

論文96-33A-7-10

특성 임피던스 정합을 위한 TEM CELL의 최적 구조 설계와 전계 분포 해석에 관한 연구

(A Study on Design of Optimal Structure of TEM Cell for the Characteristic Impedance Matching and Analysis of the Electric Field Distribution)

鄭勝永*, 李中根*

(Seung-Young Chung and Joong-Geun Rhee)

요 약

본 논문에서는 50의 특성 임피던스로 정합되도록 설계된 TEM Cell의 전계 해석을 수행하고, TEM Cell의 특성 임피던스와 관련된 설계 변수들간의 관계를 연구하였다. 또한 준정적 근사화를 통하여 TEM Cell 내부의 전자계에 대한 적분 방정식을 모멘트 법으로 해석하였다. 본 연구의 결과를 TEM Cell 전자계 해석에 사용되었던 기존의 R. J. Spigel의 해석 방법에 의한 결과와 비교 분석 하였고, 특성 임피던스 해석에 있어서도 상사 변화법을 이용한 근사식과 개선된 임피던스 해석 방법을 비교하여 결과를 나타내었다.

Abstract

In this paper, the analysis of the electric field distribution for TEM Cell which is matched with 50 is performed, and the relations of variables for characteristic impedance are derived. Quasi-static approximations are used to calculate the field strength of the internal field of TEM Cell. The result of the improved method for analysis of the electric field is compared with that of R.J.Spigel. And the improved method for characteristic impedance and the results of numerical analysis are shown.

I. 서 론

최근 전자 산업과 통신 관련 산업의 발전에 따라 우리 주변에는 불요 전자파를 발생시키는 장비나 시스템이 서로간에 매우 밀집하여 존재하고 있다. 이러한 장비나 시스템은 여러가지 결합 경로를 거쳐 주변의 장비나 시스템에 영향을 미치므로, 어떠한 상황과 조건에서도 안정된 상태와 동작을 유지하기 위해서는 전자파 양립성(EMC: Electromagnetic Compatibility)의 확보가 그 어느 때보다 중요시 되고 있다. 일반적으로 전자파 장애나 전자파 양립성의 측정에 관련된 시험장비

는 크게 야외 시험장, 전자파 무반사실, 그리고 TEM Cell 등으로 나눌 수 있는데 그 중에서도 TEM Cell은 설비 가격이 야외 시험장이나 전자파 무반사실 건설에 비해 저렴하고, 여러 가지 사용 제한의 원인(사용 주파수의 범위와 안테나의 지향성 및 편파성)이 되는 안테나를 사용하지 않는다는 장점을 가지고 있다. 그러나 TEM Cell은 균일한 전자계 영역, 피시험체(EUT: Equipment under test)의 크기, 그리고 사용 주파수의 대역이 제한된다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점들은 TEM Cell 자체의 구조 설계 변수에 의해 좌우되기 때문에 TEM Cell의 설계시 구조 설계 변수들간의 상관 관계가 반드시 고려되어야 한다. 특히 전송 선로의 확장 형태로 해석되는 TEM Cell의 임피던스 정합은 매우 중요한 고려 사항이다. 특성 임피던스 부

* 正會員, 漢陽大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng. Hanyang Univ.)

接受日字: 1996年1月3日, 수정완료일: 1996年6月24日

정합에 의한 반사파의 영향은 TEM Cell내의 균일한 전자계 형성과 정확한 실험에 많은 문제점을 초래한다. 따라서 본 논문에서는 TEM Cell의 특성 임피던스 해석으로 이미 잘 알려진 임피던스 해석 모델^[2]을 이용하여 50Ω의 임피던스를 갖도록 TEM Cell의 구조를 유도하였고, 이러한 구조에 대해 경계 적분 방정식^[3]을 이용한 전계 분포 해석을 수행하였다. 또한 비대칭형 TEM Cell에 대해서도 동일 과정을 거쳐 대칭형 TEM Cell과 비교하고 서로간의 성능을 비교하였다. 한편 수치 해석에 의해 얻은 최적화 구조에 따라 직접 TEM Cell을 제작하여 삽입 손실(Insertion Loss)과 전압 정재파비(VSWR)를 측정하였다.

II. TEM Cell의 전계 분포 해석과 특성 임피던스 해석

1. 경계 적분 방정식을 이용한 전계 수치 해석 방법

TEM Cell 내부의 전자계에 대한 근사 해석을 위해 축 방향의 도체를 무한 선전하 분포로 가정하였으며, 이러한 가정은 무한 선전하에 대한 3차원 문제를 2차원 문제로 변환시켜 수치 해석을 단순화 시킨다. 실질적으로 TEM Cell은 차단 주파수(Cutoff Frequency)보다 낮은 주파수 이하에서만 사용이 되므로 전계 분포 해석에는 준정적 근사법을 적용한다^[1]. 기본적으로 준정적 근사법에서는 셀의 크기가 셀 전류에 의해 발생하는 파장보다 작다고 가정하게 되는데 이러한 가정에 의해 TEM Cell내에서 사용하는 전자파의 파장이 단면의 길이에 비해 크고, 도체 표면에 존재하는 전류는 파의 진행 축 방향 성분만 존재한다고 가정 할 수 있다^[1].

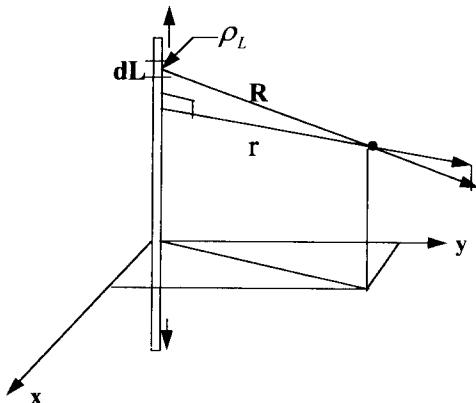


그림 1. 무한 선전하 분포
Fig. 1. Infinite line charge distribution.

그림 1의 무한 선전하 분포를 갖는 도선에서 r [m] 떨어진 임의의 점의 전계와 전위는 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.^[8]

$$\vec{E}_r = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0\gamma} \vec{a}_r \tag{1}$$

$$V = - \int \vec{E}_r \cdot d\vec{r} = - \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0} \int \frac{1}{\gamma} dr = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{1}{\gamma} \right] + C \tag{2}$$

여기서, r은 원천점(Source Point)의 좌표 (x', y')로부터 전계점(Field Point)의 좌표 (x,y)까지의 거리를 나타낸다. 즉 $\gamma = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$ 이다. 식 (2)에서의 상수 C는 무한 공간의 임의의 점에서의 기준 전위를 0으로 가정했을 경우, 생략될 수 있다. 이제 식 (2)에 대해 경계 적분 방정식을 적용하자. 다음과 같은 Green의 2차 정리를 적용하면

$$\iint [f\nabla^2 g - g\nabla^2 f] dv = \iint [f\nabla g - g\nabla f] ds \tag{3}$$

식 (3)에서 임의의 스칼라 함수 f, g를 r-1, V로 각각 대치하면, 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\iint [r\nabla^2 V - V\nabla^2 r^{-1}] dv = \iint [r^{-1}\nabla V - V\nabla r^{-1}] ds \tag{4}$$

Poisson 방정식으로 부터 식 (4)의 좌변 첫번째 적분항 $\nabla^2 V = -\rho/\epsilon\gamma$ 가 되며, 두번째 적분항 $\nabla^2 r^{-1}$ 은 식 (5)에 나타낸 것과 같이 입체각(Solid Angle) A를 전 방향에 대해 적분한 것으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \iint \nabla^2 r^{-1} dv &= \iint \nabla \cdot \nabla r^{-1} dv \\ &= \nabla^2 r^{-1} dv = \iint \nabla \cdot [-r^{-3}\vec{r}] dv \end{aligned} \tag{5}$$

따라서 전계점의 위치에 따라 식 (5)의 해는 식 (6)과 같이 두가지 경우로 고려될 수 있다.

$$\begin{aligned} \iint \nabla^2 r^{-1} dv &= -4\pi \text{ (inside outer conductor)} \\ &= -4\pi \text{ (outside outer conductor)} \end{aligned} \tag{6}$$

즉 식 (6)은 $-4\pi \delta(r)$ 로 나타낼 수 있고, 여기서 $\delta(r)$ 은 Dirac Delta함수이다. 또한 $d\vec{s} = \vec{u}_n \cdot ds$ 이므로, 결국 식 (6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$4\pi V(r) = \iint \frac{\rho}{\epsilon_0\gamma} dv + \iint [r^{-1}\vec{U}_n \cdot \nabla V - V\vec{U}_n \cdot \nabla r^{-1}] ds \tag{7}$$

식 (7)에서 $1/4\pi r$ 을 $-\ln r/2\pi$ 로 대치하여 2차원 문제로 단순화시켜 표현하면 식 (8)이 된다.

$$2\pi V(r) = \iiint \frac{\rho}{\epsilon_0} \ln r dA + \int [\ln r \vec{u}_n \cdot \nabla V - V \vec{U}_n \cdot \nabla \ln r] dC \quad (8)$$

식 (8)에서 경계면 C에 따른 법선 그레디언트(Normal Gradient)를 $\vec{u}_n \cdot \nabla V = \frac{\partial V}{\partial l} = g$ 로 놓고, 그림 2에서 나타난 것과 같이 경계 C를 n개의 미소 길이 ΔC 로 분할하여 순번 j로 한다. 그리고 내부 도체의 전하 분포 영역을 m 개의 미소 면적 ΔA 로 분할 하여 순번 k로 나타내어 각 분할 요소 내부에 대해 r_{ij} 및 r_{ik} 가 일정하다고 가정할 경우, 식 (8)은 식 (9)와 같은 관계가 성립된다^[3].

$$2\pi V_i = \sum_{k=1}^m t_{ik} \rho_k + \sum_{j=1}^n p_{ij} g_j + \sum_{j=1}^n q_{ij} V_j \quad (9)$$

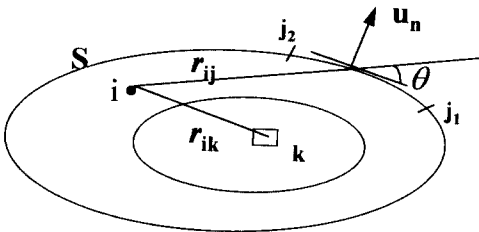


그림 2. 2차원 경계 적분법의 정의
Fig. 2. Definition of two-dimensional boundary integral method.

식 (9)에서 $i \neq j$ 일 경우, t_{ik} , p_{ij} , q_{ij} 는 각각 다음과 같이 정의 된다.

$$t_{ik} = -\epsilon_0^{-1} \iint_k \ln r_{ik} dA = -\epsilon_0^{-1} \ln r_{ik} \Delta A_k \quad (10)$$

$$P_j = -\ln r_j \Delta C_j \quad (11)$$

$$q_j = \int \nabla \ln r_j \cdot \vec{u}_n dC = r_j^{-2} \vec{r}_j \cdot \vec{u}_n \Delta C_j$$

$$[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2] \times [\sin \theta (x_i - x_j) - \cos \theta (y_i - y_j)] \Delta C_j \quad (12)$$

그러나 식 (10), (11), (12)를 구하는데 있어서의 가장 문제가 되는것은 $i=j$ 일 경우에 발생하는 특이성 문제이다. 즉 구하고자 하는 전계점의 적분 경로가 전하가 놓인 분할 요소의 위치와 같을 때 특이성 문제가 발생한다. 따라서 t_{ik} 에 대한 특이성 배제 기법으로써 Harrington의 3차원 구조에 대한 일반 특이성 배제 근사식^[3]을 2차원 전하 분포 영역의 미소 면적에 대한 직접 적분으로 변형하여 풀이하는 방법을 이용하였다. 이러한 기법을 이용함으로써 임의의 두개의 내부 도체를 갖는 구조의 근사 해석이 가능했다.

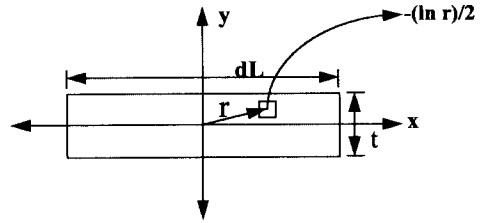


그림 3. $\iint \ln r dR$ 의 의미
Fig. 3. The meaning of $\iint \ln r dR$.

t_{ii} 는 그림 3으로 부터 다음과 같이 유도된다.

$$t_{ik} = -\frac{1}{\epsilon_0} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \ln(\sqrt{x^2 + y^2}) dx dy$$

$$-\frac{1}{\epsilon_0} ab \ln \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2} \quad (13)$$

그러나 p_{ii} 및 q_{ii} 에서 나타나는 특이성을 배제하기 위해서는 다음의 그림 4에 나타난 바와 같은 미소 경계 ΔC 의 변형 기법을 이용한다. 이러한 경계의 분할 적분법은 Salon에 의해 제안되었다.^[9]

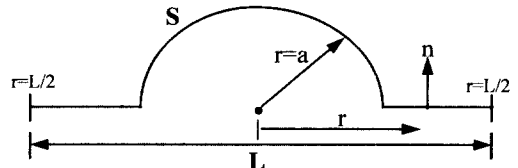


그림 4. 특이성을 배제하기 위한 적분 경로의 변형 모델
Fig. 4. Approximative analysis of the boundary element.

$$p_{ii} = -\lim_{a \rightarrow 0} [\int_{semicircle} \ln r dC + 2 \int_{r=a}^{4c/2a} \ln r dC] \quad (14)$$

$$= -\Delta C \ln \left(\frac{1}{2} \Delta C \right) + \Delta C$$

$$q_{ii} = \lim_{a \rightarrow 0} \left[\int_{\theta=0} \vec{u}_r \cdot \vec{u}_r \left[\frac{1}{r} \right]_{r=a} a d\theta \right] = \pi \quad (15)$$

식 (9)에서 우변의 세번째 항은 외부 도체의 전위를 0으로 하였을 경우 생략할 수 있으며 따라서 TEM Cell과 같은 불평형 전송 선로에 대해서는 다음과 같은 식이 적용된다.

$$2\pi V_i = \sum_{k=1}^m t_{ik} \rho_k + \sum_{j=1}^n P_{ij} g_j \quad (16)$$

식 (16)에서 구하고자 하는 미지항은 내부 도체에서의 전하 분포 밀도 ρ_k 와 외부 도체에서의 법선 그레디언트 g_j 이며, 경계 적분 방정식은 식 (17)에 나타난 바와 같은 행렬 방정식으로 근사화 될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1m} & \rho_{11} & \rho_{12} & \dots & \rho_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2m} & \rho_{21} & \rho_{22} & \dots & \rho_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{m1} & t_{m2} & \dots & t_{mm} & \rho_{m1} & \rho_{m2} & \dots & \rho_{mn} \\ t_{m+11} & t_{m+12} & \dots & t_{m+1m} & \rho_{m+11} & \rho_{m+12} & \dots & \rho_{m+1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{m+n1} & t_{m+n2} & \dots & t_{m+nm} & \rho_{m+n1} & \rho_{m+n2} & \dots & \rho_{m+nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \\ V_{m+1} \\ \vdots \\ V_{m+n} \end{bmatrix} \quad (17)$$

전계 강도 E는

$$\vec{E} = -\nabla V = E_x + E_y = -\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial V}{\partial y} \quad (18)$$

따라서,

$$E_x = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\epsilon_0} \sum_{k=1}^N \rho_k \Delta A_k \frac{(x-x_k)}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} + \sum_{j=1}^m g_j \Delta A_j \frac{(x-x_j)}{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} \right) \quad (19)$$

$$E_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\epsilon_0} \sum_{k=1}^N \rho_k \Delta A_k \frac{(y-y_k)}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} + \sum_{j=1}^m g_j \Delta A_j \frac{(y-y_j)}{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} \right) \quad (20)$$

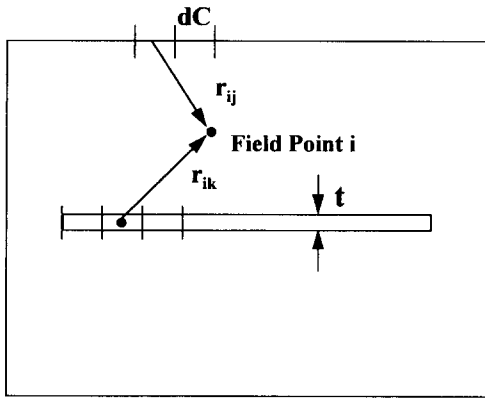


그림 5. 전계 분포 해석을 위한 수치 해석 모델
Fig. 5. Analysis model for the numerical analysis of E-field distribution.

2. 특성 임피던스의 수치 해석

TEM Cell의 특성 임피던스는 TEM Cell의 삽입 손실(Insertion Loss)과 전압 정재파 비(VSWR)에 가장 큰 영향을 준다. 표준 TEM Cell은 전송 라인의 끝이 가늘어지는 부분을 지나 50Ω 의사 부하에 연결이 되므로 공칭 특성 임피던스(Nominal Characteristic Impedance)는 보통 50Ω으로 간주한다^[11]. 따라서 임피던스가 정합되어 반사를 줄이기 위해서는 셀의 모든 구조의 설계 변수를 50Ω의 임피던스를 갖

도록 설계해야 한다. TEM Cell의 피시험체 시험 영역의 전계 필드는 균일한 TEM 모드를 형성한다. 이것은 전계와 자계의 진행 방향 성분(E_z, H_z)이 0이고 서로 수직임을 의미한다. 평면파에서 전계는 라플라스 방정식을 만족하고, TEM Cell의 경우 식 (21)과 같이 표현할 수 있다^[41].

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \vec{E}(x, y) = 0 \quad (21)$$

이것은 관련된 정전계 문제의 해로부터 횡전자계의 분포(Transverse Field Distribution)를 구할 수 있음을 의미한다. 또한 자계는 전계로부터 쉽게 구할 수 있다^[41].

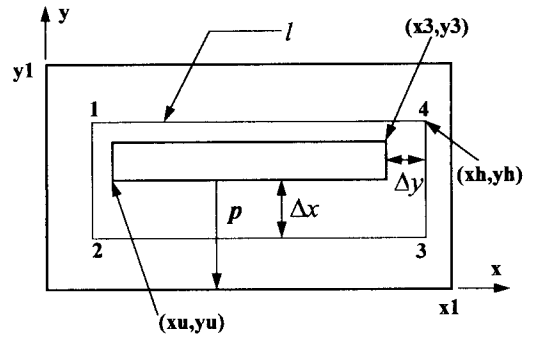


그림 6. 특성 임피던스 해석을 위한 TEM Cell 내부의 적분 경로^[41]
Fig. 6. Integral path of a center conductor, and an outer conductor of a TEM Cell for characteristic impedance analysis.

$$\vec{H}^{\pm} = \pm \frac{\vec{a}_z \times \vec{E}^{\pm}}{\eta_0} \quad (22)$$

여기서

$$\begin{aligned} \vec{E}^{\pm} &= \vec{E}(x, y) e^{j\omega t \pm \gamma z} \\ \vec{H}^{\pm} &= \vec{H}(x, y) e^{j\omega t \pm \gamma z} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$$

따라서 전체 전자계 필드에 대한 식은 아래 식 (24)와 같다.

$$\begin{aligned} \vec{E} &= Re [\vec{E}^+ + \vec{E}^-] \\ \vec{H} &= Re [\vec{H}^+ + \vec{H}^-] \end{aligned} \quad (24)$$

식 (24)의 전계와 자계에 대한 표현식을 전압과 전류의 식으로 표현할 수 있다.

$$\hat{V}(z) = \hat{V}_m e^{rz} + \hat{V}_m e^{-rz} \quad (25)$$

$$\hat{I}(z) = \hat{I}_m e^{rz} + \hat{I}_m e^{-rz}$$

여기서

$$V_m^{\pm} = -\int_p \hat{E}^{\pm} \cdot d\vec{l} \quad (26)$$

$$I_m^{\pm} = -\int_l \hat{H}^{\pm} \cdot d\vec{l}$$

여기서 p 는 TEM Cell의 횡단면에서 내부 도체에 외부 도체까지 이르는 임의의 경로이다. 그리고 l 은 내부 도체를 둘러싼 폐경로(Closed Path)이다^{[21][41]}.

$$Z_0 = \pm \frac{\hat{V}_m^{\pm}}{\hat{I}_m^{\pm}} = \pm \frac{V_m^{\pm}}{\int_l \frac{\mathbf{a}_z \times \mathbf{E}}{\eta_0} \cdot d\vec{l}} \quad (27)$$

결국 전압에 대한 진행파와 반사파의 크기만 알면 식 (27)에 의해 특성 임피던스 값을 구할 수 있다. 여기서는 반사파가 존재하지 않는 임피던스 정합 조건을 가정하여 위 식(27)을 그림 5의 수치 해석 모델에 적용하여 아래와 같이 나타내었다^[2].

$$\begin{aligned} & \int_l \mathbf{a}_z \times \mathbf{E} \cdot dt = \\ & \int_1^2 \mathbf{a}_z \times \{E_x(xl, y)\mathbf{a}_z + E_y(xl, y)\mathbf{a}_y\} \cdot d\vec{l} 2(-a^y) \\ & + \int_2^3 \mathbf{a}_z \times \{E_x(x, yl)\mathbf{a}_x + E_y(x, yl)\mathbf{a}_y\} \cdot d\vec{l} 2(-a^x) \quad (28) \\ & + \int_3^4 \mathbf{a}_z \times \{E_x(xh, y)\mathbf{a}_x + E_y(xh, y)\mathbf{a}_y\} \cdot d\vec{l} 2(-a^y) \\ & + \int_4^1 \mathbf{a}_z \times \{E_x(x, yh)\mathbf{a}_x + E_y(x, yh)\mathbf{a}_y\} \cdot d\vec{l} 2(-a^x) \end{aligned}$$

그림 4를 식 (27)의 분모에 적용하면 위에서 나타낸 (28)을 유도할 수 있다. 또한 식 (27)의 분자는 내부 도체에 인가되는 전압이므로 식 (29)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_0 = \eta_0 V / \left\{ \int_{x_s}^{x_e} \{E_x(x, y_e) - E_y(x, y_s)\} a'x \int_{y_s}^{y_e} \{E_x(xe, y) - E_y(xs, y)\} a'y \right\} \quad (29)$$

$$Z_0 = 2\pi \epsilon_0 \eta_0 V$$

$$\left[\sum_{n=1}^N \rho_n \Delta C \begin{pmatrix} \tan^{-1}\left(\frac{x_e - x_n}{y_e - y_n}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y_e - y_n}{x_e - x_n}\right) \\ -\tan^{-1}\left(\frac{x_s - x_n}{y_e - y_n}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{x_s - x_n}{y_e - y_n}\right) \\ +\tan^{-1}\left(\frac{y_e - y_n}{x_e - x_n}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y_s - y_n}{x_e - x_n}\right) \\ -\tan^{-1}\left(\frac{y_e - y_n}{x_s - y_n}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{y_s - y_n}{x_s - x_n}\right) \end{pmatrix} \right]^{-1} \quad (30)$$

식 (30)에서 알 수 있는 것처럼 특성 임피던스는 내부 도체와 외부 도체에 존재하는 전하와 전계점의 위치의 함수로서 나타낼 수 있으며, 분할 요소의 전하값을 알면 식 (30)에 대입하여 특성 임피던스값을 구할 수 있다.

III. 수치 해석 결과

1. 특성 임피던스 해석 결과

그림 7은 TEM Cell의 횡단면과 설계 구조 변수를 나타낸 것이다. 그림 8 (a)와 (b)는 Spiegel의 해석 방법과 내부 도체의 두께를 고려한 전계 해석 방법 간의 차이를 비교한 것으로 그림 8 (a)는 TEM Cell의 해석 모델의 분할 길이를 서로 달리 했을 경우에 대한 해석으로 내부 도체와 외부 도체의 측벽 주변에서 차이가 남을 알 수 있다. 또한 그림 8 (b)는 셀의 분할 요소의 크기를 서로 같게하여 미소 길이로 분할 했을 경우인데 결과가 서로 일치함을 알 수 있다

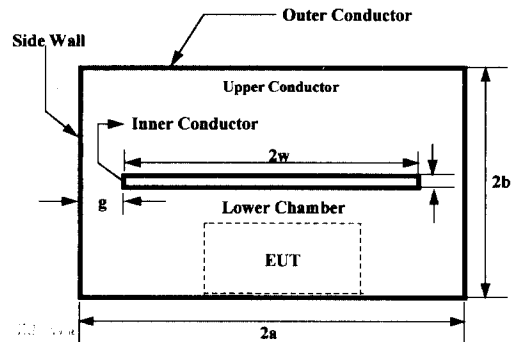
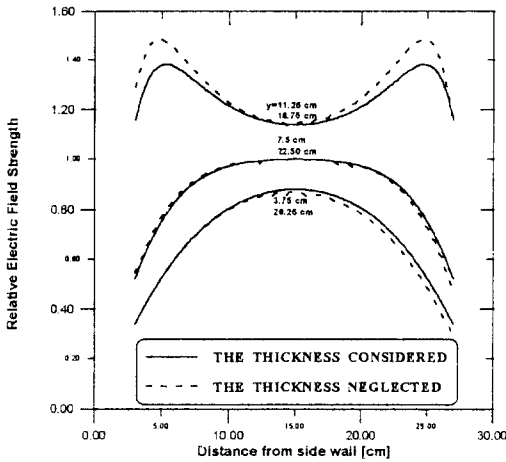


그림 7. TEM Cell의 횡단면과 설계 구조 변수
Fig. 7. Cross section of the analysis model.

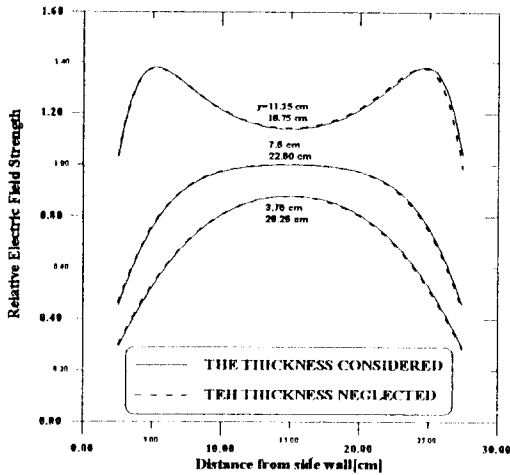
그림 8의 (a)와 (b)의 결과에 의하면 전계 분포 해석시 내부 도체의 두께를 고려하는 것은 그다지 전계 분포에 큰 영향을 미치지 못한다. 원천점에서부터 전계점까지의 거리가 분할 요소의 길이보다 충분히 커서 분할 요소의 길이에 걸친 전하의 변화가 무시될 수 있게 해야 한다. 이것은 모멘트 법을 적용할 때 가정한 것으로서 중심 도체에 가까울 수록 전계값의 신뢰도는 떨어지게 된다.

본 논문에서 추구하고자 하는 것은 특성 임피던스로 정합된 최적 구조의 설계 구조 변수의 비를 유도하고, 이러한 최적 구조에 대해 전계 분포 해석을 수행하는 것이다. 우선 Crawford의 근사식과 본 임피던스 해석법의 비교를 위해 내부 도체와 외부 도체의 x 축

방향 길이비를 각각 $w/a=0.1, 0.4, 0.7$ 로 하여 외부 도체의 가로와 세로 축의 크기비(b/a)에 대한 특성 임피던스 변화를 살펴보았다. 결과를 그림 9에 나타내었다.



(a)



(b)

그림 8. (a) Spigel의 해석 모델의 분할 요소의 길이를 본 논문의 해석 모델의 분할 요소 길이보다 상대적으로 작게한 경우 (b) Spigel의 해석 모델의 분할 요소 길이와 본 논문의 해석 모델의 분할 요소 길이가 같은 경우

Fig. 8. Comparison of E-field distribution according to the variation of length of subdivision.

그림 9의 결과에 의하면 특성 임피던스는 내부 도체와 외부 측벽간의 간격이 상대적으로 작아짐에 따라 감소함을 알 수 있다. 이것은 간격(g)의 길이가 작아짐에 따라 내부 도체와 외벽의 측벽간의 커패시턴스가 증가

하기 때문이다.

TEM Cell의 특성 임피던스는 설계 구조 변수 중에서도 내부 도체와 외부 도체 사이의 갭에 의해 가장 큰 영향을 받는다. 또한 Crawford의 근사식의 유효 범위를 벗어난 영역, 즉 $b/a=1$ 이상의 영역에서는 더 이상 임피던스가 변화하지 않음을 알 수 있다. 즉 이러한 결과에 의해서도 특성 임피던스는 내부 도체와 외부 도체 측벽 간의 간격에 의한 커패시턴스의 변화에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

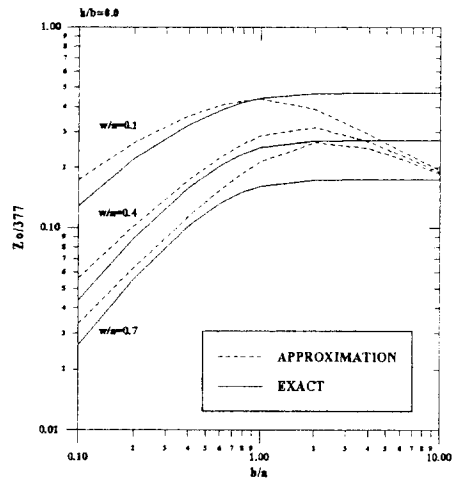
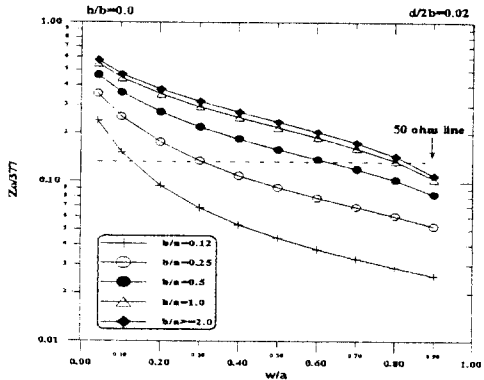


그림 9. 내부 도체의 폭의 변화와 외부 도체의 크기비 (b/a)의 변화에 대해 두께를 고려한 임피던스 값과 Crawford 식에 의한 특성 임피던스 값의 비교

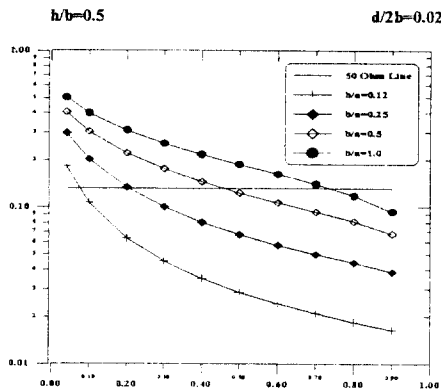
Fig. 9. Comparison of the characteristic impedance considering the thickness.

또한 일반적으로 TEM Cell은 차단 주파수 범위 밖에서는 고차 모드가 형성되므로 차단 주파수 이하에서만 사용한다. 큰 피시험체를 수용하기 위해 셀의 크기를 늘릴 경우 차단 주파수는 셀의 크기의 증가에 비례해서 작아진다. 실험적으로 최대 시험 주파수와 최대 시험 영역의 최적 구조는 $2b$ 가 $2w$ 와 같을 때로 알려져 있다^[7]. 이러한 구조에서 시험 영역에서의 전계의 균일성은 2 dB내이다. 여기서 시험 영역을 줄이고 b 를 0.6w로 줄일 경우 필드의 균일성은 1dB 내외로 개선된다^[7]. 일반적으로 TEM Cell에서는 피시험체의 시험 영역의 확장을 위해 내부 도체의 높이를 증가시킨다. 내부 도체의 높이 증가와 폭의 변화에 대한 임피던스의 변화를 그림 10에 나타내었다. 여기서 그림 10 (a)는 내부 도체를 대칭으로 놓았을 경우이고 그림 10

(b)는 내부 도체의 높이를 증가시켰을($h/b=0.5$) 경우이다. 그림 10의 결과에 따르면, 내부 도체의 높이만 증가시켰을 경우, 특성 임피던스는 상대적으로 감소함을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 10. (a) 내부 도체가 대칭일 경우 내부 도체의 폭의 변화와 외부 도체 크기비 (b/a)에 대한 특성 임피던스의 변화 (b) (a)에서의 내부 도체의 높이를 변화($h/b=0.5$) 시켰을 경우의 특성 임피던스의 변화

Fig. 10. In symmetrical inner conductor (a) The change of characteristic impedance for the width variation of a inner conductor, and the ratio (b/a) of a outer conductor, (b) The change of characteristic impedance for the height variation ($h/b=0.5$) of inner conductor.

또한 실제 TEM Cell의 제작시 내부 도체가 대칭을 이루지 못하고 한 쪽으로 치우칠 수 있다. 이러한 상황에 대해 그림 11은 내부 도체가 x축 방향으로 치우칠

경우에 대한 영향을 나타 내고 있다. 특히 내부 도체의 좌우 이동은 폭이 클 경우가 작을 경우보다 더욱 현저해진다. 두께에 대한 변화 역시 내부 도체와 외부 도체의 미소 갭의 변화이므로 커패시턴스의 증가와 감소에 따라 임피던스가 변한다. 즉 내부 도체의 두께가 증가할 수록 임피던스는 감소한다. 그러나 실제 상황에서 내부 도체의 두께에 대한 선택 범위가 상당히 작으므로 보통 4% 범위 내외에서 변한다.

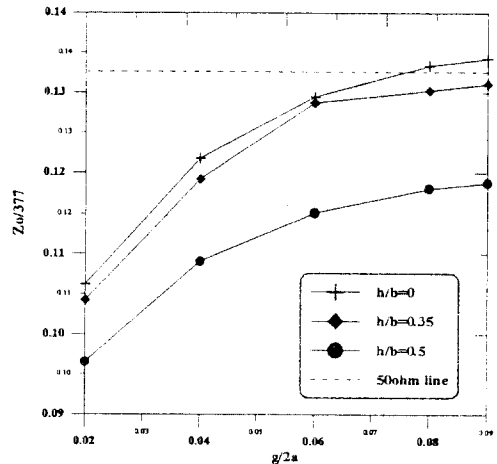


그림 11. 내부 도체(Septum)가 x축 방향으로 치우칠 경우의 특성 임피던스 변화

Fig. 11. The change of characteristic impedance for septum slid to x axis.

2. 특성 임피던스 정합된 최적 구조의 전계 분포 해석

그림 12는 특성 임피던스가 정합된 구조를 갖는 TEM Cell의 단면을 나타낸 것이다. 그림 12의 결과는 그림 9와 그림 10을 이용한 것으로 그림에 표시된 50Ω 선상과 일치하는 각각의 설계 구조 변수 비를 그림으로 나타낸 것이다. 그림 13은 그림 12의 구조에 대한 전계 해석으로써 외부 도체의 왼쪽 측벽에서 오른쪽 측벽까지의 거리와 내부 도체의 높이에 대한 전계 분포를 나타낸 것이다. 그림 14는 내부 도체 아래의 시험 영역 중심점에서의 전계값을 기준으로 1dB 범위 안의 상대 전계값의 분포를 나타낸 것으로 1dB 편차 영역이라고 한다. 그림의 결과에서 보듯이 외부 도체의 세로 길이가 작아질 수록 1dB 편차 영역은 넓어지나 내부 도체의 높이가 증가하면 1dB 편차 영역은 거의 변하지 않는다.

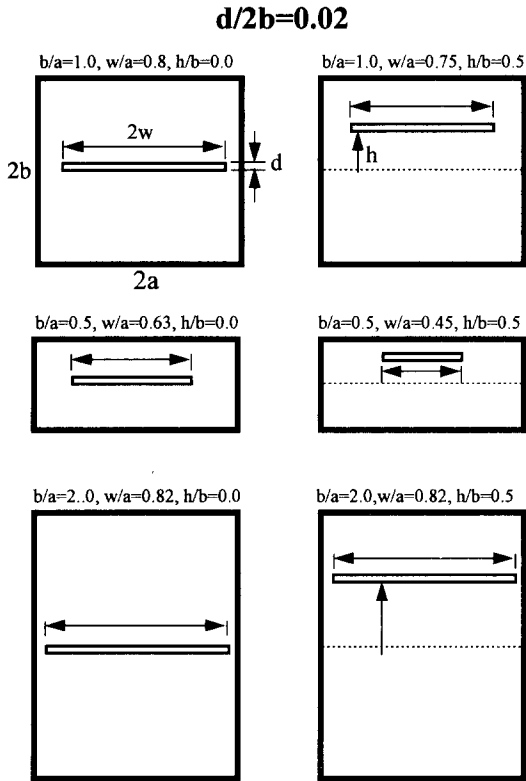


그림 12. 그림 9와 그림10에서의 50 Line과 일치하는 설계 변수 비를 갖는 TEM Cell의 단면
 Fig. 12. The cross section of a TEM Cell with the ratio of practical parameter in accordance with 50 line in Fig. 9, Fig. 10.

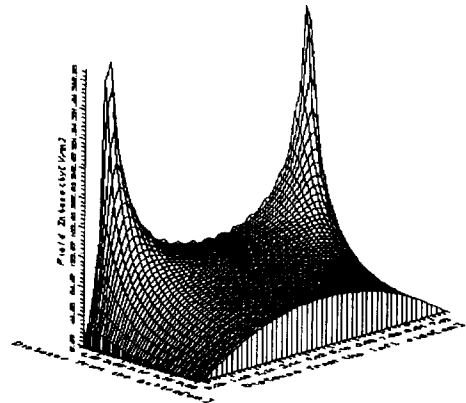
그림 13에 나타낸 것과 같이 외부 도체의 세로축 길이를 짧게한 경우는 상대적으로 높은 전계가 형성된다. 반대로 세로축의 길이를 길게 할 경우는 상대적으로 낮은 전계가 형성되고, 1dB 편차 영역도 작아진다. 결론적으로, TEM Cell의 설계 시 각각의 상황에 따라 크기 비를 조절하여 최적의 조건과 일치하는 구조를 선택해야 한다.

IV. 실험 제작과 측정 및 결과

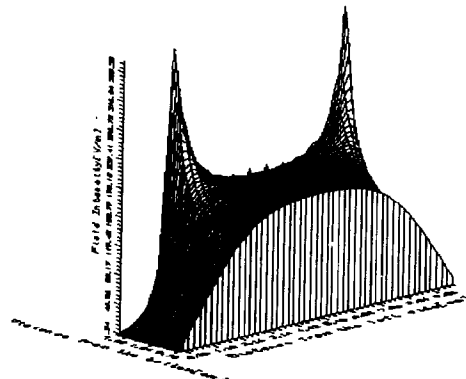
1. 전계 강도 측정

실제 제작한 정방형 구조의 특성 임피던스 정합 구조와 일치하는 TEM Cell을 그림 15 나타내었다. TEM Cell의 주파수 변화에 따른 전계 강도와 전압 정재파비 그리고 삽입 손실을 측정하고 이를 수치 해석 결과와 비교하였다.

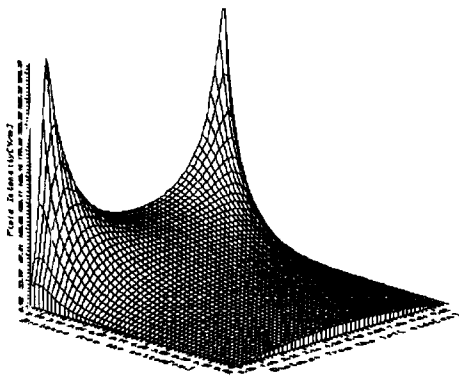
그림 16의 결과에서 알 수 있듯이 TEM Cell의 입력단의 입력 전압이 4.6V일 경우 100 MHz에서 300 MHz 까지의 넓은 주파수 대역에 걸쳐 균일한 전계가 형성됨을 결과 그래프에 의해 알 수 있다. TEM Cell의 특성 임피던스가 TEM Cell의 성능에 미치는 영향을 알기위해 삽입 손실과 전압 정재파 비를 측정하였다. 삽입 손실은 전자파 에너지가 TEM Cell을 통과시 발생하는 손실이며, 측정값이 낮을수록 전송 선로상의 특성 임피던스 부정합이 작음을 의미한다. 그림 17은 삽입 손실의 측정 결과이고 그림 18은 귀환 손실의 측정 결과이다. 그림 17에서 보면, 상한 주파수인 280 MHz까지는 거의 1 dB이하의 손실을 갖으나, 그 이상의 주파수에서는 약 6 dB정도의 손실을 갖는다. 따라서 TEM Cell의 차단 주파수 이하에서는 좋은 삽입 손실 특성을 갖는다.



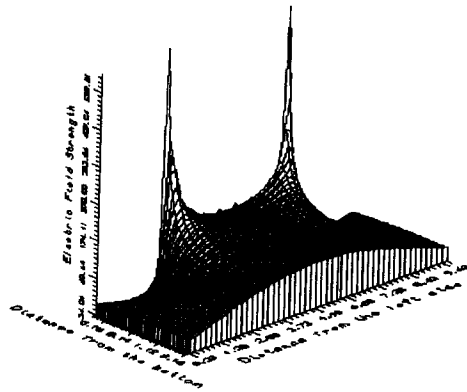
(a) b/a=1, w/a=0.8, h/b=0, d/2b=0.02



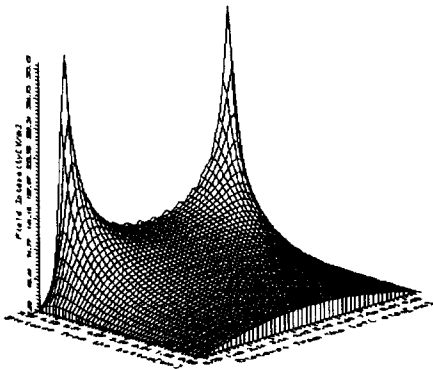
(b) b/a=0.5, w/a=0.63, h/b=0, d/2b=0.02



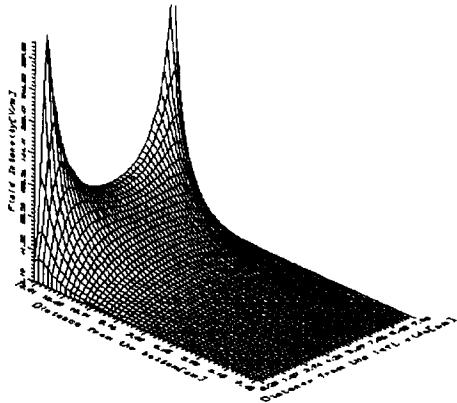
(c) $b/a=2, w/a=0.82, h/b=0, d/2b=0.02$



(e) $b/a=0.5, w/a=0.45, h/b=0.5, d/2b=0.02$

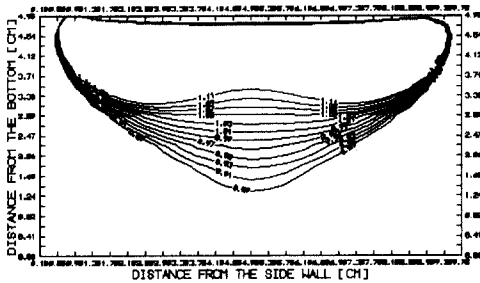


(d) $b/a=1, w/a=0.75, h/b=0.5, d/2b=0.02$

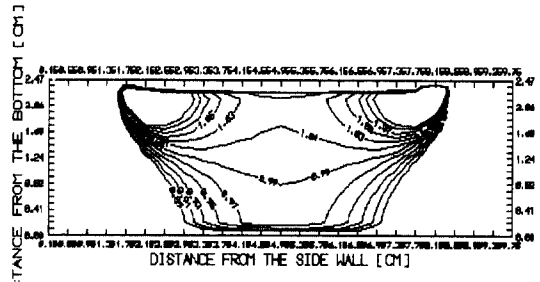


(f) $b/a=2, w/a=0.82, h/b=0.5, d/2b=0.02$

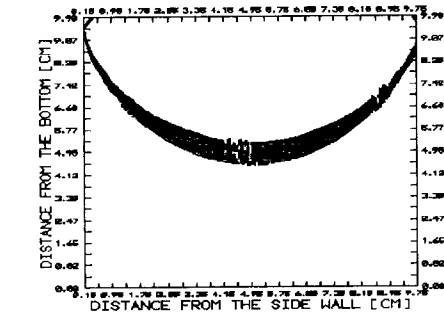
그림 13. 그림 12의 구조에 대한 시험 공간에서의 전계 분포
 Fig. 13. The electric field distributions for the structures of fig. 12.



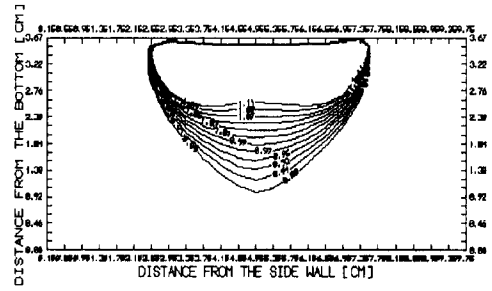
(a) $b/a=1, w/a=0.8, h/b=0, d/2b=0.02$



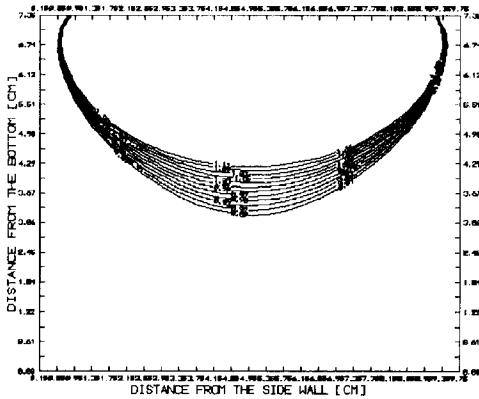
(b) $b/a=0.5, w/a=0.63, h/b=0, d/2b=0.02$



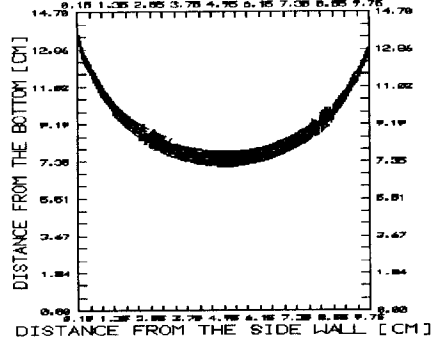
(c) $b/a=2, w/a=0.82, h/b=0, d/2b=0.02$



(e) $b/a=0.5, w/a=0.45, h/b=0.5, d/2b=0.02$



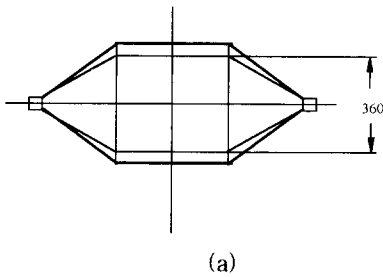
(d) $b/a=1, w/a=0.75, h/b=0.5, d/2b=0.02$



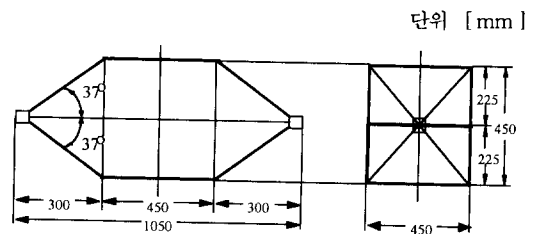
(f) $b/a=2, w/a=0.82, h/b=0.5, d/2b=0.02$

그림 14. 시험 영역의 중심에 유기되는 전계값에 대한 1 dB 편차 이내의 상대 전계값 (1 dB편차 영역이라고 함)

Fig. 14. 1dB field strength deviation region in the test area.



(a)



(b)

그림 15. 설계 제작한 TEM Cell (a) 위에서 본 그림 (b) 옆에서 본 그림 (c) 횡단면
Fig. 15. Drawing of the designed/fabricated TEM Cell.

그림 18의 귀환 손실은 약 10~15dB 정도가 된다. 따라서 VSWR은 관련된 식에 의해 약 1.5 이하임을 알 수 있다.

V. 결론

그림 13과 그림 14의 결과에 의하면 피시험체의 시

험 영역을 확장하기 위해 내부 도체의 높이를 증가시킬 경우, 1 dB 영역은 높이를 변화시키기 전보다 상대적으로 작아진다. 그러나 외부 도체의 크기를 정방향 ($a/b=1$) 형태로 유지하고 내부 도체의 높이를 증가시킬 경우($h/b=0.5$)는 중심점에서의 전계값은 약간 작아 지나 1 dB영역은 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 따라서 큰 피시험체의 시험 영역을 위한 비대칭 TEM

Cell구조는 1dB영역의 감소 없이 보다 넓은 시험 영역을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 또한 내부 도체와 외부 도체의 대칭형 구조를 유지하고 외부 도체의 세로축 길이를 작게 할 경우, 내부 시험 영역에 형성되는 전계는 상대적으로 커지고 1dB 영역도 증가한다. 이러한 비대칭형 구조 ($h/b \neq 0$) 역시 1dB 영역의 차이없이 피시험체의 시험 영역을 확장시킬 수 있다. 따라서 실제 TEM Cell을 제작할 경우, 1dB영역을 넓게 유지하고 시험 영역을 확장하기 위해서는 외부 도체의 크기가 $b/a < 1$ 이 되도록 한다.

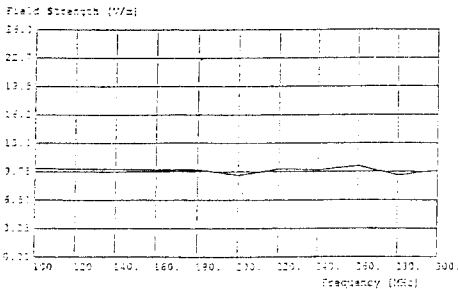


그림 16. 전계 강도 측정 결과
Fig. 16. Result of the E-field strength measurement.

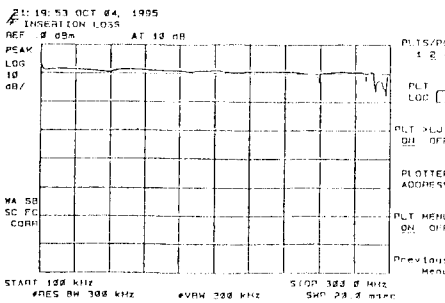


그림 17. 제작된 TEM Cell의 삽입 손실 측정 결과
Fig. 17. Result of the insertion loss measurement.

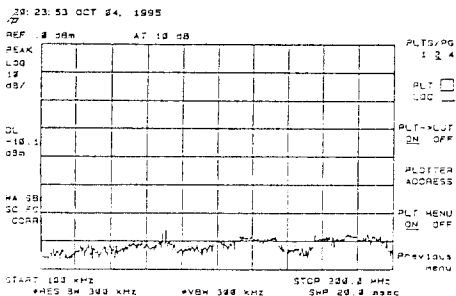


그림 18. 제작한 TEM Cell의 귀환 손실 측정 결과
Fig. 18. Result of the return loss measurement.

이것은 앞에서 언급한 참조문 [4]의 실험 결과와도 일치한다.

앞으로 연구할 과제로는 TEM Cell의 고차 모드 특성과 내부 도체의 형태의 변화에 따른 전계 분포 형성에 관한 정확한 수치해석이 요구되고 또한 표준 TEM Cell을 개량한 GTEM Cell이나 WTEM Cell 등의 다양한 TEM Cell에 대해서도 많은 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R. J. Spiegel, W. T. Joines, C. F. Blackman, A. W. Wood, "A Method for Calculating Electric and Magnetic Fields in TEM Cells at ELF", *IEEE Transaction, Electro-magnetic Compatibility*, Vol. 29, November 1987.
- [2] 윤재훈, 모던트법을 이용한 임의의 구형 내부도체를 갖는 TEM Cell의 특성 분석, 한국 통신 학회 논문지 Vol. 15
- [3] S. Ratnajeevan, H. Hoole, *Compter_Aided Analysis and Design of Electromagnetic Device*, Elsevier, New York, 1989.
- [4] J. C. Tippet, D. C. Chang, "Radiation Characteristics of Dipole Sources Located inside a Rectangular, Coaxial Transmission Line", NBSIR 75-829, January 1976.
- [5] A. A. Oliner, "Theoretical Developments in Symmetrical Strip Transmission Line", *Proceedings of the Symposium on Modern Advances in Microwave Techniques*, Vol. 4, Brooklyn, N. Y.: Poly-technic Institute of Brooklyn, 1954.
- [6] L. Gruner, "Higher Order Modes in Rectangular Coaxial Waveguides", *IEEE Transaction, Microwave Theory Technique*, Vol. 15, August 1967.
- [7] Ernest .E.Donaldson *Field Measurements made in an Enclosure*, IEEE Transaction, 1978.
- [8] David K. Cheng *Field and Wave Electormagnetics* Second Edition.
- [9] N.Morita, N. Kumagai, J. R. Mautz, *Integral Equation Methods for Electromagnetics*.

[10] 이 중근, "전자파 내성 평가 기술 연구", 기아 자동차, 한양대학교 산업 과학 연구소, 1992

[11] 이 중근, "전자파 장애 방지 기술 연구(IV)", 체신부 전파 연구소, 한국 전자파 기술 학회, 1993

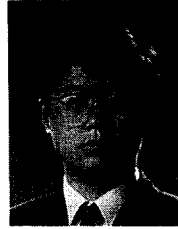
저 자 소 개



李 中 根(正會員)

1945年 4月 21日생. 1967년 서울대학교 공학사(전기공학). 1973년 미국 플로리다 주립대학 공학석사(전자공학). 1979년 미국 플로리다 주립대학 공학박사(전자공학).

1979년 ~ 1988년 국방과학 연구소 책임연구원. 1984년 ~ 현재 체신부 전파연구소 자문위원. 1988년 ~ 현재 한양대학교 전자공학과 교수



鄭 勝 永(正會員)

1969年 4月 23日생. 1994년 2월 한양대학교 전자공학과(공학사). 1996년 2월 한양대학교 전자공학과(공학석사)