

모멘트법을 이용한 임의의 구형 내부도체를 갖는 TEM Cell의 특성분석

정회원 윤재훈* 정회원 최익권*

Analysis of the TEM Cells Having arbitrary Rectangular Septum by Using Moment Method

Jae Hoon YUN*, Iek Kwon CHOI* *Regular Members*

要 約 TEM cell에 구형 내부도체(Septum)의 두께, 폭 및 위치를 임의로 변화시켰을때, 이에 따른 cell내 전기장도 및 자기장도 크리고 특성임피던스의 변화를 준정적 근사화하여 모멘트법으로 해석해 보았다. 그 결과는 기존의 특정한 cell 구조에 대한 실험 및 해석결과들과 좋은 일치를 보이고 있다.

ABSTRACT This paper applies the moment method to analyze the transverse electromagnetic (TEM) cell with an inner conductor (septum) of arbitrary rectangular shape and location by employing quasi static approximation. The EM field and the characteristic impedance so obtained are shown to be in good agreement with the available data from the previously published papers about the typical TEM cell structure with center-septum of zero thickness.

I. 서 론

TEM cell은 단면이 직각동축선로(RCTL : Rectangular Coaxial Transmission line) 구조를 갖고 있으며, 내부 TEM파 발생특성을 이용하여, 전자파가 생체에 미치는 영향 연구분야, 전자장 강도 측정기 교정용 및 EMI/EMC 측정시설에서 저주파대칭 및 방사측정에 널리 사용되고

있다.^{(1) (6)} TEM cell은 피측정 장비가 cell 내 시험공간에 비해 작아야 한다는 단점을 가지고 있는 반면에 외부 전자파 및 내부 전자파 차폐 효과가 우수하고 Open site나 Anechoic chamber에서 저주파대 실험시 발생하는 안테나 크기 및 시험공간, Chamber 내 전파 흡수체 성능저하 등의 문제점이 없으며, DC-수백 MHz에 이르는 광대역 선형특성을 가지고 있어서 저주파대 EMI/EMC 측정시설로 적합하다^{(2) (7)}.

굵기가 아주 가느다란 내부도체 (Septum)가 상하 좌우 대칭 구조를 갖는 TEM cell에 대한

*韓國電子通信研究所
Electronics And Telecommunications Research Institute
論文番號 : 90-91(接受1990. 9. 10)

분석은 많은 논문을 통해 제시되고 있다.

1976년 J.C. Tippet은 특성임피던스를 구하기 위해 상사변환(Conformal Transformation)을 통해 분석하였으며 간단한 근사식을 유도하였다.⁽¹⁰⁾ 또한 그는 TEM cell내에서 고차 TE, TM모드의 차단주파수를 내부 도체와 외부도체 사이의 떨어진 간격 영역에서의 연속 경계조건을 이용하여 구하였다.⁽⁹⁾

1984년 Yasuhiro Tanaka와 2인은 혼합형 경계 분할요소법을 이용하여 3차원의 TEM cell 분석과 내부에 작은 피측정 물체가 존재하는 경우 그특성을 분석하였다.⁽⁸⁾⁽⁹⁾

1985년 B.N. Das와 1인은 역시 같은 방법으로 유전체 판으로 지탱된 내부도체(Septum)을 갖는 TEM cell의 특성임피던스를 구하여 분석하였다.⁽¹¹⁾ 또한 그는 한쪽 외벽이 개방된 TEM cell의 특성임피던스를 그린 함수(Green function) 유도를 통해 분석하였다.⁽¹²⁾

1987년 R.J. Spiegel 등은 모멘트법을 이용하여 TEM cell의 내부전자계 분포를 구하였다.⁽¹³⁾ 여기서 주시할 점은 상기 논문들은 내부도체가 아주 얇고 수직벽에 대해 대칭구조를 갖는 TEM cell 구조에 대해서만 국한하여 해석 했을뿐이다. 그러나 TEM cell내의 임의의 내부도체 두께, 폭 및 위치에 따른 특성파악은 TEM cell설계시 매우 중요하다.

여기서는 Spiegel에 의해 준정적 근사화하여 유도된 적분식을 보다더 확장하여 상기구조에 적합한 수식유도를 통해 모멘트법으로 cell내 전자계는 물론 특성임피던스를 구하고 특성을 분석하여 보았다.

내부도체 두께가 아주 가느다란 TEM cell 내부 전계강도의 경우, NBS(National Bureau Standards : 근자에 "NIST : National Institute of Standards Technique"로 바뀜)의 실험치와 비교해보았고 특성임피던스의 경우는 Tippet에 의해 제시된 해석결과와 비교해 보았는데, 좋은 일치를 보이고 있다. 다음 II 장 1절에서는 TEM cell내에서 전자계 분포에 대한 이론을 살펴보고 동 2절에서는 특성임피던스 관계식을 유도했으며

III 장에서는 수치해석 방법을 다루고자 한다. IV 장 1절에서는 전계에 대한 테이타를 분석해보고 동 2절에서는 특성임피던스 결과를 시험공간 최대확보 측면에서 살펴보았으며 마지막 V 장에서는 결론을 나타내었다.

II. TEM Cell 내 전자계 및 특성임피던스

TEM cell내 전자장에 대한 준정적 근사 분석은 그린함수를 이용한 변분해석⁽¹⁵⁾ 및 도체 표면의 선전하에 대한 수식유도를 통한 수치해석⁽¹³⁾ 등이 있으나, 구형 내부도체가 임의 크기 및 위치를 갖는 TEM cell 분석시 후자의 방법을 선택하는 것이 용이하다. 왜냐하면 전자는 구형 내부도체가 임의의 굽기 및 임의의 위치를 갖는 경우, 경계면의 수식 형태 변환에 적합한 그린함수를 구해야 하는 어려움을 갖게 된다. 그러나 후자 적용시 경계면 형태 변환에 상관없이 도체 표면의 선전하에 대한 수식유도로 2차원 문제를 1차원화 처리하기 때문에 수치 해석상 유리한 조건을 갖게 된다. 다음 1절에서는 후자를 적용한 Cell 내 전자장 적분방정식을 간단히 기술하고 2절에서는 선전하에 대한 특성 임피던스 수식을 살펴보고자 한다.

1. TEM Cell 내 전자계 분포

TEM Cell내에서 사용하는 파장이 단면에 비해 크고 도체 표면에 존재하는 전류가 파의 진행 축 방향 성분만 존재한다는 가정하에 준정적 근사법을 적용하여 분석한다. 실질적으로 TEM Cell은 차단주파수 보다도 낮은 영역에서 EMI/EMC 측정장비로 사용하기 때문에 그 해석방법은 타당성이 있다.⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹³⁾⁽¹⁵⁾

TEM Cell의 단면구조를 그림 1에 나타내고 있다. 그 구조는 그림에서처럼 직각동축 전송선로(RCTL : Rectangular Coaxial Transmission Line)의 단면 구조와 동일하며 내부도체(Septum)와 외부도체로 구성된다.

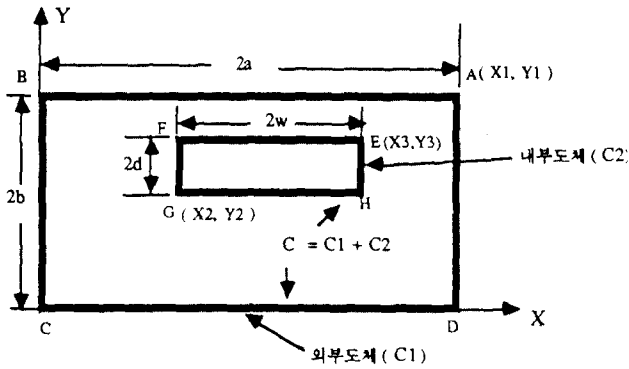


그림 1. 직각좌표상의 임의 구형 내부도체를 갖는 병행의 위치
Location of TEM cell cross section in Rectangular coordinate system.

그림 1에서 C1, C2는 외부도체 및 내부도체 윗쪽선(Contour)으로서 각각 A B C D, E F G H 를 의미하며, 2a는 외부도체 수평변경이, 2b는 수직변경 높이, 2w는 내부도체 폭, 2d는 두께를 표기한다.

전자계의 시간 의존인자 e^{ikt}를 무시하고 내부도체와 외부도체를 완전도체라고 하면 내부공간에 존재하는 전자계는 다음과 같다.¹⁾

$$\mathbf{E}(x, y) = -\nabla\Phi(x, y) \quad (1)$$

$$\mathbf{H}(x, y) = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A}(x, y) \quad (2)$$

$$\Phi(x, y) = \frac{1}{\epsilon_0} \iint_C \rho(x', y') G(x, y, x', y') dx' dy' \quad (3)$$

$$\mathbf{A}(x, y) = \mu_0 \iint_C \mathbf{J}(x', y') G(x, y, x', y') dx' dy' \quad (4)$$

$$G(x, y, x', y') = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} \right] \quad (5)$$

$$\Phi(x, y) = \begin{cases} V & \text{on } C2 \\ 0 & \text{on } C1 \end{cases} \quad (6)$$

단 여기서 J는 전류밀도(A/m), ρ는 선전하(C/m), ε₀는 자유공간 유전율 (8.85 · 10⁻¹² F/m), μ₀는 자유공간 투자율 (4π · 10⁻⁷ H/m), Φ는 스칼라 포텐셜, A는 벡터 포텐셜이다. (5)식은 무한히 긴 선전하에 대한 2차원 그린함수²⁾이며, 프라임(')은 원점점을, 프라임이 없는 변수는 관측점을 나타내고 있다. (6)식은 내부도체에 전압 V volt 전압인가시 경계 조건을 나타내고 있다. 상기식을 그림 1.에 적용하여 전개하면 전자계를 다음 처럼 전하에 대한 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{E}(x, y) = E_x(x, y) \mathbf{a}_x + E_y(x, y) \mathbf{a}_y \quad (7)$$

$$\mathbf{H}(x, y) = \frac{\epsilon_0 \omega}{\beta} (E_y(x, y) \mathbf{a}_x + E_x(x, y) \mathbf{a}_y) \quad (8)$$

$$E_x(x, y) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^8 \int_{c_i} \rho(x', y') \frac{y-y'}{(x-x')^2 + (y-y')^2} dc_i \quad (9)$$

$$E_y(x, y) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^8 \int_{c_i} \rho(x', y') \frac{x-x'}{(x-x')^2 + (y-y')^2} dc_i \quad (10)$$

상기 (9), (10)식에서 ∫_{c1} = ∫_a^{x1}, ∫_{c2} = ∫_a^{x1}, ∫_{c3} = ∫_b^{x1}, ∫_{c4} = ∫_b^{x1}, ∫_{c5} = ∫_a^{x2}, ∫_{c6} = ∫_a^{x2}, ∫_{c7} = ∫_b^{x2}, ∫_{c8} = ∫_b^{x2}

적분구간을 나타내고, $dc_{2j}=dy$, $dc_{2j-1}=dx$ (단 $j=1,2$)로서 적분내 증분을 나타낸다. 또한 ω 는 각속도를 β 는 위상정수를 나타낸다.

그런데 참고문헌[13]에서 논의된바처럼 사용주파수가 DC(Direct Current)에 이르면 위상정수 β 는 각속도의 $\sqrt{\omega}$ 비례적 관계가 되어 자계값은 영이 된다. 그러나 실질적으로 TEM Cell내에서 끝단 임피던스 (Z_0 : NIST에서는 $50\Omega^{(2)}$)정함으로 인해 사용주파수가 DC에 이르러도 내부도체와 외부도체 표면에는 크기가 같고 방향이 서로 반대인 균일 전류가 흘러 자계를 형성한다. 이러한 경우 (약 200Hz 이하⁽³⁾) 전류밀도가 도체표면에 일정하게 분포하므로 자계는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$H(x, y) =$

$$\begin{aligned} & \mathbf{a}_x \left[\frac{I}{4\pi b} \left\{ \tan^{-1} \frac{x-x_1}{y-y_1} - \tan^{-1} \frac{x}{y-y_1} + \tan^{-1} \frac{x-x_1}{y} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \tan^{-1} \frac{x}{y} \right\} + \frac{I}{4\pi a} \right. \\ & \quad \left. \left\{ \ln \frac{((x-x_1)^2+(y-y_1)^2)^{1/2}}{((x-x_1)^2+y^2)^{1/2}} + \ln \frac{(x^2+(y-y_1)^2)^{1/2}}{(x^2+y^2)^{1/2}} \right\} \right. \\ & \quad \left. - \frac{I}{4\pi w} \right. \\ & \quad \left. \left\{ \tan^{-1} \frac{x-x_3}{y-y_3} - \tan^{-1} \frac{x-x_2}{y-y_3} + \tan^{-1} \frac{x-x_3}{y-y_2} - \tan^{-1} \frac{x-x_2}{y-y_2} \right\} \right. \\ & \quad \left. - \frac{I}{4\pi d} \right. \\ & \quad \left. \left\{ \ln \frac{((x-x_3)^2+(y-y_3)^2)^{1/2}}{((x-x_3)^2+(y-y_2)^2)^{1/2}} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \ln \frac{((x-x_2)^2+(y-y_3)^2)^{1/2}}{((x-x_2)^2+(y-y_2)^2)^{1/2}} \right\} - \mathbf{a}_y \right. \\ & \quad \left. \left[\frac{I}{4\pi b} \left\{ \ln \frac{((x-x_1)^2+(y-y_1)^2)^{1/2}}{(x^2+(y-y_1)^2)^{1/2}} \right. \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \left. + \ln \frac{((x-x_1)^2+y^2)^{1/2}}{(x^2+y^2)^{1/2}} \right\} - \frac{I}{4\pi a} \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left. \left. \left. \left\{ \tan^{-1} \frac{y-y_1}{x} - \tan^{-1} \frac{y}{x} + \tan^{-1} \frac{y-y_1}{x-x_1} - \tan^{-1} \frac{y}{x-x_1} \right\} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \frac{I}{4\pi w} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \left\{ \ln \frac{((x-x_2)^2+(y-y_2)^2)^{1/2}}{((x-x_2)^2+(y-y_3)^2)^{1/2}} + \ln \frac{((x-x_3)^2+(y-y_2)^2)^{1/2}}{((x-x_3)^2+(y-y_3)^2)^{1/2}} \right\} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \frac{I}{4\pi d} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \left. \left\{ \tan^{-1} \frac{y-y_3}{x-x_2} - \tan^{-1} \frac{y-y_2}{x-x_2} - \tan^{-1} \frac{y-y_3}{x-x_3} - \tan^{-1} \frac{y-y_2}{x-x_3} \right\} \right] \right. \end{aligned}$$

2. TEM Cell의 특성임피던스

TEM Cell내 특성임피던스는 내부도체 굵기가 무한히 가늘다란 좌우 대칭형 구조의 경우, 상사 변환법을 사용한 Tippet⁽¹⁰⁾의 해석 방법이 많이 사용되어 왔다. 그러나 이러한 해석 방법은 $\frac{a}{b}$

>약5.이고 $\frac{W}{b} \leq 0.1$ 인 해석적인 시각영역을 갖고 있을 뿐만 아니라, 구형 내부도체가 임의의 크기 및 위치를 갖는 경우 적용할 수 없다.

그러므로 그림 1.의 구조 분석에 적합한 수식을 살펴보면 다음과 같이 선전하에 관한 특성 임피던스 적분방정식을 유도할 수 있다.

우선 RCTL에서 임피던스 정함이 이상적으로 되었다고 볼때 특성임피던스는 다음과 같다.⁽³⁾

$$\begin{aligned} Z_0 &= V_m / I_m = - \frac{\int_p \mathbf{E} \cdot d\mathbf{p}}{\oint_t \mathbf{H} \cdot d\mathbf{t}} \\ &= -\eta_0 \frac{\int_p \mathbf{E} \cdot d\mathbf{t}^2}{\oint_t \mathbf{a}_z \times \mathbf{E} \cdot d\mathbf{t}^1} \quad (12) \end{aligned}$$

단 상기식에서 \mathbf{p} 는 내부도체로부터 외부도체 까지의 임의의 적분 경로벡터로서 그림 2.에서

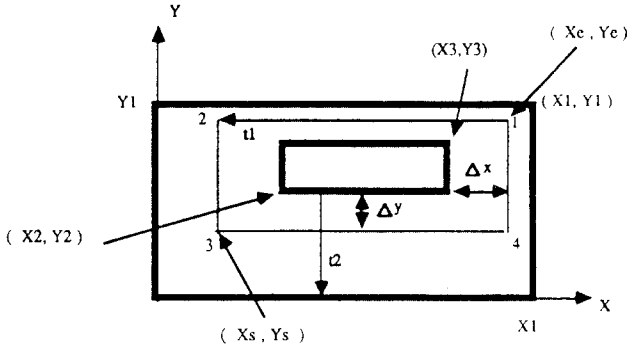


그림 2. 직각좌표상의 임의의 구형내부도체를 갖는 행렬의 p.t of TEM cell cross section in rectangular coordinate system

t_2 를 나타내며, t 는 내부도체를 둘러싼 폐곡선벡터로서 그림2.에서 1, 2, 3, 4를 연결하는 t_1 을 의미한다. 또한 t_1 의 각구간마다 증분마다 $dt_{11}, dt_{23}, dt_{34}, dt_{41}$ 을 정의하면 각각 $dt_{12}(-a_x), dt_{23}(-a_y), dt_{34} a_x, dt_{41} a_y$ 가 됨을 그림을 통해 쉽게 파악할 수 있을 것이다.

p 와 t 는 그림3. 이외의 어떠한 다른 형태로도 잡을수 있다. 여기서의 계산의 편리성을 위해 직각좌표상을 취했다. 그림2.을 (12)식분포형에 적용하면 다음식을 유도할 수 있다.

$$\oint_{t_1} \mathbf{a}_z \times \mathbf{E} \cdot dt_1 = \int_{-1}^{+2} \mathbf{a}_z \times \{ E_x(x, y_e) \mathbf{a}_x + E_y(x, y_e) \mathbf{a}_y \} \cdot dt_{12}(-\mathbf{a}_x) + \int_{-2}^{+3} \mathbf{a}_z \times \{ E_x(x_s, y) \mathbf{a}_x + E_y(x, y_s) \mathbf{a}_y \} \cdot dt_{23}(-\mathbf{a}_y) + \int_{-3}^{+4} \mathbf{a}_z \times \{ E_x(x, y_s) \mathbf{a}_x + E_y(x, y_s) \mathbf{a}_y \} \cdot dt_{34}(\mathbf{a}_x) + \int_{-4}^{+1} \mathbf{a}_z \times \{ E_x(x_e, y) \mathbf{a}_x + E_y(x_e, y) \mathbf{a}_y \} \cdot dt_{41}(\mathbf{a}_y) \quad (13)$$

상기(13)식은 그림2. 처럼 직각좌표계에 적용하여 전개하고 (12)식의 분자항은 내부도체와 외부도체 사이에 인가되는 전압(V volt)이므로 (12)식은 다음처럼 유도될 수 있다.

$$Z_0 = \eta_0 V / \left\{ \int_{x_s}^{x_e} \{ E_y(x, y_e) - E_y(x, y_s) \} dx + \int_{y_s}^{y_e} \{ E_x(x_e, y) - E_x(x_s, y) \} dy \right\} \quad (14)$$

상기 (14)식에서 x_e, x_s, y_e, y_s 는 그림 2에서 처럼 각각 $x_3 + \Delta x, x_2 - \Delta x, y_3 + \Delta y, y_2 - \Delta y$ 를 나타내고 있다. 상기식을 살펴보면 $E_y(x, y_e), E_y(x, y_s), E_x(x_e, y), E_x(x_s, y)$ 는 (9), (10)식에 의해 주어진다. 이제 굳이 과정을 간단하게 다시 보면 장어보면 (6)식의 경계조건을 이용하여 출력선 C1, C2에 존재하는 전하분포를 모멘트법을 통해 구하고 그 결과를 (8)식과 (9)식에 대입하여 전자기계를 구한다. 여기서 얻은 전계를 (11)식에 대입하여 특성임피던스를 구하게 된다. 다음 장에서는 수치해석을 기술하겠다.

III. 수치해석

여기서는 모멘트법중에 기저함수를 펄스 함수인 포인팅법(Pointing Method)⁽¹⁶⁾을 사용하였다.

그림3.은 임의의 크기 및 위치를 갖는 구형 내부도체로 구성된 TEM cell의 모멘트법 모델화를 직각좌표상에서 나타내고 있다. A, B, C, D 구간에서의 분할요소수를 각각 N1개이고 분할요소 길이는 ΔC^1 이며 B, C, D, A 구간에서 분할요소수는 각각 N2, 분할요소 길이는 ΔC^2 이다. 내부도체에서 E, F, G, H 구간에서 분할요소수는 각각

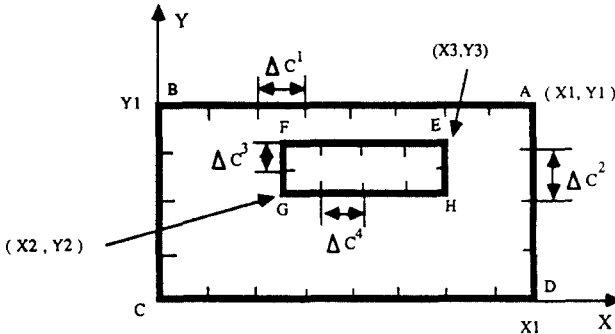


그림 3. 직각좌표상의 임의의 구형 내부도체를 갖는 TEM Cell의 모멘트법 모델화
Modeling of TEM cell cross section having arbitrary rectangular septum in moment method.

N3이며 분할요소 길이는 ΔC^3 이다.

또한 F-H, H-E 구간에서는 분할요소수를 각각 N4라하고 분할요소길이를 ΔC^4 라고 한다면 각각의 분할요소수를 문제 상황에 맞도록 선택할 수 있다. 단 여기서는 마주보고 있는 면에 대한 분할요소수 및 길이를 같게 취하고 있다.

그런데 (3)식의 스칼라포텐셜은 전하분포가 내부도체표면 (C2)과 외부도체 표면(C1)에 존재하므로 그림1.을 참고로하여 그 관계 수식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\phi(x, y) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^8 \int_{c_i} \rho(x', y') \ln \left(\frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} \right) dc_i \quad (15)$$

단, 여기서 dc_i 및 \int_{c_i} 는 (9), (10)식과 동일하다. 상기수식을 살펴보면 도체표면에 존재하는 전하에 대한 적분방정식임을 볼 수 있다. (6)식의 경계조건을 이용하면 상기식은 구하고자 하는 응답(Response)이 전하분포(ρ)가 되고, 주어지는 여기(Exitation)가 경계면에서의 스칼라포텐셜(ϕ)인 결정성 문제(Deterministic

Problem) 가 되므로 모멘트법을 적용할 수가 있다. 그림3.을 참고하여 기저함수가 펄스함수인 포인팅법을 적용하면 전하분포는 다음과 같다.

$$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i P_i(x', y') \quad (16)$$

(16)식에서 펄스함수 $P_i(x', y')$ 는 2차원 함수가 아니라 변수가 x' 혹은 y' 를 가지면서 윤곽선 (C1, C2)에 걸치는 1차원 함수라는 점을 주의해야 한다. (16)식을 (15)식에 대입하여 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.⁽¹³⁾⁽¹⁶⁾

$$[Z_{ij}] [\rho_j] = [G_j] \quad (17)$$

$$Z_{ij} = \begin{cases} \frac{\Delta C_i}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \right) & (i \neq j \text{ 일때}) \\ \frac{\Delta C_i}{2\pi\epsilon_0} \left(1 - \ln \left(\frac{\Delta C_i}{2} \right) \right) & (i = j \text{ 일때}) \end{cases} \quad (18)$$

$$G_j = \begin{cases} 0 & (\text{관측점 } (x_i, y_i) \text{이 } C1 \text{에 놓일때}) \\ V & (\text{관측점 } (x_i, y_i) \text{이 } C2 \text{에 놓일때}) \end{cases} \quad (19)$$

상기식에서 (x_i, y_i) 는 원천점으로서 각 분할요소의 중심좌표를 의미하며 (x_i, y_i) 는 관측점을 나타낸다. 또한 ΔC_j 는 각 분할요소의 길이를 의미한다. 역변환을 통해 (17)식으로부터 전하분포에 대한 기저함수 계수(ρ_i)를 구하고, 이를 (16)식에 대입하면 도체표면(C1+C2)에 존재하는 전하분포를 얻어 낼 수 있다. (16)식을 (9)식과 (10)식에 대입하면 Cell내 전계를 구할 수 있다. 그 관계식은 다음과 같다.

$$E_x(x, y) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \rho_i \Delta C_i \frac{(x-x_i)}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (20)$$

$$E_y(x, y) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \rho_i \Delta C_i \frac{(y-y_i)}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (21)$$

(20), (21)식을 (14)식에 대입하면 전하분포에 대한 기저함수 계수와 관련된 특성임피던스 수식을 유도할 수 있다. 그관계 수식은 다음과 같다.

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi \beta_0 \eta_0} V \left[\sum_{i=1}^N \rho_i \Delta C_i \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{x_e - x_i}{y_e - y_i} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{x_s - x_i}{y_e - y_i} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{x_e - x_i}{y_s - y_i} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{x_s - x_i}{y_s - y_i} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{y_e - y_i}{x_e - x_i} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{y_s - y_i}{x_e - x_i} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{y_e - y_i}{x_s - x_i} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{y_s - y_i}{x_s - x_i} \right) \right\} \right]^{-1} \quad (22)$$

기저함수 계수(ρ_i)는 각 원천점의 전하량을 의미한다. 그러므로 상기식은 전하분포에 대한 특성임피던스를 나타낸다. Spiegel의 논문[13]에서는 내부도체 굵기 (그림1에서 2d)가 영이고 내부도체가 좌우대칭 구조로 놓이는 경우 전계만을 해석하고 있는 반면, 여기서는 그 방법을 확장하여 굵기를 갖고 내부도체가 Cell내에서 임의의 위치에 놓이는 임의의 구조에 대한 특성임피던스를 구하여 보았다.

수치해석시 관측점(x_i, y_i)은 각 분할요소 중심 좌표로 놓고 분할요소수는 각구간에 따라 약간의 차이를 주었다. A B, B C, C D, D A, E F, G H는 각각 18개씩 F G, H E 10개씩을 주어 총분할요소수를 128개로 하였다.

IV. 데이터 분석

1. 전계

NBS에서 사용하고 있는 TEM Cell인 외부도체의 수평길이 (2a)가 30cm이고 수직길이(2b)가 30cm 그리고 내부도체의 폭(2w)은 25cm, 그누께 (2d)가 0.3cm인 구조에 대해 적용해보았다. 내부도체에 4.16 volt를 가할 경우 내부 전계 (E)를 $y=3.75\text{cm}, 7.5\text{cm}, 11.25\text{cm}$ 에서 각각 살펴본 결과 그림 4.처럼 Spiegel의 결과 [13]와 NBS 실험치[7]와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있었다.

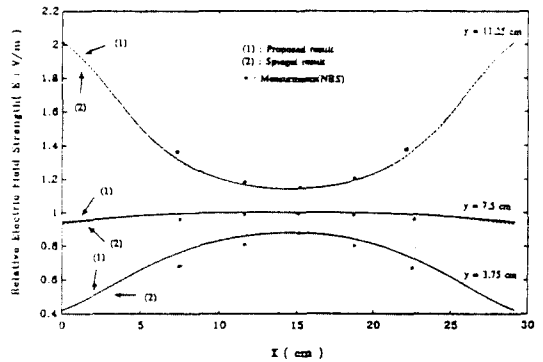
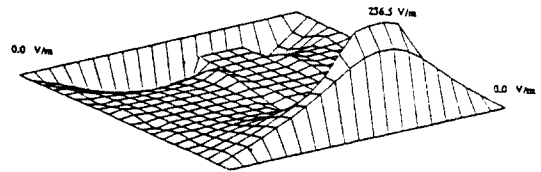
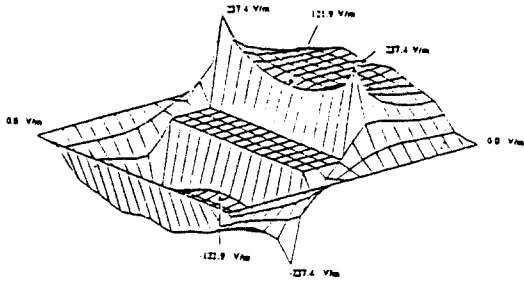


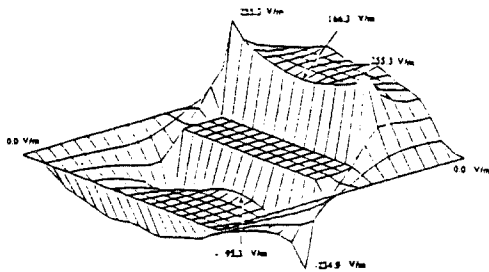
그림 4. $a=15\text{cm}, b=15\text{cm}, w=12.5\text{cm}, d=0.3\text{cm}$ 인 TEM cell 내부 전계장도의 Spiegel(d=0)결과 및 NBS 실험 측정치 비교

Comparison of Spiegel's result, NBS Measurement and proposed result for electric field strength in TEM cell which is $a=15\text{cm}, b=15\text{cm}, w=12.5\text{cm}$ and $d=0.3\text{cm}$

상기 그림4.에서 $y=11.25\text{cm}$ 인 경우 양끝단에서 약간의 불일치를 보이고 있는 것은 Spiegel 결과 [13]의 경우는 $d=0$ 로 취하고 여기서는 $d=0.3\text{cm}$ 로 하였기 때문에 약간 큰 값을 보이고 있으며, NBS의 실험치의 경우는 $y=3.75\text{cm}, y=11.25\text{cm}$ 에서 불일치가 심한 것은 측정시 TEM cell내의 측정 Prob가 외부도체로 접근시, 내부전계 강도에 영향을 많이 주기때문에 발생하는 것으로 보인다.



(b) $y_0 = 6/5 \cdot b$



(b) $y_0 = 6/5 \cdot b$

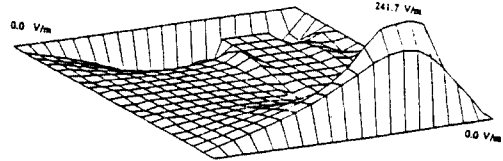
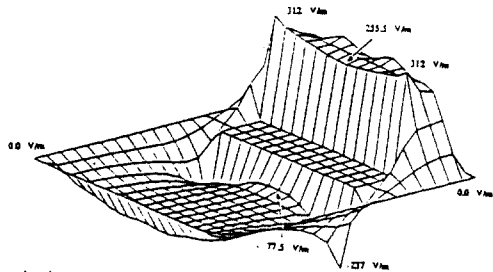
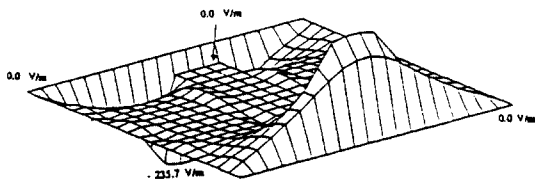


그림 6. $a=7\text{cm}$, $b=4\text{cm}$, $w=5\text{cm}$, $d=0.8\text{cm}$ 인 구조를 갖는 TEM cell의 내부도체를 $+y$ 방향 이동에 따른 x 축 전기장 성분 (E_x)
(a) $y_0=b$ (b) $y_0=6/5 \cdot b$ (c) $y_0=7/5 \cdot b$
 X component electric field strength in TEM cell which is $a=7\text{cm}$, $b=4\text{cm}$, $w=5\text{cm}$, $d=0.8\text{cm}$ and (a) $y_0=b$, (b) $y_0=6/5 \cdot b$ (c) $y_0=7/5 \cdot b$



(c) $y_0 = 7/5 \cdot b$

그림 5. $a=7\text{cm}$, $b=4\text{cm}$, $w=5\text{cm}$, $d=0.8\text{cm}$ 인 구조를 갖는 TEM cell의 내부도체를 $+y$ 방향 이동에 따른 y 축 전기장 성분(E_y)
(a) $y_0=b$ (b) $y_0=6/5 \cdot b$ (c) $y_0=7/5 \cdot b$
 Y component electric field strength in TEM cell which is $a=7\text{cm}$, $b=4\text{cm}$, $w=5\text{cm}$, $d=0.8\text{cm}$ and (a) $y_0=b$, (b) $y_0=6/5 \cdot b$ (c) $y_0=7/5 \cdot b$



(a) $y_0 = b$

다음은 $a=7\text{cm}$, $b=4\text{cm}$, $w=5\text{cm}$, $d=0.8\text{cm}$ 인 작은 TEM cell의 내부 전기장 특성을 그림 5, 그림6에 나타내었다. 그림5의 경우는 내부도체를 좌우 대칭으로 놓고 중심에서 $+y$ 방향 (위방향)으로 올렸을때 즉 내부도체 중심좌표 $x_0=7\text{cm}$ 로 고정시키고 $y_0=a$, $6/5a$, $7/5 \cdot a$ cm로 취했을 경우 y 축 전기장 성분(E_y)을 나타내고 있다. 그림6의 경우는 이때의 x 축 전기장 성분(E_x)을 나타내고 있다. 그림6에서 내부도체 모서리 부분에서 매우 높은 전기장이 나타나는데 이는 모서리 부분에서 매우 높은 전하 형성 때문인 것으로 보인다. 자계에 대한 관계는 (8), (11)식으로 부터 쉽게 파악될 수 있을 것이다.

2. 특성임피던스

(15)식을 통해 특성임피던스를 얻을 수 있는데 그 결과를 살펴보기 위해 다음과 같이 $a=8\text{cm}$, $b=4\text{cm}$, $d=1.01\text{cm}$, 0.83cm , 0.57cm , 0.3cm 로 점점 가늘은 내부도체로 접근시킬때, 내부도체 폭(w) 변화에 따른 특성임피던스를 그림7에 나타내고 있다.

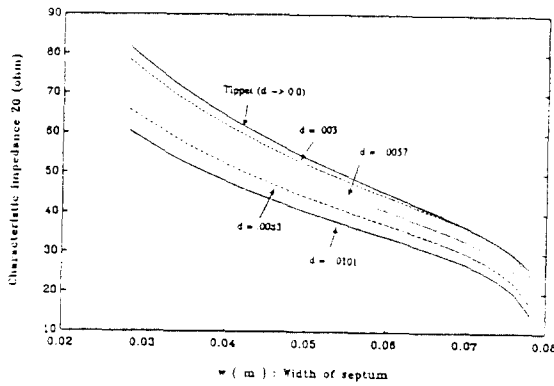


그림 7. 내부도체 폭(W) 변화에 따른 TEM cell 특성임피던스
와 Tippet(d=0) 결과 비교
Comparison of Tippet's result and proposed result
for characteristic impedance in TEM cell varying
width of septum

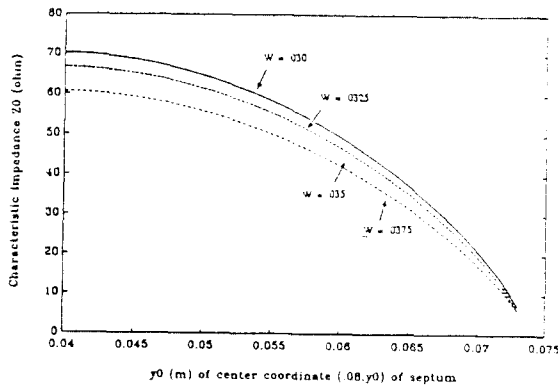


그림 8. 내부도체가 +y 방향 이동에 따른 특성임피던스
Characteristic impedance in TEM cell moving
septum to +y direction

그림처럼 $d \rightarrow 0.0$ 으로 갈때 Tippet의 결과[7]와 잘 일치되고 있음을 볼 수 있다. 상기 그림을 잘 살펴보면 특성임피던스의 경우 내부도체 폭(2w)을 외부도체 수평면 길이(2a)에 가까워수록 그 증가율이 급격하게 감소함을 관찰할 수가 있다.

내부도체가 굵기를 갖는 경우 Crawford의 실험치[7]와 비교한 결과 $a=50\text{cm}$, $b=50\text{cm}$, $w=41.28$, $d=0.157\text{cm}$ 의 측정치 51.98Ω 인 반면 계산된 결과는 52.31Ω 이었으며, $a=50\text{cm}$, $b=$

30cm , $w=36.05\text{cm}$, $d=0.157\text{cm}$ 의 측정치 52.11Ω 인 반면 여기저의 계산치는 52.26Ω 으로 나타나다 Crawford 실험치와 좋은 일치를 보이고 있음을 볼 수 있었다.

또한 그림8.에서는 그림5,6에서처럼 내부도체를 y축 방향으로 이동시 특성임피던스 변화를 나타내고 있다. 단 여기서의 $a=8\text{cm}$, $b=4\text{cm}$, $w=3\text{cm}$, 3.25cm , 3.3cm , 3.75cm 로 비교적 작은 내부도체 폭 변화에 따른 특성임피던스이다. 여기서도 역시 그림7.에서처럼 내부도체가 외부도체 밖으로 가까이 갈때 특성임피던스 감소율이 커짐을 볼 수 있다. 그러나 상기 그림8.에서처럼 내부도체가 $y_0=0.06\text{m}$ 까지 이동시 특성임피던스 변화율이 작음을 볼 수 있는데, (단위길이당 캐패시턴스 변화율을 보면 더욱 변화율이 작음을 볼수있음) 이때 TEM cell 내에서의 시험공간인 내부도체 하단부에서는 그림5,6.의 (3)과 유사한 전장이 형성된 것이다.

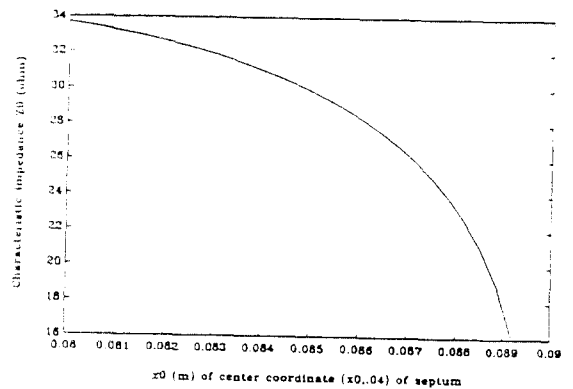


그림 9. 내부도체가 +x 방향 이동에 따른 특성임피던스
Characteristic impedance in TEM cell moving
septum to +x direction

또한 그림9.에서는 내부도체를 좌우로 이동시 특성임피던스 변화율을 나타내고 있는데, 상기 그림처럼 균등장을 얻기 위해 내부도체 폭을 넓게 취하는 경우 약간의 좌우 이동에 따른 변화율이 심하게 증가함을 볼 수 있다. 상기그림의 구조는 $a=8\text{cm}$, $b=4\text{cm}$, $w=7\text{cm}$, $d=0.5\text{cm}$

인 형태를 이루고 있으며 이때 내부중심 좌표는 $y_0=4\text{cm}$ 로 고정되고 x_0 를 8cm로부터 9cm까지 변화시켰을 때의 값이다. TEM cell설계시 시험공간 최대 확보는 매우 중요한 의미를 갖는다.¹⁸⁾ 상기 그림들을 통해 내부도체를 +y방향(윗방향)으로 이동시켜 시험공간인 내부도체 하단부를 $y_0=6\text{cm}(=3/2*a)$ 까지 넓히고 좌우 대칭성이 유지된다면 그때의 특성임피던스에 많은 영향을 주지않고 균등장이 깨지지 않음을 확인 할 수 있다.

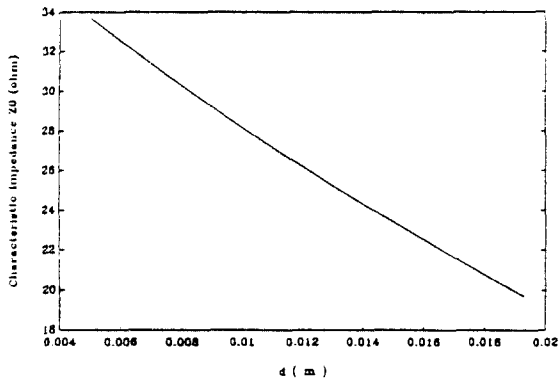


그림 10. 내부도체 굵기(2d) 변화에 따른 TEM cell 특성임피던스
Characteristic impedance in TEM cell varying thickness of septum

상기 그림9.의 대칭구조를 갖는 TEM cell에서 단지 내부도체 굵기를 변화시켰을 때 즉 $a=8\text{cm}$, $b=4\text{cm}$, $w=7\text{cm}$, $d=0.5\text{cm}$ 에서 2cm까지 변화에 따른 특성임피던스 변화를 그림10.에 나타내고 있다. 여기서는 거의 반비례적으로 변하고 있음을 볼 수 있으나 내부도체 굵기(2d)가 외부도체 수직벽 길이(2b)에 가까워지면 매우 감소율이 높을 것이다.

특성임피던스는 내부도체 벽이 외부도체 벽에 가까워질수록 그 사이에 유기되는 전계의 증가로 인해 매우 높은 비율로 감소할 것이다.

V. 결 론

TEM cell의 특성중 전자계 분포 및 특성임피던스를 구하기 위해 Spiegel에 의해 제시된 바 있는 준정적근사화에 기초한 모멘트법을 확장시켜 특성임피던스를 구하였다. 그결과 내부도체가 매우 가느다란 경우 Tippet의 결과와 좋은 일치 를 보이고 있으며 Tippet의 수식으로도 구할수 없는 영역은 물론, 구형 내부도체가 임의의 두께, 폭 및 위치를 갖는 TEM cell에 대해서도 해석될 수 있었다.

TEM cell내에서 균등장이 보장되는 한계에서 시험공간 최대 확보는 중요한 문제이다. 상기 결과를 토대로 내부도체를 위로 올려시험공간을 확보해도 어느 정도 범위내에서 (상기 특징예에서는 $y_0=0.06\text{m}$) 전자계 및 특성임피던스에 그리 큰 영향은 주지 않음을 볼 수 있었다. 그러나 내부도체 폭(W)이 큰 경우, 좌우 이동에 따른 특성임피던스 변화율이 크므로 주의할 해야 할 것이다.

차후로는 연구를 더욱 활성화하여 일반적인 형태를 갖는 TEM cell의 미고려된 차단주파수 및 공진주파수를 수치해석을 통한 정확한 분석이 시도 되어야 할 것이며 가능한 넓은 시험공간에서 균등장을 유지 할수 있기 위한 내부도체 형태의 최적화가 요청되고 있다.

참 고 문 헌

1. M.L. Crawford ; J.C. Workman Using a TEM cell for EMC measurments of electric equipment N.B.S. (U.S.) Tech. Note 1013, 1979 April
2. Motohisa Kanda, R. David Orr Generation of standard electromagnetic fields in TEM cell. N.B.S. Tech. Note 1319, 1988 August
3. 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. N.B.S.(U.S.) NBSIR 76 841;1976 June
4. Larsen, E.B. Techniques for producing standard EM fields from 10 KHz to 10 GHz for evaluation radiation monitors, Proc. Symp. on Electromag. Fields in Biolog. Systems; 1978 June; Ottawa, Canada, 96-112
5. Donaldson, E.E.; Free, W.R.; Robertson, D.W.:

- Woody, J.A. Field measurements made in an enclosure. Proc. IEEE 66(4) : 466-472; 1978 April .
6. Galen, H.K.; William D.B. Implementation of an automated system for measuring radiated emissions using a TEM cell. IEEE Tran, on Instr. and Measur. Vol.38, No.2, 1989 April.
 7. Crawford, J.C. Generation of standard EM fields using TEM transmission cells. IEEE Trans. Electromagn. Comp. EMC 16(4) : 189 195; 1974 November.
 8. Tanaka, Y. ; Honma, T.;Kaji, I. A three dimensional analysis of a TEM cell model by mixed boundary element method. 1984 International Symposium on EMC, Vol.1 : 24 29 page, 1984 Oct.
 9. Tanaka, Y. ; Honma, T.; Kaji, I. A three dimensional analysis for symmetrical TEM cells by the mixed boundary element method based on both constant and linear elements. Trans. Inst. Electron. and Com. Eng. JPN, Sect. E.(Japan) Vol. E67, No.9; 474 9 page, 1984 Sept.
 10. Tippet, J.C.; Chang, D.C. Radiation characteristics of dipole sources located inside a rectangular coaxial transmission line. N.B.S.(U.S.) NBSIR 75 829; 197 6 January.
 11. B.N.das; S.Ananda Mohan Analysis of a TEM cell with septum on a dielectric slab. IEEE Tran, Electromag. Compat. EMC 27(1); 16 page, 1985 February.
 12. B.N. Das; S.Ananda Mohan TEM cell in absence of one of the walls parallel to the septum. IEEE Tras. Electromag. comp. EMC 27(2); 58 63 page, 1985 May .
 13. Spiegel, R.J.; Jones, W.T.; Blackman, C.F.; Wood, A.W. A method for calculating electric and magnetic fields in TEM cell at ELP. IEEE Trans. Electromagn. Compat. EMC 29(4) : 265 272; 1987 November
 14. J.Van Bladel Electromagnetic Fields, New York : McGraw hill, 1964, 126 and 274 page.
 15. The nan Chang; Qusi static analysis of electric and magnetic fields in TEM cell. J.Chin. Inst. Eng.(Taiwan) Vol 12, No.1 1989 Jan.
 16. Roger F.Harrington field computation by moment methods. Macmillan series in Electrical Science, 19 68.
 17. Decker, W.F.; Wilson, W.A.; Crawford, M.L. Construction of a large transverse electromagnetic cell. N.B.S.(U.S.) Tech. Note 1011;1979 February.
 18. M.L. Crawford; J.C. Workman Asymmetric versus symmetric TEM cells for EMI measurements. IEEE 1978 International Symposium on EMC, Atlanta, Ga., June 20 22, 1978 (78 CH 1304 5 EMC)
 19. Collin Field Theory of Guided Waves, New york : McGraw Hill Book Company, page 43 47, 1960.



윤 재 훈(Jae Hoon YUN) 正會員
 1960年 9月10日生
 1984년 : 중앙대학교 공학사
 1986년 : 중앙대학원 공학석사
 1990년 ~ 현재 : 한국전자통신 연구소
 전파공학연구소장

최 익 권(Ick Kwon CHOI) 正회원
 1987년 ~ 현재 : 한국전자통신연구소
 전파공학연구소장