

이 애 경* 이 상 회** 김 정 기*

*중앙대학교 전자공학과 **대유공전 전자과

Electromagnetic Fields in a TEM Cell Considering Dielectric Rod

Ae-Kyoung Lee *

Sang-Hoi Yi **

Jung-Ki Kim *

*Dept. of Electronic Eng. ChungAng Univ.

**Dept. of Electronics DaeYeu Tech. Junior College

Abstract

This paper deals with electromagnetic field characteristics in a TEM cell using boundary integral equation. It is formulated in terms of the scalar potential and the line charge density over the contour of the cell wall and the septum on the vertical section of the cell. To solve this equation and obtain the field distribution inside the cell, boundary element method is employed and the following five cases are considered:

1. the thickness of the septum is varied,
2. the frequency below the cell cut-off frequency is varied,
3. the width ratio of septum and cell wall is varied,
4. the supporting rod of the septum exists,
5. one side of the cell wall is opened.

The results of this method well agree with the known research works .

I. 서 론

전자파 장해를 일으키는 전자기기에서 발생하는 전자파의 주파수, 전자장 세기와 편파면 등을 측정하는 실험실은 측정 주파수에 따라서 TEM cell(10kHz-150MHz), 육의 시험장(25MHz-1GHz), 전자파 차폐 시험실(500MHz-40GHz)로 구분된다. 본 논문에서는 이 중에서 TEM cell에 대한 전자파 특성을 고찰한다.

TEM cell은 접지된 외부 도체와 50Ω의 입력 전송선에 연결된 금속판(septum)으로 구성되어 있어, 동축 케이블 안에서 발생하는 TEM 모드를, 정방형 구조(TEM cell)내에서 발생시키는 것이다. Larsen, E. B[1], Donaldson, W. R[2], Crawford, M. L[3], Kanda, M[4] Spiegel, R. J[5] 등에 의하여 TEM cell에 대한 기본적인 고찰이 이루어졌다.

본 논문은 TEM cell 단면에서 septum의 두께와 차단 주파수를 초과하지 않는 범위에서 주파수 변화에 대한 영향과 cell 횡단면과 septum의 폭 비율에 따른 변화가 전자장에 미치는 영향을 B.E.M.을 사용하여 해석하고 기존의 연구 결과와 비교 분석한다.[5,6]

그리고 일치된 결과를 기초로 하여 TEM cell의 한쪽 벽면을 개방했을 경우와 septum을 지지하는 유전체 막대를 고려할 경우 전자파 분포 특성을 연구 분석한다. 이 문제들을 해결하기 위해 우선 TEM cell내의 경계 적분 방정식을 유도하고 이 방정식을 경계 요소법에 의하여 수치해석 한다.

II. 수 식 유 도

파동 방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\nabla \cdot D(x, y, z) = \rho$$

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

이므로

$$\nabla \cdot [\epsilon \cdot (-\nabla\phi - j\omega A)] = \rho$$

$$\nabla^2\phi + j\omega\nabla \cdot A = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

이 식에 Lorentz 조건을 적용시키면, 다음의 Helmholtz 식을 얻을 수 있다.

$$(\nabla^2 + \omega^2 \mu \epsilon) \phi = - \frac{\rho}{\epsilon} \quad \text{---(2)}$$

2 차원에서 (2) 식의 Green 함수 $G(r)$ 은

$$G(r) = \frac{-j}{4} H_0^{(2)}(\beta r) \quad \text{---(3)}$$

이다. 식 (3)에서 β 는 $\omega \sqrt{\mu \epsilon}$ 이며, 다루고자 하는 TEM 모드에서 $\beta = \beta_z$ 이다. r 은 2차원(x-y 평면)에서의 거리를 나타낸다. 근거리에서 Green 함수는

$$G(r) = - \frac{j}{4} + \frac{1}{2\pi} \ln(\gamma \pi f \sqrt{\mu \epsilon} r) \quad \text{---(4)}$$

이다.

파동방정식에서 포텐셜은 다음과 같이 주어진다.

$$\phi(r) = \int_r \rho(r') / \epsilon \cdot G(r, r') dr' \quad \text{---(5)}$$

식(5)에서 포텐셜 함수 ϕ 를 TEM cell에서 septum과 벽면의 전위로 주면 전하 ρ 를 구할 수 있다.

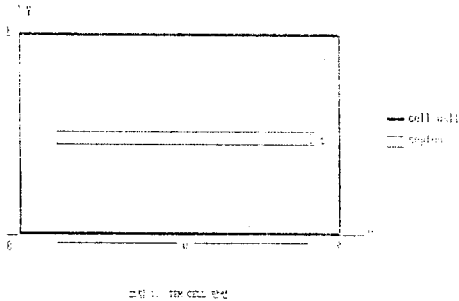
TEM 모드에서 $A_x = A_y = 0$ 이므로 2차원에서 식 (1)의 전계는

$$E_t(r) = - \nabla_t \phi(r) \quad \text{---(6)}$$

이다.

III. TEM CELL 내에서 수치해석

그림 1은 일반적인 TEM cell의 단면을 표시한 것으로 벽면의 길이는 $X = a, Y = b$ 이고 septum의 두께는 t 이고 폭은 w 이다.



적분 방정식 (5)는 수치해석에 의해 다음과 같이 연산자 L 에 관한 $L\rho = \phi$ 형태를 만족한다.[8]

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} \quad \text{---(7)}$$

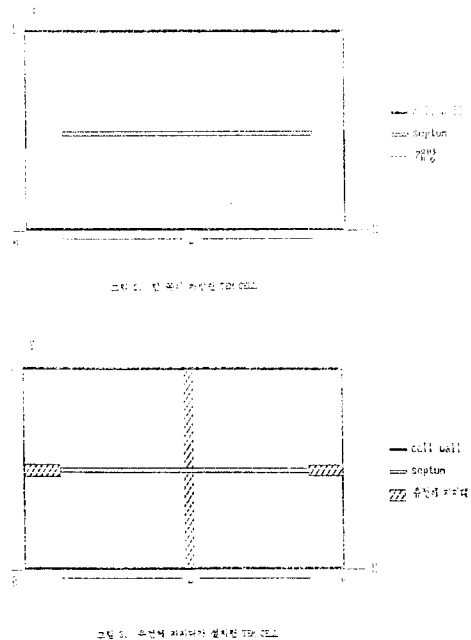
포텐셜 함수 ϕ 는 septum에는 $4.16 Vp(\phi_1)$, 벽면에는 $0 V(\phi_2)$ 가 가해진다. 식 (7)에서 septum과 벽면에 유지되는 전하량의 합은 $\sum \rho_{1,2} = 0$ 로서 외부로 발산되는 전속이 없는 차폐 공간의 조건을 만족한다.

그 다음 식 (6)의 gradient를 계산하면 경계요소법에 의한 경계면 내부의 전계식 (8)을 얻게되고 이 식에 식 (7)의 결과값 ρ 를 대입하여 cell 내의 전계 분포를 구할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} E_t &= -\nabla_t \int \rho(r') / \epsilon \cdot G(r, r') dr' \\ &= - \frac{1}{2\pi \epsilon} \sum_n \rho_n \Delta C_n \cdot \nabla \ln \frac{1}{\sqrt{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2}} \\ &= \frac{1}{2\pi \epsilon} \sum_n \rho_n \Delta C_n \cdot \left[\frac{(x-x_n)}{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2} a_x + \frac{(y-y_n)}{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2} a_y \right] \end{aligned} \quad \text{---(8)}$$

식 (8)에서 각각 E_x, E_y 성분을 구할 수 있다.

그림 2와 그림 3은 TEM cell의 한쪽 벽면을 개방한 경우와 septum에 유전체 지지대를 설치한 경우로서 지지대는 비유전율(ϵ_r)을 2.7로 하여 경계면을 septum(r_1), 벽면(r_2), 그리고 지지대(r_3)로 구분하여 수치해석 한다.



한 쪽 벽면을 개방하는 경우 septum 벽면, 그리고 비 유전율(ϵ_r)이 1 인 공기면으로 구분하여 계산할 수 있다. 수치해석을 하기위해 이 개방된 곳의 포텐셜은 가상 경계조건을 사용하여 접지면과 벽면을 등전위면으로 형성시켜 실험적 mapping 법을 이용하여 구한다.

$$\begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{pmatrix} \quad \text{---(9)}$$

식(9)는 이상의 경우에 적합한 수치해석 형태로 septum과 벽면의 길이는 주어진 값으로 고정하고 주어진 주파수(53 MHz)에서 결과값을 구하도록 한다.

IV. 결과 및 고찰

그림 1에서 a와 b는 각각 14cm, 8cm, 그리고 septum 폭 w는 10cm로 고정하고 주어진 주파수에서 septum의 두께 t를 0.5cm, 1cm, 1.5cm로 변화시킬 때의 cell 경계면의 전하 분포가 그림 4에 보이고, 내부 지점(x=0-14cm, y=2.47cm)의 전계 특성을 그림 5에서 보이고 있다.

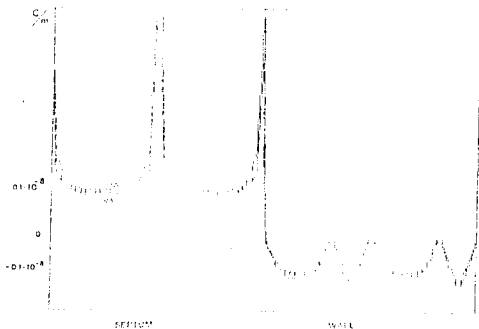


그림 4. 주파수 변화에 따른 TEM CELL 내 전하 분포

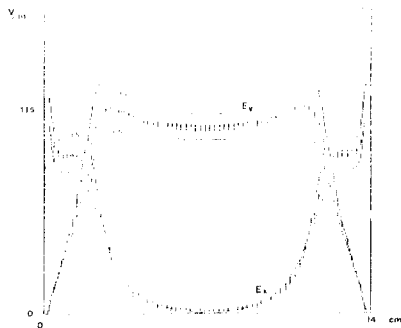


그림 5. 주파수 변화에 따른 TEM CELL 내 전계 분포

그림 4에서 보는 바와 septum과 cell 벽면의 전위차로 유지된 전하는 도체면 끝부분에 더 많이 모여 있다. 그리고 septum에는 양전하, cell 벽면에는 음전하가 분포하므로 전계는 septum에서 벽면으로 향하게 된다. 총전하량은 '0'로서 완전 밀폐된 폐곡면을 만족한다. 그림 5는 전계의 x,y 성분을 표시한 것으로 septum의 중앙 부분에서는 주로 E_y 성분만이 존재하고 끝 모서리 부분으로 갈수록 전계가 cell의 측면 벽으로 향하게 되므로 E_x 성분이 크게 나타나므로 점차 균일 전계를 형성하지 못하는 것을 보이고 있다. septum의 두께변화에 있어서는 septum의 두께가 얇을수록 E_x 성분이 상대적으로 작고, E_y 성분이 septum 양 끝부분에서 변화가 적어 균일 전계를 이룬다.

이번에는 그림 1의 cell에서 septum의 두께는 고정하고, 주파수를 10MHz, 53MHz, 106MHz로 변화시킬 때 cell 내의 전하 및 전계 분포를 그림 6,7에 나타내고 있다. 전계의 계산 위치는 앞과 동일하다.

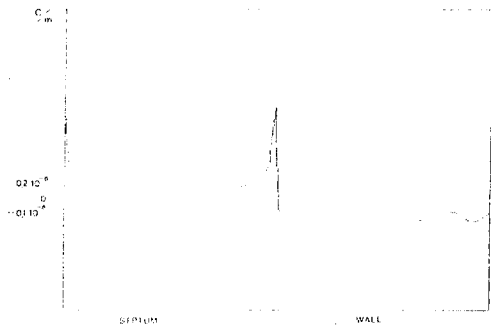


그림 6. 주파수 변화에 따른 TEM CELL 내 전하 분포

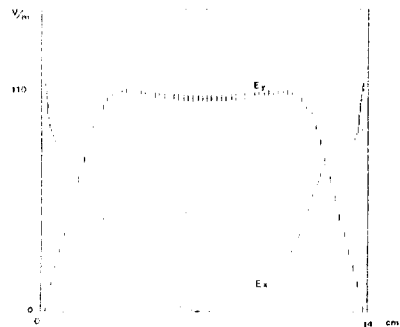


그림 7. 주파수 변화에 따른 TEM CELL 내 전계 분포

전계와 전하는 주파수 변화에 거의 관계 없이 일정한 값을 유지하고 있어 차단 주파수 범위 이하에서는 일정한 TEM 모드를 형성하고 있는 것을 나타내고 있다.

다음은 cell벽면의 길이는 고정시키고 septum의 폭(w)을 cell의 가로 길이(a)의 0.5, 0.7, 0.9 배로 변화시킬 때의 전하와 전계 분포를 알아본다.

그림 8,9 는 각각 이 경우에 전하와 전계의 변화를 표시한 것이다. septum의 폭이 클 수록 균일 전계의 영역이 넓어짐을 알 수 있다.

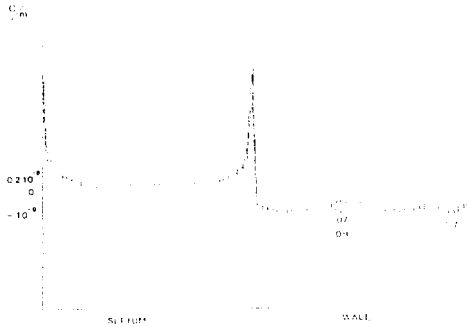


그림 8. 전하와 전계의 변화에 대한 그래프

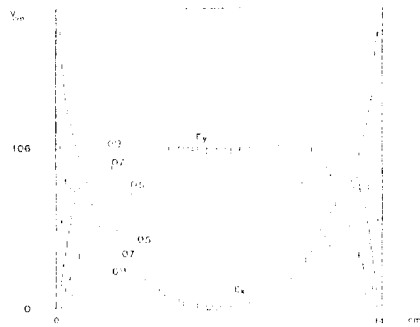


그림 9. 전하와 전계의 변화에 대한 그래프

이상의 결과는 기존의 결과와 좋은 일치를 보인다. [5,6]. 참고로 Spiegel이 준정적 근사에 의해 구한 전계 분포를 그림 10 에 나타내었다.

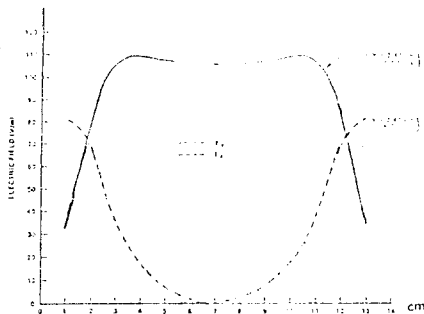


그림 10. Spiegel의 전계 분포

이제까지의 결과를 토대로 cell의 한 쪽이 개방된 경우(그림 2)와 septum을 고정시키기 위한 유전체 지지대가 있는 경우(그림 3) 전계 분포에 어떠한 영향을 미치는가 알아 본다.

그림 11 은 벽면을 완전 도체로 가정한 앞의 경우와 달리 비유전율이 1인 창문을 설치한 경우 TEM cell내부의 전계 특성을 보인 것이다. 이 그림에서 나타나는 것처럼 개방된 부분에서 차단된 경우에 비해 E_x성분이 비교적 적게 분포하는 균일파를 보이고 있어 전자파 내성 측정시 차단 주파수가 고려된다면 공간 확보에 이득을 얻을 수 있을 것이다.

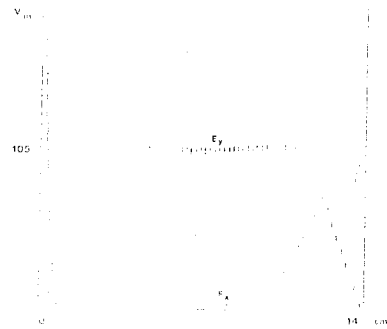


그림 11. 비유전율이 1인 창문을 설치한 경우의 전계 분포

그림 12는 septum에 유전체 지지대를 붙인 경우, 유전체에 의한 전계의 산란으로 얻고자하는 균일 전계에 좋지 않은 영향을 미치게 되며, 유전체 두께가 굵을 수록 그 정도는 심한 것으로 나타나고 있다.

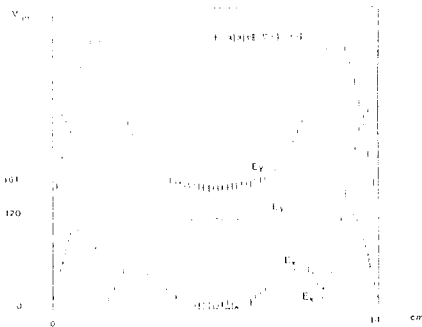


그림 12. 유전체 지지대를 붙인 경우의 전계 분포

V. 결 론

본 논문에서는 TEM cell 내부에서 분포하는 전계 특성을 septum의 두께, 주파수, septum 폭 변화에 대해 기존의 연구 결과와 비교 하였고, 이 결과값의 일치됨을 근거로 TEM cell에서 벽면이 개방된 경우와 septum을 지지하는 유

전계 봉이 있는 경우의 전계 특성을 경계요소법으로 수치해석 하였다. 벽면이 개방된 경우, 전계 변화를 얻기 위해 개방된 지점의 전위값은 septum(4.16 V), 벽면과 지표면 (0 V)사이에 형성되는 등전위면을 mapping 방법으로 구했다.

TEM cell에서 가장 관심을 갖고 있는 내부 용적 문제와 차단 주파수 문제[7]는 본 논문에서 제시된 이론을 근거로 좀더 깊이 있는 해석을 할 수 있으리라 전망 한다.

VI. 참고 문헌

- [1] Larsen, E.B. "Techniques for producing standard EM fields from 10 kHz to 10GHz for evaluating radiation monitors."
- [2] Donaldson, E.E. ; Free, W.R. ; Robertson, D. W. ; Woody, J. A. Field measurements made in an enclosure. Proc. IEEE 66(4) : 464-472 ; 1978 April
- [3] Crawford, M.L. Generation of standard EM fields using TEM transmission cells. IEEE Trans. Electromagn. Compat. EMC-16(4) : 189-195 ; 1984 November.
- [4] M. Kanda and R.D.Orr, " Generation of Standard Electromagnetic Fields in a TEM cell ", NBS technical note 1319, p246, Aug. 1988.
- [5] Spiegel, R.J. ; Joines, W.T. ; Blackman, C.F. ; Wood, A. W. A method for calculating electric and magnetic fields in TEM cells at ELF. IEEE Trans. Electromagn. Compat. EMC-29(4) : 265-272 ; 1987 November.
- [6] Tippet, J.C. ; Chang, D.C. Radiation characteristics of dipole sources located inside a Rectangular, coaxial transmission line. Nat. Bur. stand. (U.S.) NBSIR 75-829 : 1976 January.
- [7] Tippet, J.C. ; Chang, D.C. ; Crawford, M.L. "An Analytical and experimental determination of the cutoff frequencies of higher order TE modes in a TEM cell."
- [8] R.F. Harrington, Field Computation by Moment Methods. New York : Macmillan, 1968.