

論文97-34D-4-1

## 시간영역에서 십자형 터널 내의 전파 전파의 전송 효율에 관한 연구

## (A Study on the Transmission Efficiency of Electromagnetic Wave Propagation in cross type Tunnels in time Domain)

金紀來\*, 內田一徳\*\*, 安元清俊\*\*\*

(Gi Rae KIM, Kazunori UCHIDA, and Kiyotoshi YASUMOTO)

## 요약

십자형 및 변형 십자형의 2차원 터널 내에서 전파 전파 문제를 FVTD (finite volume time domain)법을 적용하여 시간영역에서 해석하였다. FVTD법은 임의의 미소 다면체 셀(cell)에 대하여 맥스웰 방정식(Maxwell's equation)을 체적 적분한 것에 이산화하여 나타난 차분 방정식이다. 이 방식의 장점은 불균질 매질을 포함하는 임의 형태의 경계치 문제를 쉽게 계산할 수 있는데 있다. 본 논문에서는 FVTD법을 이용하여 십자형 터널에 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 presents an analysis of the wave propagation in cross-type tunnels using the finite volume time domain (FVTD) method. Because the FVTD method is based on the volume integrations of the Maxwell's equations with respected to arbitrary shaped small polyhedron cells and the fields at every center point of the cells are assigned in an average fashion, the method can handle arbitrary boundary problems with inhomogeneous media. In this paper, the wave propagation in cross-type tunnels has been analyzed using the FVTD method with the PML(perfectly matched layer) absorbing boundary conditions, and the numerical results are verified with a set of experimental data.

## 1. 서론

최근 이동 통신의 급속한 보급으로 무선통신의 이용

이 많아지면서 터널, 지하도 및 지하철과 같은 이제까지 그다지 관심을 갖지 않던 환경에서의 전파 전파에 관한 관심이 높아지고 있다.

\* 正會員, 馬山專門大學 情報通信科

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

\*\* 福岡工大 工學部 情報工學科, 福岡市, 日本

(Dept. of Information Engineering, Fukuoka Insitute Technology)

\*\*\* 九州大學校 工學部 情報工學科, 福岡市, 日本

(Dept. of Information Engineering, Kyushu University)

接受日: 1997年2月28日, 수정완료일: 1997年4月9日

터널에서의 전파 전파에 대한 연구는 1970년부터 실험식에 의하여 많이 이루어 졌다. Emslie [1]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 문제로 하여 고유 모드와 전자계와 전송 정수를 정확하게 구하는 것이 요구된다. Chiba [2]는 원형 터널에 대해 얻어진 초월 방정식

에 고주파 근사를 하여 감쇠 정수의 근사식을 유도하였다. 약 30년전, Yee는 시간영역에서 전자파의 산란을 수학적으로 해석하기 위해 직교좌표계에 대한 FDTD (Finite Difference Time Domain) 알고리즘을 제안하였다<sup>[3]</sup>. 최근 고성능 컴퓨터의 발전으로 다양한 전자계 문제를 해석하는데 FDTD 알고리즘을 이용하는 연구가 많이 이루어 지고 있다. FDTD 알고리즘의 응용에 있어 중요한 두가지 문제는 계산 영역을 제한하기 위한 흡수경계조건 (Absorbing Boundary Condition, ABC) 문제와 어떤 임의의 좌표계에 적합하지 않는 기하학적 구조에 FDTD 알고리즘을 어떻게 적용하느냐는 것이다. 첫번째 문제에 대해서는 Mur의 법<sup>[4]</sup>과 그것의 변형법<sup>[5]</sup>이 사용되지만 이 흡수경계조건에 의해서는 경계에서 완전히 반사파를 제거하지 못한다. 그러나 이런 문제를 Berenger<sup>[6]</sup>에 의해 소개된 PML 흡수경계조건에 의해 해결되었다. 두번째 문제에 대해서는 많은 알고리즘이 제안되었다. 그러나, 이들 알고리즘을 실제 전자계 문제에 적용할 때 많은 해석적 과정이 요구된다.

지금까지 FDTD 법이 여러 가지 전자계 문제의 해석에 응용되어 그 유효성이 증명되었다. 이 방법은 최초로 YEE에 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>[7][8][9]</sup> 이 방법에 의하면 미소 셀 내의 매질 정수는 일정하다고 하지만 각 셀 마다 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 전파와 문제에 관한 지금까지의 연구에서는 실제 터널 구조와 관계가 많은 임의의 굴절을 갖고 있는 복잡한 터널 구조에 대한 해석은 없다. 참고문헌<sup>[10]</sup>에서는 실제 터널 구조와 유사한 직각 굴절형 구조의 터널과 직각 굴절형 터널에서 모서리를 45도로 처리하여 반사면을 둔 경우, 그리고 원형 굴곡형 2차원 터널 내의 전파 전파를 해석하여 수치 계산 결과와 실험치의 비교를 통해 FVTD 법의 유효성을 검증하였다. 본 논문에서

는 같은 방법으로 터널구조가 다른 십자형 터널과 변형 십자형 터널 내의 전파 전파를 해석하여 계산 결과를 실험치와 비교하여 유효성을 검증하였다.

## II. 이 론

FVTD 알고리즘은 시간적 변화를 갖는 맥스웰 방정식을 유한차분 방정식으로 변환하는 방법이다<sup>[10]</sup>. 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 같고, 이를 공간 영역에서 이산화 시키면 식(3),(4)와 같이된다.

$$\int_{\sigma, S_i} n \times EdS = - \int_{\sigma, V_i} \sigma_m HdV - \frac{d}{dt} \int_{\sigma, V_i} \mu HdV \quad (1)$$

$$\int_{\sigma, S_i} n \times HdS = \int_{\sigma, V_i} \sigma EdV + \frac{d}{dt} \int_{\sigma, V_i} \epsilon EdV \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \hat{H}_i + \frac{\sigma_{mi}}{\mu_o \mu_{ri}} \hat{H}_i = - \frac{c}{\mu_{ri} \Delta V_i} \sum_{i \in N_i} n_{iw} \times E_{iw} \Delta S_{iw} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} E_i + \frac{\sigma_i}{\epsilon_o \epsilon_{ri}} E_i = \frac{c}{\epsilon_{ri} \Delta V_i} \sum_{i \in N_i} n_{iw} \times \hat{H}_{iw} \Delta S_{iw} \quad (4)$$

여기서 계산의 편리를 위해  $\hat{H} = Z_o H$  라두고,  $\Delta S_{iw}$ 는  $i$ 번째 다면체 셀의 평면의 표면이고,  $n_{iw}$ 는 그 표면에서 외부 방향의 수직 단위 벡터이다.  $E_i$ 와  $\hat{H}_i$ 는 미소 셀  $\Delta S_{iw}$ 의 표면에서 평균 전계와 자계이며,  $c$ 는 자유 공간에서 빛의 속도 ( $c = 1/\sqrt{\epsilon_o \mu_o}$ )이다. 전계와 자계에 대한 FVTD 식은 식(5)~식(8)와 같이 나타내어진다.  $E_i^n$ 은  $i$ 번째 셀에서 전계이고  $E_{iw}^n$ 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,  $H_i^{n'}$ 와  $H_{iw}^{n'}$ 는  $(n-1) \Delta t < t < n \Delta t$  시간 영역에서  $i$ 번째 셀에서의 자계와 그 표면에서의 자계를 나타낸다.

$$\hat{H}_i^{n+1} = \mathcal{E}_i \hat{H}_i^{n'} - \Lambda_i A_i \left( \sum_{i \in N_i} n_{iw} \times E_{iw}^n \Delta S_{iw} \right) \quad (5)$$

여기서

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_i &= \exp(-\alpha_{mi}) \\ \Lambda_i &= \frac{c \Delta t}{\mu_{ri} \Delta V_i} \\ A_i &= \frac{1 - \exp(-\alpha_{mi})}{\alpha_{mi}} \\ \alpha_{mi} &= \frac{\sigma_{mi} \Delta t}{\mu_o \mu_{ri}} \end{aligned} \quad (6)$$

$$E_i^{n+1} = \Omega_i E_i^n + \Gamma_i B_i \left( \sum_{i \in N_i} n_{iv} \times \hat{H}_{iv}^{n+1} \Delta S_{iv} \right) \quad (7)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Omega_i &= \exp(-\alpha_i) \\ \Gamma_i &= \frac{c \Delta t}{\epsilon_r \Delta V_i} \\ B_i &= \frac{1 - \exp(-\alpha_i)}{\alpha_i} \\ \alpha_i &= \frac{\sigma_i \Delta t}{\epsilon_r \epsilon_r} \end{aligned} \quad (8)$$

수치 계산을 하려는 십자형 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(9)~(11)과 같이 나타내어진다.

$$\hat{H}_x^{n+1}(i,j) = \hat{H}_x^n(i,j) - \Lambda_x [E_z^n(i,j+1) - E_z^n(i,j-1)] \quad (9)$$

$$\hat{H}_y^{n+1}(i,j) = \hat{H}_y^n(i,j) + \Lambda_x [E_z^n(i+1,j) - E_z^n(i-1,j)] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} E_z^{n+1}(i,j) &= \Omega E_z^n(i,j) \\ &+ \Gamma_x B_i [\hat{H}_y^{n+1}(i+1,j) - \hat{H}_y^{n+1}(i-1,j)] \\ &- \Gamma_y B_j [\hat{H}_x^{n+1}(i,j+1) - \hat{H}_x^{n+1}(i,j-1)] \end{aligned} \quad (11)$$

여기서

$$\Lambda_{x,y} = \frac{c \Delta t}{2 \Delta x, y}, \quad \Gamma_{x,y} = \frac{c \Delta t}{2 \epsilon_r \Delta x, y} \quad (12)$$

$$\Omega = \exp(-\alpha), \quad B = \frac{1 - \exp(-\alpha)}{\alpha} \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{\sigma \Delta t}{\epsilon_r \epsilon_r} \quad (14)$$

한편 공간 매질에서 FVTD 식은 위 식에서  $\epsilon_r = 1$ ,  $\sigma = 0$ 라고 두면 된다. 수치 계산의 종단에 대한 흡수 경계 조건은 손실 매질에 있어서의 PML(Perfect Matched Layer) 흡수 경계 조건<sup>16)</sup>을 적용하였다. 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 전기

적, 자기적 전도율을  $I_1 \leq i \leq I_2$ 에서는  $\sigma_x^*$ ,  $\sigma_{mx}^*$  그리고  $J_1 \leq j \leq J_2$ 에서는  $\sigma_y^*$ ,  $\sigma_{my}^*$ 라고 할 때 FVTD 법에 있어서 흡수 경계는 식(15)~(19)를 만족한다.

$$\begin{aligned} \hat{H}_x^{n+1}(i,j) &= \varepsilon_j \hat{H}_x^n(i,j) \\ &- \Lambda_y A_j [E_z^n(i,j+1) - E_z^n(i,j-1)] \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \hat{H}_y^{n+1}(i,j) &= \varepsilon_i \hat{H}_y^n(i,j) \\ &+ \Lambda_x A_i [E_z^n(i+1,j) - E_z^n(i-1,j)] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} E_{zx}^{n+1}(i,j) &= \Omega_i E_{zx}^n(i,j) \\ &+ \Gamma_x B_i [\hat{H}_y^{n+1}(i+1,j) - \hat{H}_y^{n+1}(i-1,j)] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} E_{zy}^{n+1}(i,j) &= \Omega_j E_{zy}^n(i,j) \\ &- \Gamma_y B_j [\hat{H}_x^{n+1}(i,j+1) + \hat{H}_x^{n+1}(i,j-1)] \end{aligned} \quad (18)$$

$$E_z^n(i,j) = E_{zx}^n(i,j) + E_{zy}^n(i,j) \quad (19)$$

여기서, 감쇠 파라미터는 다음과 같은 지수형으로 나타내어진다.

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

$$\varepsilon_j = \begin{cases} \frac{\beta_{mj} \exp(-\beta_{mj})}{\beta_{mj}} & J_1 \leq j \leq J_2 \text{ 일 때} \\ 1 & \text{그 외} \end{cases} \quad (20)$$

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

$$A_j = \begin{cases} \frac{1 - \exp(-\beta_{mj})}{\beta_{mj}} & J_1 \leq j \leq J_2 \text{ 일 때} \\ 1 & \text{그 외} \end{cases} \quad (21)$$

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

$$\Omega_j = \begin{cases} \frac{\alpha \exp(-\alpha)}{\alpha - \beta_j} + \frac{\beta_j \exp(-\beta_j)}{\beta_j - \alpha} & J_1 \leq j \leq J_2 \text{ 일 때} \\ \exp(-\alpha) & \text{그 외} \end{cases} \quad (22)$$

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

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

여기서 PML 영역으로부터 가상적인 반사파를 적게 하기 위해서는 감쇠정수를 단계적으로 변화시키는 것이 필요하다. 여기서는 식(24),(25)와 같은 지수형으로 정의한다.

$$\beta_{mi} = \beta_i = W \left( \frac{i-I_1+1}{I_2-I_1+1} \right)^L \quad (24)$$

$$\beta_{mj} = \beta_j = W \left( \frac{j-J_1+1}{J_2-J_1+1} \right)^L \quad (25)$$

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

### III. 계산 및 실험 결과

FVTD 알고리즘의 유효성을 증명하기 위해 십자형 터널 구조에 대한 마이크로파 모델 실험을하여 측정치와 계산치를 비교하였다. 실험은 터널의 크기를 줄이기 위해 주파수를 9.35GHz로 선택하고 터널 벽의 재질은 콘크리트로 하였다. 그림1은 십자형 터널내의 전파 측정을 위한 실험에 사용된 장치의 개략도를 나타냈다. 실험은 2차원 모델에 근사하기 위해서 그림1과 같이 넓은 두장의 도체판(알루미늄판, W = 100cm, L = 180cm, 두께 2mm)을 콘크리트 블록 상하에 두어 터널을 구성하였다. 변형 십자형 터널의 I, II, III은 5개의 콘크리트 와 판으로 구성되어 있다. 그 구성은 각각  $L_1 = L_3 = 35\text{cm}$ ,  $70\text{cm}$ ;  $L_5 = 35\text{cm}$ ;  $L_2 = L_4 = 70\text{cm}$ ;  $W_1 = 35\text{cm}$ ;  $W_2 = 70\text{cm}, 105\text{cm}$ ;  $W_3 = 10, 15\text{cm}$ ;  $T = 4.5\text{cm}$  이다. 터널 내부의 전계강도는 위 도체판에 스티트를 만들어 삽입한 모노폴 안테나로 측정하며 외부 반사파의 영향을 없애기 위해 무반사실 내에서 측정하였다. y축 방향으로는 전자계가 일정한 2차원 터널로서 입사파는  $E_y$  기본 모드 ( $m = 1$ ) 이다.

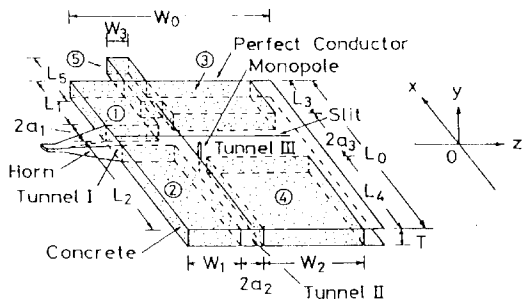
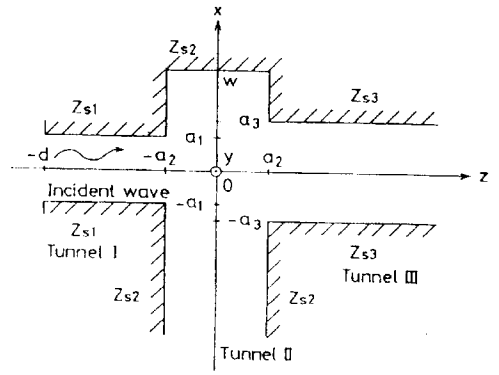
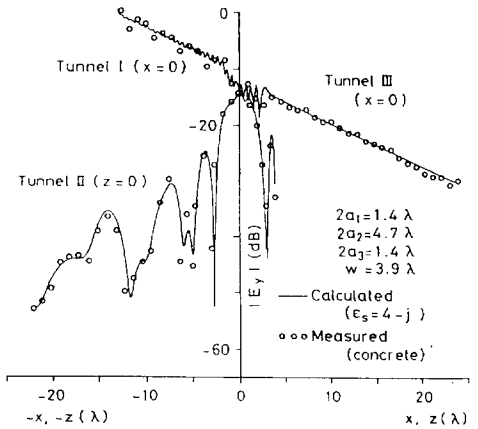


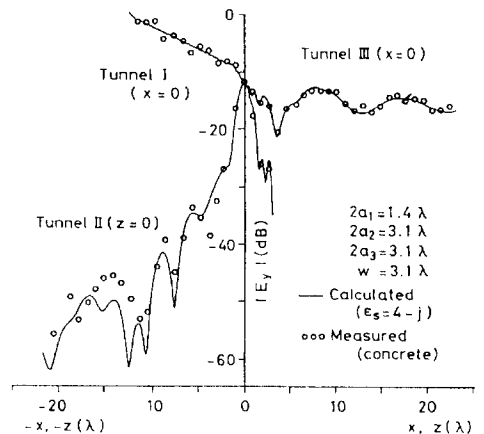
그림 1. 실험 장치의 개략도  
Fig. 1. Experimental setup.



(a) 터널의 구조



(b) 전계강도분포 ( $2a_2 = 4.7\lambda, 2a_3 = 1.4\lambda, w = 3.9\lambda$  일때)



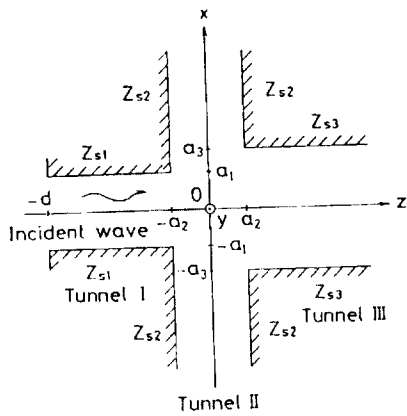
(c) 전계강도분포 ( $2a_2 = 3.1\lambda, 2a_3 = 3.1\lambda, w = 3.1\lambda$  일때)

그림 2. 변형 + 자형 터널의 중심부에서 전계강도 분포

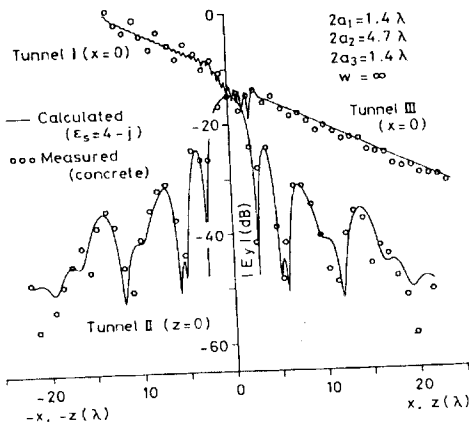
Fig. 2. Electric field intensity distribution in the center of a modified cross-type tunnel.

그림2(a)는 변형 십자형 터널의 평면 구조를 나타내었다. 그림2(b) 와 (c)는 변형 십자형 터널의 중심부에서

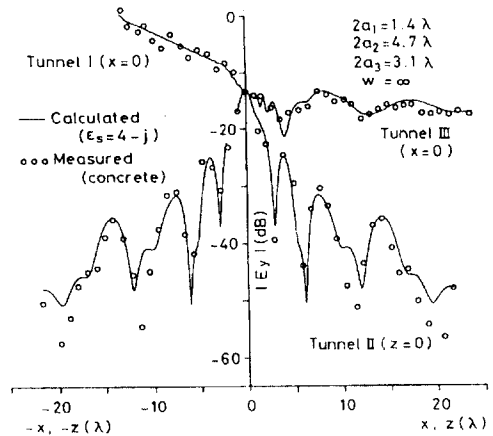
전계강도의 설계치와 측정치를 비교하여 나타내었다. 그림 2(b)는 터널 I과 III의 폭( $2a_1 = 2a_3 = 1.4\lambda$ )을 같게 하고 터널 II의 폭을  $2a_2 = 4.7\lambda$ 로 하였다. 터널 I과 III에서는 중심부( $x = 0$ )에서 전계강도를  $z$ 의 함수로, 터널 II에서는 중심부( $z=0$ )에서 전계강도를  $x$ 의 함수로 표시하였다. 터널 I, II, III에서 계산치와 측정치에서 결과가 일치함을 알 수 있다. 터널의 폭이 넓은 터널 II에서 전계강도의 변동이 심한 것은 모드간의 간섭에 의한 것이다. 터널 I의 측정치에 정재파적인 미세한 변동이 나타나는 것은 실험 장치에서 도파관과 터널의 접속 부에서 부정합에 의한 고차 모드의 발생에 의한 것이다. 그림 2(c)의 경우는 터널 I의 폭은 그림 2(b)의 경우와 같게 하고, 터널 II의 폭( $2a_2 = 3.1\lambda$ )을 약간 작게하고, 터널 III의 폭( $2a_3 = 3.1\lambda$ )을 그림 2(b)의 경우보다 크게 하였다. 이 경우도 계산치와 측정치가 일치함을 알 수 있었다. 터널 II와 III에서는 모드간의 간섭에 의한 전계강도의 큰 변동을 볼 수 있다.



(a) 터널의 구조



(b) 전계강도분포 ( $2a_2=4.7\lambda, 2a_3=1.4\lambda, w=\infty$ 일때)



(c) 전계강도분포 ( $2a_2=4.7\lambda, 2a_3=3.1\lambda, w=\infty$ 일때)

그림 3. + 자형 터널의 중심부에서 전계강도 분포  
Fig. 3. Electric field intensity distribution in the center of a cross type tunnel.

그림 3(a)는 십자형 터널에 대한 평면 구조를 나타내었다. 그림 3(b)와(c)는 터널 중심에서 전계강도의 측정치와 계산치를 비교하였다. 그림 3(b)는 그림 2에서  $2a_1 = 2a_3 = 1.4\lambda, 2a_2 = 4.7\lambda, w = \infty$ 로 터널 구조로 바꾼 십자형 터널의 경우이다. 그림 3(c)는 그림 3(b)의 경우보다 터널 III의 폭을 크게 ( $2a_3 = 3.1\lambda$ )로 한 경우이다. 이 경우에도 계산치와 측정치가 일치함을 알 수 있다. 터널 I과 III에서 전계강도 분포는 레벨이 전체적으로 낮아진 것을 제외하면 그림 2의 경우와 같다고 볼 수 있다. 이 레벨이 낮아진 것은 터널 II에서  $x > 0$ 의 방향으로 투과하여 들어간 모드가 여진되었기 때문이다. 이 결과 터널 II에서는  $x > 0$ 의 영역에서  $x < 0$ 의 영역과 같은 패턴이 나타난다.

#### IV. 결론

본문에서는 임의의 미소 다면체 셀에 관한 맥스웰의 체적 적분에서 유도된 FVTD 법에 대해 설명하였다. 이 방법을 이용하면 직교좌표계를 적용하기 어려운 임의 형태의 경계치 문제를 용이하게 취급할 수가 있다. 그 응용 예로서 십자형 및 변형십자형 터널내의 전파 전파를 수치 해석으로 계산하여 실험치와 비교하였다. 수치 계산의 결과는 어떠한 구성에서도 터널 내의 전파 상태를 알 수 있는 해석 결과를 얻었으며, 실험치와의 비교에서 일치하는 것으로 터널 내의 전파 전파 문제의 해석에 FVTD 법이 유효하다는 것을 알 수 있다.

터널 구조에 대한 결과를 검토해보면 수치 계산의 종단에 적용되는 손실 매질에 있어서 PML 흡수 경계 조건은 가상적인 반사파를 대폭적으로 억제한다는 것을 알았다. 십자형과 변형십자형 터널의 경우 터널 I, II, III에서 계산치와 측정치에서 결과가 일치함을 알 수 있었으며, 터널의 폭이 넓은 터널 II에서 전계강도의 변동이 심한 것은 모드간의 간섭에 의한 것이다. 터널 I의 측정치에 정재파적인 미세한 변동이 나타나는 것은 실험 장치에서 도파관과 터널의 접속 부에서 부정합에 의한 고차 모드의 발생에 의한 것이다. 터널 II와 III에서는 모드간의 간섭에 의한 전계강도의 큰 변동을 볼 수 있다. 이 상에서 여러 터널의 구조에 대해 FVTD 법을 이용하여 전파 전파 특성을 해석하였다. FVTD 법은 각종 전자계 문제에 광범위하게 응용될 수 있기 때문에 더욱 복잡한 2차원이나 3차원 터널에서의 전파 전파 문제의 FVTD 해석은 향후 과제로 남아 있다. 본 논문에서 해석한 터널 구조는 실제의 지하도나 터널 등에서 자주 볼 수 있기 때문에 안테나를 설치하려고 하는 입장에서 전파 전파의 해석은 공학적으로 상당한 의의가 있다고 생각된다.

#### 참 고 문 헌

[1] 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.

[2] 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.

[3] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", IEEE Trans. Antennas Propagation, vol. AP-14, no. 3, pp. 302-307, May. 1966.

[4] G. Mur, "Absorbing boundary conditions

for the finite-difference approximation of the time domain electromagnetic field equations," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. EMC-23, no. 4, pp. 377-382, Nov. 1981.

- [5] K. L. Shlager and John B. Schneider, "A selective survey of the Finite Difference Time Domain literature," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 37, no. 4, pp. 39-56, Aug. 1995.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 金紀來, 韓卿求, 松永利明, 內田一德, 安元清俊, "굴곡 및 굴절형 터널내의 전파전파의 전송효율에 관한연구", 電子工學論文誌, 第33卷, 第12號, pp. 25~32, 1996年 12月
- [11] 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.

## 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 정보통신연구소 근무. 1993년 4월 ~ 현재 마산전문대학 정보통신과 조교수. 관심분야는 전파 해석, 초고주파회로 설계

FDTD 및 FVTD 응용에 관한 연구 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.

관심분야는 FDTD 및 FVTD 법의 응용에 관한연구, 전파 수치해석, 전자계이론 터널 및 빌딩 내의 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.

관심분야는 전파이론, 수치해석, 마이크로파전송선로, 전자빔·플라즈마의 파동현상 연구 광도파로