

고차 모드로 인한 TEM Cell의 대역 제한

(Bandwidth Limitations of the TEM Cell due to Higher Order Modes)

李 愛 卿*, 李 相 檜**, 金 正 祺***

(Ae Kyoung Lee, Sang Hoi Yi, and Jung Ki Kim)

要 約

본 논문에서는 EMC 시험에 사용하는 TEM cell내의 전자장 분포를 수치해석 한다. 전자장은 주파수의 증가에 따라 왜곡이 일어난다. 이 왜곡은 고차 모드와 공진으로 인한 것으로 TEM cell의 사용에 있어 대역 제한을 가져온다. cell의 크기가 커질수록 상한 주파수는 낮아진다. TEM 모드는 cell의 테이퍼(taper) 영역의 끝을 통해서 진행을 한다. 그러나 고차모드는 테이퍼 영역이 너무 작아서 더 이상 진행할 수 없는 어떤 지점에서 반사를 하게 된다. 본 논문에서는 최초 두개의 TE모드 차단 주파수와 최초 여섯개의 TE_{mnp} 공진 주파수를 전계 패턴으로부터 확인하며 그 결과는 다른 데이터와 일치한다. 공진을 지속시키는 벽면 전류를 보인다. 대형 cell에 있어서는 사용 가능 주파수 영역을 최초의 고차 모드 이상으로 확장하는 것이 요구된다. 본 연구는 공진 억제에 의하여 주파수 대역폭을 확장하려는 시도를 제안한다.

Abstract

In this paper the electric and magnetic field distributions in a TEM cell used for EMC testing are analyzed numerically. The fields are distorted with the increase of frequency. These distortions are due to higher order modes and resonances and cause the bandwidth limitations in the use of TEM cells. The upper frequency is lower for larger cells. The TEM mode propagates through the tapered ends of the cell. Higher order modes however, are reflected at some points within the tapered region where it becomes too small to support the modes. The first two TE mode(TE_{01} and TE_{10}) cutoff frequencies and the first six TE_{mnp} resonant frequencies are identified in a TEM cell ($1 \times 0.6 \times 2m$, $w=0.72m$) from field patterns and the results are consistent with others' data. The circumferential wall currents to support resonances are shown. For the large cell it is desired to extend the usable frequency range above the cutoff frequency of the first higher order mode. This study proposes an attempt to expand the frequency bandwidth by a resonance suppression.

I. 서 론

TEM cell은 그 단면이 동축 케이블을 구형으로 확장한 형태(rectangular coaxial transmission line-RCTL)를 가지며 끝으로 갈수록 단면적이 줄어들고 양끝에서 동축 케이블과 연결되는 구조를 갖는다. TEM cell은 저주파대(주파수 한계는 cell의 구조에

*準會員, ***正會員, 中央大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Chungang Univ.)

**正會員, 大有專門大學 電子科
(Dept. of Elec. Eng., Daeyou Junior College)
接受日字: 1991年 8月 22日

따라 다르다.)에서 동축 케이블의 중앙 도체와 연결되는 셉텀과 외부도체 사이에 원역장에서와 같은 균일 TEM 모드를 형성하므로 이러한 전자장을 이용하여 시험체(EUT)의 전자파 감응성(EMS)이나 복사 측정, 전자파 프로브와 측정기 교정, RF복사 노출 시 생체 영향에 대한 연구 등에 사용된다.¹¹⁾ 그러나 TEM cell은 주파수 증가에 따라 고차모드를 갖게 되고 양 끝이 경사를 가지며 좁아지는(tapered) 구조로 인해 공진이 발생하므로 고차모드 대역에서는 EMS 또는 RF측정을 위해 TEM cell을 사용하기 어려워진다. 따라서 TEM cell의 사용 가능 주파수 범위가 연구되어 왔다. 본 논문에서도 cell의 주파수 사용 범위 연구와 나아가 사용 대역 확장을 위해 TEM 모드 대역 이후를 3차원 수치 해석한다. 각 독립된 모드의 field 패턴¹²⁾을 중첩시킴으로써 수치해석에서 얻어진 cell내의 위치에 따른 전계의 왜곡 현상으로부터 고차 모드의 차단 주파수를 구하고 그 결과 값은 Kanda, Gruner, J. C. Tippet의 값과 비교 검토한다.¹³⁾ 그리고 수치해석 결과 전계 강도의 이상 변이로부터 공진 주파수를 확인하며, 결과 값은 D. A. Hill⁷⁾의 값과 일치함을 보인다. TEM cell이 대형화할수록 차단 주파수는 낮아지므로 사용 주파수 화장을 더욱 필요로 하게 된다. 본 논문에서는 공진을 지속시키는 강한 벽면 전류분포를 보이며, 전류분포 및 공진 유효 길이로부터 공진의 발생을 억제시켜 기존의 cell로써 고주파대까지 EMC 측정의 가능성을 제안하며 결론에서 본 논문의 수치 해석 기법을 이용하여 연구 가능한 과제를 살펴본다.

II. 수치 해석

1. TEM cell 내의 적분방정식 유도

해석하게 되는 TEM cell은 그림1의 (c)와 같이 taper 영역을 제외한 직육면체 구조로 I(x-z), II(y-z)면과 개방된 III(x-y)면으로 구분한다. 맥스웰 방정식으로부터 시간 조화 함수의 전계와 자계식은

$$E = -\nabla\phi - j\omega A \tag{1}$$

$$H = \frac{1}{\mu} \nabla \times A \tag{2}$$

이다. 중앙도체(septum)와 외부도체면은 두께가 없는 완전 도체로 가정하여 전계의 접선 성분이 영이 되는 경계조건을 적용하고, 개방 II면에서는 등가 전하와 등가 변위전류가 존재하는 것으로하여 전체 경계면을 폐곡면(closed surface)화하여 식(1)과 (2)의 스칼라(ϕ)와 벡터 포텐셜(A)을 식(3), (4)의 경계적분방

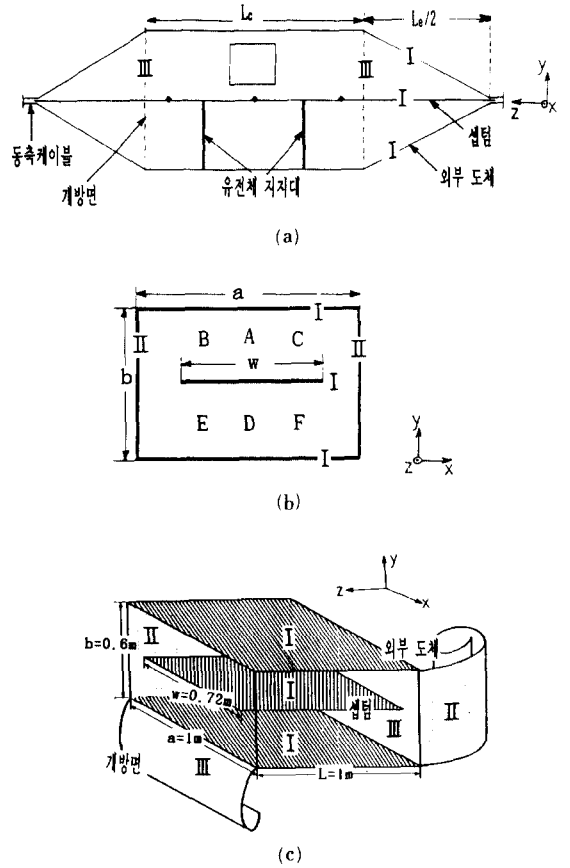


그림 1. TEM cell구조

(a) 측면 (b) 단면 (c) 해석 영역

Fig. 1. Structure of TEM cell.

(a) side view, (b) cross-sectional view, (c) considered domain.

정식(BIE)으로 유도할 수 있다.

$$\phi(x, y, z) = \frac{1}{\epsilon} \int_V \rho(x', y', z') G(x, y, z | x', y', z') dv' \tag{3}$$

$$A(x, y, z) = \mu \int_V J(x', y', z') G(x, y, z | x', y', z') dv' \tag{4}$$

1. 전자계를 구하기 위한 해석 절차

1) 전하분포 해석

식(1)에서 스칼라 포텐셜 ϕ 는 인가 전압으로 셉텀에는 10V_{pp}로 급전하고 외부 도체는 접지 시킨다. 개방면 III에서는 필드맵(field map) 결과에 의한 등가 전위를 지정한다. 그 과정을 그림2에 나타내었다.

도체면을 완전 도체로 가정하면 전계는 도체 표면에서 수직이어야 하므로 테이퍼 영역에서는 전계 곡선이 그림2의 P, Q 또는 S와 같이 cell의 끝점을 중

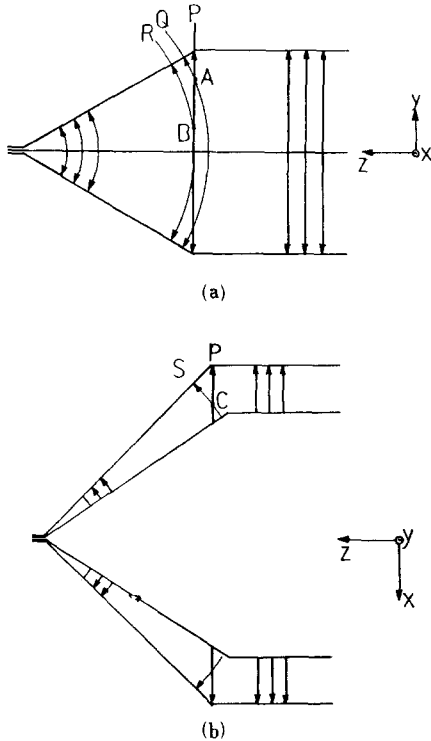


그림 2. III면에서의 등가전위
 (a) 측면에서 본 등가전위
 (b) 위에서 본 등가전위
 Fig. 2. Equivalent potential at the third(III) boundary surface.
 (a) equivalent potential at side view,
 (b) equivalent potential at top view.

심으로 하는 원의 형태를 갖지만 단면이 일정한 cell의 중간 영역에서는 P와 같이 (a)에서는 y축 (b)에서는 x축에 평행한 직선으로 전계가 형성된다. 따라서 그 경계인 III면의 필드셀(field cell)을 정확히 구하기 어려우므로 각 영역의 경우에 대한 평균치를 등가전위로 취하였다. 일례로 A점의 등가전위는 Q를 전계 곡선으로 하는 등가전위와 P를 전계 곡선으로 하는 등가전위의 평균치를 취하였다. 이제 식(3)에서의 스칼라 포텐셜 ϕ 를 모든 경계면에서 정의하였으므로 이로부터 경계면 I, II 그리고 III에서의 표면 전하밀도(ρ)를 구한다.

2) 전류분포 해석

전 경계면의 전하밀도를 식(1)의 $\nabla\phi$ 에 대입하여 계산하고, I, II의 전계의 접선성분을 0을 경계조건으로 적용하고, III면에서는 전계 $E=J/j\omega\epsilon$ 를 대치하면 이는 전류밀도에 관한 연립 방정식 형태가 되므

로 전류밀도 J를 구하게 된다. 그 과정을 다음 식에 나타내었다.

$$E_{xI}=0 = -\frac{\partial\phi_I}{\partial x} - j\omega\mu\int_I J_{xI} G dx' dz' - j\omega\mu\int_{III} J_{xIII} G dx' dy'$$

$$= -\frac{\partial\phi_I}{\partial x} - J_{xI} - j\omega\mu\int_I G dx' dz' + \omega^2\epsilon\mu\int_{III} E_{xIII} G dx' dy'$$

(5)

$$E_{xIII} = -\frac{\partial\phi_{III}}{\partial x} - j\omega\mu\int_I J_{xI} G dx' dz' - j\omega\mu\int_{III} J_{xIII} G dx' dy'$$

$$= -\frac{\partial\phi_{III}}{\partial x} - j\omega\mu\int_I J_{xI} G dx' dz' + \omega^2\epsilon\mu\int_{III} E_{xIII} G dx' dy'$$

(6)

이를 행렬식으로 나타내면

$$\begin{vmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} J_{xI} \\ E_{xIII} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \partial\phi_I/\partial x \\ \partial\phi_{III}/\partial x \end{vmatrix}$$

(7)

윗 식에서 E_{xI}, E_{xIII} 는 각 경계면 I, III의 관측점(O. P.)에서 전계를 나타내며 J_{xI}, J_{xIII} 는 I, III면의 전류를 나타낸다. 식(5)에서 $E_{xI}=0$ 은 I면에서 전계의 접선 성분인, E_x 가 영이 되는 경계조건을 만족하기 때문이다. 식(6)은 미지수 E_{xIII} 가 Fredholm 2종 방정식 형태를 만족한다.

식(7)에서 미지수 J_{xI}, E_{xIII} 를 구할 수 있다. 전계 y 성분은 x성분을 구하는 방법과 동일하게

$$E_{yI}=0 = -\frac{\partial\phi_{II}}{\partial y} - j\omega\mu\int_{II} J_{yII} G dy' dz' + \omega^2\epsilon\mu\int_{III} E_{yIII} G dx' dy'$$

(8)

$$E_{yIII} = -\frac{\partial\phi_{III}}{\partial y} - j\omega\mu\int_{II} J_{yII} G dy' dz' + \omega^2\epsilon\mu\int_{III} E_{yIII} G dx' dy'$$

(9)

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

$$\begin{vmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} J_{yII} \\ E_{yIII} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \partial\phi_{II}/\partial y \\ \partial\phi_{III}/\partial y \end{vmatrix}$$

(10)

z성분 전계는

$$E_{zI}$$

$$= -\frac{\partial\phi_I}{\partial z} - j\omega\mu\int_I J_z G dx' dz' - j\omega\mu\int_{II} J_{zII} G dy' dz' + \omega^2\epsilon\mu$$

$$\int_{III} E_{zIII} G dx' dy' = 0$$

(11)

$$E_{zII} = -\frac{\partial \phi_{II}}{\partial z} - j\omega\mu \int_1 J_{zI} G dx' dz' - j\omega\mu \int_{II} J_{zII} G dy' dz' + \omega^2 \epsilon \mu \int_{III} E_{yIII} G dx' dy' = 0 \quad (12)$$

$$E_{zIII} = -\frac{\partial \phi_{III}}{\partial z} - j\omega\mu \int_1 J_{zI} G dx' dz' - j\omega\mu \int_{II} J_{zII} G dy' dz' + \omega^2 \epsilon \mu \int_{III} E_{yIII} G dx' dy' \quad (13)$$

이고, 앞의 경우와 마찬가지로 E_{zI} 과 E_{zII} 도 I면과 II 면에서 경계조건을 만족하므로 영이되며, 식(11), (12) 그리고 (13)의 행렬식은

$$\begin{vmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} J_{zI} \\ J_{zII} \\ J_{zIII} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \partial \phi_I / \partial z \\ \partial \phi_{II} / \partial z \\ \partial \phi_{III} / \partial z \end{vmatrix} \quad (14)$$

3) 전계분포 해석

계산된 전하밀도 ρ 와 전류밀도 J 를 가지고 식(1)에 다시 대입하여 cell 공간내 전 영역에서 전계분포를 얻을 수 있다.

4) 자계분포 해석

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

이고, 식(15)의 자계의 각 성분은

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

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

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

이므로 앞에서 구한 전류밀도를 식(16), (17) 그리고 (18)에 대입하여 cell 내부 전 영역에서 자계분포를 구한다. 참고로 TEM cell의 경계면 (I, II 그리고 III)은 총 280개의 분할요소로 구성되어 수치해석 하였으며 그림3에 보이는 cell내 공간의 전자계는 y값이 일정한 x-z 평면의 1000 (40×25)개의 측정점에서 구한

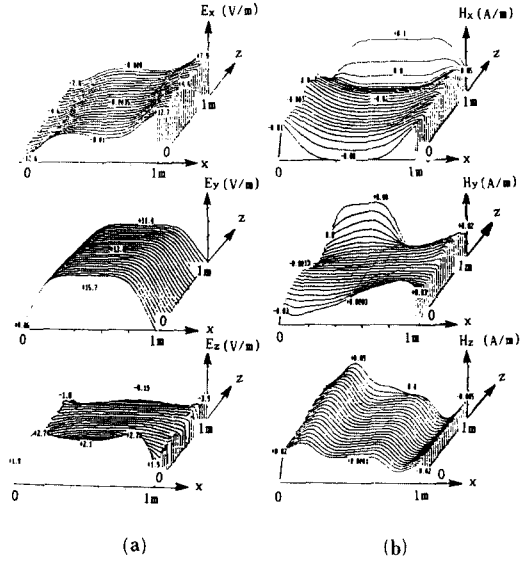


그림 3. TEM cell 내부의 전계 및 자계분포 (30MHz)

(a) 전계분포 (b) 자계분포
Fig. 3. The electric and magnetic field distributions in the TEM cell (30 MHz).
(a) electric field, (b) magnetic field.

값이다. 이는 30MHz에서 해석한 결과로서 R. J. Spiegel의 준정적 결과와 좋은 일치를 보인다.^{2,3)}

III. 고차모드 차단 주파수⁴⁻⁶⁾

Gruner에 의하면 그림1과 같은 cell에 50Ω으로 급전하고 가로축 a=1m, 높이 b=0.6m, 셉텀의 폭 w=0.72m인 TEM cell에서 TE₁₀ 모드는 150MHz이고, TE₀₁ 모드는 약 135MHz의 차단주파수를 갖는다.^{4,6)}

본 논문에서는 중전의 고유치나 임피던스에 의한 결정적 차단 주파수가 아니라 전계분포 자체에서 고차모드의 차단주파수를 결정하기 위하여 II의 수치해석 과정을 주파수 변화에 따라 반복시켜 그 결과의 필드 패턴(field pattern)과 단일 모드의 필드 패턴의 비교를 통해 모드 별 차단주파수를 분석하였다. 단일모드 전계 패턴의 이해를 돕기 위해 처음 세개의 단일모드의 필드 패턴을 S. K. Das의 논문에서 참고하여 그림5에 표시한다.⁸⁾ 단, 이 패턴은 셉텀의 전압이 양수인 때를 기준한 것이다.

1. TE₀₁모드의 차단주파수

TEM cell내의 B, E, C 그리고 F점에서 수치해석 결과 f_{c01} 근처의 주파수에서 이미 TE₁₀ 모드가 약하게 중첩되고 있으나 TE₁₀ 모드의 E_x성분은 거의 존

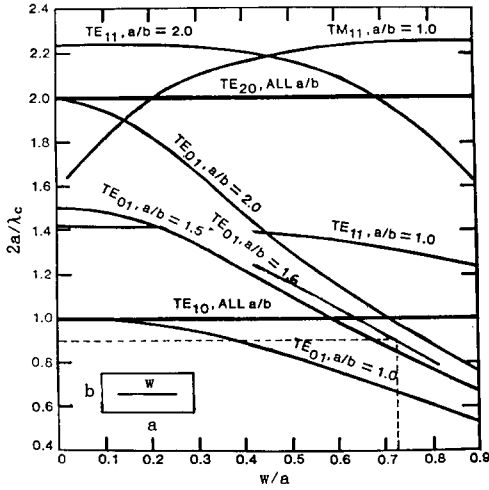


그림 4. TEM cell내의 고차모드 차단 주파수 특성곡선 (1×0.6×2m, w=0.72m) [6]
 Fig. 4. Cutoff frequency characteristics of higher order modes in the TEM cell (1×0.6×2m, w=0.7m) [6]

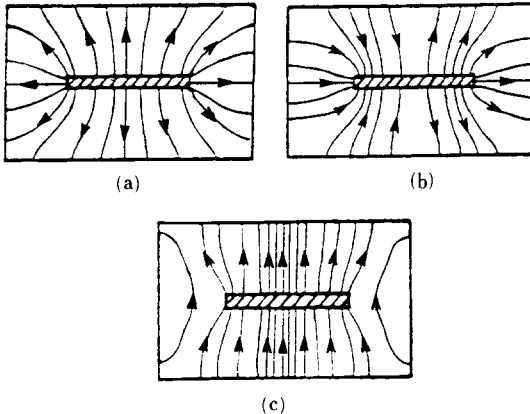


그림 5. TEM cell 단면에서의 모드별 필드(field) 패턴 [8]
 (a) TEM 모드 (b) TE₀₁ 모드 (c) TE₁₀ 모드
 Fig. 5. Field pattern classified by each mode in a TEM cell.
 (a) TEM mode, (b) TE₀₁ mode, (c) TE₁₀ mode.

채하지 않음을 다음2가지 점에서 알 수 있다. 먼저 그림5의 TE₁₀의 전계 패턴에서 알 수 있듯이 B, E, C, F점에서는 A점이나 D점에서 만큼 세지는 않으나 전계가 y 성분만 가짐을 볼 수 있고 그 다음 수치해석 결과 셉텀 아래와 위의 E_y값은 분명히 차가 있는

것으로 보아 TE₁₀ 모드가 중첩되었음을 알 수 있으나 그림 6(b)에서 보듯이 E_x 값은 변화가 없다. 따라서 TE₀₁ 모드의 차단주파수를 결정하는데 있어 E_x 성분만을 가지고 TE₀₁ 모드와 TEM 모드의 패턴을 비교하여 차단주파수를 얻을 수 있다. 그 결과 TE₀₁ 모드의 차단주파수는 약 135MHz로 나타났다.

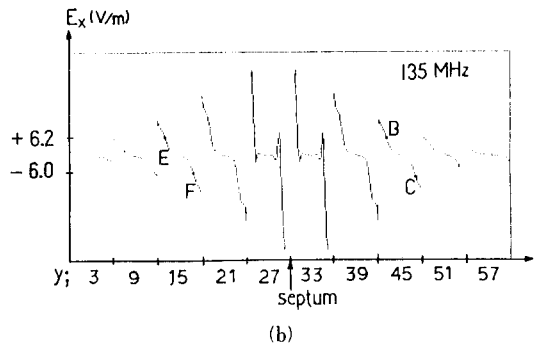
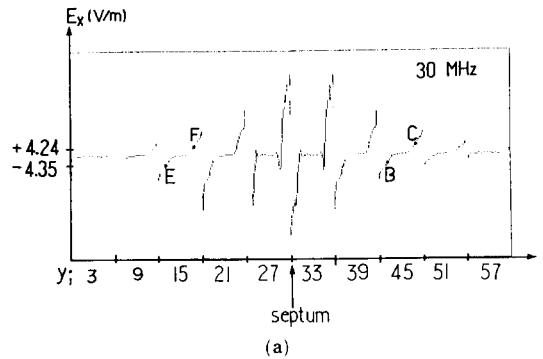


그림 6. TEM 모드와 다중 모드의 E_x
 (a) TEM 모드 (f=30MHz)의 E_x
 (b) 다중 모드 (f=135MHz)의 E_x
 Fig. 6. E_x of multimode and TEM mode.
 (a) E_x at TEM mode (f=30MHz),
 (b) E_x at multimode (f=135MHz).

2. TE₁₀ 모드의 차단 주파수

TE₁₀ 모드의 경우에는 Hill이 TE₁₀ 모드의 존재를 점E와 C에서 E_y의 비교를 제안한 반면 본 논문에서는 그림5의 field 패턴으로부터 점A와 D에서 TE₀₁ 모드의 E_y 성분이 거의 없으므로 그 위치에서 TEM 모드와 TE₁₀ 모드의 E_y 성분을 비교함으로써 TE₁₀ 모드의 차단주파수를 구하였다. 그 결과 TE₁₀ 모드의 차단주파수는 약 150MHz로 나타났다. 그림 7은 30MHz와 150MHz에서 위치별 E_y성분을 표시한 것

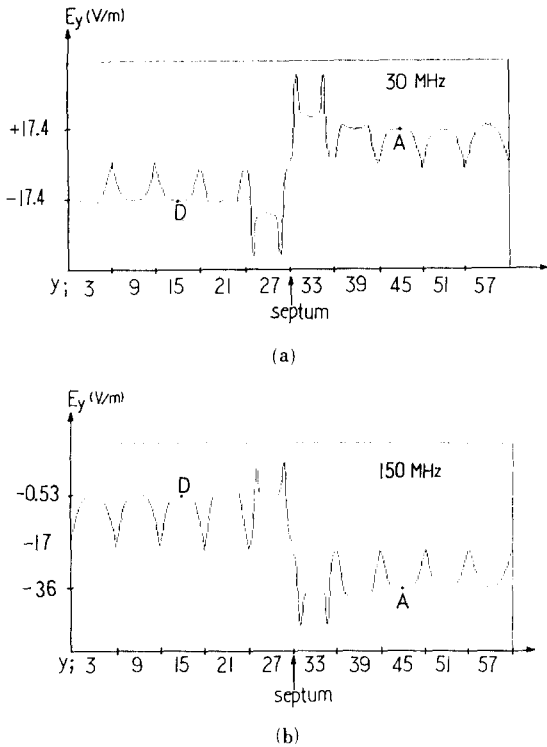


그림 7. TEM 모드와 다중 모드의 E_y
 (a) TEM 모드 ($f=30\text{MHz}$)의 E_y
 (b) 다중모드 ($f=150\text{MHz}$)의 E_y
 Fig. 7. E_y of multimode and TEM mode.
 (a) E_y at TEM mode ($f=30\text{MHz}$),
 (b) E_y at multimode ($f=150\text{MHz}$).

이다. 150MHz에서 셉텀 위,아래가 동일 비율로 증
 컹되었음을 쉽게 알 수 있다.

IV. 공진 주파수 [7]

그림1에서 보는 바와 같이 cell의 단면은 점차 작
 아지기 때문에 고차모드에서 파가 일정한 지점에서
 는 계속 진행하지 못하고 공진을 겪게 된다. 이때
 cell에서 그 양지점간 거리가 공진 유효길이 L_{mn} 이
 다. 공진주파수와 유효길이 L_{mn} 은 식(19, 20)과 같이
 쓸 수 있다.

$$f_{\text{Rmn}}^2 = f_{\text{Cmn}}^2 + \left[\frac{pc}{2L_{mn}} \right]^2 \tag{19}$$

- 단, f_R : 공진주파수, mn : 모드, p : 공진순서
- c : 파의 진행속도
- f_C : 차단주파수
- L_{mn} : mn 모드에서 유효길이

$$L_{mn} = L_c + X_{mn}L_e \tag{20}$$

L_c 는 그림1에 나타나 있듯 일정한 단면을 갖는
 cell의 중앙 부분의 길이이고, $L_e/2$ 는 테이퍼 영역의
 길이이다. 표1에 공진 모드별 결과치가 있다. Hill이
 E와 C점에서 측정 한 것과는 달리 본 논문에서는 A
 와 D에서 공진을 발견하였으며 Hill의 결과치와 부
 분적인 약간의 오차를 보이는 것은 공진시 E와 C점
 에서 TE_{01} 모드의 영향으로 전계 E_y 값이 크게 변화
 하기 때문으로 해석된다. 공진의 상대적 크기의 비
 교를 위해 공진이 없을 경우의 전계 세기(표기 : [])
 도 함께 나타내었다.

표 1. 공진주파수 ($1 \times 0.6 \times 2\text{m}$, $w=0.72\text{m}$)
 Table 1. Resonant frequencies in the TEM
 cell ($1 \times 0.6 \times 2\text{m}$, $w=0.72\text{m}$).

공진 모드	주파수 (MHz)	점A 셉텀上 (V/m)	점D 셉텀下 (V/m)	공진 크기	$c/2L_{mn}$ (MHz)	X_{mn}
TE_{011}	161	-45.6 [-35.9]	-9.6 [-0.53]	0.515	92±4	0.63± 0.07
TE_{012}	235	-90.18 [-35.9]	-25.23 [-0.53]	2.168		
TE_{101}	182	+37.6 [-35.9]	+67.7 [-0.53]	3.89	107±4	0.4± 0.05
TE_{102}	269	-6.3 [-27.]	+23.5 [+9]	1.96		
TE_{111}	271	+33.1 [-27]	+54.8 [+9]	5.88	⊕	⊕
TE_{112}	280 이후	-97.45 [-27]	-80.98 [+9]	10.41		

⊕ 280MHz 이후에서는 해석하지 않아 TE_{112} 의 주파수가
 불확실함.

전력에 의한 VSWR 측정으로 발견이 가능한 공
 진모드는 Hill[2]에 의하면 위의 표에서 공진크기가
 대략 3.8이상의 TE_{101} , TE_{111} , TE_{112} 공진이다. 상대
 적으로 작은 크기의 공진은 전계 측정에 의해서만
 찾을 수 있으며 위의 수치해석 결과는 Hill의 측정치
 와 잘 일치한다. 그림8은 약 100MHz에서부터 280
 MHz까지 위치 A와 D에서의 전계분포이다. 저주파
 대(약 100MHz)⁹⁾에서는 TEM 모드만 존재하므로 나
 타내지 않았다.

그림9는 150MHz와 182MHz에서의 벽면(II면) 전
 류분포이다. 182MHz의 벽의 모서리 부분의 전류의
 세기가 150MHz에서 보다 상당히 크게 나타나며, 이

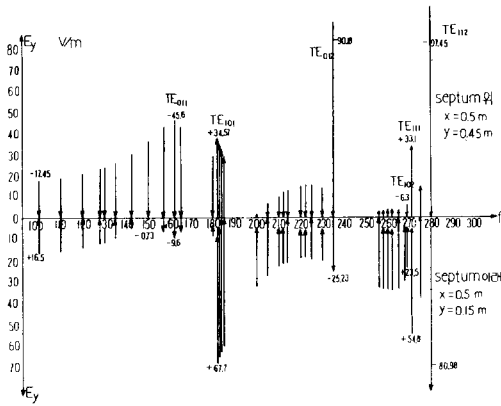


그림 8. 주파수 변화에 따른 TEM cell내의 전기장 변화
 Fig. 8. The variation of electric field in the TEM cell with the increase of frequency.

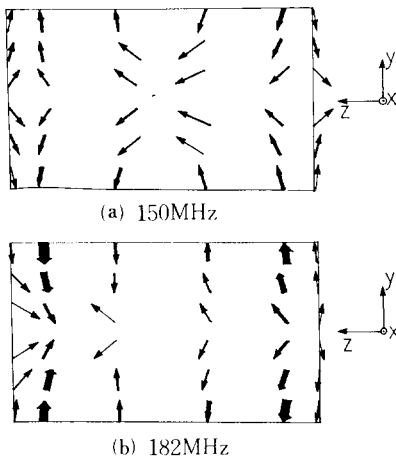


그림 9. TEM cell 벽면(II면)의 전류분포
 Fig. 9. The current distribution of the TEM cell on the wall(surface II)
 (a) 150MHz, (b) 182MHz.

전류가 공진을 지속시키는 원인이 된다. 최근 TEM cell의 사용 주파수의 확장을 위해서 공진 없이 고차 모드에서도 사용이 가능한 GTEM cell에 대한 연구가 활발하다. 따라서 이 결과로부터 공진을 억제하는 방안을 제시한다면 먼저 전류 밀도가 상당히 셀 모서리 부분에 z축을 따라 길게 홈(cut line)을 만들어 이 전류(circumferential current)를 제거하는 방법⁷⁾과 또 한가지는 앞서 언급되었던 공진 유효길이 L_{mn} 위치에 홈을 환상으로 만들어 그 지점에서의 다중 반사를 제거하는 방법을 들 수 있다. 단, 홈을

구성하는 경우 그 위치에서 외부와의 간섭이 없도록 다른 방법(가령 흡수체)에 의해 잘 차폐되어야 할 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 TEM cell(1×0.6×2m) 내부의 고차모드 대역에서 전기 분포를 수치 해석함으로써 처음 2개의 고차모드의 차단주파수 (f_{c01} , f_{c10})와 6개의 공진주파수 ($f_{R011,012,101,102,111,112}$)를 확인하였다. 가상 경계면의 정확도를 높이기 위해 III의 등가 전위는 테이퍼 영역의 가장자리(fringing) 효과를 고려하여 2차원의 필드맵(field map)을 이용하였다.

고차모드의 차단주파수와 공진주파수는 참고문헌 [4-7]의 결과값과 좋은 일치율을 보이며 이상의 결과를 이용하여 앞으로 연구 가능한 과제는 다음과 같다. 먼저 본 논문의 수치해석 방법을 이용하여 cell내의 시험 공간의 확대를 위해 셉텀의 위치가 비대칭인 경우 최적의 cell의 설계를 위한 소프트웨어로 활용할 수 있으며, cell내의 EUT에 의한 전자파의 흡수량과 복사량의 해석이 가능하다. 그리고 공진주파수 결과를 활용하여 TEM cell 내부에 EUT가 존재하는 경우 공진주파수의 천이를 비롯하여 TEM cell의 가장 큰 단점으로 나타나고 있는 상한 주파수를 높일 수 있는 광대역 TEM cell의 구현이 가능하리라 본다.

參 考 文 獻

- [1] M.L. Crawford, 'Generation of standard EM Fields using TEM transmission cells,' IEEE Trans EMC-16(4) pp. 189-195, Nov. 1974
- [2] R.J. Spiegel W.T. Joines C.F. Blackman and A.W. Wood "A method for calculating electric and magnetic fields in TEM cells at ELF,' IEEE Trans , EMC-29(4), pp. 265 272, Nov. 1987.
- [3] 이예경, 이상희, 김정기, "TEM cell내의 전자파 해석," 한국전자파기술학회, Vol. 2, No. 1, pp. 37-45, 1991. 6
- [4] C. Weil and L. Gruner 'High order mode cutoff in rectangular striplines'' IEEE Trans MTT-32(6) pp. 638 641, June. 1984.
- [5] J.C. Tippet, 'Modal characteristic of rectangular coaxial transmission line,' Ph. D Thesis, Univ. Colorado, Boulder, Co, June. 1978.

[6] R.D. Orr and M. Kanda "Generation of standard electromagnetic fields in a TEM Cell," NBS Tech. Note 1319, Aug. 1988.

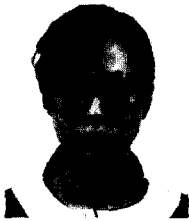
[7] D.A. Hill "Bandwidth limitations of TEM cells due to resonances" J. Microwave power, 18(2), pp. 181-195, 1983.

[8] S.K. Das and B.K. Sinha, "Numerical solution of higher order mode cutoff frequencies in symmetric TEM cell using Finite Element Method,' IEEE Trans. EMC-32(4) pp. 264 268, Nov. 1990.

[9] 이애경, 이상희, 김정기, "TEM cell의 고차모드 차단 주파수에 대한 연구," 대한전자공학회 마이크로파 및 전파전파 연구회 논문집, Vol. 14, No. 1, pp. 99-101, 1991, 5.

[10] John D. Kraus, Electeromagnetics McGraw-Hill, Inc. 1984.

著 者 紹 介



李 愛 卿(正會員)
 1966年 5月 29日生. 1990年 2月
 중앙대학교 대학원 전자공학과
 졸업(공학사). 1990年 3月~현
 재 중앙대학교 대학원 전자공학
 과(석사과정). 주관심분야는
 EMI/EMC와 이동통신 등임.



李 相 楡(正會員)
 1958年 9月 3日生. 1983年 2月
 중앙대학교 공과대학 전자공학과
 전자공학과 졸업(공학사). 1985
 年 2月 중앙대학교 대학원 전자
 공학과 졸업(공학석사). 11989年
 2月 중앙대학교 대학원 전자공
 학과 졸업(공학박사). 1989年 3月~현재 대우공업
 전문대학 전자과 조교수. 주관심분야는 인공위성 통
 신, EMC의 측정과 설계 및 흡수체 재료 등임.

金 正 祺 (正會員) 第26卷 第8號 參照
 현재 중앙대학교 전자공학과
 교수