

8단자 가변 임피던스 전자파 발생 장치를 이용한 표준 복사 전자기장 조성 연구

正會員 윤 재 훈*

Study for Generation of Standard EM Field Using 8 Ports-Variable Wave Impedance Generator

Jae Hoon Yun* *Regular Member*

요 약

8단자 가변임피던스 전자파 발생장치(8P-VWIG: 8Ports-Variable Wave Impedance Generator)에 대한 설계 기술에 대해 나타내고, 내부에서 유기되는 전자기장 및 특성임피던스에 대한 수치해석, 일정한 특성임피던스를 갖는 구조에 대해 간단하게 추적할 수 있는 수치알고리즘에 대해 나타내었다. 또한 특정 구조에 대한 균일도 평가 결과와 내부 전자계 분포, 그리고 그 응용으로서 EMS 측정시스템에 대한 간단한 소개를 나타내었다. 8P-VWIG는 기존 간이 EMI/EMS 시설들에 비해 시험공간의 활용도가 좋고, 수직 수평 분극 조성이 자유로운 장점을 가지고 있다. 제작된 8P-VWIG는 정재파비로 측정된 제 1 공진이 152.1MHz에서 발생하고, 50Ω 임피던스 정합 시스템으로 동작하도록 한 8채널의 다중전송선로 구조를 갖는다.

ABSTRACT

A design technique of 8 ports variable wave impedance generator(8P-VWIG) is described. The design technique employs not only a numerical algorithm to find the structure with arbitrary characteristic impedance, but also a numerical solution to analyze the uniform electromagnetic fields established inside the generator. The 8P-VWIG so obtained is shown to have good performance with the VSWR of less than 1.4 at any frequency of interest below which higher order mode begin to propagate. The measured first resonant frequency is 152.1 MHz. The 8P-VWIG is designed based on the concept of an expanded multi-transmission line(8 channel). It is especially useful for the electromagnetic interference(EMI) and electromagnetic susceptibility(EMS) testing since it maximizes usable test cross sectional area, and it is easy change the polarization, vertical or horizontal, of field.

* 한국전자통신연구소 전자파공학연구소
論文番號: 95358-1012
接受日字: 1995年 10月 12日

I. 소 개

8단자 가변임피던스 전자파 발생장치(8P-VWIG: 8Ports-Variable Wave Impedance Generator)는 그림 1에서 처럼 8채널을 갖는 다중진송선로 구조를 갖는다. 그림 1에서 처럼 4개의 원통형 내부도체가 외부도체 각 모서리에 위치하고, 8개의 채널이 양측에서 외부와 연결할 수 있도록 되어있다. 기존 간의 EMI/EMS(Electromagnetic Interference/Electromagnetic susceptibility) 측정 시설인 TEM cell[1], GTEM cell[2], 삼중티이엠셀[3]과는 달리 내부도체를 외부도체 모서리에 위치시켜 다중 채널 구조를 갖게 하였다. 이는 다수의 채널을 이용하여 내부 전자계의 분극을 자유롭게 조절하고, 내부에 설치되는 피시험체의 전기적 모델에 대한 분극정보를 다량으로 수집할 수 있어 EMI/EMS 측정시간을 단축함은 물론 재현성을 기할 수 있도록 고안된 시설이다[4].

또한 내부도체가 외부도체 모서리에 위치하므로써 전력효율은 다소 떨어지나 보다 넓은 시험공간을 확보할 수 있는 장점을 갖는다. 넓은 시험공간을 확보할 수 있는 장점을 갖는다. 넓은 시험공간을 확보하는 것은 매우 중요한 의미를 갖는다. 왜냐하면 밀폐된 8P-VWIG에서는 내부 크기와 사용주파수대역간에는 서로 반비례적인 특성을 갖기 때문이다[5]. 즉 크기가 크면 사용 주파수대역(수십 kHz부터 차단주파수[6] 혹은 제 1공진 주파수[7]까지 EMI/EMS측정을 권장함.)이 좁아지고, 작아지면 커지는 관계를 갖고 있기 때문이다. 8P-VWIG는 내부도체가 가늘다면, 동일 크기의 대칭형 TEM cell에 비해 약 2배의 시험공간인 균일장 영역(uniform area: 그림 2에 빗금친 영역)을 갖는다.

이러한 간의 EMI/EMS시설들에 대한 전기적인 특성은 크게 특성임피던스, 내부전자기장 분포, 차단주파수로 구분할 수가 있다[8]. 전기적인 특성에 대한 분석 방법은 여러방법[9, 10, 11, 12, 13]이 있을 수 있으나 본고에서는 유도가 간단하고 설계 분야에 응용하기가 용이한 준정직 근사법에 근거한 선전하 적분

방정식 해석[14]을 적용하고, 상기 세가지 전기적인 특성중에 수십kHz~차단주파수 대역에서 특성임피던스 및 내부 전자기장 분포를 분석하였다. 또한 50Ω의 8P-VWIG 구조를 찾아내는 간단한 수치알고리즘을 살펴보고, 이를 적용하여 외부도체 단면의 크기가 1.2m*1.2m이고 내부도체의 굵기가 0.10478m인 50Ω 구조를 찾아내어 직접 설계 제작하였다. 제작 결과 상기 주파수 대역에서 각채널의 정재파비가 1.4이하를 유지하고 있음을 볼 수가 있었으며, 또한 예측된 내부 전자기장의 세기, 내부도체간의 결합량이 측정치와 매우 일치되었고, 제1공진 주파수가 152.1MHz에 나타남을 확인할 수가 있었다.

또한 국제 규격인 IEC1000-4-3에서 요구되는 균일장영역(uniform area: 그림 2에서 빗금친 영역: 내부

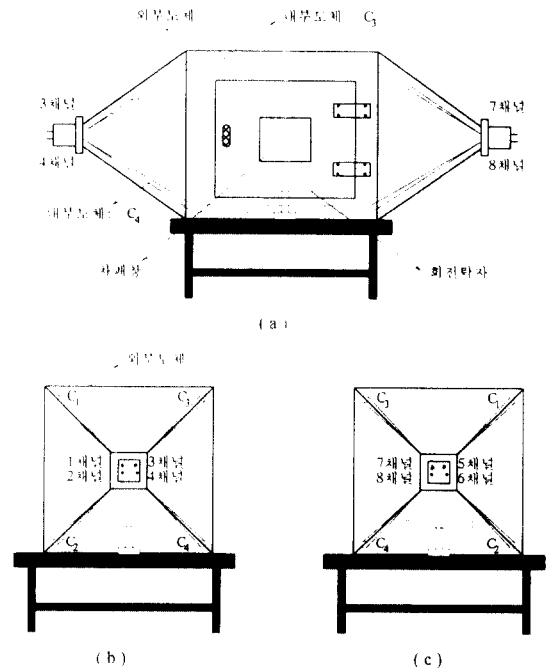


그림 1. 8P-VWIG의 구조 (a)정면도 (b)좌측면도 (c)우측면도.
Fig. 1 Structure of 8P-VWIG (a)Front view (b)Left side view (c)right side view.

* 균일장영역에 대한 균일도 평가는 국제규격에서 사용되고 있는 방식으로 2종류가 있는데, IEC 1000-4-3에 표기하고 있는 기준 전계치에 대해 6dB이내를 점유하는 영역의 비율로 평가하는 방식과 CISPR Pub. 24 혹은 EN55101-3에서 표기하고 있는 균일장 영역내에서 최대 최소 전계치의 dB편차로 평가하는 방식이 있음.

시험공간에서 위아래 좌우 1/3인 중심 영역)에 대한 균일도 평가결과*, 기준 전계치에 대해 6dB이내를 점유하는 영역의 비율(추후 표기를 간단히 하기 위해 "6dB점유영역비"라고 통칭하겠음)이 전체의 92% (16점 측정 결과는 82.5%)를 확보하고 있음을 볼 수 있었다. 이러한 결과, 내부에서 조성되는 표준 전자파의 균일도는 기존 삼중 TEM cell[19, 20]보다도 균일함을 볼 수가 있었다.

다음 장에서는 내부 전자기장 분포 및 특성임피던스 분석에 대한 이론적 측면과 이를 설계에 응용한 수치 알고리즘에 대해 간단하게 살펴볼 것이다.

II. 8P-VWIG의 전기적인 특성 분석 및 수치 알고리즘

가. 8P-VWIG의 내부 전자기장 및 특성임피던스

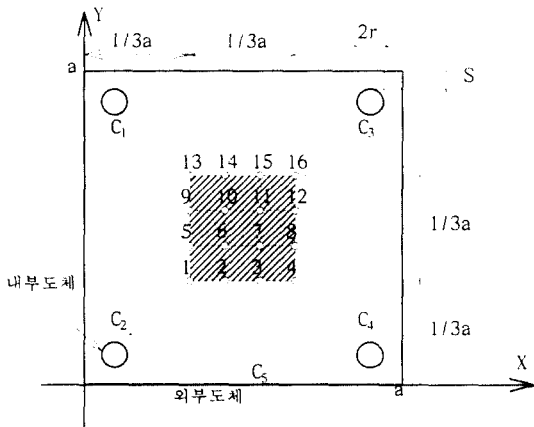


그림 2. 8P-VWIG 단면의 좌표상의 위치.
Fig. 2 Location of 8P-VWIG in rectangular coordinate system.

그림 2는 피시험체가 위치하고 있는 시험영역의 단면 구조를 나타내고 있다. 내부도체 C(i=1, 2, 3, 4)는 각각 우측단의 제 "i 번째 채널"과 좌측단에 제 "i + 4 번째 채널"로 연결되어 있다. 또한 내부도체가 가늘다고 가정했을 때, IEC1000-4-3에서 TEM cell류에 대해 정의하는 균일장 영역(그림 2에서 빗금친 부분)을 나타내었으며, 이러한 영역에 대한 균일도 평가를 위한 16점 측정 지점을 나타내었다.

8P-VWIG의 해석을 간단히 하기 위해, 상기 구조는 크기가 일정한 다중전송선로이고, 내부도체(C₁, C₂, C₃, C₄) 및 외부도체(C₅)를 완전도체라고 가정하자. 그런데 8P-VWIG는 수십kHz부터 차단주파수이하의 주파수 대역에서 EMI/EMS 측정시설로 활용되므로, 이러한 주파수 대역에서 비교적 정확도를 보이고 있는 준정적 근사법에 의한 분석이 가능하다. 이 때 내부에 존재하는 전계(E), 자계(H)는 다음과 같다[14].

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

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

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

$$A(x, y) = \mu_0 \iint_c J(x', y') G(x, y, x', y') dx' dy' \tag{1-4}$$

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

$$\Phi(x, y) = \begin{cases} V_i & \text{on } C_{i=1, 2, 3, 4} \\ 0 & \text{on } C_5 \end{cases} \tag{1-6}$$

상기식에서 J는 전류밀도(A/m), ρ는 선전하 밀도(C/m), ε₀는 자유공간 유전율(8.85 * 10⁻¹² F/m), μ₀는 자유공간 투자율(4π * 10⁻⁷ H/m), Φ는 스칼라 포텐셜, A는 벡터포텐셜이다. (1-5)식은 2차원의 그린함수이며, 프라임("′")첨자를 갖는 변수는 원천점을, 프라임이 없는 변수는 관측점을 나타내고 있다. (1-6)식에서 내부도체 C₁, C₂, C₃, C₄ 각각에 대해 V₁, V₂, V₃, V₄ Volt 전압을 인가하고, 외부도체 C₅은 접지하였다.

상기 (1-3)식에서 (1-6)식의 경계조건을 그림 2구조에 적용하여 내부도체 및 외부도체 표면(C_i(i=1, 2, 3, 4, 5))에 존재하는 선전하밀도 ρ를 구한다면, (1-1)식을 통해 내부 전계 분포를 예측할 수가 있다. 또한 (1-4)식의 전류는 상기 주파수대역에서 TEM 모드만이 전송되어 진행방향(그림 2에서 Z방향)의 전류성분만 존재하므로 전류연속방정식에 의거 선전하밀도로 부터 간단하게 구할 수가 있다[14]. 선전하밀도를 구했다고 했을 때, (1-1)~(1-5) 식으로 부터 내부 전계 및 자계는 다음과 같이 유도된다.

$$\mathbf{E}(x, y) = E_x(x, y)\mathbf{a}_x + E_y(x, y)\mathbf{a}_y \quad (2-1)$$

$$\mathbf{H}(x, y) = \frac{\epsilon_0 \omega}{\beta} (E_x(x, y)\mathbf{a}_x + E_y(x, y)\mathbf{a}_y) \quad (2-2)$$

$$E_x(x, y) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^5 \int_{c_i} \rho(x', y') \frac{x-x'}{(x-x')^2 + (y-y')^2} dc' \quad (2-3)$$

$$E_y(x, y) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^5 \int_{c_i} \rho(x', y') \frac{y-y'}{(x-x')^2 + (y-y')^2} dc' \quad (2-4)$$

그림 2에서 각 내부도체에 임의의 전압을 가했을 때, (1-3)식에 (1-6) 경계조건을 대입하여 선전하밀도 ρ 를 구했다면, 각 채널의 특성임피던스는 이로부터 쉽게 구할 수가 있다. 그 관계를 살펴보면 다음과 같다[9].

$$Z_{0i} = \frac{\eta_0}{\epsilon_0 V_i} \int_{c_i} \rho dc' \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

단, 상기식에서 η_0 는 자유공간 고유임피던스로서 $120\pi\Omega$ 이다. 다중전송선로의 내부도체간의 결합양이 크면 클수록 구하고자하는 채널 이외의 각 채널의 인가전압에 대한 영향을 많이 받는다. 그러나 만일 내부도체간의 결합양이 작으면 다른 채널의 인가전압에 대한 영향을 적게 받을 것이다. 즉 8P-VWIG 내부도체의 굵기가 작고 네 모서리 부분 가까이 위치할수록 내부도체간의 결합양이 줄어, 각 채널의 특성임피던스는 다른 채널의 전압과 거의 무관한 특성을 갖게 된다. 그러므로 다중전송선로 구조를 갖는 8P-VWIG에서 내부도체간의 결합양을 최소화하는 구조를 찾아내야 할 것이다. 각 내부도체간의 결합양(dB)은 다음과 같다[16].

$$\text{Coupl}_{ij} = 20 \log \left[\frac{\int_{c_i} \rho dc_i}{\int_{c_j} \rho dc_j} \right]_{V_k = V(k=j), V_k = 0(k \neq j)} \quad (4)$$

상기식은 내부도체 C_j 에 대해 급진시 내부도체 C_i 에 결합되는 결합양(dB)을 의미한다. 상기 수식의 괄호안에 있는 분모, 분자는 각각 내부도체 C_j 를 V Volt로 급전하고 나머지 내부도체를 모두 0 Volt로 하였을 때, 내부도체 C_i , 내부도체 C_j 표면에 유기되는 총

전하량을 의미한다.

나. 50Ω 특성임피던스 구조 설계를 위한 수치알고리즘

준정적 근사법에 근거한 선전하 적분식을 통한 분석은 설계 분야에 응용하기가 쉽다. 왜냐하면 다른 분석방법[9, 10, 11, 12, 13]과는 달리 임의의 모형에 대해서도 단지 표면에 존재하는 선전하에 대한 계산만을 통해 특성임피던스를 쉽게 구할 수 있기 때문이다. 그러므로 컴퓨터 계산 용량만 확보된다면 임의의 모양에 대한 분석이 쉽게 가능하다. 이러한 분석을 통하여 $Z_0(=50\Omega)$ 특성임피던스 구조 찾기 위한 수치알고리즘 순서를 간단히 살펴보면 다음과 같다.

1) 선전하 적분식으로 나타내는 스칼라 포텐셜(1-3)식에 도체표면에 인가되는 전압(1-6)식을 적용하여 모멘트법[17]으로 선전하 분포를 구한다.

2) 선전하 분포를 통해 (3)식의 특성임피던스를 구한다.

3) 특성임피던스 구하는 과정을 뉴턴턴 램슨법[15]을 적용하여 주어진 특성임피던스인 Z_0 를 만족하는 구조변수를 추적한다. 상기 절차를 정리해보면 다음과 같다.

$$S_n = S_{n-1} - \left\{ \frac{L_k(|B_i|^T [g_j] [z_{ij}]) - Z_0}{\frac{\partial}{\partial S} (L_k(|B_i|^T [g_j] [z_{ij}]))} \right\}_{S=S_{n-1}} \quad (5-1)$$

$$L_k = \frac{\eta_0}{\epsilon_0 V_k} \int_{c_k} dc' \quad (5-2)$$

$$z_{ij} = \left\langle W_j(c), \frac{1}{2\pi} \int_{c'} B_i(c') \ln \left\{ \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} \right\} dc' \right\rangle \quad (5-3)$$

$$g_j = \langle W_j(c), V \rangle \quad (5-4)$$

$$\langle A, B \rangle = \int_{c'} AB^* dc \quad (5-5)$$

상기식에서 V 는 (1-6)식을 의미하고, (5-2)식은 K 번째 내부도체에 대한 특성 임피던스를 구하는 수식이며, $B_i(c')$ 는 기저함수, $W_j(c)$ 는 가중함수를 나타낸다.

또한 $\langle \rangle$ 는 Hilbert Space에서 정의되는 내적을 의미한다. 점자 n는 뉴우튼 랩슨법에서 나타내는 반복수를 나타낸다. 또한 S는 그림 2에서 8P-VWIG이 대칭성 구조를 갖는 경우, 내부도체의 중심이 외부도체 대각선상에 위치하고 모서리로 떨어진 거리를 모두 일정하다고 볼 때, 외부도체의 벽과 내부도체가 떨어진 거리(그림 2 참조)를 의미한다. 즉 상기 (5)식은 외부도체 크기 a가 주어지고 내부도체 굵기(r)가 결정되어 있을 때, $Z_0(=50\Omega)$ 특성임피던스를 갖기 위한 S의 크기를 결정하기 위한 수치 알고리즘을 나타내고 있다.

만일 상기 (5)식에서 기저함수를 펄스함수, 가중함수를 델타함수인 점정합법[17]을 사용하여 전개한다면 상기 (5-2), (5-3), (5-4)식은 다음과 같이 전개될 것이다.

$$L_k = \frac{\eta_0}{\epsilon_0 V_k} \sum_{p=1}^{Nck} \Delta C_p \quad (6-1)$$

$$z_{ij} = \begin{cases} \frac{\Delta C_j}{2\pi\epsilon_0} \ln \left\{ \frac{1}{\sqrt{(x_j - x'_i)^2 + (y_j - y'_i)^2}} \right\} & (i \neq j) \\ \frac{\Delta C_j}{2\pi\epsilon_0} \left(1 - \ln \left(\frac{\Delta C_j}{2} \right) \right) & (i = j) \end{cases} \quad (6-2)$$

$$g_i = \begin{cases} V_i & \text{on } C_{i=1, 2, 3, 4} \\ 0 & \text{on } C_5 \end{cases} \quad (6-3)$$

단, 상기 수식에서 ΔC_p 는 분할요소 길이를 나타내고, Nck는 C_k 도체의 총분할요소수를 나타낸다. (6-2)식에서 $i=j$ 일 때 관측점과 원천점간의 특이(singular)가 발생하여 근사화된 수식[18]을 사용하였다. 상기 (5)~(6)식은 내부도체 굵기 및 외부도체 크기가 결정될 때, Z_0 특성임피던스구조를 갖는 내부도체와 외부도체 이격거리 S를 추적하는 것 이외에도 이격거리 S가 주어지고 내부도체 굵기 r를 추적할 때도 상기 과정과 같이 구할 수가 있다.

III. 8P-VWIG 설계 및 제작 결과

상기 50Ω 특성임피던스 구조 설계를 위한 수치알고리즘을 활용하여 찾아낸 8P-VWIG의 치수가 그림 3에 표기되어 있다.

즉 $1.2m \times 1.2m$ 외부도체 단면 크기를 갖고, 굵기가 $0.1048m$ 일때, S가 $0.0394m$ 으로 계산되었다. EMI/EMS 측정시 내부에 설치되는 피시험체의 영향으로 특성임피던스가 낮아지기는 것을 보상하기 위해 TEM cell에서는 약 52Ω 으로 설계하고 있다[1]. 그러나 내부도체가 와이어로 구성되는 경우 피시험체와 내부도체간의 결합양이 떨어져 특성임피던스의 변화량이 낮아[13] 여기서는 보상치를 적용하지않은 50Ω 으로 설계하였다. 제작된 8P-VWIG의 결합양 $Coupl_{21}$, $Coupl_{31}$ 은 $-58dB$ (측정치: $-57.5dB(60MHz)$), $Coupl_{41}$ 은 $-64dB$ (측정치: $-63dB(60MHz)$)로 계산되어 측정치와 일치됨을 확인할 수 있었으며, 이러한 구조에 대한 각 주파수별 정재파비(VSWR) 측정결과를 그림 4에 나타내었다.

그림에서 (a), (b), (c), (d)는 각각 8P-VWIG의 1채널, 2채널, 3채널, 4채널의 정재파비를 나타낸다. 측정장비는 HP8510B 회로망 분석기를 이용하여 측정하였으며, 회로망 분석기와 연결된 채널을 제외한 나머지 채널은 종단시키고 측정이 수행되었다. 그림 4(a), (c)는 1채널, 3채널의 측정결과로서 제1공진이 나타나는 주파수인 $152.1MHz$ 까지 1.4이하를 유지하고 있으며, (b), (d)의 2채널의 측정결과 1.2이하를 유지하고 있음을 볼 수가 있다. 이들 약간의 차이는 구조상 상단쪽으로 설치된 내부도체가 하중으로 인해 정확한 치수를 유지하지 못한것에 기인된 것으로 보인다.

상기 치수를 갖는 8P-VWIG의 제2내부도체(C_2)에 대해 10 Volt를 인가했을 때, 계산된 내부전계값과 60MHz에서 측정된 결과를 그림 5에 나타내었다. 매우 일치된 결과를 나타내고 있음을 볼 수가 있다. 측정된 전계는 IEC1000-4-3에서 요구되는 측정설비 조건을 만족하는 EMCO7122 광대역 전계프로브로서 프로브에서 받은 AC 신호를 DC신호로 바꾸고 이를 다시 광신호로 변환시켜 광케이블을 통해 8P-VWIG 밖에 설치된 모니터링 시스템(그림 8 참조)과 연결하여 전계를 측정한 결과이다.

그런데 8P-VWIG의 제2내부도체(C_2) 급전시 전계의 분극 방향이 대각선으로 위치하고, 모서리에 내부도체가 위치하므로 내부도체 가까이에 위치한 외부도체 벽으로 전계의 분극이 휘어지는 현상으로 인해 6dB점유영역비가 62.5%(그림 5에서 16개의 측정지점에서 $0.8 \sim 1.6V/m(6dB)$ 편차)내의 전계값은 10개

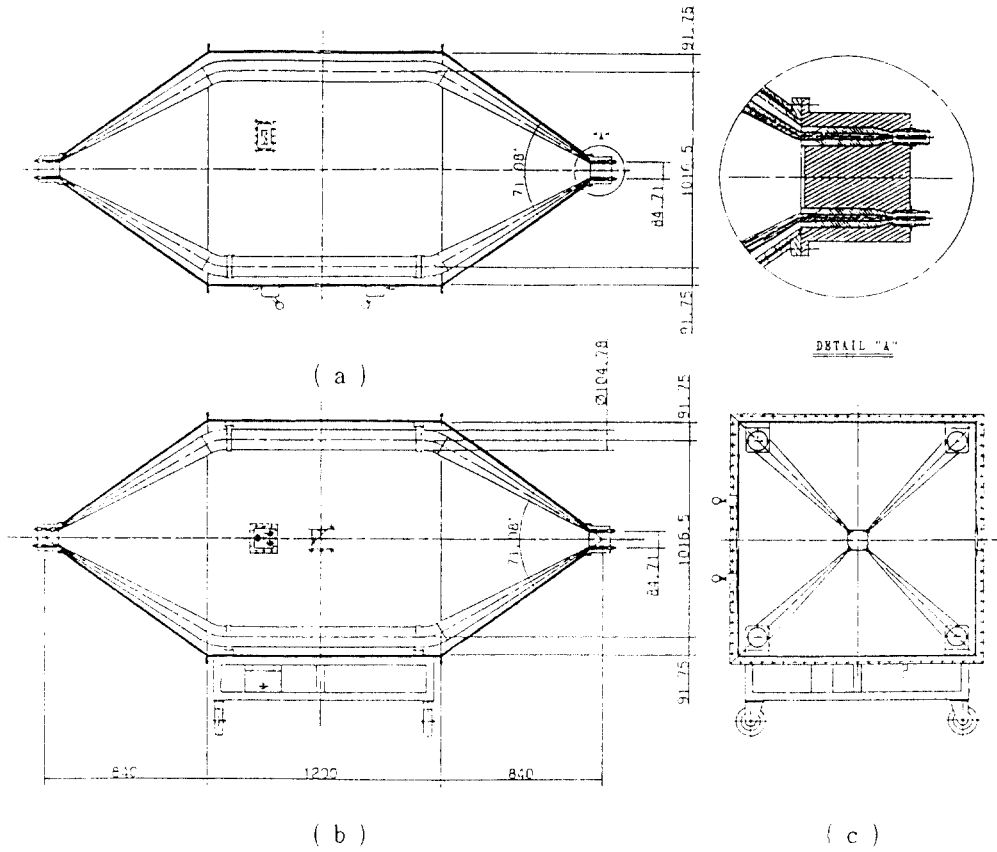
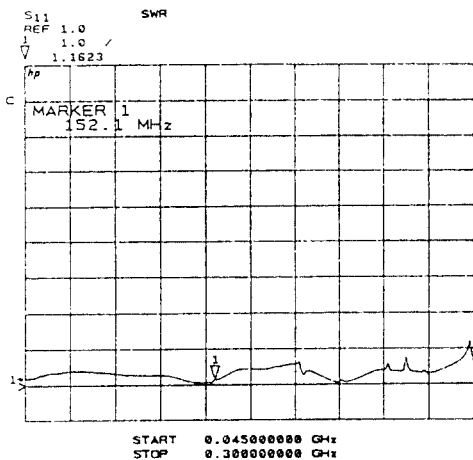
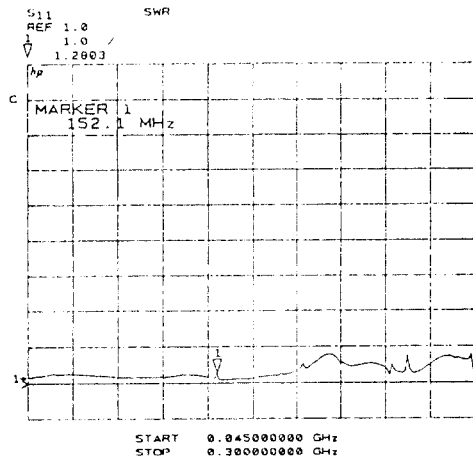


그림 3. 8P-VWIG의 상세도면 (a)평단면도 (b)정단면도 (c)측단면도.

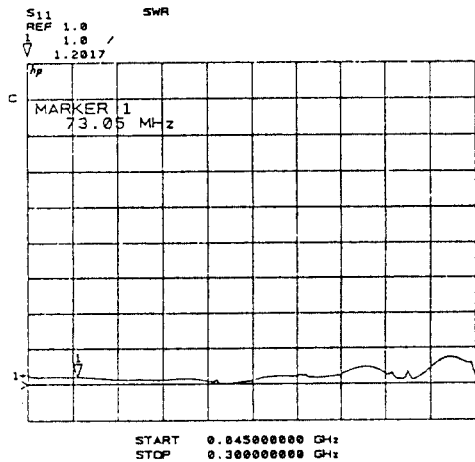
Fig. 3 Design of 8P-VWIG (a)Plane sectional view (b)Front sectional view (c)cross sectional view.



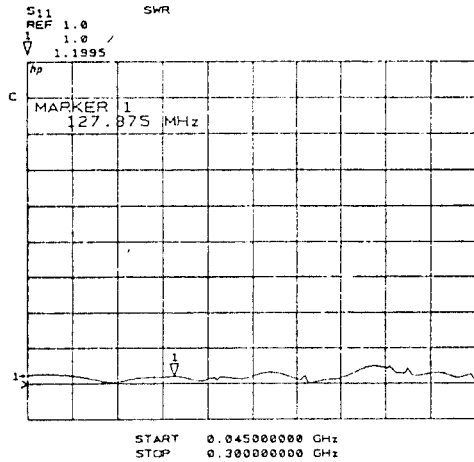
(a)



(c)



(b)



(d)

그림 4. $a = 1.2\text{m}$, $r = 0.0524\text{m}$, $s = 0.0394\text{m}$ 인 8P-VWIG (a) 1채널 (b)2채널 (c)3채널 (d)4채널의 정재파비.

Fig. 4 (a)1channel (b)2channel (c)3channel (d) 4channel input VSWR of 8P-VWIG for which $a = 1.2\text{m}$, $r = 0.0524\text{m}$ and $s = 0.0394\text{m}$.

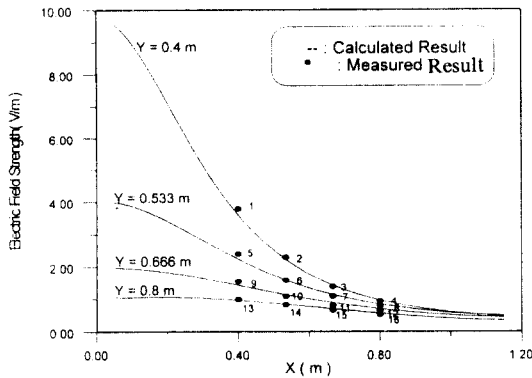


그림 5. $a = 1.2\text{m}$, $r = 0.0524\text{m}$, $s = 0.0394\text{m}$ 인 8P-VWIG에서 제2내부도체(C_2)에 60MHz의 10 Volt로 급전시 계산된 전계값과 측정된 전계값의 비교.

Fig. 5 Comparison of calculated and measured electric field strength in the 8P-VWIG($a = 1.2\text{m}$, $r = 0.0524\text{m}$, $s = 0.0394\text{m}$; feeding inner conductor = C_2 , $V = 10$ Volt, $f_r = 60\text{MHz}$).

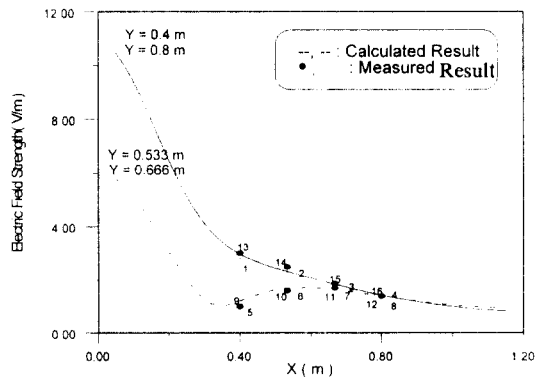


그림 6. $a = 1.2\text{m}$, $r = 0.0524\text{m}$, $s = 0.0394\text{m}$ 인 8P-VWIG에서 제1내부도체(C_1)와 제2부도체(C_2)에 대해 동위 상으로 각각 60MHz의 10 Volt로 급전시 계산된 전계값과 측정된 결과의 비교.

Fig. 6 Comparison of calculated and measured electric field strength in the 8P-VWIG($a = 1.2\text{m}$, $r = 0.0524\text{m}$, $s = 0.0394\text{m}$; inphase feeding inner conductors = C_1 and C_2 , $V = 10$ Volt, $f_r = 60\text{MHz}$).

지점이 이에 속하므로 '10/16*100%')로 떨어져, 전자파 내성 측정에 응용하기에는 균일도가 저조한 문제점을 갖는다.

이러한 문제점을 해결하기 위해, 동일 외부도체면에 위치한 2개의 내부도체(그림 2에서 C_1 , C_2 혹은 C_1 , C_3 등)를 동위상으로 급전시켜 해결하였다. 피시험체가 위치하는 균일장영역에서 균일도를 저해하던 상기 "2개의 내부도체를 공유하는 외부도체면에 대해 수평을 이루고 있는 전계 성분"을 제거함으로써 균일도가 높은 전자장을 조성시킬 수 있도록 한 것이다. 또한 급전하는 내부도체를 어느면에 대해 선택하느냐에 따라 분극을 상하 좌우(수직, 수평)방향으로 조성시킬 수 있도록 하였다. 즉 수평 분극의 균일장을 조성시키기 위해서는 내부도체 C_1 , C_2 혹은 내부도체 C_3 , C_4 에 대해 동위상으로 급전시키면 되고, 수직 분극의 균일장을 조성시키기 위해서는 내부도체 C_1 , C_3 혹은 내부도체 C_2 , C_4 에 대해 동위상 급전을 통해 이루어질 수가 있다. 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 즉 제1내부도체(C_1)와 제2내부도체(C_2)를 동위상으로 급전시켜 수평분극을 조성시켰을 때의 수치 결과와 측정된 결과를 나타내었다. 그림에서 처럼 계산된 결과와 측정된 결과가 일치됨을 볼 수 있으며, 균일도가 매우 개선되었음을 볼 수가 있다. 즉 60MHz에서 측정된 16개 지점에서 1.2V/m~2.4V/m(6dB 편차)내에 있는 저점이 14개이므로 6dB 점유 영역비는 87.5%로 측정됨을 볼 수가 있다.

그림 7(b)에 상기와 같이 내부도체 C_1 , C_2 을 각각 동위상으로 급전했을 때의 수평분극에 대한 수치 결과를 상세히 나타내었다. 균일장 영역(그림 7(b)에서 점선으로 구성된 영역)에서 전계에 대한 6dB 점유 영역비는 16점 측정 결과보다도 높은 92%를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 또한 분극 분포도는 그림 8에서 처럼 기울기(tilt)로서 나타내었다. 그 분포가 기준방향(그림 8에서는 0°)에 대해 약 $\pm 40^\circ$ 이내의 편차를 가지고 있음을 볼 수가 있다. 수직 및 수평분극을 고려한 $\pm 3dB$ 편차를 갖는 영역은 그림 7(b)에서 처럼 $0.325m \times 0.325m$ 인 중심영역으로 제한된다. 이 때의 분극 분포도는 기준 방향에 대해 $\pm 30^\circ$ 이내에 있음을 볼 수가 있다. $\pm 1dB$ 편차를 갖는 영역은 그림 7(b)에서 처럼 $0.2m \times 0.2m$ 인 중심영역으로 제한되고 있으며, 분극 분포는 $\pm 10^\circ$ 이내에 있음을 볼 수가 있다. 그림 7(a)는 동일 크기의 외부도체를 갖는 50Ω 삼중 TEM cell[19, 20]에 대한 균일장 영역 및 균일도를 나타내었다. 그림에서 처럼 균일장 영역의 크기는 0.

$35m \times 0.35m$ 로 그 크기가 줄어들었음에도 불구하고 6dB 점유영역비는 약 75%를 유지하고 있음을 볼 수가 있다. 또한 $\pm 3dB$ 편차를 갖는 영역의 크기는 $0.24m \times 0.24m$ 이며, $\pm 1dB$ 편차를 갖는 영역의 크기는 $0.08m \times 0.08m$ 을 갖는다. 그러므로 8P-VWIG는 기존 삼중 TEM cell보다도 같은 단면을 기준으로 할 때, 보다 넓은 균일장 영역을 확보할 뿐만 아니라 보다 높은 균일도를 가지고 있음을 볼 수가 있다.

8P-VWIG는 좌우 상하 대칭 구조로 인해, 수직분극에 대해서도 상기와 동일한 결과를 나타내므로 그 결과는 생략한다.

상기 시설은 내부 균일장 영역의 최대 크기를 1/3인 중심영역으로 정의하고, 6dB 점유영역비가 75% 이상을 확보하는 조건을 갖는다면, $0.4m \times 0.4m \times 0.4m$ 크기를 갖는 피시험체까지 가능하고, CISPR Pub.24, EN55101-3을 만족하는 복사 전자기장 내성 시험을 하기 위해서는 $0.325m \times 0.325m \times 0.4m$ 크기를 갖는 피시험체까지만 가능함을 볼 수가 있었다. 또한 A. Tsaliovich의 보고[21]에 따르면, 균일도가 $\pm 1dB$ 내에 있다면 ABB측정 방식[23]을 활용한 불요 전자기 간섭(EMI)의 측정치가 비교적 정확하다고 보고하고 있다. 상기 8P-VWIG의 구조에서 $\pm 1dB$ 내 균일도를 유지하기 위해서는 피시험체의 최대 크기가 $0.2m \times 0.2m \times 0.4m$ 가 되어야 한다. 그러나 EMI 측정에서 균일도 제한은 어느정도로 해야 할것인지는 아직도 연구중에 있다. 왜냐하면 EMI측정에 있어서 균일도의 제한은 측정방식[22, 23], 그리고 시설의 종류, 크기, 형태등과 매우 밀접한 관계를 갖고 있어 많은 실험 연구 결과가 뒷받침되어야 하기 때문이다. Claude M. Weil과 Lucian Gruner[24]에 따르면 구형도파관 내에 내부도체가 놓이는 경우, 내부도체가 없는 경우의 차단주파수보다도 낮은 값을 가진다고 보고하고 있고, 또한 Lorenzo Carbonini[25]에 따르면 내부도체가 가느다란 와이어로 구성되는 경우, 그 값의 차이가 미소함을 보여주고 있다.

그러므로 상기 구조에서 TE_{10} , TE_{01} 모드의 차단주파수는 약 125MHz, TE_{20} , TE_{02} , TE_{11} 모드의 차단주파수는 약 176MHz임을 알 수가 있다. 그런데 Hill의 논문[7]에서 지적했듯이 정재파비로 측정되는 공진주파수는 그 한계가 있다. 어느 공진주파수에서는 전송 전력(삽입손실비), 반사전력(정재파비)으로는 측정이

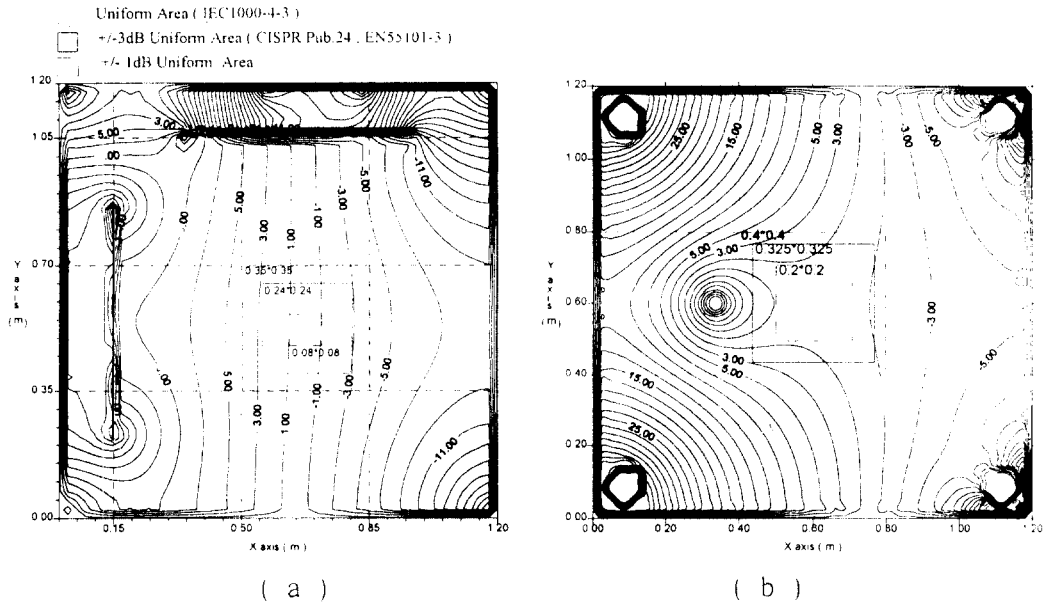


그림 7. (a)삼중티이엠셀(TTEM cell)의 전계치 분포 편차 (b)8P-VWIG의 내부에서의 “1채널”과 “2채널”에 대해 동위상으로 급전했을 때의 전계치 분포 편차

Fig. 7 Variations of the electric field strength distribution in (a)the TTEM cell, (b)the 8P-TEM cell of which in-phase feeding channels are “1 channel” and “2 channel”.

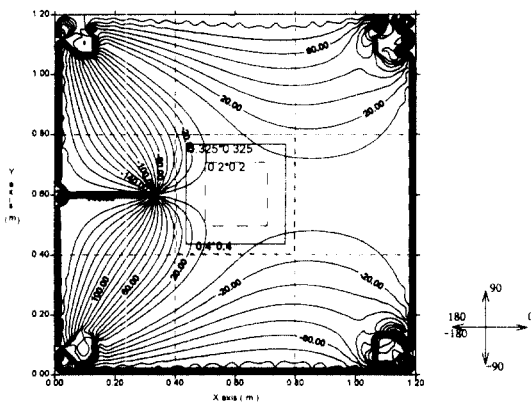


그림 8. 8P-VWIG의 내부에서의 “1채널”과 “2채널”에 대해 동위상으로 급전했을 때의 전계 분극 분포 편차

Fig. 8 Variations of electric field polarization distribution in the 8P-VWIG of which inphase feeding channels are “1 channel” and “2 channel”.

불가능하고 내부전계에 대한 소인주파수 측정법으로만이 측정가능한 공진주파수가 존재하기 때문이다. 그러므로 그림 3의 정재파비로 측정된 공진주파수 152.2MHz, 189MHz, 202.5MHz, 207MHz, 225MHz, 265MHz는 어느 공진모드인지를 결정하기가 어렵다. 그러나 측정된 제1공진(152.2MHz)이 제 1 차단주파수~제 2 차단주파수 사이에 있으므로, 측정된 제 1 공진주파수인 152.2MHz는 반드시 TE_{10N} 혹은 TE_{01N} 이 되어야만 한다. 그런데 Hill의 계산 방법[7]에 의거, 상기 8P-VWIG의 유효길이는 1.2~2.9m 내에 있어야 하므로 135MHz~162MHz사이에 존재하는 공진주파수의 모드는 반드시 상기 모드에서 $N=1$ 이어야만 한다. 그러므로 정재파비로 측정된 제 1 공진주파수는 TE_{011} (혹은 TE_{101})모드임을 알 수가 있다.

IV. 8P-VWIG의 응용

8P-VWIG를 활용한 분야로는 앞절에서도 언급되었듯이 복사 전자기장 내성 측정 시설로 활용할 수가 있다. "1채널", "2채널"을 동위상 급전을 통해 수평분극에 대한 복사 전자기장 내성 시험이 가능하며, 대칭적인 구조로 인해 "1채널"과 "3채널"을 동위상으로 급전을 통해 수직분극에 대한 복사 전자기장 내성 시험이 가능하다. 이는 피시험체를 뒤집지 않아도 복사 전자기장 내성 시험을 수행할 수가 있어, 측정의 재현성뿐만 아니라 전자레인저처럼 내부에 피조사체를 넣고 시험하는 피시험체에 대해서도 지원이 가능한 장점을 갖는다. 또한 4채널중에 사용하지 않는 내부 도체를 스펙트럼분석기 혹은 진계측정장치 등과 같이 연결하여 피시험체의 복사 전자파는 물론 복사 전자파를 발생시키는 전류원(모멘트향)에 대해 측정할 수가 있다. 왜냐하면 피시험체는 여러개의 전류원을 집합으로 볼 수가 있으며, 이들 전류원은 전송선로

내부에서 조성되는 전계 및 자계와 일정한 결합 관계를 가지며 양 입출력 단자로 전송되기 때문이다. 즉 전류원은 폐전류(close current)와 개전류(open current)로 구분할 수가 있는데, 폐전류, 개전류는 각각 모멘트향으로 전계, 자계(8P-VWIG의 단자로 일정 전압을 공급할 때, 전류원들이 위치하는 공간에 조성되는 자계, 전계)와 결합하여 양단으로 전송된다. 이러한 특성을 이용하여 피시험체로부터 발생하는 복사전자파 혹은 복사 전자파를 발생시키는 피시험체의 전류원을 측정할 수가 있다[26~27]. 오동작시 급격히 변화하는 복사 전자파의 상태를 측정하므로써 피시험체의 정상동작여부를 객관적으로 판단하는 자료로 이용할 수가 있는 것이다. 종전에는 이러한 장치 설치를 위해 내부에 프로브를 설치하여 운용하였으나 프로브에 의한 내부 전자계의 균일도가 깨지는 문제점을 제거시킬 수 없었다. 8P-VWIG를 이용한 복사 전자기장 내성 측정 시스템의 블록다이어그램 살펴보면 그림 9와 같이 구성할 수가 있다.

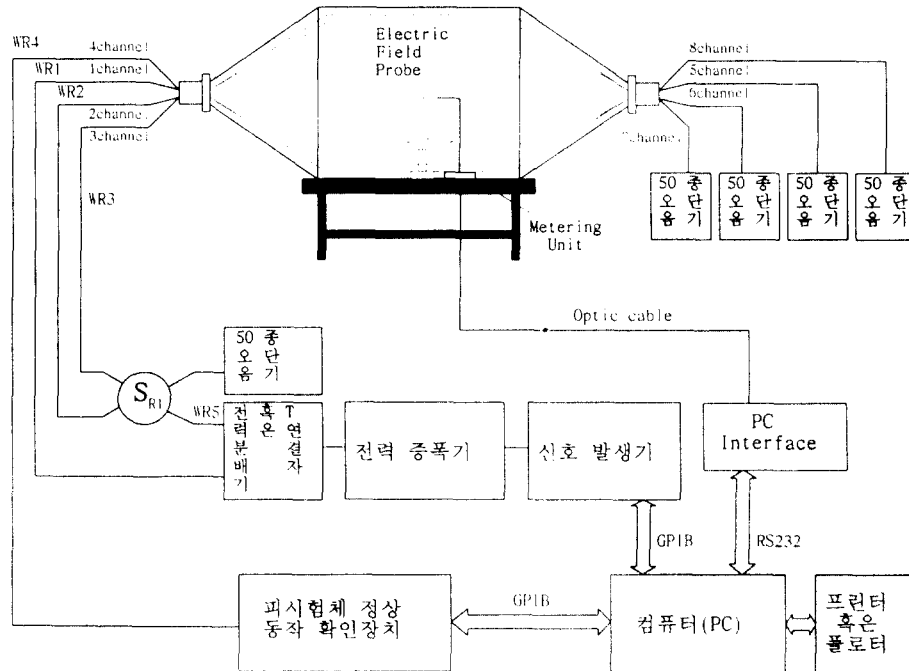


그림 9. 8P-VWIG를 이용한 전자기장 내성 측정 시스템.
Fig. 9 Radiated immunity test system using 8P-VWIG.

50Ω 종단기 5개, 전력분배기 혹은 T연결자, 전력증폭기, 신호발생기, 피시험체 정상동작 확인장치, 그리고 전계 모니터링 시스템으로 구성시켜 전자기장 내성 시험을 할 수가 있다. 시스템을 구성시킬때 WR1, WR2 + WR5, WR3 + WR5의 길이는 동위상 급전을 위해 일치해야 하며, 스위치 SR1의 삽입손실과 위상 지연이 없어야 한다. 또한 전력분배기 출력 2단의 상대위상차가 없어야 한다.

상기 시스템을 이용하여 수평 복사 전자기장 내성 측정을 하기 위해서는 우선 내부 피시험체가 위치하는 영역에 등방성 프로브를 설치하고, 스위치 SR1을 조절하여 WR2는 WR5로, WR3는 50Ω 종단기로 연결한다. 그리고 원하는 레벨(IEC1000-4-3에서 규정된 바에 의하면 1레벨:1V/m, 2레벨:3V/m, 3레벨:10V/m임.)이 되도록 신호 발생기의 출력을 조절하여, 그 값이 유지되면 신호발생기의 출력 전력을 기억해둔다. 전 주파수대에 대해 수행이 완료되면, 등방성 프로브를 제거한 후 피시험체를 내부의 균일장 영역내에 설치하고, 신호발생기의 출력을 변조시켜 “기억해둔 각 주파수에 대한 전력”을 출력시켜 피시험체의 오동작 여부를 살펴본다.

피시험체가 설치된 회전타자를 90도씩 회전시켜 4면에 대해 시험을 실시하고 그 과정이 끝나면, 수직 분극에 대한 복사전자기장 내성 시험을 위해 스위치 SR1을 조절하여 WR3는 WR5로, WR2는 50Ω 종단기로 연결하여, 상기처럼 4면에 대해 시험을 수행한다.

이 이외에도 상기 시설의 적용분야는 각종 프로브, 안테나 교정, EMI측정 시설, 각종 무선기기 감도 측정, 전자파 강도 측정기의 교정, 화재 감지기 내성, 위해 전자파 감지기 동작 판별, 임의의 전파임피던스를 갖는 표준 근역장 발생장치 등에 활용할 수가 있다.

V. 결 론

8단자 가변임피던스 전자파 발생 장치에 대한 구조에 대해 소개하였고, 이러한 구조에 대한 전기적인 특성을 분석하였으며, 50Ω 임피던스 구조에 대한 추적 알고리즘을 제시하였고, 이를 이용하여 직접 설계 제작한 결과를 나타내었다. 제작 결과 1.4이하의 정제파비를 갖고 제1공진 주파수가 152.1MHz에서 나타남을 볼 수 있었다. 또한 준정적 근사법에 의한 내부

전자계에 대한 분석 결과와 실험치가 일치함을 볼 수가 있었다.

동일 외부 도체면에 존재하는 2개의 내부 도체에 대해 동위상 급전을 통해 균일도를 높이고, 수직 수평 분극 조절이 가능한 표준 전자기장을 조성시켰다. 균일장 영역에서 균일도 평가는 6dB점유영역비 평가 결과 92%(16점 측정 결과는 82.5%)를 확보하고 있어, 전자기장 내성 시험 시설로 적합함을 보였다. 그리고 이러한 복사 전자기장 내성 측정을 위한 측정 시스템에 대한 간단한 소개가 있었다.

8P-VWIG는 기존 간이 EMI/EMS 측정 시설들[1, 2, 3, 20]에 비해 전력효율은 다소 떨어지나 시험 공간이 넓고, 분극 조정이 자유로운 잇점을 지닌 시설이다. 이 외에도 본 고에서는 소개되지 않았지만 특히 EMI 측정시 다중 채널을 통해 피시험체에 대한 다양한 분극 정보를 받을 수가 있기 때문에 측정의 편리성, 측정의 재현성, 측정시간의 단축효과를 갖는다. 추후 8P-VWIG를 이용한 EMS 측정뿐만 아니라 다른 응용 분야에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. M.L. Crawford, "Generation of standard EM fields using TEM transmission cells," IEEE Trans. on EMC, Vol.16, No.4, pp.189~195, November 1974.
2. D. Konigstein, D. Hanssen, "A new family of TEM cells with enlarged bandwidth and optimised working volume," in Proc. 7th Inter. Symp. on EMC, Zurich, pp.127~132, March 1987.
3. F.B.J. Leferink, "A Triple TEM cell: three polarization in one setup," in Proc. 10th Inter. Symp. on EMC, Zurich, pp.573~578, March 1993.
4. 윤재훈 외 3명, "8단자 가변임피던스 전자파 발생 장치와 이를 이용한 복사 전자기장 내성 측정 시스템," 특허출원번호 36340, 1994. 12.
5. P.F. Wilson, M.T. Ma, "Simple approximate expression for higher order mode cutoff and resonant frequencies in TEM cells," IEEE Trans. on EMC, Vol.EMC-28, No.3, pp.125~130, August 1986.
6. M.T. Ma, M. Kanda, "Electromagnetic compati-

- bility and interference metrology," NIST(U.S.) Tech. Note 1099, July 1986.
7. D.A. Hill, "Bandwidth limitations of TEM cells due to resonances," J. Microwave Power 18(2), 181~195, August 1983.
 8. M. Kanda, R.D. Orr, "Generation of standard electromagnetic fields in a TEM cell," NIST(U.S.) Tech. Note 1319, August 1988.
 9. J.C. Tippet, D.C. Chang, "A new approximation for the capacitance of a rectangular coaxial strip transmission line," IEEE Trans. M.T.T., Vol. MTT-20, pp.602~204, September 1976.
 10. Y. Tananka, T. Honma, I. Kagi, "A boundary element analysis of TEM cells in three dimensions," IEEE Trans. on EMC, Vol.EMC-28, pp.179~184, November 1986.
 11. S.K. Das, B.K. Sinha, "Numerical solution of higher order mode cutoff frequency in symmetric TEM cells using finite element method," IEEE Trans. on EMC, Vol.32, No.4, November 1990.
 12. R.D. Leo, T. Rozzi, C.Svara, Zappelli, "Rigorous analysis of the GTEM cell," IEEE Trans. M.T.T., Vol.MTT 39, pp.488~500, March 1991.
 13. L.Carbonini, "Modal analysis of multi-connected waveguides," IEEE Trans. M.T.T., Vol.MTT 40, pp.665~671, April 1992.
 14. 윤재훈, 최익권, "모멘트법을 이용한 임의의 구형 내부도체를 갖는 TEM cell의 특성 분석," 한국통신학회 논문지, Vol.15, No.11, pp.898~908, 1990. 11.
 15. W.H.Press, S.Teukolsky, W.T.Vetterling, B.P.Flannery, *Numerical recipes in C*, Cambridge university press, Ch.9.4, pp.362~368, 1992.
 16. M.K. Krage, G.I. Haddad, "Characteristics of coupled microstrip transmission lines I: Coupled-mode formulation of inhomogeneous lines II: Evaluation of coupled-line parameters," IEEE Trans. M.T.T., Vol.MTT-18, pp.217~228, August 1970.
 17. R.F. Harrington, *Field computation by moment methods*, Macmillan Series in Electrical Science, Ch.1, pp.1~20, 1968.
 18. 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 Trans. on EMC, Vol.EMC-29, No.4, pp.262~272, November 1987.
 19. X.D. Cai, G.I. Costche, "An optimum engineering design approach of a triple-TEM cell using finite element method," IEEE Inter. Symp. on EMC, Sendai, pp.332~335, May 1994.
 20. 윤재훈, "티이엠셀(TEM cell)의 개발 현황과 개발된 모델들의 성능 분석," 한국전자파기술학회지(특집), Vol.5, No.4, pp.94~103, 1994. 12.
 21. A. Tsaliovich, "Using GTEM cell for electromagnetic emission measurements: experiments test result correlation," IEEE Inter. Symp. on EMC, Chicago, pp.161~166, August 1994.
 22. I. Sreenivasiah, D.C. Chang, M.T. Ma, "Emission characteristics of electrically small radiating source from test inside a TEM cell," IEEE Tras. on EMC, Vol.EMC-23, No.3, pp.113~121, August 1981.
 23. P. Wilson, D. Hansen, D. Koenigsein, "Simulating open area site emission measurements based on data obtained in a novel broadband TEM cell," IEEE Inter. Symp. on EMC, Zurich, pp.171~179, March 1989.
 24. C.M. Weil, L. Gruner, "High order mode cutoff in rectangular striplines," IEEE Trans. M.T.T., Vol.MTT-32(6), pp.638~641, June 1984.
 25. L.Carbonini, "Comparison of analysis of a WTEM cell with standard TEM cells for generating EM fields," IEEE Trans. on EMC, Vol.35, No.2, May 1993.
 26. 윤재훈, 최익권, "TEM cell을 이용한 EMI 측정 방식 연구," 한국전자통신연구소 기술문서 TD92-7330-157, 1992. 12.
 27. G. H. Koepke, M.T. Ma, and W. D. Bensema, "Implementation of an automated system for measuring radiated emissions using a TEM cell," IEEE Trans. on Instrum. and Measur., Vol.38, No.2, pp.473~479, April 1989.

尹 在 焯(Jae Hoon Yun)

正會員

1960年 9月 10日生

1984년: 중앙대학교 공학사

1986년: 중앙대학교 공학석사

1996년~현재: 중앙대학원

1990년~현재: 한국전자통신연구소 전자파공학연구실