

와이어 어레이 형태의 내부 도체를 갖는 W-TEM Cell의 전자계 분포 특성에 관한 연구

正會員 김 명 훈*, 이 중 근**

A Study on the Electromagnetic Field Distributions in a W-TEM Cell having Wire Array as an Inner Conductor

Myung Hoon Kim*, Joong Geun Rhee** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 TEM Cell 내부 전자계의 균일성을 개선시키기 위한 내부 도체의 변형된 구조에 대해 다룬다. 이는 기존의 도체판이 아닌 와이어 어레이 형태의 내부 도체를 갖기 때문에 Wire TEM cell(W-TEM cell)이라 불리우는데, 기존의 NBS TEM cell과 이 W-TEM cell의 내부 전계 분포에 대한 비교·분석을 위해 준정적 근사화를 통해 얻은 적분 방정식을 내부 도체의 두께까지 고려하여 모멘트법으로 수치 해석하였다. 그 결과로, 본 논문에서 제시하고 있는 W-TEM cell은 생성 전계의 세기가 약 1.4 dB 정도 낮은 값이긴 하나, 전계 강도 분포의 균일성 면에서는 향상된 성능을 가진다는 것을 알 수 있었다. 또한, cell의 내부에 도전성 EUT를 삽입하였을 때에 발생하게 되는 전자계 분포의 왜곡(부하 효과) 정도 역시 NBS TEM cell에 비해 월등히 감소하게 됨을 입증하였으며, W-TEM cell만이 갖는 새로운 설계 변수인 내부 와이어의 갯수에 대해서도 최상의 내부 전계 분포를 위한 와이어 갯수의 최적화 공식을 유도하였다. 한편, 해석 과정을 통해 결정된 설계 변수들을 적용하여 W-TEM Cell을 제작하고, 전압 정재파비(VSWR)와 삽입 손실을 측정하였다.

ABSTRACT

The subject of this paper is the analysis of a Wire-TEM cell(W-TEM cell) which has an inner wire array rather than a metallic septum; its basic structure is similar to a NBS TEM cell. To verify improved performances of this W-TEM cell as a standard EM field generator, well-known quasi-static approximations are employed and their resultant integral equations are numerically analyzed by moment method. Although the electric field strength of a

*한양대학교 전자공학과 석사과정
Dept. of Electronic Eng. of Hanyang Univ.

**한양대학교 전자공학과 교수
Dept. of Electronic Eng. of Hanyang Univ.

論文番號: 96001-0103
接受日字: 1996年 1月 3日

W-TEM cell is 1.4 dB lower than that of a NBS TEM cell, the uniformity of EM field patterns in a W-TEM cell is improved. It is also shown that the EM field distortions resulting from loading by the conducting objects under test (loading effects), are decreased considerably. This paper also deals with the investigations about relationship between the EM field distributions and the number of wire composing the inner conductor. Finally, the experimental analysis is performed on the practical model which is built on the basis of the design variables brought out by the theoretical and numerical analysis.

I. 서 론

현대인들의 생활에서 전자파 스펙트럼(electromagnetic spectrum)이 차지하는 비중은 가히 절대적이라 할 정도이며, 실제로 그에 대한 의존도는 매우 높아져 가고 있다. 이와 같은 추세로 인해 전자파 장애 문제 역시 날로 증가하고 있는데, 한 장비가 이에 대응할 수 있는 전자파 양립성을 확보하기 위해서는 양립성 있는 회로의 설계와 제작 뿐 아니라 그 장비의 전자파 장애 특성을 규명하고 제어하기 위한 정확하고 신뢰성 있는 측정 또한 필요하게 된다. 전자파 잡음의 피시험체(EUT, Equipment Under Test)에 대한 결합(coupling) 양상에 따라 여러가지 측정 방법들을 크게 나누어 보면, 주변 전자계법(ambient field method)과 전류 주입법(current injection method), 그리고 전압 주입법(voltage injection method)의 세가지를 들 수 있으며, 이 중 주변 전자계법에 사용되는 시험 장치들로는 야외 시험장(OATS, Open Area Test Site)과 전자파 무반사실(anechoic chamber), TEM cell 등이 있다[1][2][3][4]. 그 가운데에서도 TEM cell은 획득 비용이 저렴할 뿐 아니라 주파수 대역이나 위상의 직선성 지향성 및 편파 특성 등에 제한을 받게 되는 안테나를 사용하지 않으며, 외부와 전기적으로 분리된다는 장점으로 인해 널리 이용되고 있다[5][6]. 하지만 TEM cell은 그 자체적인 전자기적 특성으로 인해 균일한 전계 영역이 제한되고, 시험 가능한 EUT의 물리적인 크기 역시 제한되며, 사용 주파수의 상한값이 cell의 크기에 따라 제한된다는 단점을 가지고 있다. 이와 같은 특성들로 미루어 볼 때, 다음과 같은 다섯가지가 TEM cell의 성능을 좌우하게 되는 설계시 주요 고려 사항이라 할 수 있다[7].

① 시험 가능한 단면적의 최대화.

② 유효 상한 주파수의 최대화.

③ 임피던스 부정합이나 VSWR의 최소화.

④ 내부 전자계 균일성의 최대화.

⑤ 부하 효과의 최소화.

본 논문의 해석 대상인 W-TEM cell은 그 내부 도체의 구조를 기존의 도체판이 아닌 와이어 어레이의 형태로 변형시킨 것으로서, 결과적으로 위의 설계 고려 사항 ①, ④번에 대한 향상 뿐 아니라, 도전성 EUT와 cell의 내부 도체 사이에 존재하는 전자기적 결합 효과를 감소시켜 고려 사항 ⑤번의 부하 효과에 대한 성능 향상을 도모한 것이다. 이의 분석을 위해서 준정적 근사화(quasi-static approximation) 기법을 통한 적분 방정식들을 와이어 어레이 구조의 내부 도체에도 적용할 수 있도록 내부 도체의 두께까지 고려하여 모멘트법으로 수치 해석을 수행하였으며, 이를 이용하여 내부 전계 강도의 균일성과 부하 효과로 인한 전계의 왜곡 정도를 기존의 NBS TEM cell과 비교·분석해 보았다. 또한, W-TEM cell이 새롭게 갖게 되는 설계 변수인 와이어의 갯수 L 을 변화시켜 가며 최적 전계 분포에 대해 고찰함으로써, 전계 분포와 와이어의 갯수에 대한 관계식을 유도하였다. 한편, 이와 같은 과정을 통해서 얻어진 설계 변수들에 기초하여 W-TEM cell을 직접 제작하고, 삽입 손실(insertion loss)과 전압 정재파비(VSWR)를 측정하였다.

II. W-TEM cell의 수치 해석 기법

TEM cell을 이용한 EMI/EMC의 측정에 사용되는 주파수는 cell의 유효 상한 주파수(고차 모드의 차단 주파수) 이하의 대역이기 때문에, 준정적 근사화의 방법이 적용될 수 있다. 준정적 근사화는 생성 전자계 주파수의 파장에 비해 cell의 크기가 작다는 가정,

즉 전류 분포의 원천점으로부터 전자계 관측점까지의 거리가 그 파장에 비해 매우 작다는 가정 하에서 유효한 것인데[8], 본 논문의 해석 대상인 W-TEM cell에 대해서 이 가정은 타당한 것이다.

페이저를 도입하여 시간 의존 인자 $e^{i\omega t}$ 를 소거한 시간 조화 전자계(time-harmonic field)에서 정적 제한(static limit)인 $\omega=0$ 을 적용하면, 전계와 자계는 각각 다음과 같이 주어지게 된다[9].

$$\begin{aligned} \vec{E} &= -\nabla\Phi \\ \vec{H} &= \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \end{aligned} \quad (1)$$

이때, Φ 와 는 각각 전계 스칼라 포텐셜(electric scalar potential)과 자계 벡터 포텐셜(magnetic vector potential)을 나타내는 것으로서 다음의 식을 통해 얻어진다.

$$\vec{\Phi}(\vec{r}) \simeq \frac{1}{\epsilon} \int \rho(\vec{r}_0) G(\vec{r}, \vec{r}_0) dV \quad (3)$$

$$\vec{A}(\vec{r}) \simeq \mu \int \vec{J}(\vec{r}_0) G(\vec{r}, \vec{r}_0) dV \quad (4)$$

여기서 J 는 전류 분포, ρ 는 전하 분포, G 는 그린 함수이고, r 은 관측점, r_0 는 원천점이며, ϵ 은 자유 공간에서의 유전율로 8.854×10^{-12} [F/m]이고, μ 는 $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]의 값을 갖는 자유 공간에서의 투자율이다. 그리고, 다음의 식 (5)와 같은 비제차 미분 방정식의 해를 통해 포와송 방정식에 대한 자유 공간에서의 3차원 그린 함수를 구할 수 있다.

$$\nabla^2 G(x, y, z; x_0, y_0, z_0) = -\delta(x-x_0)\delta(y-y_0)\delta(z-z_0) \quad (5)$$

본 논문의 W-TEM cell 역시 기존의 NBS TEM cell과 마찬가지로 cell의 양쪽 종단에 동축 커넥터들을 연결할 수 있도록 경사진(tapered) 구조를 갖기 때문에, 의사 부하(dummy load) 등의 집중 소자(lumped device)를 이용한 cell 종단의 임피던스 정합이 가능하다. 이와 같이 W-TEM cell이 전기적으로 정합되어 있다면 작은 VSWR 값을 구현할 수 있으며, 결과적으로 cell의 내부 도체를 따라 전류의 진행 방향으로는 전자계 변화가 거의 없게 되고, 전계 성분과 자계 성분의 분포가 진행 방향과 직교하는 평면에서만 변화하게 된

다. 따라서, 개념적인 2차원 해석(와이어에 흐르는 전류는 하나의 와이어 내에서 동일하다고 가정)이 가능하며, 이러한 상황에서 윗 식 (5)는 다음의 식 (6)과 같이 2차원 공간에서의 그린 함수로 변형될 수 있다[8][10].

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} = -\delta(x-x_0)\delta(y-y_0) \quad (6)$$

이 경우에, 전하의 원천 함수는 단위 밀도의 무한 선 전하 분포가 된다. 윗 식 (6)의 해인 G 를 보다 쉽게 구하기 위하여 원통 좌표계(cylindrical coordinate) r, θ 를 도입한 뒤, 선전하원을 둘러싸는 원통 S 의 단위 길이 내 체적에 대해 적분하면($\nabla G = \partial G / \partial r$ 을 이용), 다음의 식 (7)을 얻을 수 있다[10][11].

$$2\pi r \left(\frac{\partial G}{\partial r} \right) = -1 \quad (7)$$

이제 위의 식 (7)을 다시 한번 적분한 후, 이를 식 (3)과 식 (4)에 적용할 수 있도록 x, y 직각 좌표계(rectangular coordinate)로 변환하여 다음과 같이 정의한다[8].

$$G(r, r_0) = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}} \right) \quad (8)$$

위의 식 (8)을 식 (3)에 대입하면, 전하 $dx_0 dy_0$ 의 모든 요소에 기인하는 Φ 를 중첩하여 표면 전하 분포 ρ 에 의한 포텐셜을 얻을 수 있다. 여기에 W-TEM cell이 갖는 식 (9)의 경계 조건(인가 전압 V)을 이용하면 식 (10)과 같은 경계 적분 방정식이 구해진다(각각의 와이어가 갖는 전압은 동일하다고 가정).

$$\begin{aligned} \Phi(x, y) &= 0, \text{ 외부 도체} \\ \Phi(x, y) &= V, \text{ 내부 도체} \end{aligned} \quad (9)$$

$$V = \frac{1}{2\pi\epsilon} \int \rho(x_0, y_0) \ln \left(\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}} \right) dC_0 \quad (10)$$

이 때, 그림 1에서 보듯이 $C = C_1 + C_2$ 이고 C_2 에서는 $V=0$ 이며, ρ 는 선전하 밀도이다. 여기에서는 내부 도체로 사용된 직경 l 의 원형 도선들을 $l=1.163k$ 라는 근사식에 따라 한 번의 길이가 k 인 정방형 도선으로

근사화하였는데, 이 근사화 공식은 직경 1의 넓은 범위에 걸친 변화에 대해 0.01% 내의 오차로 훌륭하게 근사화 된다는 것이 여러 문헌에 증명되어 있다[12][13][14].

이제 식 (10)을 ρ 에 대해 풀기 위하여 모멘트법(moment method)을 적용한다. 본 논문에서 W-TEM cell의 내부 전계 해석에 모멘트법을 이용한 이유는 이것이 와이어 구조의 모델링에 가장 적합한 것이기 때문이다[5]. 이 모멘트법은 주파수 영역에서의 수치 해석 기법으로서, 주어진 문제에 대해 적당한 경계 조건들을 적용하여 경계면들의 분할 요소 상에서 전류 등에 대한 미지의 함수를 기저 함수(basis function)들의 조합으로 표현하게 된다. 미지 계수는 최적의 상태(최소 오차)를 나타낼 수 있는 일련의 방정식들을 풀이 함으로써 구할 수가 있다. 본 논문에서는 기저 함수로서 펄스 함수(pulse function)를 사용 했으며, 델타

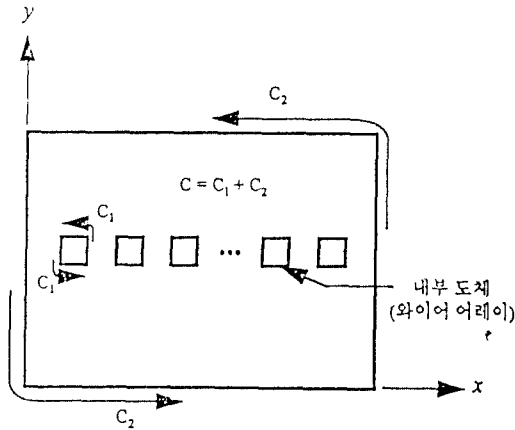


그림 1. W-TEM cell의 단면에 대한 식 (9)의 적분 경로.

함수를 보정 함수(weighting/testing) function)로서 사용하였다. 먼저, 그림 1에 보인 경로 C를 N 개의 작은 요소 ΔC_n 으로 분할한다(이때, ρ_n 는 하나의 분할 요소 내에서 상수라고 가정). 여기에서 n번째의 분할 요소를 ΔC_n 이라 하고, 그 분할 요소의 중심점을 (x_n, y_n) 이라고 하면, 앞의 식 (10)은 모든 (x_n, y_n) 에 대해 만족하게 되므로, 이 적분 방정식을 일련의 선형 대수 방정식으로 근사시켜 행렬의 형태로 표현하는 기법이 가능하게 된다.

$$[V_m] = [G_{mn}] [\rho_n] \quad (11)$$

여기서 특이성(singularity) 배제 기법(특이점을 무한소 간격으로 둘러싸서 적분 구간에서 배제시킨 후에, 적분을 수행하고 나서 그 간격을 0에 수렴시키는 것)을 적용하면 G_{mn} 은 다음의 식 (12)와 같이 표현될 수 있으며, 가우스-조단 소거법(Gauss-Jordan elimination) 등을 이용하면 식 (11)에서 미지의 $[\rho_n]$ 을 구할 수 있다.

$$G_{mn} = -\frac{1}{2\pi\epsilon} \int_{\Delta C_n} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{(x_m - x_0)^2 + (y_m - y_0)^2}} \right) dC_0 \quad (12)$$

$$\approx \begin{cases} \frac{\Delta C_n}{2\pi\epsilon} \left(1 - \ln \frac{\Delta C_m}{2} \right) & (m = n) \\ \frac{\Delta C_n}{2\pi\epsilon} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2}} \right) & (m \neq n) \end{cases}$$

이렇게 해서 얻어진 전하 분포를 식 (3)에 대입하면, 전계 스칼라 포텐셜 Φ 를 얻을 수 있으며, Φ 를 식 (1)에 대입하여, 즉 전계 스칼라 포텐셜의 구배(gradient)를 통하여 전계 강도의 분포를 구할 수 있다. 최종적으로, W-TEM cell이 갖는 전계 강도는 x축 방향과 y축 방향에 대해 각각 다음과 같이 표현된다.

$$E_x = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{n=1}^N \rho_n \Delta C_n \left(\frac{x - x_n}{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2} \right) \quad (13)$$

$$E_y = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{n=1}^N \rho_n \Delta C_n \left(\frac{y - y_n}{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2} \right) \quad (14)$$

III. 수치 해석 결과

3.1. W-TEM cell의 전계 분포 특성

여기서는 지금까지 논의한 수치 해석 기법의 여러 가지 적용 결과를 다룬다. 먼저 외부 도체의 크기 및 내부 도체의 폭과 두께가 서로 동일한 NBS TEM cell과 W-TEM cell 각각에 대해 수치 해석을 실시함으로써 W-TEM cell의 향상된 성능을 증명한다. 해석의 대상으로 사용된 W-TEM cell의 단면은 다음의 그림 2와 같고(NBS TEM cell의 단면은 이 그림에서 와이어 어레이를 도체판으로 바꾼 것과 같다), 그 값은 표 1에 나타낸 바와 같이 설정했다. 두가지 해석 모델 모

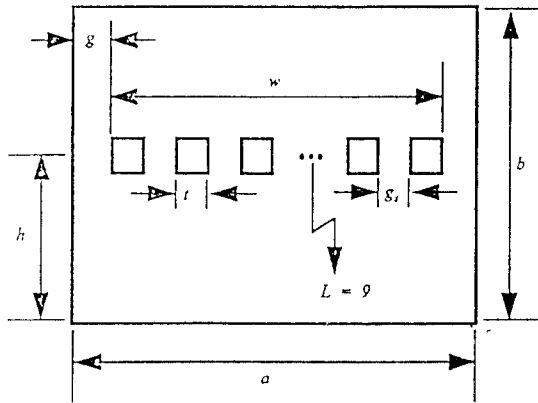


그림 2. W-TEM cell의 단면도.

표 1. 수치 해석에 사용된 두 TEM cell의 설계 변수 값

변수	의 미	설정값
a	상·하 외부 도체의 길이	45cm
b	좌·우 외부 도체의 길이	45cm
w	내부 도체의 폭	37.5cm
h	내부 도체의 높이	22.5cm
t	내부 도체의 두께	0.2cm
L	와이어의 갯수	9개
g	내부 도체와 좌(우) 외부 도체의 간격	3.75cm
g_s	서로 인접한 두 와이어 사이의 간격	4.47cm

두에서 분할 요소 dCn의 값은 0.2cm이며, 인가 전압 역시 공허 3.0V이다.

NBS TEM cell과 W-TEM cell에 대한 수치 해석의 결과를 그림 3에 나타내었다. 이 그림에서 횡축은 좌측 외부 도체로부터의 거리를 나타내며, 종축은 상대 전계 강도의 값이다. 여기서 상대 전계 강도란, cell 내부의 전계 강도 값을 그 상반 영역의 중심점(좌측 외부 도체로부터의 거리 $x=22.5\text{cm}$, 하측 외부 도체로부터의 거리 $y=33.75\text{cm}$ 인 점)에서의 전계 강도 값으로 나누어 cell의 전계 강도 분포가 갖는 중심에서의 편차를 서로 비교해 볼 수 있도록 한 값이다. 하측 외부 도체로부터의 거리 y 에 대해서는 세가지 높이에서 관찰해 보았는데(A = 30.25cm, B = 33.75cm, C =

37.25cm), NBS TEM cell의 전계는 점선으로, 또 W-TEM cell의 전계는 실선으로 각각 나타내었다. 곡선 B, C에서는 큰 차이 없이 거의 근사되지만 내부 도체로부터의 거리가 보다 가까워진 곡선 A에서는 큰 차이를 보이고 있다. NBS TEM cell의 경우 횡축의 중심에서 양쪽 측면으로 가면서 전계 강도의 값이 평탄성을 잃게 되지만, W-TEM cell의 경우에는 거의 일정한 직선을 그리며 전계 강도의 균일성에 대한 개선을 나타내고 있는 것이다. 이와 같이 W-TEM cell의 내부 전계 강도 분포가 NBS TEM cell에 비해 균일해진 이유는 와이어 어레이의 경우, 내부 도체의 중심점에서 양 끝점으로 가면서 각 점이 가지는 전하 밀도의 차이가 도체판의 경우에 비하여 작기 때문이다. 한편 W-TEM cell의 경우, 그 상반 영역 중심점에서의 전계 강도 값은 11.25 V/m로서, 표준 TEM cell의 13.29 V/m와 비교해 볼 때 1.4 dB 정도 낮아진다는 것을 알 수 있는데, 전계 강도의 크기는 입력 전압에 의존하므로(앞의 결과는 두 cell 모두에 동일한 입력 전압 3 V를 인가했을 경우이다), 입력 전압을 높임으로써 보상해 줄 수 있다(실제로 TEM cell을 이용하여 EMS 측정을 수행하는 경우에는 높은 전계 강도

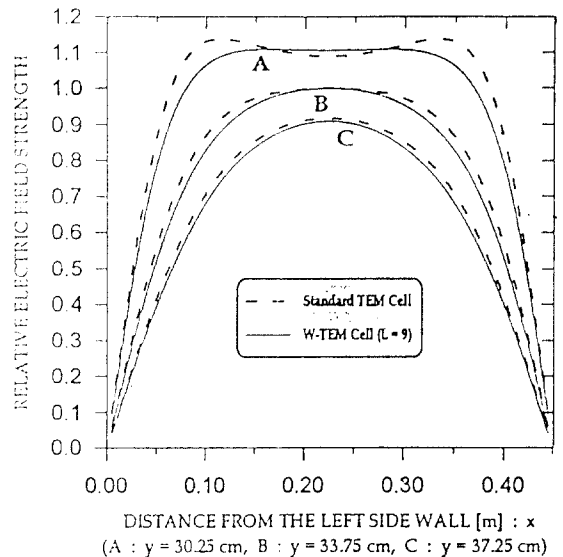


그림 3. NBS TEM cell과 W-TEM cell에 대해 내부 도체로부터 일정한 높이(3가지)에서 관찰한 상대 전계 강도의 분포도.

값을 형성하기 위하여 RF 증폭기를 사용한다). 물론 와이어의 수를 늘리게 되면 이 값을 증가시킬 수는 있지만, 이렇게 되면 내부 전계의 균일성 측면에서 NBS TEM cell과 비교할 때의 장점을 잃게 된다. 와이어 수의 변화에 의한 전계 분포의 최적화는 이 장의 마지막 절에 자세히 기술하였다.

3.2. 부하 효과(loading effect)

TEM cell을 이용하여 실제로 EMC 측정을 할 때에는 TEM cell의 내부에 도전성의 EUT를 삽입하게 되는데, TEM cell의 입사파는 EUT가 없을 때와 마찬가지로 자유 공간에서의 평면파에 근사된다고 할 수가 있지만, 도전성 EUT에 의해서 산란되는 전사파는 TEM cell 내·외부 도체와의 다중 반사, 즉 EUT와 TEM cell과의 상호 결합으로 인해 자유 공간에서와 달라지게 된다. 이것을 부하 효과(도전성 EUT로 인한 내부 전자계의 왜곡)라고 하는데, 그 해석 결과는 다음의 그림 4~그림 8에 나타내었다. 앞서 2장에서 유도한 전자계 분포에 관한 수식을 다시 한번 적용하여 분석하였는데, 한가지 다른 점은 도전성 EUT의 외벽이 접지면의 역할을 하여, 이로 인한 경계 조건인 $V = 0$ 을 추가한 점이다. 또, 도전성 EUT는 직사각형의 단면을 갖는다고 가정하고 NBS TEM cell과 W-TEM cell에 대해 두 가지 크기의 EUT를 삽입하여 해석하였다. 그리고, EUT 단면의 크기인 E_h (높이)와 E_w (폭)는 $7.4\text{cm} \times 15\text{cm}$ 와 $11\text{cm} \times 23\text{cm}$ 의 두 가지로 설정하였다. NBS TEM cell의 경우에, EMC 측정에 활용되는 cell 내부의 시험 영역은 부하 효과로 인해 측면 도체 길이(그림 2의 b)의 6분의 1로 제한된다(일반적으로 이는 $b/2$ 만에 대하여 '3분의 1 법칙(1/3 law)'이라 말한다[7]). 본 논문에서 해석의 대상으로 사용된 NBS TEM cell과 W-TEM cell에 있어서, 그림 4와 그림 5는 삽입된 EUT의 크기가 정확히 1/3인 경우($E_h = 0.33b$)에 대하여, 그림 6과 그림 7은 1/3 보다 큰 경우($E_h = 0.49b$)에 대하여 해석한 결과이다. NBS TEM cell의 경우에는 삽입되는 EUT의 크기가 커질수록 전계의 왜곡이 심해지는 것을 그림에서 알 수 있으며, 특히 3분의 1 법칙의 임계 수치를 벗어난 EUT를 삽입했을 경우에는 내부 전계의 왜곡이 상당함을 볼 수 있다. 반면, 본 논문에서 제안하고 있는 W-TEM cell의 경우에는 이와 같은 cell 내부 전계의

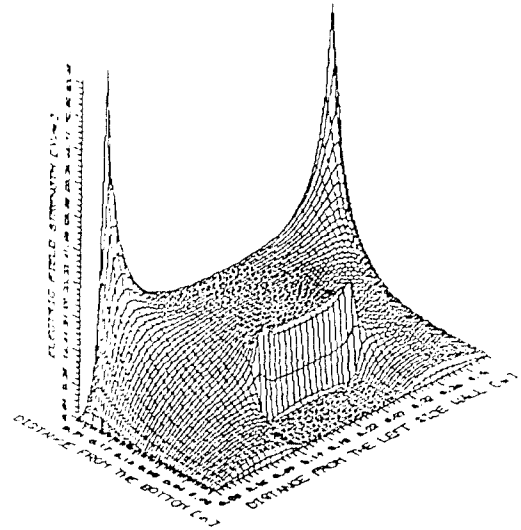


그림 4. NBS TEM cell에 $E_w = 15\text{cm}$, $E_h = 7.4\text{cm}$ 인 도전성 EUT를 삽입하였을 경우의 E_y 분포도.

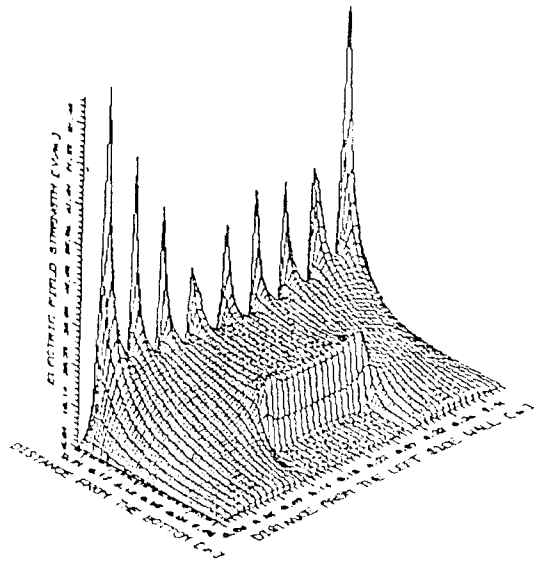


그림 5. W-TEM cell에 $E_w = 15\text{cm}$, $E_h = 7.4\text{cm}$ 인 도전성 EUT를 삽입하였을 경우의 E_y 분포도.

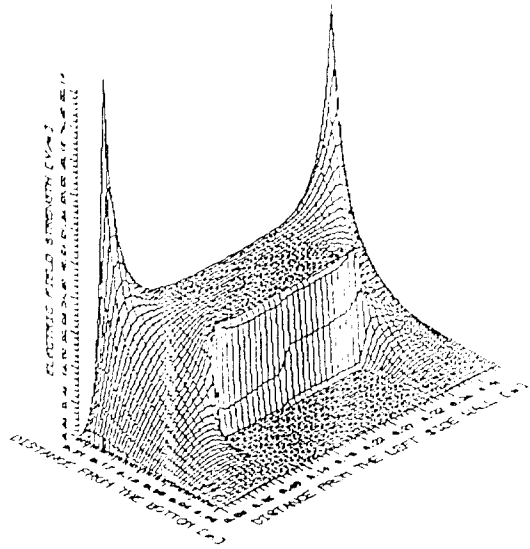


그림 6. NBS TEM cell에 $E_w=23\text{cm}$, $E_h=11\text{cm}$ 인 도전성 EUT를 삽입하였을 경우의 E_y 분포도.

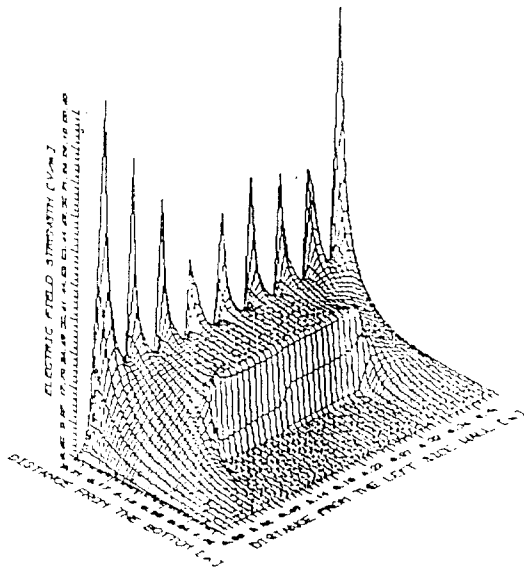


그림 7. W-TEM cell에 $E_w=23\text{cm}$, $E_h=11\text{cm}$ 인 도전성 EUT를 삽입하였을 경우의 E_y 분포도.

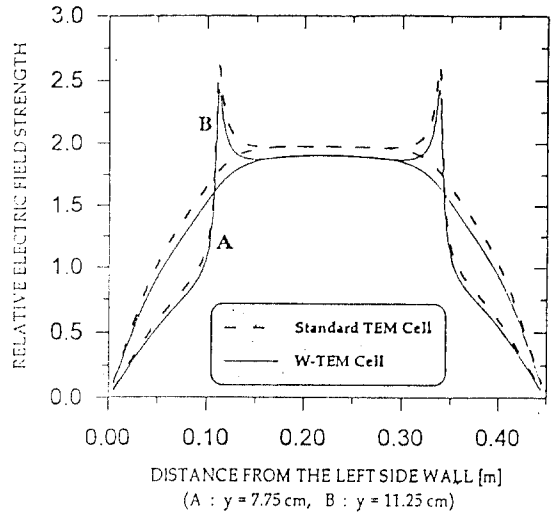


그림 8. 도전성 EUT를 삽입한 경우, NBS TEM cell과 W-TEM cell에 대해 내부 도체로부터 일정한 높이(3가지)에서 관찰한 상대 전계 강도의 분포도($E_w=23\text{cm}$, $E_h=11\text{cm}$).

왜곡 정도가 상대적으로 작기 때문에 측정의 신뢰성을 높일 수 있을 뿐만 아니라, 결국 시험 영역의 넓이가 증가하게 되어 측정 가능한 EUT의 크기에서 이득을 얻을 수 있다. 그림 8을 통해 보다 분명하게 부하 효과에 대한 개선을 관찰할 수 있는데, 이것은 EUT를 삽입하였을 경우의 전계 강도 값을 EUT를 삽입하지 않았을 경우 cell 중심에서의 전계 강도 값(NBS TEM cell에서는 13.29 V/m이며, W-TEM cell에서는 11.25 V/m)으로 나누어 정상화시킨 상대 전계 강도를 나타낸 그래프이다. 그림 8에서 점선으로 표시된 NBS TEM cell에 비해서 실선으로 표시된 W-TEM cell의 값이 기준값인 1.0에 더 가까우며(그만큼 왜곡 전계 강도의 상승-의 정도가 작다는 것을 의미한다), EUT의 근처에서 전계 강도 값이 급격하게 상승하는 서지(surge) 현상도 감소하는 것을 볼 수 있다(이러한 서지 현상은 실제의 EMC 측정에 있어서 EUT를 파괴하기도 한다).

3.3. 와이어의 갯수에 따른 전계 분포의 변화

이번 절에서는 NBS TEM cell과 비교할 때, W-TEM cell이 새롭게 갖게 되는 설계 변수인 와이어의 갯수

L 을 변화시켜 가며 전계 분포의 균일성을 최대로 확보할 수 있는 최적 L 값에 대해서 고찰한다. 이것은 W-TEM cell의 제작과 활용에 있어서 필수적인 연구라 할 수 있다. 먼저, 여기에 사용된 W-TEM cell(단면은 그림 2 참조)의 설계 변수 값은 L 을 제외하면 앞서의 표 1과 같고, 해석 모델에 대한 분할 요소 dC_n 과 인가 전압 역시 각각 0.2cm와 3.0 V이다. 와이어의 수 L 에 대해서는 그 변화폭을 5개~13개로 정하였고, 해석 결과는 다음의 그림 9~그림 11에 나타내었다.

아래의 그림 9로부터 알 수 있는 사실은 와이어의 갯수가 너무 적을 경우, 내부 도체가 위치하는 공간에서의 전하 분포가 와이어 간의 넓어진 간격만큼 불균일해져서 내부 도체 부근의 전계에 요동(fluctuation)이 발생하게 된다는 것이다. 또, 와이어 어레이 중에서 각 와이어 내의 전하 분포는 서로 다르게 되는데, 그림 10을 관찰해 보면 와이어의 갯수가 너무 많을 경우, NBS TEM cell에서와 유사하게 어레이의 끝쪽(측면 외부 도체와 가까운 쪽)으로 갈 수록 전계가 커지게 되어 균일성을 잃게 된다는 사실을 알 수 있다. 이 같은 과정을 통해 변수 L 에 대해 그 범위를 좁혀 가며 최적화를 수행하였는데, 그 일련의 과정들을 전부 수록하기는 힘들기 때문에, 최종적으로 와이어의 갯수 L 을 결정하는 최적화의 마지막 단계만을 그림 11에 나타내었다. 그림 11에서 (a)는 $L=8$ 인 경우와 $L=9$ 인 경우인데, cell의 중심 부근 영역에서의 균일성은 $L=8$ 일 때가 다소 양호하지만, 그 끝 부분(측면 외부 도체 쪽으로의 방향)으로 갈 수록 전계 강도 감소의 기울기가 $L=9$ 일 때에 비해 커지게 되므로, 전체적인 전계의 균일성은 $L=9$ 일 때가 우수하다는 사실을 알 수 있다. 또, 그림 11의 (b)는 $L=9$ 인 경우와 $L=10$ 인 경우인데, $L=10$ 인 경우에는 그림 10에서 관찰한 것 처럼 어레이의 양 끝쪽으로 가면서 전계가 커지는 현상(NBS TEM cell에서와 흡사한 현상)이 시작된다는 것을 알 수 있다.

이상의 고찰을 통하여, 그림 2와 같은 단면에 대해 표 1의 설계 변수를 갖는 W-TEM cell의 경우에, 와이어 어레이를 구성하는 와이어의 갯수로서 9개가 적당하다는 것을 입증하였다. 이 경우, 내부 도체로 와이어 어레이를 사용할 때의 장점을 최대한 효과적으로 나타낼 수 있게 되어, 내부 전자계의 균일성 개선도를 최적화·최대화할 수 있는 것이다. 한편, 이러한

W-TEM cell이 실용화될 수 있으려면, 임의의 단면 크기에 대한 와이어의 갯수 L 이 앞서에서와 같은 최적화 과정을 거치지 않고도 결정될 수 있어야 한다. 이를 위해, 표 1에서 $t=0.2\text{cm}$, $w/a \cong 0.833$ 인 정방형

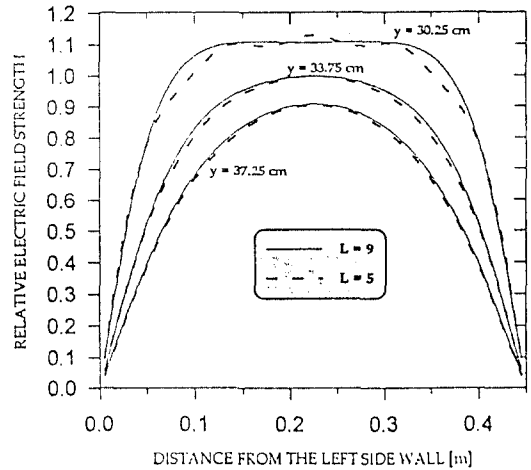


그림 9. 와이어의 갯수 L 을 변화시켜 가며 내부 도체로부터 일정한 높이(3가지)에서 관찰한 W-TEM cell의 상대 전계 강도 분포($L=5$ 인 경우와 $L=9$ 인 경우).

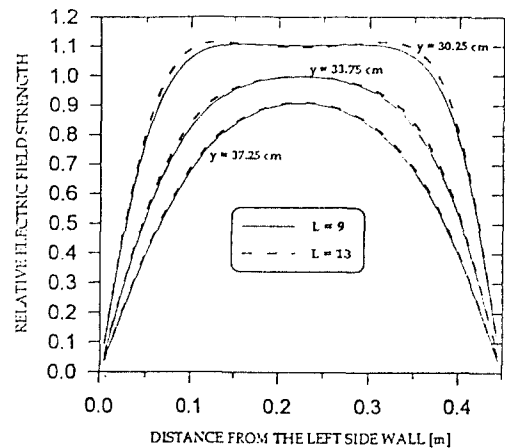


그림 10. 와이어의 갯수 L 을 변화시켜 가며 내부 도체로부터 일정한 높이(3가지)에서 관찰한 W-TEM cell의 상대 전계 강도 분포($L=9$ 인 경우와 $L=13$ 인 경우).

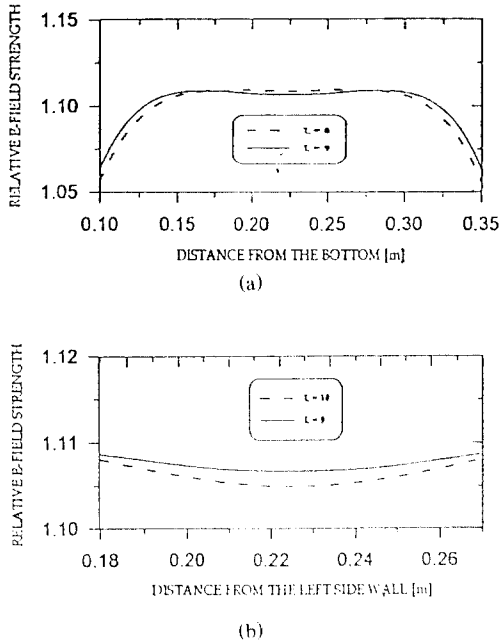


그림 11. 내부 도체로부터 일정한 높이($y = 30.25\text{cm}$)에서의 W-TEM cell의 상대 전기장 강도 분포(와이어의 갯수 L 가변): (a) $L = 8$ 과 $L = 9$ 인 경우; (b) $L = 9$ 와 $L = 10$ 인 경우.

의 W-TEM cell에 있어서 a 의 값을 변화시켜 가며, 각각에 대해 그 전기장 강도와 L 사이의 관계를 앞서와 동일한 방법으로 고찰해 보았다($a = 30\text{cm}$ ($w = 25\text{cm}$)인 경우 최적 $L = 8$, $a = 60\text{cm}$ ($w = 50\text{cm}$)인 경우 최적 $L = 10$). 그 결과, w 와 t 사이의 비례 관계를 통하여 L 의 최적 공식을 다음의 식 (15)와 같이 실험적으로 구해 볼 수 있었다(단, w 의 단위는 cm).

$$L = \frac{1.0896w}{0.0896w + 1.3} \quad (15)$$

IV. 설계·제작 및 실험 결과

여기에서는 앞서 고찰하였던 설계 변수에 따라 W-TEM cell을 직접 설계·제작하여 측정된 결과에 대해 기술한다. 제작된 W-TEM cell의 설계 도면은 그림 12와 같다. 이와 같은 W-TEM cell에 대해 귀환 손실을 측정하여 전압 정재파비(VSWR)를 구해보았으며, 삽입 손실도 측정하였다. 그림 13은 측정된 귀환

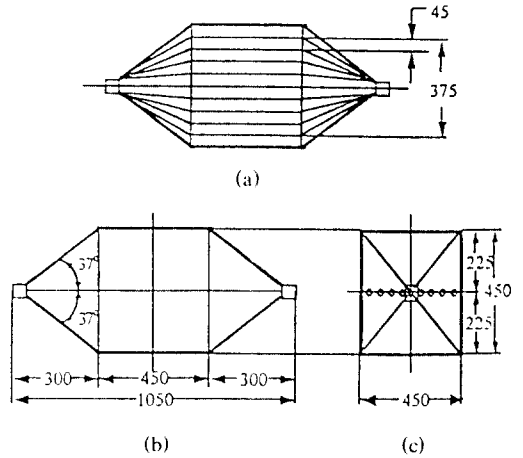


그림 12. 설계·제작한 W-TEM cell의 단면도: (a) 상측면도; (b) 측면도; (c) 횡단면도.

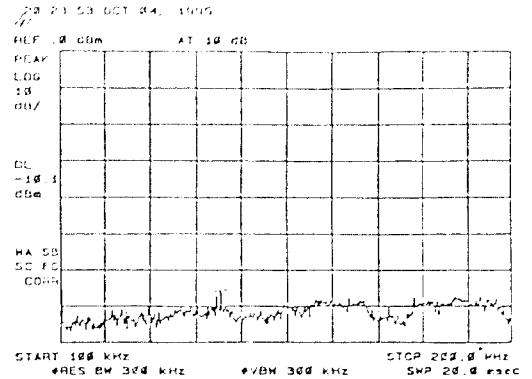


그림 13. 제작된 W-TEM cell의 귀환 손실을 측정된 그래프.

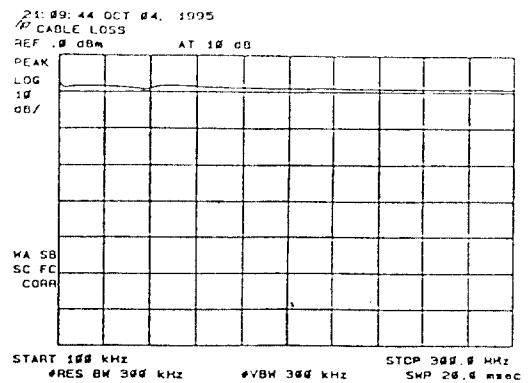


그림 14. 삽입 손실 측정 시스템의 기준 입력 그래프.

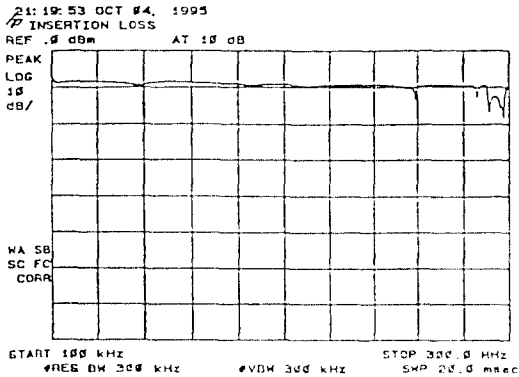


그림 15. 제작된 W-TEM cell의 삽입 손실을 측정된 그래프.

손실 그래프이며, 그림 14는 삽입 손실 측정 시스템의 기준 입력값을, 그림 15는 측정된 삽입 손실을 나타내는 그래프이다.

그림 13을 보면, 100 kHz에서 200 MHz의 주파수 대역에서 기준 입력인 -10.1 dBm에 비해 약 56 dB~64 dB 정도 감쇠를 볼 수 있는데, 측정 시스템 중 방향 결합기(directional coupler)의 내부 감쇠가 40 dB 이므로 측정된 W-TEM cell의 실제 귀환 손실은 약 16 dB~24 dB 정도가 된다. 따라서, 제작된 W-TEM cell의 VSWR은 약 1.37~1.13 정도임을 알 수 있다. 한편, 그림 14와 그림 15를 통해서 삽입 손실을 알 수 있는데, 280 MHz 이전까지는 1 dB 이하의 삽입 손실을 보이고 있으며, 280 MHz 부근에서 약 7 dB 정도의 손실을 보여, 제작된 cell의 유효 상한 주파수는 약 280 MHz 정도가 된다.

V. 결론

W-TEM cell에 생성되는 내부 전자계의 해석에 있어서, 내부 도체의 두께를 무시하는 기존의 해석법을 적용하는 것은 부적절하기 때문에 와이어 어레이 형태의 내부 도체를 해석할 수 있도록 변형시킨 수치 해석법을 이용하였다. 이러한 해석 기법으로 W-TEM cell과 NBS TEM cell에 대해 그 내부 전계를 서로 비교해 본 결과, 특히 내부 도체와 가까운 거리의 영역에서 그 균일성이 개선될 수 있음을 확인하였다. 또, 도전성의 EUT를 삽입하였을 경우에, cell 내부의 전

자계가 왜곡되는 부하 효과에 있어서도 W-TEM cell에서는 그 정도가 약해, EUT의 크기가 3분의 1 범칙을 어느 정도 초과(약 2분의 1 정도 까지)한다고 해도 신뢰성있는 측정이 가능하다는 사실을 알 수 있었다.

한편, W-TEM cell은 기존의 NBS TEM cell과 달리 새로운 설계 변수인 L (와이어의 갯수)을 갖는데, 이러한 변수 L 을 변화시켜 가며 전계 분포를 고찰해 본 결과, 정방형의 W-TEM cell에 대한 최적화 공식을 유도해 낼 수 있었다. 또한, 해석의 과정을 통해서 결정된 설계 변수로서 W-TEM cell을 제작하였으며, 그 삽입 손실과 VSWR의 측정을 통해 표준 전자계 형성 장치로서 EMC의 측정에 활용될 수 있음을 증명하였다.

참고 문헌

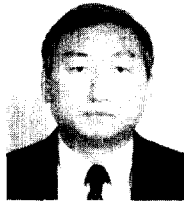
1. William G. Duff, "A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility", vol. 1., Interference Control Technologies, Inc., 1988.
2. Donald R. J. White, "Electromagnetic Interference and Compatibility", 2nd ed., Don White Consultant, Inc., 1980.
3. 이 중근, "전자파 내성 평가 기술 연구", 기아 자동차, 한양대학교 산업 과학 연구소, 1992.
4. 이 중근, "전자파 장애 방지 기술 연구(IV)", 체신부 전파 연구소, 한국 전자파 기술 학회, 1993.
5. Myron L. Crawford, "Measurement of Electromagnetic Radiation from Electronic Equipment using TEM Transmission Cells", NBSIR 73-306, Feb. 1973.
6. Myron L. Crawford, J. L. Wordman, "Using a TEM Cell for EMC Measurements of Electronic Equipment", NBS Technical Note #1013, April 1979.
7. Myron L. Crawford, "Generation of Standard EM Fields using TEM Transmission Cells", IEEE Transaction, Electromagnetic Compatibility, Vol. 16, No. 4, November 1974.
8. 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, Electromagnetic Compatibility, Vol.

29, November 1987.

9. Roger F. Harrington, "Time-Harmonic Electromagnetic Fields", McGraw-Hill Book Company, Inc., 1961.
10. Robert E. Collin, "Field Theory of Guided Waves", 2nd Ed., IEEE Press, 1991.
11. Matthew N. O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics", CRC Press, Inc., 1992.
12. Y. T. Lo, S. W. Lee, "Antenna Handbook", Vol. 4, Van Nostrand Reinhold Co., 1993.
13. L. Carbonini, "Theoretical and Experimental Analysis of a Multi-Wire Rectangularly Shielded Transmission Line for EMC Measurements", IEEE International Symposium, Electromagnetic Compatibility, Cherry Hill, NJ, August 1991.
14. L. Carbonini, "Comparison of Analysis of a WTEM Cell with Standard TEM Cells for Generating EM Fields", IEEE Transaction, Electromagnetic Compatibility, Vol. 35, May 1993.



김 명 훈(Myung Hoon Kim) 정회원
1970년 10월 29일생
1994년 2월: 한양대학교 전자공
학과(공학사)
1996년 2월: 한양대학교 전자공
학과(공학석사)
현재: 한국통신 전임 연구원



이 중 근(Joong Geun Rhee) 정회원
1945년 4월 21일생
1967년: 서울대학교 공학사(전기
공학)
1973년: 미국 플로리다 주립대학
공학석사(전자공학)
1979년: 미국 플로리다 주립대학
공학박사(전자공학)

1979년~1988년: 국방과학연구소 책임연구원
1984년~현재: 체신부 전파연구소 자문위원
1988년~현재: 한양대학교 전자공학과 교수