

TEM CELL에서의 전자장 수치해석 (Numerical Analysis of Electromagnetic Fields in TEM Cells)

李愛卿* · 李相繪** · 金正棋*
(Ae Kyoung Lee · Sang Hoi Yi · Jung Ki Kim)

ABSTRACT

The electromagnetic field distribution within rectangular coaxial transmission lines (RCTL:TEM cells) is calculated using a numerical method. Boundary integral equations(BIE) considering equivalence theorem and extended boundary condition(EBC) in tapered region are used, thereby restricting the operational frequencies (0~130 MHz) below the cell cutoff frequency(130 MHz).

The EM fields within NIST TEM cell (1×0.6×2m) are calculated by this method. The results of the numerical calculation have a good agreement in the cross-sectional EM field distribution of TEM cell with 2-dimensional analysis results. Based on this method, the first cutoff frequency in high order modes in the cell and the electric field polarization are considered.

I. 서 론

TEM cell은 밀폐된 공간내에서 직류(dc)부터 최초의 고차 모드의 차단 주파수까지 TEM파를 발생한다. TEM cell의 외부는 차폐 금속체를 접지하고 있으며, 전송 케이블과 septum이 연결된 장방형 구조이며, 양끝은 줄어드는 모양을 취해 임피던스 정합을 이루고 있다[1-5].

본 논문에서는 전자파 내성 측정에 주로 사용되는 TEM cell대하여 수치해석 방법에 의해 전자장 분포 특성을 구한다. 일반적으로 TEM cell은 동축 케이블에서 발생하는 TEM 모드를 기초로 전송 케이블에 장방형 TEM cell을 연결시켜 septum과 평행 도체면 사이에서 TEM 평면파를 형성시키는데 목적이 있다. 따라서 TEM cell은 최초의 고차 모드가 발생하는 주파수 이하에서만 사용하게 된다[2]. TEM

cell 구조의 전자장 방정식은 확장경계조건과 맥스웰 방정식으로 부터 유도된 경계적분방정식을 사용하여 수치해석한다[6-9]. TEM cell의 구조는 NIST에서 제작한 것과 동일 치수를 사용하며, 수치해석 결과는 Crawford M.L [1], Kanda M.[2], Spiegel R.J[3]등에 의해서 연구된 결과값과 비교 검토한 다음 차단 주파수 부근에서의 전장 분포를 구하도록 한다.

II. 수식유도 및 수치해석

2.1 수식유도

맥스웰 방정식으로 부터 전장 방정식을 구하면

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi - j\omega \mathbf{A} \quad \text{--- (1)}$$

이고, ϕ , \mathbf{A} 는 3차원 파동 방정식으로 부터 구한 해로서 스칼라, 벡터 포텐셜 함수이며, G 는 그린 함수이다.

* 正會員, 中央大學校 電子工學科

**正會員, 大有工業專門大學 電子科

$$\phi(x, y, z) = \frac{1}{\epsilon} \int_V \rho(x', y', z') G(x, y, z | x', y', z') dv' \quad (2)$$

$$A(x, y, z) = \mu \int_V \tau(x', y', z') G(x, y, z | x', y', z') dv' \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)으로 부터 전장을 구할 수 있다.

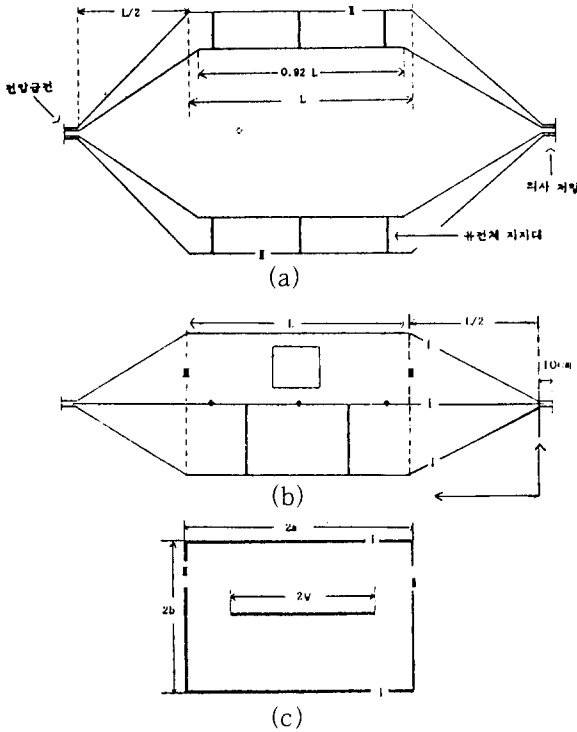


그림 1. TEM CELL의 구조
Fig 1. A typical TEM Cell

그림 1에서는 TEM cell의 구조를 나타내며 (a)는 위에서 내려본 형태로 septum과 벽면(II)으로 구분되며, 중앙 부분과 테이퍼 영역(L/2, 3L/2)의 경계면을 III으로 구분하고, cell의 양끝은 급전과 의사저항(dummy load)으로 연결한다. (b)는 옆에서 바라본 모습으로 경계면 I로 구분하고, (c)는 앞에서 바라본 단면(cross-section)이다. TEM cell 내부 벽면과 septum은 완전도체이다.

그림 2에서와 같이 III면은 빈 공간으로 전압 급전점까지의 경사벽면에 대한 고려가 힘들기 때문에 Z=L/2, 3L/2에서 발생하는 전장을 등가 전류로 치환하며 이 전류는 septum과 벽면 사이의 등전위면을 구하므로써 얻게된다.

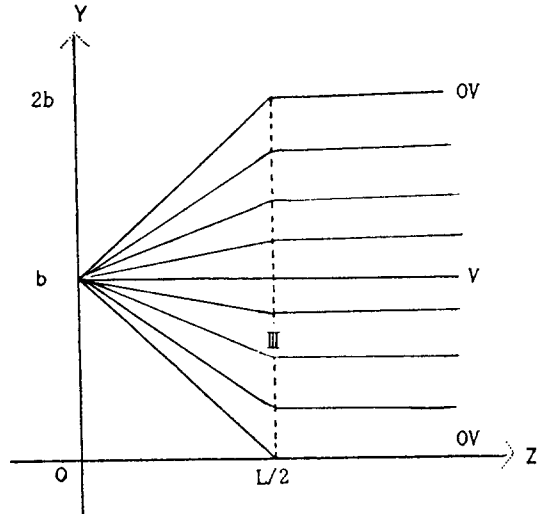


그림 2. III면에 대한 등전위
Fig 2. Equipotential of boundary III

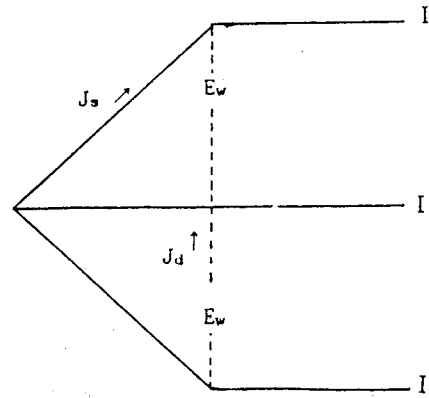


그림 3. III면에 대한 등가 정리 적용
Fig 3. Equivalence principle for boundary III

그림 3은 경사벽면에 Js가 존재하므로 등가 정리(equivalence principle)를 적용하여 경사 벽면이 cell내에 미치는 영향을 III면에 등가 변위 전류(Jd)로 대체시킴으로써 III면과 평행도체판 벽면이 폐곡면(closed surface)을 형성하므로 확장경계조건(extended boundary condition : EBC)을 만족하는

경계적분방정식(boundary integral equation : BIE)을 유도하게 된다.

$$J_a = j\omega \epsilon E_a \quad \text{--- (4)}$$

전류 밀도와 전하 밀도를 각 경계면에서 구하여 식(1)의 전장을 구하게 된다. 이들 각각의 구간 경계면에서 구하는 전류 성분은 완전도체의 접선성분을 만족하도록 I면에서 J_x, J_z , II면에서 J_y, J_z , III면에서는 전장 E_x, E_y, E_z 성분으로 부터 변위전류 J_x, y, z 를 구한다.

경계면 I, II면은 완전 도체면으로 가정하여 전장의 접선 성분이 영이 되는 사실과 III면의 등가 전류를 이용하여 TEM cell의 수치 해석 영역이 하나의 폐공간을 이루는 경계적분방정식 (5)-(14)를 구성할 수 있다.

2.2 수치해석

전장 각 성분에 따른 경계적분방정식 형태는 다음과 같고, 경계요소법을 적용하여 수치해석한다. 즉 전장의 X성분은

$$\begin{aligned} E_{x_I} = 0 &= - \frac{\partial \phi_I}{\partial x} - j\omega\mu \int_I J_{x_I} G dx' dz' - j\omega\mu \int_{III} J_{x_{III}} G dx' dy' \\ &= - \frac{\partial \phi_I}{\partial x} - j\omega\mu \int_I J_{x_I} G dx' dz' + \omega^2 \epsilon \mu \int_{III} J_{x_{III}} G dx' dy' \quad \text{--- (5)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{x_{III}} = 0 &= - \frac{\partial \phi_I}{\partial x} - j\omega\mu \int_I J_{x_I} G dx' dz' - j\omega\mu \int_{III} J_{x_{III}} G dx' dy' \\ &= - \frac{\partial \phi_{III}}{\partial x} - j\omega\mu \int_I J_{x_I} G dx' dz' + \omega^2 \epsilon \mu \int_{III} J_{x_{III}} G dx' dy' \quad \text{--- (6)} \end{aligned}$$

위 식에서 $E_{x_I}, E_{x_{III}}$ 는 각 경계면 I, II의 관측점 (O. P.)에서 전장을 나타내며 $J_{x_I}, J_{x_{III}}$ 는 I, III면의 전류를 나타낸다. 식(5)에서 $E_{x_I} = 0$ 은 I면에서 전장의 접선 성분인, E_x 가 영이 되는 경계조건을 만족하기 때문이다. 식(6)은 미지수 $E_{x_{III}}$ 가 Fredholm 2종 적분방정식 형태를 만족한다.

$$\begin{vmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} J_{x_I} \\ E_{x_{III}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \phi_I}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_{III}}{\partial x} \end{vmatrix} \quad \text{--- (7)}$$

식(7)에서 미지수 $J_{x_I}, E_{x_{III}}$ 를 구할 수 있다. 전장 y성분은 x성분을 구하는 방법과 동일하게

$$E_{y_{II}} = 0 = - \frac{\partial \phi_{II}}{\partial y} - j\omega\mu \int_{II} J_{y_{II}} G dy' dx' + \omega^2 \epsilon \mu \int_{III} E_{y_{III}} G dx' dy' \quad \text{--- (8)}$$

$$E_{y_{III}} = 0 = - \frac{\partial \phi_{III}}{\partial y} - j\omega\mu \int_{II} J_{y_{II}} G dy' dx' + \omega^2 \epsilon \mu \int_{III} E_{y_{III}} G dx' dy' \quad \text{--- (9)}$$

이고, 앞의 경우와 마찬가지로 $E_{y_{II}}$ 는 II면에서 전장의 y성분이 영이되는 경계조건을 만족한다. 식(9)는 식(6)과 같은 Fredholm 2종 적분 방정식 형태가 된다.

$$\begin{vmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} J_{y_{II}} \\ E_{y_{III}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \phi_{II}}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_{III}}{\partial y} \end{vmatrix} \quad \text{--- (10)}$$

z성분 전장은

$$\begin{aligned} E_{z_I} &= - \frac{\partial \phi_I}{\partial z} - j\omega\mu \int_I J_{z_I} G dx' dz' - j\omega\mu \int_{II} J_{z_{II}} G dy' dz' + \omega^2 \epsilon \mu \int_{III} E_{y_{III}} G dx' dy' \\ &= 0 \quad \text{--- (11)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{z \text{ II}} &= -\frac{\partial \phi_{\text{II}}}{\partial z} - j\omega\mu \int_{\text{I}} J_{z \text{ I}} G dx' dz' - j\omega\mu \int_{\text{II}} J_{z \text{ II}} G dy' dz' + \omega^2 \epsilon\mu \int_{\text{III}} E_{y \text{ III}} G dx' dy' \\
&= 0
\end{aligned} \quad \text{--- (12)}$$

$$\begin{aligned}
E_{z \text{ III}} &= -\frac{\partial \phi_{\text{III}}}{\partial z} - j\omega\mu \int_{\text{I}} J_{z \text{ I}} G dx' dz' - j\omega\mu \int_{\text{II}} J_{z \text{ II}} G dy' dz' + \omega^2 \epsilon\mu \int_{\text{III}} E_{y \text{ III}} G dx' dy' \\
&= 0
\end{aligned} \quad \text{--- (13)}$$

이고, 앞의 경우와 마찬가지로 $E_{z \text{ I}}$ 과 $E_{z \text{ II}}$ 도 I 면과 II 면에서 경계조건을 만족하므로 영이되며, 식 (11), (12), (13)의 연산자 매트릭스 형태는

$$\begin{vmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} J_{z \text{ I}} \\ J_{z \text{ II}} \\ E_{z \text{ II}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \phi_{\text{I}}}{\partial z} \\ \frac{\partial \phi_{\text{II}}}{\partial z} \\ \frac{\partial \phi_{\text{III}}}{\partial z} \end{vmatrix} \quad \text{--- (14)}$$

이다. 이상과 같이 식(7), (10), (14)의 I, II, III 면에서 전류를 구하여 이 값을 식(1)에 대입하면 TEM cell 내부에서 전장을 구할 수 있다. 자장은

$$\begin{aligned}
\mathbf{H} &= \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} = \frac{1}{4\pi} \nabla \times \int_{\mathbf{v}} \mathbf{J}(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} d\mathbf{v}' \\
&= \frac{1}{4\pi} \int_{\mathbf{v}} \left[\nabla \frac{e^{-jkR}}{R} \times \mathbf{J}(x', y', z') + \frac{e^{-jkR}}{R} \nabla \times \mathbf{J}(x', y', z') \right] d\mathbf{v}' \\
&= -\frac{1}{4\pi} \int_{\mathbf{v}} (\mathbf{R} \times \mathbf{J}) \frac{1 + jkR}{R^2} e^{-jkR} d\mathbf{v}' \quad \text{--- (15)}
\end{aligned}$$

이고, 식(15)의 자장 x, y, z 성분은

$$H_x = \frac{1}{4\pi} \int_{\mathbf{v}} \left[(z - z')J_y - (y - y')J_z \right] \frac{1 + jkR}{R^3} e^{-jkR} dx' dy' dz' \quad \text{--- (16)}$$

$$H_y = \frac{1}{4\pi} \int_{\mathbf{v}} \left[(x - x')J_z - (z - z')J_x \right] \frac{1 + jkR}{R^3} e^{-jkR} dx' dy' dz' \quad \text{--- (17)}$$

$$H_z = \frac{1}{4\pi} \int_{\mathbf{v}} \left[(y - y')J_x - (x - x')J_y \right] \frac{1 + jkR}{R^3} e^{-jkR} dx' dy' dz' \quad \text{--- (18)}$$

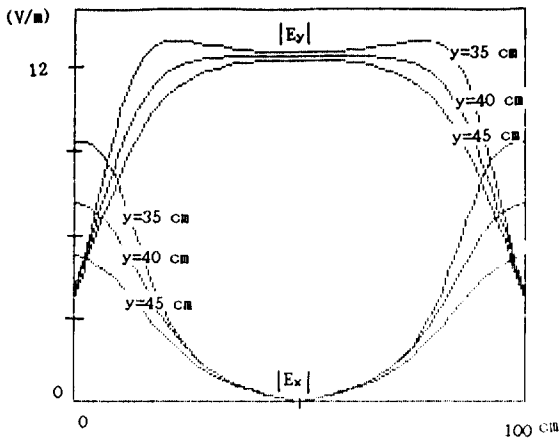
이다. 여기서 J_x, y, z 는 전장식 (7), (10), (14)에서 이미 구해진 값이며 경계면으로부터 TEM cell 내부의 자장 H_x, y, z 는 식(16), (17), (18)를 사용하여 구할 수 있다.

III. 결과 고찰

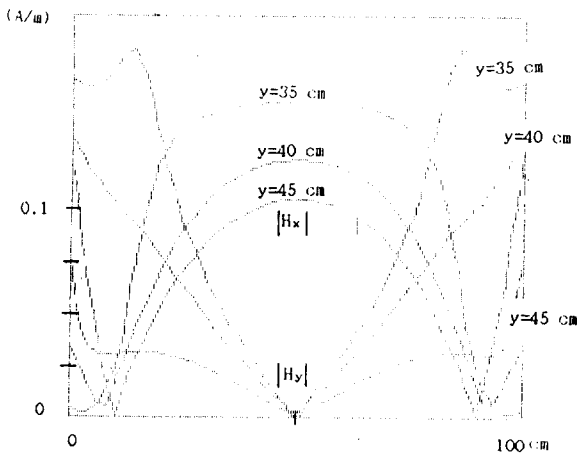
TEM cell의 구조는 그림1에 표시된 것 처럼 NIST에서 제작한 것과 동일한 치수로 $1 \times 0.6 \times 2m$ 의 크기를 가지고 있으며 septum의 폭은 72cm이고 판의 두께는 무시한다. 입력 주파수는 30,100,130

MHz에서 동작 시켰으며, 인가전압은 5Vp를 사용했다. 또한 전장과 자장은 $y=45cm$ 가 되는 위벽면과 septum의 중간 지점인 cell 공간에서 x, z 축을 따라 일정한 위치 변화에대해 계산된 값이다.

그림 4의 전장과 자장 성분은 참고문헌 [3]과 동일한 형태를 취하게 되는데 균일 평면파 E_y, H_x 는 septum 양끝으로 갈수록 감소하고, E_x, H_y 성분은 점차 더하게 되어 균일 평면파를 이루지 못한다.



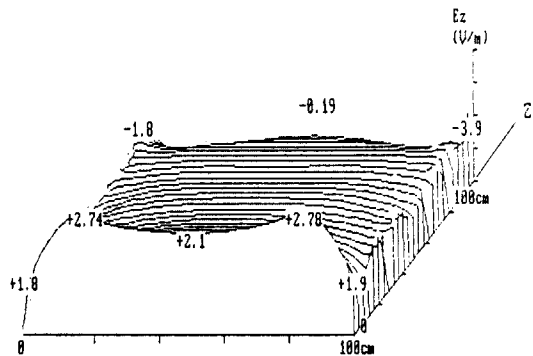
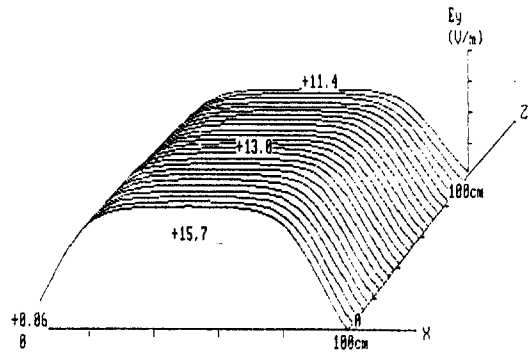
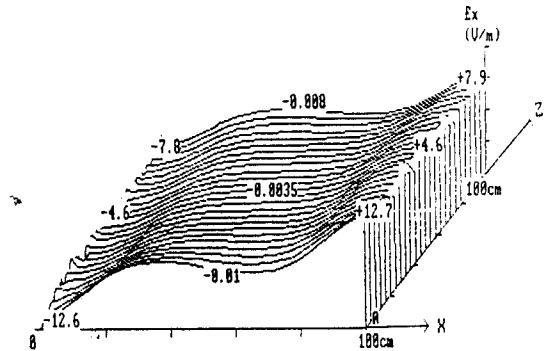
(a) 전장 분포(electric field distribution)



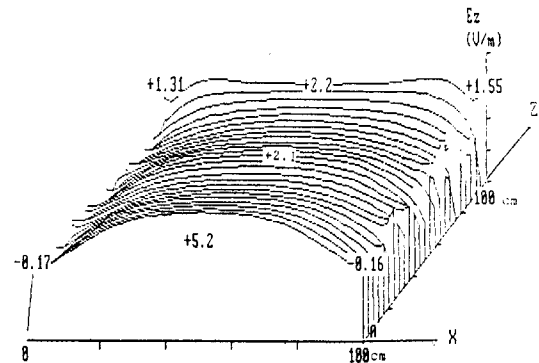
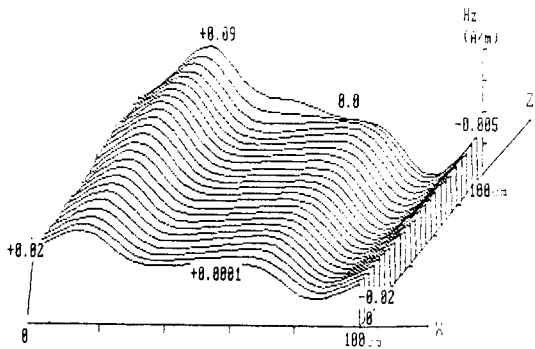
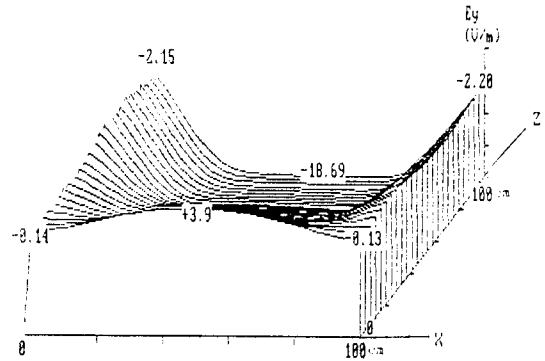
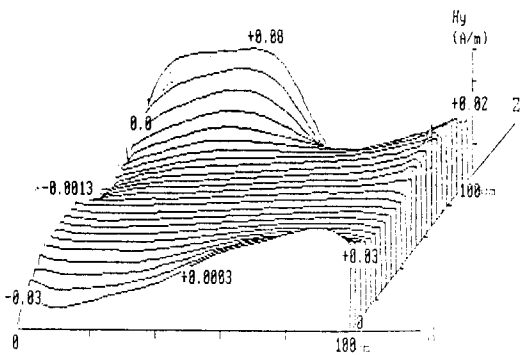
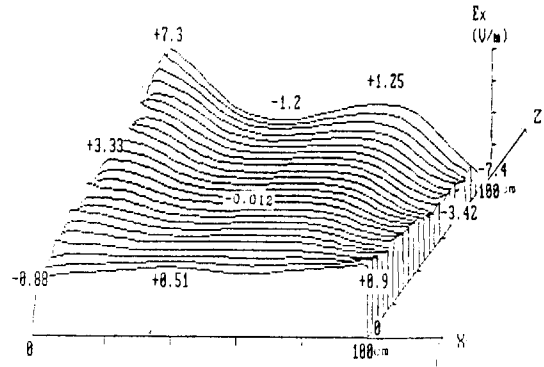
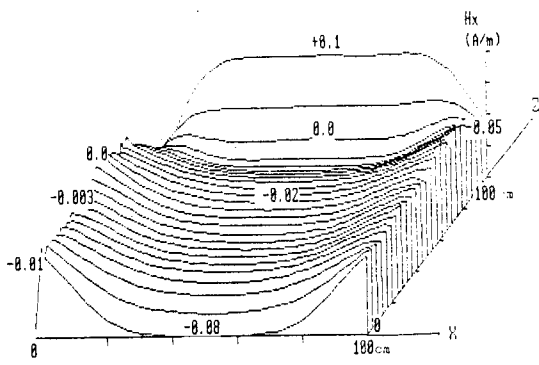
(b) 자장 분포(magnetic field distribution)

그림4. TEM cell 단면에서의 전장 및 자장 분포(d)

Fig 4. EM fields distribution of cross section at TEM cell (dc)



(a) 전장 분포(electric field distribution)



(b) 자장 분포(magnetic field distribution)

(a) 전장 분포(electric field distribution)

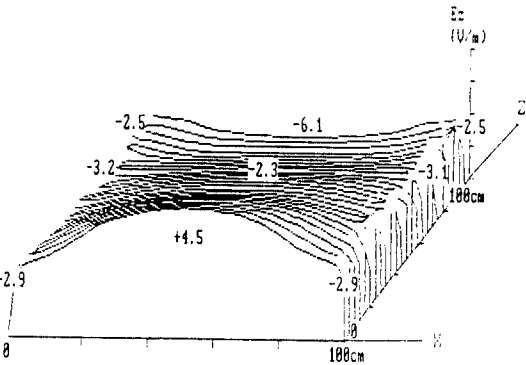
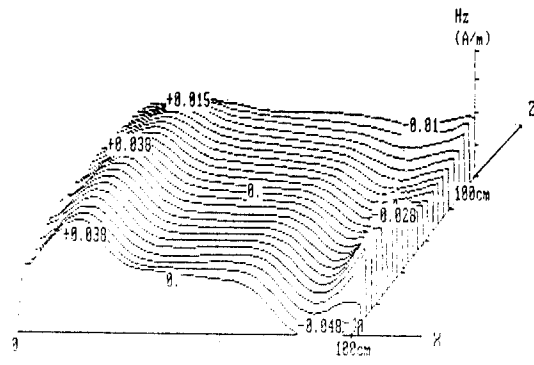
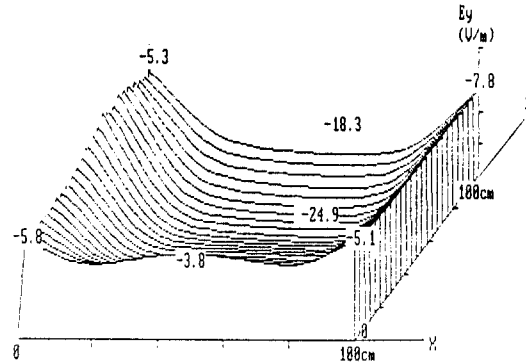
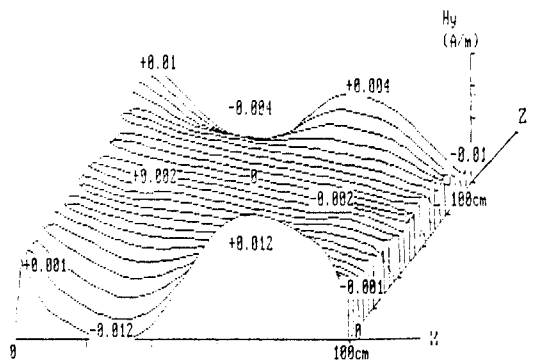
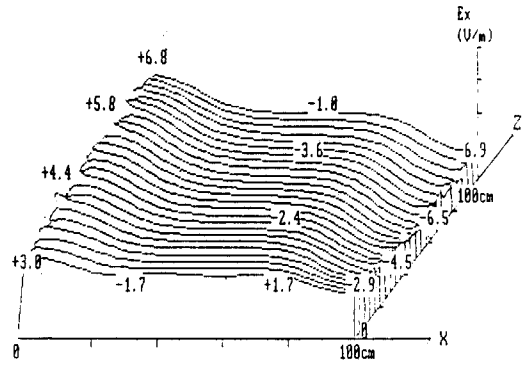
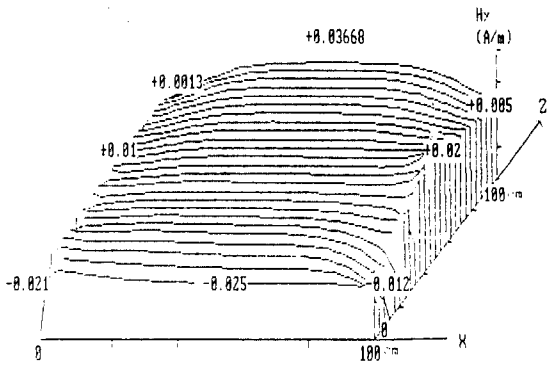
그림5. TEM cell내부 (z축을 따라)의 전장 및 자장 분포 (30 MHz)

Fig 5. EM fields distribution of TEM cell along Z axis (30 MHz)

그림 5,6에서 주파수를 직류에서 30 MHz, 100 MHz로 변화시켜 전장과 자장 성분의 변화 정도를 보인것으로 입력 급전점으로 부터 Z=50 cm이상,

150 cm이하에서 주파수 변화에 의한 전장과 자장 성분의 연관성을 보이고 있다.

이 성분들의 +, - 증가 값은 벡터의 진행 방향을 보인 것으로 절대값의 크기는 좌우대칭으로 일정한 평면파를 septum과 평행 도체판 사이에 발생하게 된다.



(b) 자장 분포(magnetic field distribution)

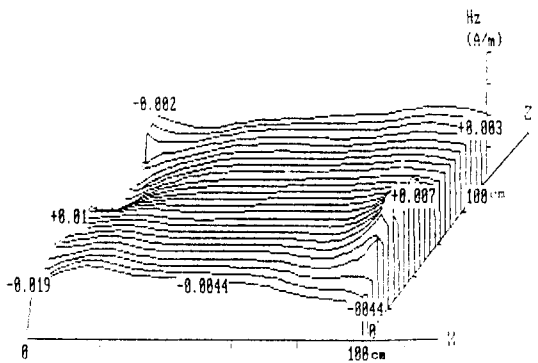
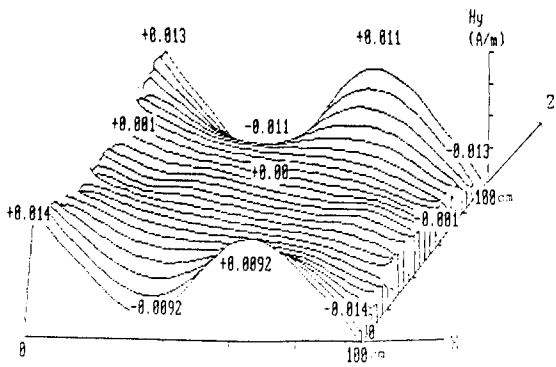
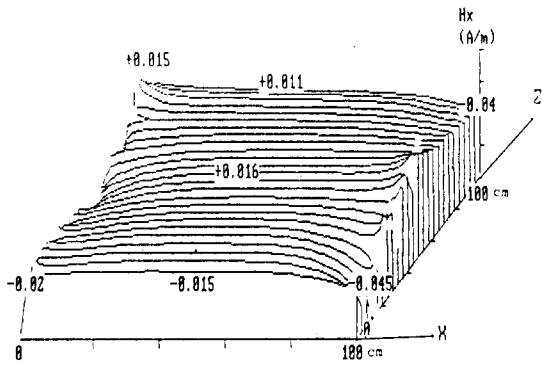
(a) 전장 분포(electric field distribution)

그림 6. TEM cell 내부 (z축을 따라)의 전장 및 자장 분포 (100MHz)

Fig 6. EM fields distribution of TEM cell along Z axis (100 MHz)

그림 7.에서는 주파수를 cell의 차단주파수(128 MHz) 근처인 130 MHz에서 전장과 자장 성분의 변화 정도를 보인 것이다. 그림 8.에서는 그림 7.의 전장 x, y, z 성분을 종합하여 표시한 것으로 TEM

cell 내부가 TE₁₀모드가 형성됨을 보이고 있다. 이 그림에서 나타나는 것처럼 septum 과 벽면 사이의 전장과 자장은 균일 평면파를 이루지 못하여 TEM 파를 나타내지 못하고 있음을 볼 수 있다. 그런데 이 주파수는 J. C. Tippet [10]의 차단주파수나 공진주파수와는 1/2 정도의 차이를 갖는 값이므로 본 논문에서는 최근 NIST의 M. Kanda[2]의 차단주파수를 기준으로 삼았다.



(b) 자장 분포(magnetic field distribution)

그림 7. TEM cell 내부 (z축을 따라)의 전장 및 자장 분포 (130 MHz)

Fig 7. EM fields distribution of TEM cell along Z axis (130 MHz)

IV. 결 론

본 논문에서는 맥스웰 방정식과 확장경계조건으로

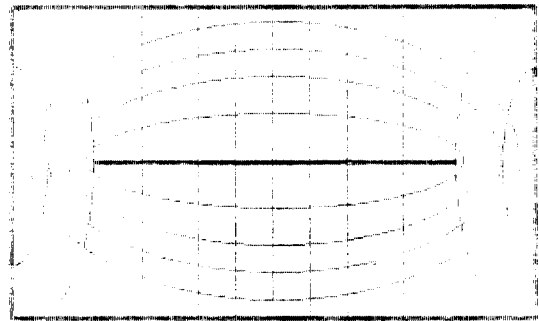


그림 8. TEM cell 내부의 전장과 자장 분포의 TE₁₀ 모드
Fig 8. TE₁₀ mode distribution of TEM cell

부터 경계적분방정식을 유도하여 수치해석을 하였으며, 이 식을 사용하여 TEM cell 내의 전장분포와 자장분포를 구하였다. 급전 전압 주파수는 0 Hz에서 기준값과 비교하여 동일함을 보였다. 주파수 변환은 30,100,130 MHz로 하였으며, 130 MHz에서 차단 주파수 조건을 만족하는 결과인 TE₁₀ 모드로의 변화 과정을 보였으며, 이 결과는 M. Kanda의 차단 주파수를 기준하였다. 이상에서 구한 결과값들은 TEM cell 내의 전자장의 분포나 변화 현상을 쉽게 알 수 있으며, 3차원 구조의 수치해석상 어려운 점을 극복할 수 있었다.

또한 이러한 결과들은 본 논문에서 제시한 경계적분방정식이 EMI의 기타 측정 기구에 대하여 전장장 분포를 해석할 수 있는 가능성을 제시한다. 본 논문에서 제시한 수치해석 방법에 의하여 TEM cell 내의 EUT(equipment under test)에 의한 복사장 해석이나, cell의 내부 용적과 차단 주파수의 상승을 위한 새로운 구조의 설계를 가능하게 할 것이며, UHF대에서 사용하는 전송 선로 측정실 (waveguide chamber)해석과 전자파 차폐실 내의 전자장의 산란 효과등을 해석할수 있는 좋은 방법이 될 수 있다.

參 考 文 獻

1. Crawford M.L., "Generation of Standard EM Fields using TEM Transmission Cells," IEEE Trans. Electromagn. Compat. , Vol. EMC-16, NO. 4, pp. 189-195, Nov. 1974

2. M. Kanda and R. D. Orr, "Generation of Standard Electromagnetic Fields in a TEM cell," NBS Tech. Note 1319, Aug. 1988
3. Spiegel R. J., Joines W. T., Blackman C. F. and Wood A. W., "A Method for Calculating EM Fields in TEM cells at ELF," IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. EMC-29, No. 4, PP. 265-272. Nov. 1987.
4. Larsen E. B., "Techniques for producing Standard EM Fields from 10 kHz to 10GHz for Evaluating Radition Monitors," EM Field in Biological Systems symposium, June 1978
5. Donaldson E. E, Free W. R., Robertson D. W. and Woody J. A., "Field Measurements made in an enclosure," IEEE proc., Vol. 66, No. 4, pp464-472, April 1978
6. P. C. Waterman, "Matrix formulation of Electromagnetic Scattering," IEEE Processing, pp. 805-812, 1965.
7. C. D. Taylor and D. R. Wilton, "The Extended Boundary Condition Solution of the Dipole Antenna of Revolution," IEEE Trans. Ant. propag. pp. 772-776, Nov. 1972.
8. K. A. AL. Badwaithy and J. L. Yen, "Extended Boundary Condition Integral Equation for perfectly conducting and Dielectric Bodies: Formulation and Uniqueness," IEEE Trans. Ant. propag. pp. 546~551, July 1975.
9. N. Morita, "Another Method of Extending the Boundary Condition for the Prdblem of Scattering by Dielectric Cylinders," IEEE Trans. Ant. propag. Vol. Ap-27, No.1, pp. 97-99, Jan.1979.
10. Tippet J.c, Chang D.C and Crawford M.L "An Analysis and Experimental Determination of the Cutoff Frequencies of Higher-Order TE Modes in a TEM cell," NBS NBSIR 76-841, June 1976.