신의 급속한 보급으로 터널, 지하도, 지하철 및 높은 빌딩 사이의 도로 상에서와 같은 이제까지 그다지 관심을 갖지 않던 환경에서의 전파 전파에 관한 여러 문제들에 관심이 높아지고 있다. 한편 우리나라에서 탄광의 갱도는 줄어들고 있지만 갱도 내에서 무선 방식에 의한 새로운 통신로를 갖추려고 하고 있으며, 이와 함께 갱도 내의 전파 전파의 해석이 필요하게 되

었다. 1970년대부터 터널 내의 전자파에 관한 연구가 이루어져 왔다. 터널, 지하도, 빌딩의 계곡 및 갱도 등과 같은 인공적인 전송로는 전자파 공학 측면에서 보면 내부가 공기인 도파관을 터널과 같은 종류의 문제로 취급할 수 있다. 대부분 터널의 벽을 구성하는 콘크리트, 암석 등은 전기적 손실이 있는 유전체로 볼 수 있기 때문에 터널 내의 전자파 해석은 손실 유전체로 둘러싸여 있는 공중 도파관에 대한 해석으로 간주할 수 있다. Emslie<sup>131</sup>는 사각형 터널에 대한 근사적 변수 분리법을 적용하여 석탄 갱도의 전파 전송식을 이끌어 내었다. 그 전송식은 터널 벽을 구성하는 매질이 석탄과 같은 저손실인 경우에 유효하다. 터널 벽에 의한 전자파의 손실 효과를 정확하게 평가하는 데는 터널 내부와 터널 벽으로 구성되는 2매질 경계치 문제로서 고유 모드의 전자계와 전송 정수를 정확하게 구하는 것이 요구된다. Chiba<sup>141</sup>는 원형 터널에 대해 얻어진 초월 방정식에 고주파 근사를 하여 감쇠 정수의 근사식을 유도하였다. 지금까지 FDTD 법이 여러 가지 전자계 문제의 해석에 응용되어 그 유효성이 증명되었다. 이 방법은 최초로 YEE<sup>151</sup>에 의해 등방성 매질에서 전자파 산란 문제의 해석에 적용하였다. 여기서 직교좌표계에서 유한 차분 시간 영역 알고리즘을 제시한다. 그러나 FDTD 법은 직교좌표계에 맞지 않는 경계를 갖는 문제에 대해 경계의 부정합이 발생한다. 따라서, 맥스웰 방정식을 체적 적분에 기초하여 이산화한 FVTD 법(Finite Volume Time Domain Method)이 제안되었다.<sup>161 171 181</sup> 이 방법에 의하면 미소 셀 내의 매질 정수는 일정하다고 하지만 각 셀마다 변화하기 때문에 불균질 매질을 포함하는 임의 형태의 경계치 문제를 비교적 용이하게 다룰 수가 있다. 이 FVTD 법은 터널과 같은 자유 공간과 손실 유전체가 임의의 형태로 접해 있는 경우 FDTD 방법보다 효과적이다. 터널 내의 전파 전파 문제에 관한 지금까지의 연구에서는 실제 터널 구조와 관계가 많은 임의의 굴절을 갖고 있는 복잡한 터널 구조에 대한 해석은 없다. 본 논문에서는 FVTD 법에 기초로 하여 직각 굴절형 구조의 터널과 직각 굴절형 터널에서 모서리를 45도로 처리하여 반사면을 둔 경우, 그리고 원형 굴곡형 2차원 터널 내의 전파 전파를 해석하였다. 수치 계산 결과와 실험치의 비교를 통해 FVTD 법의 유효성을 검증하였다.

## II. FVTD 법 적용

### 1. FVTD 식

FVTD 알고리즘은 시간적 변화를 갖는 맥스웰 방정식을 유한차분 방정식으로 변환하는 방법이다. 먼저, 손실 매질로 된 공간을 다면체 셀로 나누고,  $i$  번째 셀의 체적을  $\Delta V_i$  로 그것의 표면을  $\Delta S_i$  로 정의한다. 시간적 변화를 갖는 적분형 맥스웰 방정식은 식(1),(2)와 같다.

$$\int_{\nabla \cdot S} n \times EdS = - \int_{\nabla \cdot V} \sigma_m HdV - \frac{d}{dt} \int_{\nabla \cdot V} \mu HdV \quad (1)$$

$$\int_{\nabla \cdot S} n \times HdS = \int_{\nabla \cdot V} \sigma EdV + \frac{d}{dt} \int_{\nabla \cdot V} \epsilon EdV \quad (2)$$

계산의 편의를 위해 정규화 자계를 식(3)과 같이 정의하자.

$$\hat{H} = Z_0 H \quad (3)$$

여기서  $Z_0$  는 자유 공간에서 고유임피던스 ( $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ )이고,  $\Delta V_i$  셀 내에서 상수는 투자율 ( $\mu_i = \mu_0 \mu_{ri}$ ), 자기 전도도 ( $\sigma_{mi}$ ), 유전율 ( $\epsilon_i = \epsilon_0 \epsilon_{ri}$ ), 그리고 전기 전도도( $\sigma_i$ ) 등이 있다. 위의 식(1)(2)는 공간에서 이산화시켜 식(4),(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \hat{H}_i + \frac{\sigma_{mi}}{\mu_0 \mu_{ri}} \hat{H}_i = - \frac{c}{\mu_{ri} \Delta V_i} \sum_{v \in N_i} n_{iv} \times E_{iv} \Delta S_{iv} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} E_i + \frac{\sigma_i}{\epsilon_0 \epsilon_{ri}} E_i = \frac{c}{\epsilon_{ri} \Delta V_i} \sum_{v \in N_i} n_{iv} \times \hat{H}_{iv} \Delta S_{iv} \quad (5)$$

여기서  $\Delta S_{iv}$  는  $i$  번째 다면체 셀의 평면의 표면이고,  $n_{iv}$  는 그 표면에서 외부 방향의 수직 단위 벡터이다.  $E_i$  와  $\hat{H}_i$  는 미소 셀  $\Delta S_{iv}$  의 표면에서 평균 전계와 자계이며,  $c$  는 자유 공간에서 빛의 속도 ( $c = 1 / \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ ) 이다.  $E_{iv}^n$  은  $i$  번째 셀에서 전계이고  $E_{iv}^{n'}$  은 그것의 표면에서 전계이다.  $n$  은 시간 영역을 나타내는데 정수이며,  $n' = n - 0.5$  이다. 그리고  $n' \Delta t < t < (n'+1) \Delta t$  내에서 시간 영역을 나타낸다. 마찬가지로,  $H_{iv}^n$  와  $H_{iv}^{n'}$  는  $(n-1) \Delta t < t < n \Delta t$  시간 영역에서  $i$  번째 셀에서의 자계와 그 표면에서의 자계를 나타낸다. 전계 와 자계에 대한 FVTD 식은 식(6)~식(9)와 같이 나타내어진다.

$$\hat{H}_i^{n+1} = \epsilon_i \hat{H}_i^n - \Lambda_i A_i \left( \sum_{v \in N_i} n_{iv} \times E_{iv}^n \Delta S_{iv} \right) \quad (6)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Xi_i &= \exp(-\alpha_{mi}) \\ \Lambda_i &= \frac{c\Delta t}{\mu_{ri}\Delta V_i} \\ A_i &= \frac{1 - \exp(-\alpha_{mi})}{\alpha_{mi}} \\ \alpha_{mi} &= \frac{\sigma_{mi}\Delta t}{\mu_0\mu_{ri}} \end{aligned} \quad (7)$$

$$E_i^{n+1} = \Omega_i E_i^n + \Gamma_i B_i \left( \sum_{i \in N} n_{iv} \times \hat{H}_{iv}^{n+1} \Delta S_{iv} \right) \quad (8)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Omega_i &= \exp(-\alpha_i) \\ \Gamma_i &= \frac{c\Delta t}{\epsilon_n \Delta V_i} \\ B_i &= \frac{1 - \exp(-\alpha_i)}{\alpha_i} \\ \alpha_i &= \frac{\sigma_i \Delta t}{\epsilon_0 \epsilon_n} \end{aligned} \quad (9)$$

그리고 두 연결한 셀의 공통 면에서 접선 방향의 전계는 식(10)과 같이 셀의 중첩에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} n_{iv} \times E_{iv}^n \Delta S_{iv} &= \frac{1}{2} n_{iv} \times (E_i^n + E_j^n) \Delta S_{iv} \\ n_{iv} \times \hat{H}_{iv}^{n+1} \Delta S_{iv} &= \frac{1}{2} n_{iv} \times (\hat{H}_i^{n+1} + \hat{H}_j^{n+1}) \Delta S_{iv} \end{aligned} \quad (10)$$

### 2. 직교좌표계에서 FVTD 식

수치 계산을 하려는 터널의 구조에 맞추어 직교좌표계에서 FVTD 식을 나타낸다. 전자계의 성분이 z 방향에 일치한다고 가정하고, 이 때 전자계는 TE 파와 TM 파로 분해한다. 본 논문에서는 모델 실험이 용이한 TE 파를 고려한다. 이 때 영이 되지 않는 전자계 성분은 Ez(x,y,z), Hx(x,y,z) 및 Hy(x,y,z) 가 되며, 이 전자계는 식(6)과 식(8)로부터 다음과 같이 나타내어진다.

$$\hat{H}_x^{n+1}(i,j) = \hat{H}_x^n(i,j) - \Lambda_i [E_z^n(i,j+1) - E_z^n(i,j-1)] \quad (11)$$

$$\hat{H}_y^{n+1}(i,j) = \hat{H}_y^n(i,j) + \Lambda_i [E_z^n(i+1,j) - E_z^n(i-1,j)] \quad (12)$$

$$\begin{aligned} E_z^{n+1}(i,j) &= \Omega E_z^n(i,j) \\ &+ \Gamma_x B_i [\hat{H}_y^{n+1}(i+1,j) - \hat{H}_y^{n+1}(i-1,j)] \\ &- \Gamma_y B_j [\hat{H}_x^{n+1}(i,j+1) - \hat{H}_x^{n+1}(i,j-1)] \end{aligned} \quad (13)$$

여기서

$$\Lambda_{x,y} = \frac{c\Delta t}{2\Delta x,y}, \quad \Gamma_{x,y} = \frac{c\Delta t}{2\epsilon_r \Delta x,y} \quad (14)$$

$$\Omega = \exp(-\alpha), \quad B = \frac{1 - \exp(-\alpha)}{\alpha} \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{\sigma \Delta t}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (16)$$

한편 공간 매질에서 FVTD 식은 위 식에서  $\epsilon_r = 1, \sigma = 0$ 라고 두면 된다.

### 3. 흡수 경계 조건

수치 계산의 종단에 대한 흡수 경계 조건은 손실 매질에 있어서의 PML(Perfect Matched Layer) 흡수 경계 조건<sup>[11][12]</sup>을 적용하였다. 그리고 PML 영역에 연결한 공간은 비유전율  $\epsilon_r$ , 전기적 도전율  $\sigma$ 를 갖는 손실 균질매질이라고 가정한다. 또 PML 영역은  $I_1 \leq i \leq I_2, J_1 \leq j \leq J_2$ 에 있고, 각각의 PML 영역에 가상의 전기적, 자기적 도전율  $\sigma_x^*, \sigma_{mx}^*$  및  $\sigma_y^*, \sigma_{my}^*$ 를 고려한다. 여기서 이산화한 가상의 전기적, 자기적 전도율을  $I_1 \leq i \leq I_2$ 에서는  $\sigma_i^*, \sigma_m^*$  그리고  $J_1 \leq i \leq J_2$ 에서는  $\sigma_j^*, \sigma_{mj}^*$ 라고 할 때 FVTD 법에 있어서 흡수 경계는 식(17)-(21)를 만족한다.

$$\begin{aligned} \hat{H}_x^{n+1}(i,j) &= \Xi_i \hat{H}_x^n(i,j) \\ &- \Lambda_y A_j [E_z^n(i,j+1) - E_z^n(i,j-1)] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \hat{H}_y^{n+1}(i,j) &= \Xi_j \hat{H}_y^n(i,j) \\ &+ \Lambda_x A_i [E_z^n(i+1,j) - E_z^n(i-1,j)] \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} E_{zx}^{n+1}(i,j) &= \Omega E_{zx}^n(i,j) \\ &+ \Gamma_y B_j [\hat{H}_y^{n+1}(i+1,j) - \hat{H}_y^{n+1}(i-1,j)] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} E_{zy}^{n+1}(i,j) &= \Omega E_{zy}^n(i,j) \\ &- \Gamma_x B_i [\hat{H}_x^{n+1}(i,j+1) + \hat{H}_x^{n+1}(i,j-1)] \end{aligned} \quad (20)$$

$$E_z^n(i,j) = E_{zx}^n(i,j) + E_{zy}^n(i,j) \quad (21)$$

여기서, 감쇠 파라미터는 식(22)-(25)와 같은 지수형으로 나타내어진다.

$$\Xi_i = \begin{cases} \frac{\beta_i \exp(-\beta_{mi})}{\beta_{mi}} & I_1 \leq i \leq I_2 \text{ 일 때} \\ 1 & \text{그 외} \end{cases}$$

$$\Xi_j = \begin{cases} \frac{\beta_{mj} \exp(-\beta_{mj})}{\beta_{mj}} & J_1 \leq j \leq J_2 \text{ 일 때} \\ 1 & \text{그 외} \end{cases} \quad (22)$$

$$A_i = \begin{cases} \frac{1 - \exp(-\beta_{mi})}{\beta_{mi}} & I_1 \leq i \leq I_2 \text{ 일 때} \\ 1 & \text{그 외} \end{cases}$$

$$A_j = \begin{cases} \frac{1 - \exp(-\beta_{mj})}{\beta_{mj}} & J_1 \leq j \leq J_2 \text{ 일 때} \\ 1 & \text{그 외} \end{cases} \quad (23)$$

$$\Omega_i = \begin{cases} \frac{\alpha \exp(-\alpha)}{\alpha - \beta_i} + \frac{\beta_i \exp(-\beta_i)}{\beta_i - \alpha} & I_1 \leq i \leq I_2 \text{ 일 때} \\ \exp(-\alpha) & \text{그 외} \end{cases}$$

$$\Omega_j = \begin{cases} \frac{\alpha \exp(-\alpha)}{\alpha - \beta_j} + \frac{\beta_j \exp(-\beta_j)}{\beta_j - \alpha} & J_1 \leq j \leq J_2 \text{ 일때} \\ \exp(-\alpha) & \text{그 외} \end{cases} \quad (24)$$

$$B_i = \begin{cases} \frac{\exp(-\beta_i) - \exp(-\alpha)}{\alpha - \beta_i} & I_1 \leq i \leq I_2 \text{일때} \\ \frac{1 - \exp(-\alpha)}{\alpha} & \text{그 외} \end{cases}$$

$$B_j = \begin{cases} \frac{\exp(-\beta_j) - \exp(-\alpha)}{\alpha - \beta_j} & J_1 \leq j \leq J_2 \text{일때} \\ \frac{1 - \exp(-\alpha)}{\alpha} & \text{그 외} \end{cases} \quad (25)$$

PML을 위한 규격화한 감쇠정수는 식(26),(27)과 같이 정의된다.

$$\beta_{mi} = \sigma_{mi}^* \frac{\Delta t}{\mu_o \mu_r} \quad , \quad \beta_{mj} = \sigma_{mj}^* \frac{\Delta t}{\mu_o \mu_r} \quad (26)$$

$$\beta_i = \sigma_i^* \frac{\Delta t}{\epsilon_o \epsilon_r} \quad , \quad \beta_j = \sigma_j^* \frac{\Delta t}{\epsilon_o \epsilon_r} \quad (27)$$

여기서 임피던스 정합은 식(28),(29)의 관계식을 만족한다.

$$\frac{\sigma_{mi}^*}{\mu_o \mu_r} = \frac{\sigma_i^*}{\epsilon_o \epsilon_r} \quad I_1 \leq i \leq I_2 \quad \text{일때} \quad (28)$$

$$\frac{\sigma_{mj}^*}{\mu_o \mu_r} = \frac{\sigma_j^*}{\epsilon_o \epsilon_r} \quad J_1 \leq j \leq J_2 \quad \text{일때} \quad (29)$$

여기서 PML 영역으로부터 가상적인 반사파를 적게 하기 위해서는 감쇠정수를 단계적으로 변화시키는 것이 필요하다. 여기서는 식(30),(31)과 같은 지수형으로 정의한다.

$$\beta_{mi} = \beta_i = W \left( \frac{i - I_1 + 1}{I_2 - I_1 + 1} \right)^L \quad (30)$$

$$\beta_{mj} = \beta_j = W \left( \frac{j - J_1 + 1}{J_2 - J_1 + 1} \right)^L \quad (31)$$

여기서 W는 임의의 실수이고 L은 정수이다. 수치 계산에서는 W=3.0, L=3을 사용한다.

### III. 계산 및 실험 결과

FVTD 알고리즘의 유효성을 증명하기 위해 터널 구조에 대한 실험을 하여 측정치와 계산치를 비교하였다. 실험은 터널의 크기를 줄이기 위해 주파수를 9.35GHz로 선택하고 터널 벽의 재질은 콘크리트로 하였다. 그림1은 실험에 사용된 장치의 개략도를 나타냈다.

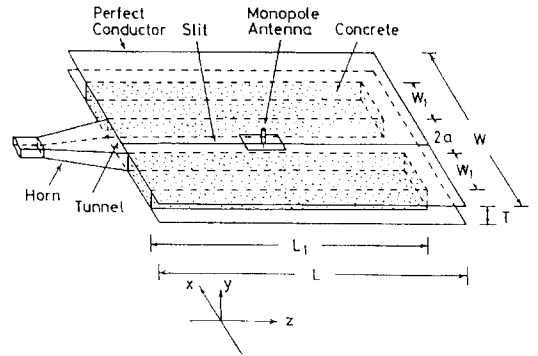


그림 1. 실험 장치의 개략도  
Fig. 1. Experimental setup.

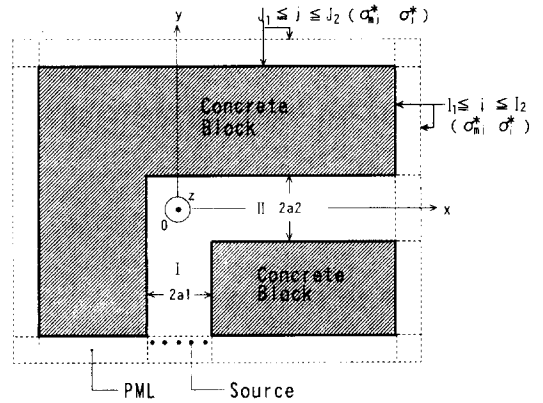


그림 2. 수치 계산의 개념도  
Fig. 2. Conceptive diagram of tunnel.

실험은 2차원 모델에 근사하기 위해서 그림1과 같이 넓은 두 장의 도체판(알루미늄판, W = 100cm, L = 180cm, 두께 2mm)을 콘크리트 블록 상하에 두어 터널을 구성하였다. 터널 내부의 전계강도는 위 도체 판에 스크린을 만들어 삽입한 모노폴 안테나로 측정하며, 외부 반사파의 영향을 무시하기 위해 무반사실 내에서 측정하였다. y축 방향으로는 전자계가 일정한 2차원 터널로서 입사파는 E<sub>y</sub> 기본 모드(m=1)이다. 본 논문에서 해석하고자 하는 터널의 구조도를 그림 2에 나타냈다. 수치 계산에서는 터널의 입구로부터 도파관 모드에 의해 여진 시키고 터널 출구에서 PML 흡수 경계를 사용한다. 시간 영역에서는 정현파 여진을 가정하고 시간 차분은 1주기를 1/20로 분할한다. 또 그림 3에서와 같이 직교좌표계에 맞지 않는 임의 형태의 경계에 있어서는 식(32),(33)에서와 같이 자유 공간 영역과 손실유전체 영역과의 면적비로서 평균화한 매질 정수를 사용

하고 미소 셀의 변형은 하지 않는다.

$$\epsilon' = \frac{\epsilon_{r1}\Delta S_1 + \epsilon_{r2}\Delta S_2}{\Delta S} \quad (32)$$

$$\sigma' = \frac{\sigma_1\Delta S_1 + \sigma_2\Delta S_2}{\Delta S} \quad (33)$$

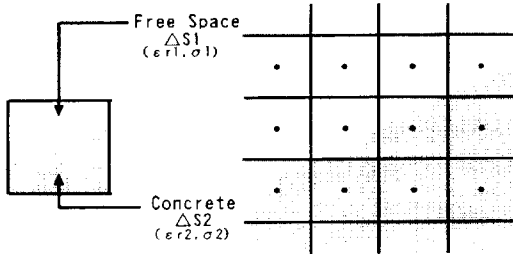


그림 3. 임의 형태의 경계 영역  
Fig. 3. Boundary regions of arbitrary shape.

다음은 FVTD 법을 이용한 수치 계산의 결과를 나타낸다. 그림 4~그림 6은 직각 굴절형(L형) 2차원 터널의 구조 및 수치 계산치와 실험치를 비교하여 나타내었다. 가로축은 터널의 길이를 파장에 대해 환산하여 표시하고 세로축은 터널 내의 전계강도를 데시벨 [dB]로 표시하고 있다. 수치 계산치와 실험치의 비교는 최대치를 0dB로 규격화하고 실험치는 수치 계산치의 원점에 맞추어 비교하고 있다. 직각 굴절형(L형) 터널과 변형 직각 굴절형(변형 L형) 터널 모두 수치 계산치와 실험치가 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 그림 7 ~ 그림 9는 직각 굴절형(L형) 터널에서 코너 부분에 2λ정도 변형한 2차원 터널(변형 L형)의 구성 및 수치 계산치와 실험치를 비교하여 나타내었다. 변수는 터널 I, II의 폭을 2.8λ로하고 주파수는 9.35GHz를 사용했다. 유전율과 도전율은 각각 ε<sub>r</sub> = 7.0, σ = 0.521(s/m)이다.

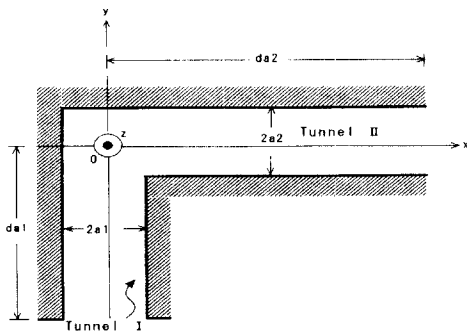


그림 4. 직각 굴절형(L형) 터널의 구성도  
Fig. 4. Geometry of a tunnel with 90° bend (L-type).

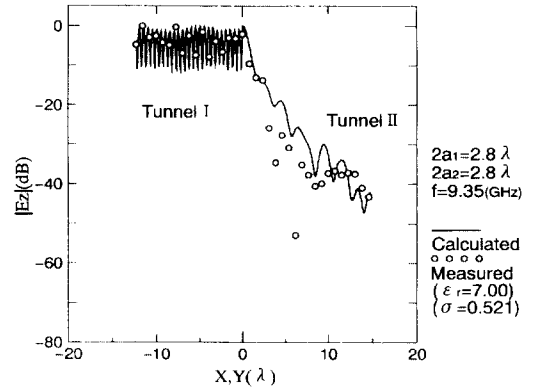


그림 5. 직각 굴절형(L형) 터널의 중심부에서 전계강도 분포  
Fig. 5. Electric fields intensities in the center of tunnel with 90° bend (L-type).

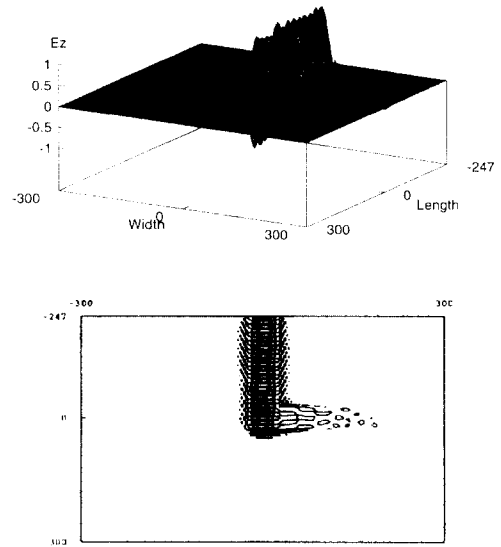


그림 6. 직각 굴절형(L형) 터널의 전계강도 3차원 분포  
Fig. 6. Electric fields 3-D distribution of tunnel with 90° bend (L-type).

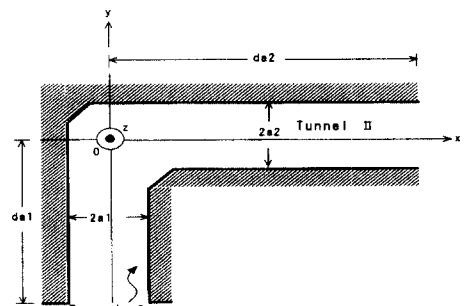


그림 7. 변형 직각 굴절형(변형 L형) 터널의 구성도  
Fig. 7. Geometry of a modified L-type tunnel.

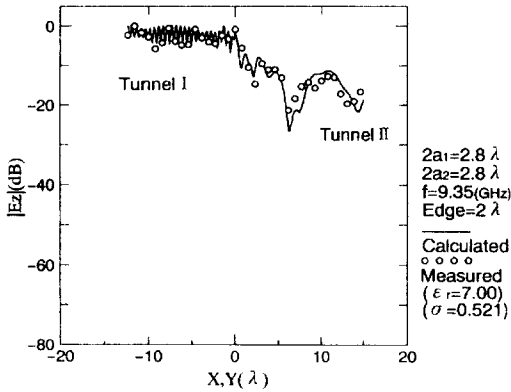


그림 8. 변형 직각 굴절형 (변형 L-형) 터널의 중심부의 전계 강도분포

Fig. 8. Electric fields intensity in the center of a modified L-type tunnel.

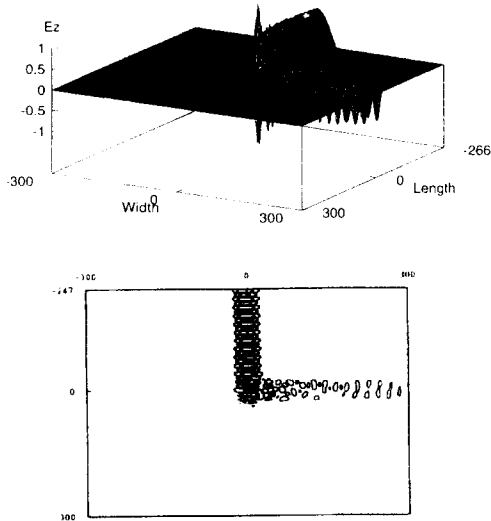


그림 9. 변형 직각 굴절형 (L형) 2차원 터널 중심의 전계강도 3차원 분포

Fig. 9. Electric fields 3-D distribution in the center of modified L-type tunnel.

그림 5와 그림 6의 결과와 같이 직각 굴절형과 같은 급격한 곡률을 갖는 터널은 터널 I 에서 강한 반사파가 발생하여 터널 II 의 전파는 심한 감쇠가 일어남을 알 수 있다. 그러나 그림 6과 같은 코너를 45도로 변형한 (변형 L형) 경우는 그림 8과 그림 9와 같이 터널 I, II 모두 전송 효율이 상당히 좋게 되었다는 것을 알 수 있다. 변형 직각 굴절형 (변형 L형) 터널의 경우도 수치 계산치와 실험치의 비교에서 서로 잘 일치하는 것으로부터 임의의 경계에 있어서도 매질 정수의 평균을

사용한 FVTD 법의 유효성이 실증되었다. 그림 10~그림 12는 원형 굴곡형 (C형) 의 2차원 터널의 구성 및 수치 계산 결과의 그래프를 나타낸다. 변수는 터널 I, II의 폭을  $4.7\lambda$ 로 하고 있다. 직각곡률의 경우에 비해서, 터널 I, II의 전파 전파가 상당히 양호하게 되었음을 알 수 있다. 그러나 터널의 곡률 부분에 있어서는 강한 다중 반사파가 발생하고 있는 것도 알 수 있다. 이와 같은 터널 구조는 실제의 지하도나 터널 등에서 자주 볼 수 있기 때문에 안테나를 설치하려고 하는 입장에서 전파 전파의 해석은 공학적으로 상당한 의의가 있다고 생각된다.

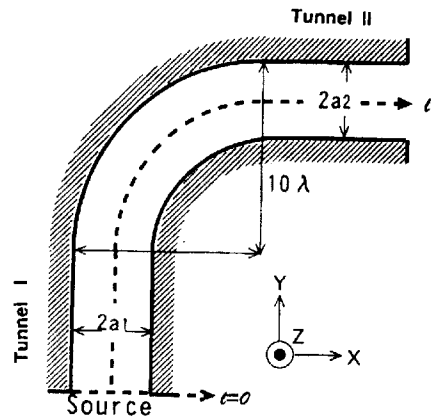


그림 10. 원형 굴곡형 (C-형) 2차원 터널의 구성  
Fig. 10. Geometry of tunnel with circular fold (C type).

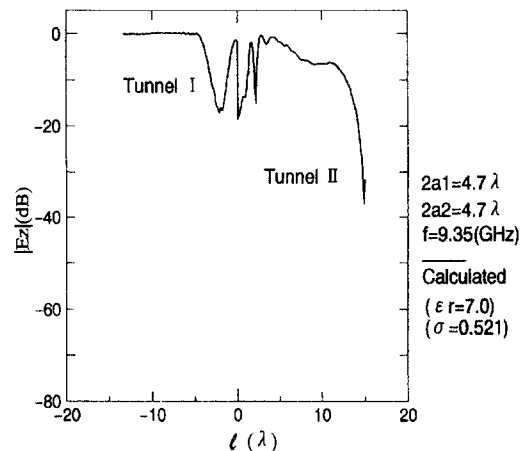


그림 11. 원형 굴곡형 터널 중심부의 전계 강도분포  
Fig. 11. Electric fields intensity in the center of a tunnel with circular fold (C-type).

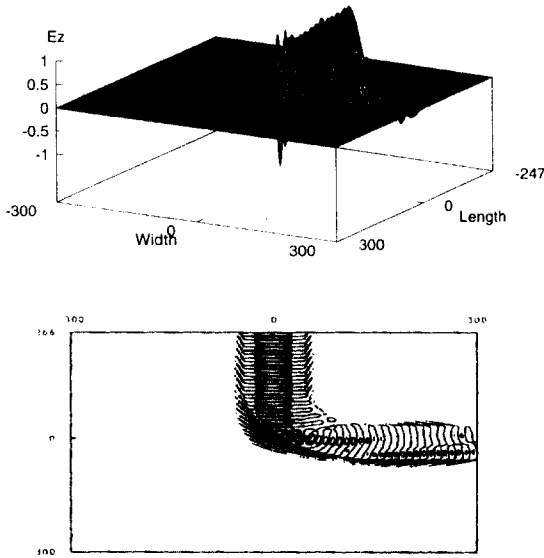


그림 12. 원형 굴곡형 2차원 터널 중심의 전계강도 3차원 분포

Fig. 12. Electric fields 3-D distribution in the center of C-type tunnel.

#### IV. 결론

본문에서는 임의의 미소 다면체 셀에 관한 맥스웰의 체적 적분에서 유도된 FVTD 법에 대해 설명하였다. 이 방법을 이용하면 그림3과 같은 직교좌표계를 적용하기 어려운 임의 형태의 경계치 문제를 용이하게 취급할 수가 있다. 그 응용 예로서 직각 굴절형 (L-형) 터널과 모서리를 45도로 변형한 (변형 L-형) 경우, 그리고 원형 굴곡형 터널 내의 전파 전파를 수치 해석으로 계산하였다. 특히 원형 굴곡형과 같은 임의 형태의 경계 부분에 있어서는 미소셀의 변형은 하지 않고 셀의 매질 정수의 평균치로 계산한다. 수치 계산의 결과는 어느 경우의 구성에서도 터널 내의 전파 상태를 알 수 있기에 충분한 해석 결과를 얻었다. 또 실험치와의 비교에서 일치하는 것으로 터널 내의 전파 전파 문제의 해석에 FVTD 법이 유효하다는 것을 알 수 있다. 또 변형 직각 굴절형 터널이나 원형 굴곡형 같은 터널의 구성이 터널 내의 전파 전파의 효율이 향상되었다는 것을 알 수 있다. 그리고 수치 계산의 종단에 적용되는 손실 매질에 있어서 PML 흡수 경계 조건은 가상적인 반사파를 대폭적으로 억제한다는 것을 알았다. FVTD 법은 각종 전자계 문제에 광범위하게 응용될

수 있기 때문에 더욱 복잡한 2차원이나 3차원 터널에서의 전파 전파 문제의 FVTD 해석은 향후 과제로 남아 있다.

#### 참고 문헌

- [1] J.P Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves", J.Comp. Phys., vol.114, No. 2, pp.185-200, Oct. 1994.
- [2] J. Fang and Z. Wu, "Generalized perfectly matched layer - An extension of Berenger's perfectly matched layer boundary condition", IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 5, No. 12, pp. 451-453, Dec. 1995.
- [3] A. G. Emslie, R. L. Lagace and P. F. Strong, "Theory of the propagation of UHF waves in coal mine tunnels", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, AP-23, 2, pp. 192-205 1975.
- [4] J. Chiba, T. Inaba, Y. Kuwamoto and R. Sato, "Radio communication in tunnels", IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., MTT-26, 6, pp.439-443, 1978.
- [5] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-14, NO.3, pp.302-307, May. 1966.
- [6] V. Shander, A. H. Mohammadian and W. F. Hall, "A time-domain, finite-volume Treatment for the Maxwell equations," Electromagnetics, vol.10, pp.127-145, 1990.
- [7] K. Uchida, T. Matsunaga, T. Noda and K.C. Kim, "An FVTD method for electromagnetic problems," Res. Bull. Fukuoka Inst. Tech., vol.28, No. 1, pp.105-112, oct. 1995.
- [8] K. Uchida, T. Matsunaga, K.C. Kim, and K.K.Han, "FVTD Analysis of Electromagnetic Wave Propagation in Two Dimensional Tunnels with Fundamental Junctions," IEICE C-I, Vol. J79-C-I, No.7, pp.210-216, 1996.

저 자 소 개



金紀來(正會員)

1963년 10월 21일생. 1986년 2월 서강대학교 전자공학과 졸업. 1988년 2월 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학석사). 1988년 ~ 1993년 3월 삼성전자 통신연구소 근무. 1993년 4월 ~ 현재 마산전문대학 정보통신과 조교수. 관심분야 : 전자파 해석, 초고주파회로 설계, FDTD 및 FVTD 응용에 관한 연구. 터널 및 빌딩내의 전파전파 연구



韓 卿 求

1962년 9월 4일생. 1993년 3월 후쿠오카 공대 전자공학과 졸업. 1996년 3월 후쿠오카 공대 대학원 정보공학과 (공학석사) 1996년 4월 ~ 현재 쿠슈대학교 정보공학과 박사과정 관심분야 : 전자파 해석, 터널내의 전파전파 연구



松永 利郎

1941년 10월 30일생. 1962년 3월 후쿠오카 단기대학 전자공학과 졸업. 1965년 3월 후쿠오카 공대 대학원 전자공학과 (석사). 1991년 11월 쿠슈대학교 대학원 정보공학과 (공학박사). 1996년 4월 ~ 현재, 후쿠오카 공대 교수. 관심분야 : 전자파 해석, 터널 및 빌딩내의 전파전파 연구



内田 一徳

1945년 3월 2일생. 1967년 3월 쿠슈대학교 전자공학과 졸업. 1969년 3월 쿠슈대학교 대학원 정보공학과 (석사). 1969년 12월 쿠슈대학교 대학원 정보공학과(공학박사). 1975년 4월 ~ 현재 후쿠오카 공대 정보공학과 교수. 관심분야 : FDTD 및 FVTD 법의 응용에 관한연구. 전자파 수치해석, 전자계이론 터널 및 빌딩내의 전파전파연구



安元 清俊

1945년 3월 8일생. 1967년 3월 쿠슈대학교 전자공학과 졸업. 1969년 3월 쿠슈대학교 대학원 정보공학과 (공학석사). 1977년 3월 쿠슈대학교 대학원 정보공학과 (공학박사) 1969년 4월 ~ 현재 쿠슈대학교 정보공학과 교수. 관심분야 : 전자파이론, 수치해석, 마이크로파 전송선로, 전자빔·플라즈마의 파동현상 연구. 광도파로