

TEM 도파관을 이용한 전자파 장애 측정 연구 및 표준화 동향	권 중 화
	ETRI 전파기술연구부

I. 개 요

EMI/EMS 측정을 위해서는 주변 전자파 잡음(background noise)이 낮은 야외시험장(Open Area Test Site)이 가장 바람직하나, 근래 전자(전기 기기 사용의 증가와 방송·무선통신 시스템의 다양화로 인한 인공잡음(artificial noise)의 증대로 조건에 부합된 부지 선정이 어렵고, 설치 비용이 매우 크며 날씨 변화에 따라 시험 계획이 변경될 수도 있는 단점이 있다. 전자파 반-무반사실(Semi Anechoic Chamber)은 대부분의 환경 잡음을 감쇠시키므로 야외시험장처럼 장소의 구애를 받지 않아 도시나 혹은 제품 생산지 가까이에 설치 운용이 가능하다. 그러나 큰 설치 공간과 많은 시설 유지 비용을 필요로 하며, 저주파 대역에서는 반사에 의한 공진을 완전히 제거할 수 없어 성능이 떨어진다. 또한, 최근 컴퓨터 CPU의 동작주파수가 급속하게 높아지고 PCS, IMT-2000 등과 같은 이동전화의 사용주파수도 계속해서 높아짐에 따라 미연방통신위원회(Federal Communication Commission)에서는 5 GHz까지의 복사 방출 시험을 요구하고 있다. IEC 61000-4-3 복사 내성 시험규격도 휴대폰 주파수인 2 GHz까지 확장되었으며 IMT-2000, Bluetooth 등 새로운 이동통신 서비스가 속속 개발됨에 따라 18 GHz 까지 시험 주파수가 확장되는 추세이다. 그러나, 현재 국내 각 연구실에서 보유하고 있는 야외시험장이나 전자파 반-무반사실의 경우 1 GHz 이상에서의 시험이 곤란하여 수 GHz 주파수대역에서 시험이 가능한 복사 및 내성시험 시설이 필요하게 되었다.

이러한 문제점들을 해결하기 위해 고안된 대용 측정 시설 중 대표적인 것이 TEM 셀이나 GTEM 셀과 같은 TEM 도파관(waveguide) 형태의 장비들이다. 이들은 본래 EMS 측정을 위한 장비이지만 협소한 공간이나 외부와의 전자파 간섭의 우려가 없고, 설치가 비교적 자유로워 여러 연구기관에서 도파관 원리를 이용한 측정 방식을 연구(개발하여 범용적인 전자파 적합성 측정 장비로서 활용하고 있다. 야외시험장과 무반사실 등이 안테나에 의한 피시험기기 주변 공간에서의 1점 측정으로 인해 시험 시간이 많이 소요되는 공통적인 단점이 있는 반면, TEM 도파관에 의한 측정은 일단 피시험기기의 모델링 정보만 얻어지면 계산에 의해 EMI 측정을 바로 할 수 있다. <표 1>에서 현재 상용화되어 사용되고 있는 TEM/GTEM 셀, 야외시험장 및 전자파 무반사실에 대해 EMI 측정과 관련된 몇 가지 사안에 대해 비교하였다.

본 문서에서는 야외시험장이나 전자파 반-무반사실 등과 같은 기존 EMI/EMS 측정 시설의 단점을 보완하고, 광대역 특성을 갖는 대용 측정 시설로서의 TEM 도파관에 대해 소개하고 야외시험장 결과와의 상관관계 알고리즘 및 표준화 동향에 대해 기술하였다. 2절에서는 대표적인 TEM 도파관 구조의 측정 시설인 TEM 셀과 GTEM 셀의 전기적·구조적 특징에 대해 간단히 기술하고, 3절에서는 TEM 셀과 GTEM 셀에서의 측정 결과를 이용하여 야외시험장 결과를 얻어내는 상관관계 알고리즘에 대해 기술하였다. 4절에서는 IEC/CISPR와 TC77에서의 표준화 활동을 중심으로 현재 진행중인 TEM 도파관

<표 1> EMI 측정시설 비교 [EMCO사의 제품 목록에서 인용].

	TEM 셀	GTEM 셀	OATS	FAC/SAC*
피시험기기 변위	피시험기기 회전	피시험기기 회전	피시험기기 회전 안테나 스윙 안테나 교체	피시험기기 회전 안테나 스윙 안테나 교체
상관 관계	데이터는 Multi-pole 에 의해 관계됨	데이터는 Multi-pole 에 의해 관계됨	전계 E의 수평, 수직 성분의 최대치를 찾 아냄	전계 E의 수평, 수직 성분의 최대치를 찾 아냄
오차 범위	± 4 dB (차단주파수 이하)	± 4 dB (차단주파수 이하)	± 2~8 dB	± 3~10 dB
시험 시간	2시간	45분	8시간	8시간
한계점	피시험기기 크기 고주파대 성능이 떨 어짐	피시험기기 크기	고가(고가) 환경 잡음 날씨	고가(고가) 공진 현상 저주파대 성능이 떨 어짐

*FAC/SAC : Full/Semi Anechoic Chamber

관련 표준화 동향과 내용에 대해 기술하고자 한다.

II. TEM 도파관

2-1 TEM 셀

TEM(Transverse Electromagnetic) 셀은 이름 자체가 내포하고 있듯이 TEM 파를 발생시키는 장비이다. TEM 셀의 구조는 [그림 1]과 같이 크게 내부도체(Septum)와 외부도체(Outer Shield)로 구성되며, 그 외에 내부 도체를 지지하는 유전체 지지봉(dielectric septum support), 양끝 단의 동축케이블 연결커넥터(coaxial connector), 그리고 동축 부하(coaxial load)로 구성된다. 내부 도체와 외부 도체는 알루미늄 혹은 구리처럼 도전율이 높은 재료로 구성되며, 지지봉은 유전율이 낮은 테프론과 같은 전자장에 영향을 적게 주는 물질로 구성된다. TEM 셀은 근본적으로 구형 동축 선로(Rectangular Coaxial Transmission Line)의 구조를 갖는다.^[1]

TEM 셀의 사용분야는

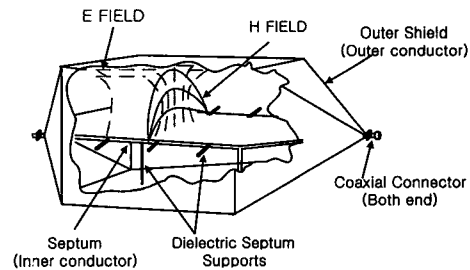
- * 전자파가 생체에 미치는 영향 연구

* 전자장 강도 측정기 교정용

* EMI/EMC 측정 시설에서 저주파 내성 및 방사 측정

등에 널리 이용되고 있다. 다른 TEM 파 발생 장치에 비해 TEM 셀이 가지고 있는 장점을 살펴보면 다음과 같다.

- 외부 전자파 및 내부 시험 장치로부터 발생되는 전자파 차폐 효과의 우수성
- 직류에서부터 수백 MHz에 이르는 넓은 주파수에서의 사용 가능성
- 낮은 전력으로부터 높은 전력에 이르는 균등



[그림 1] TEM 셀 구조.

- 장(uniform field) 발생의 용이성
- 전자파무반사실(Anechoic Chamber) 및 야외 시험장(OATS)에서 안테나를 TEM파 발생원으로 하기 때문에 발생하는 시험 조작의 복잡성과 고주파대 측정이 불가능하나 TEM 셀은 안테나가 불필요하므로 시험조작이 간단하고 저주파대 시험이 가능함
 - 시험 조작의 간편성, 제작에 있어서의 편의성

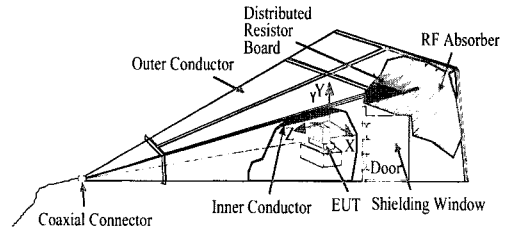
이러한 장점을 갖는 반면 다음과 같은 단점을 가지고 있다.

- 상한 주파수 이상의 높은 주파수대에서의 사용이 불가능
- 피시험기(Equipment Under Test: EUT)를 측정할 수 있는 시험 공간이 협소

2-2 GTEM 셀

TEM 셀 사용에 있어 주된 한계점은 상한 주파수에 반비례하는 시험 영역의 크기이다. 상한 주파수는 균일장(Uniform field)을 갖는 TEM 모드의 전자기장 분포를 교란시키는 고차모드의 출현에 의해 구해진다. TEM 셀은 구조적 특성 때문에 높은 Q를 갖는 공진기(cavity)와 같이 동작하는 경향이 있어 공진을 유발한다. 따라서 셀 내부시험 영역에서의 전자기장 세기는 주파수가 높아짐에 따라 큰 변화를 겪게 된다.

GTEM(Gigahertz Transverse Electromagnetic) 셀의 구조는 [그림 2]에 나타내었으며, GTEM 셀은 기존의 TEM 셀이 가지고 있는 한계점인 셀의 기하학적 크기와 관련된 상한 주파수와 사각뿔 형태로 좁아지는 종단(tapered termination)으로 인한 반사 등을 극복할 수 있다. GTEM 셀은 정합된 부하로 종단되면서 부드럽게 벌어지는 구형 동축 전송선의 단면으로 구성되어 있다. GTEM 셀 내의 전파전파



[그림 2] GTEM 셀 구조.

(電波傳播, wave propagation)의 기본 발상은 source로부터 약한 구형파를 50Ω 구형 동축선으로 TEM 파에 왜곡이 없이 분포혼합종단(distributed hybrid termination)으로 전파한다는 것이다. 분포혼합종단은 전자파 종단을 위해 흡수체(Absorber)를 사용하고 전류 종단을 위해 분포저항부하(distributed resistance load)를 사용한다. 따라서 GTEM 셀은 저주파수 대역에서 50Ω 부하와 같이 동작하며, 고주파수 대역에서는 흡수체가 무반사실에서처럼 입사파를 감쇄시킨다. 이러한 방법으로 DC에서 수 GHz까지 적절한 광대역 종단이 보장된다. 이와 같이 GTEM 셀은 실제에 있어서 TEM 셀과 무반사실(Anechoic Chamber) 사이의 혼합형이다. 이 새로운 장비는 TEM 도파관의 기본적인 장점을 보유하면서도 TEM 셀이 가지고 있는 한계점인 셀 크기와 관련된 상한 주파수 또는 추이적인 종단(tapered termination)으로 인한 반사 등을 극복하려는데 그 목적을 두고 있다. GTEM 셀은 DC에서 1 GHz 이상까지 CW 또는 Pulse원을 사용하여 시험 공간에서 거의 (± 4 dB 이하) 일정한 전자기장을 발생시킨다.^[2]

GTEM 셀은 전자기기의 전자파 적합성 시험에 크게 가치 있는 기술적 도구로 지속적으로 증명이 되었으며, GTEM 셀 사용한 측정 데이터에 대해 FCC 등과 같은 규격에서 인정하고 있다.^[3]

III. 상관관계 알고리즘(Correlation Algorithm)

야외시험장이나 전자파 반-무반사실에서 안테나를 이용하여 피시험기로부터 복사 방출되는 전자파를 측정하는 것과는 달리 TEM 도파관 형태의 측정 시설의 출력단에서 실제 측정되는 것은 피시험기로부터 방출되는 전력(power)이다. 따라서 TEM 도파관을 이용하여 얻은 정보로부터 현재 전자파장해 규제를 위한 공식적인 기본 측정 시설인 야외시험장의 결과를 얻기 위한 상관관계 알고리즘이 필요하다.

본 절에서는 TEM 도파관, 즉 TEM 셀과 GTEM 셀의 측정 결과를 이용하여 야외시험장의 결과를 유도하는 상관관계 알고리즘(Correlation Algorithm)에 대해 간단히 기술하였다. 상관관계 알고리즘 유도와 관련하여 TEM 셀과 GTEM 셀의 가장 큰 차이점은 피시험기기의 정보를 얻을 수 있는 출력단 수에 있다. 즉, TEM 셀의 경우엔 2 포트이므로 1 포트의 GTEM 셀의 경우보다 많은 정보를 얻을 수 있다.

일반적으로 TEM 도파관을 이용하여 피시험기기의 자유공간 혹은 접지면상에서의 복사 전력이나 복사 패턴을 얻는 방법은 우선 피시험기기를 등가 직교의 전기 및 자기 다이폴로 모델링하고, 얻어진 다이폴의 크기와 위상을 이용하여 자유공간 혹은 접지면상에서의 복사 전력 및 전자기장 분포를 수식적으로 계산하는 것이다. 이러한 기법을 적용하기 위해서 피시험기기는 전기적으로 작아야(electrically small) 하고, 3개의 등가 직교 전기 및 자기 다이폴 모멘트에 의해 모델링이 가능해야 한다. 즉, 최대 측정 주파수(TEM 도파관의 차단 주파수 이하)의 파장에 비해 피시험기기의 크기가 매우 작다는 가정이 만족해야만 피시험기기의 중심에 다이폴을 위치시켜 계산이 가능하다.

GTEM 셀 내의 측정 영역에 동작중인 피시험기기를 위치시키고, 기기로부터 발생되어 셀의 출력단에서 측정되는 전력을 $\frac{1}{4} |e_{ov}(o)|^2$ 로 정규화시킨 식^[4]은 다음과 같다.

$$|\tilde{a}_o|^2 = |P_y e^{j\psi_y} - jk_0 M_x e^{j\psi_{mx}}|^2 \quad (1)$$

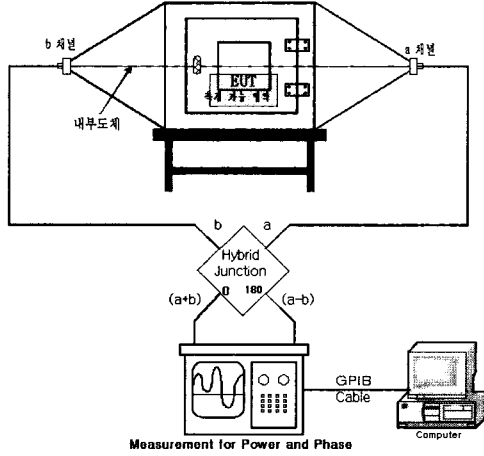
여기서, $e_{ov}(o)$ 는 단위 전력이 GTEM 셀에 인가되었을 때 피시험기기가 위치한 지점에서의 기본 모드(fundamental mode)의 전계의 수직 성분(y 성분)이고, k_0 는 자유공간에서의 전파 상수이다. P_y 와 ψ_y 는 피시험기기의 등가 전기 다이폴 모멘트 \mathbf{P} 의 y성분에 대한 크기와 위상을 나타내며, M_x 와 ψ_{mx} 는 등가 자기 다이폴 모멘트 \mathbf{M} 의 x성분에 대한 크기와 위상을 나타낸다.

3-1 TEM 셀

TEM 셀을 이용한 EMI 측정을 위한 상관관계 알고리즘^{[5],[6]}의 경우 [그림 3]과 같이 셀의 측정 영역의 중심에 피시험기기를 위치시키면 피시험기로부터 복사되는 에너지는 기본 전송 모드(fundamental transmission mode)에 결합되어 기기의 출력단으로 전파된다.

[그림 3]과 같이 TEM 셀의 두 출력단 사이에 hybrid junction을 삽입하고, 이를 전력과 위상의 측정이 가능한 측정기에 연결하여 두 출력단으로 전파된 정보의 합(a+b)과 차(a-b)를 측정하고, 두 값 사이의 상대적인 위상차를 측정할 수 있도록 한다. 셀 내부의 피시험기기의 방위를 6번 바꿔가면서 동일한 측정을 하고 각각의 값을 저장한다. 일반적으로 피시험기기의 구조가 보다 복잡한 경우에는 피시험기기의 방위를 보다 많이 바꿔가면서 복사되는 에너지를 측정해야 한다.

측정되어 저장된 값들을 이용하여 등가의 전기 및 자기 다이폴의 크기($P_x, P_y, P_z, M_x, M_y, M_z$)와 위상($\psi_{px}, \psi_{py}, \psi_{pz}, \psi_{mx}, \psi_{my}, \psi_{mz}$)에 대한 정보를 추출하고 다음 식을 이용하여 피시험기기의 복사 전력(total radiated power), P_T 및 복사 패턴(radiated pattern), $P(\theta, \phi)$ 을 얻을 수 있다.



[그림 3] TEM 셀을 이용한 복사 전자파 측정.

$$P_T = \int_{4\pi} P(\theta, \phi) d\Omega = \frac{40\pi^2}{\lambda^2} (P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 + k^2(M_x^2 + M_y^2 + M_z^2))$$

$$= \frac{40\pi^2}{\lambda^2} (|P|^2 + k^2|M|^2)$$

$$P(\theta, \phi) = \frac{15\pi}{r^2\lambda^2} [(P_x^2 + kM_x^2)(\cos^2\theta \cos^2\phi + \sin^2\phi) + (P_y^2 + kM_y^2)(\cos^2\theta \sin^2\phi + \cos^2\phi) + (P_z^2 + kM_z^2) \sin^2\theta - 2\{P_x P_y \cos(\psi_{px} - \psi_{py}) + k^2 M_x M_y \cos(\psi_{mx} - \psi_{my})\} \sin^2\theta \sin\phi \cos\phi - 2\{P_y P_z \cos(\psi_{py} - \psi_{pz}) + k^2 M_y M_z \cos(\psi_{my} - \psi_{mz})\} \sin\theta \cos\theta \sin\phi - 2\{P_x P_z \cos(\psi_{px} - \psi_{pz}) + k^2 M_x M_z \cos(\psi_{mx} - \psi_{mz})\} \sin\theta \cos\theta \sin\phi + 2k\{P_x M_y \sin(\psi_{px} - \psi_{my}) - P_y M_x \sin(\psi_{py} - \psi_{mx})\} \cos\theta + 2k\{P_y M_z \cos(\psi_{py} - \psi_{mz}) - P_z M_y \sin(\psi_{pz} - \psi_{my})\} \sin\theta \cos\phi + 2k\{P_x M_z \cos(\psi_{px} - \psi_{mz}) - P_z M_x \sin(\psi_{pz} - \psi_{mx})\} \sin\theta \sin\phi]$$

3-2 GTEM 셀

다음으로 GTEM 셀을 이용하여 피시험기에 대한 EMI 시험, 즉 야외시험장에서의 최대 복사 전장을 유도하는 방법에 대해 기술하고자 한다.

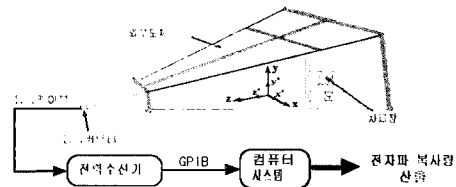
GTEM 셀과 관련된 상관관계 알고리즘^{[7]~[10]}은 TEM 셀의 경우와 마찬가지로 셀 내의 피시험기를 적절하게 회전시키면서 복사되는 전력을 셀의 출력단에서 측정하고, 측정된 정보를 이용하여 피시험기를 등가 다이폴로 모델링하고, 얻어진 피시험

기에 대한 등가 다이폴에 대한 정보, 즉 다이폴의 크기와 상대적인 위상차를 이용하여 자유공간 혹은 접지면상에서의 전기장 분포를 계산하는 방법을 이용한다. [그림 4]는 GTEM 셀과 전력수신기, 그리고 GPIB 케이블을 이용한 복사 전자파 측정 시스템 배치를 나타낸다.

GTEM 셀을 이용하여 야외시험장 결과를 얻기 위한 대표적인 방법인 3 방위 및 15 방위 상관관계 알고리즘을 적용하기 위해 피시험기를 GTEM 셀을 이용하여 EMI를 측정하는 방법은 다음과 같다.

GTEM 셀의 좌표축 (x, y, z)은 셀의 종단 방향을 +z로, 셀의 수직 방향을 +y로 설정하고, 피시험기의 좌표축 (x', y', z')을 임의로 지정한다. 그리고 GTEM 셀의 좌표축과 피시험기의 좌표축을 동일하게 두고(xx', yy', zz') 각 알고리즘에 따라 필요한 회전각에 대해 피시험기를 셀의 y축을 중심으로 각도 ϕ_n 만큼 회전시키면서 전력을 측정한다. 다음으로 GTEM 셀의 좌표계와 피시험기의 좌표축을 다르게 놓은 상태, 즉 (xy', yz', zx'), (xz', yx', zy')로 설정하고 (xx', yy', zz') 경우와 같은 방법으로 셀의 수직 방향을 중심으로 피시험기를 회전시키며 측정한다.

3방위 알고리즘^{[7],[8]}의 경우에는 셀과 피시험기 사이의 좌표축 조합, 즉 (xx', yy', zz'), (xy', yz', zx') 그리고 (xz', yx', zy')에 대해 $\phi_n=0$ 에서 측정된 전력, 즉 $\vec{a}_0^{xx'}$, $\vec{a}_0^{yy'}$ 와 $\vec{a}_0^{zz'}$ 을 사용하여 등가 다이폴 모멘트의 크기(다이폴의 위상은 모두 같다고 가정함)에 대한 정보를 얻을 수 있다. 그리고 얻어진 다이폴의



[그림 4] GTEM 셀을 이용한 측정 시스템.

정보와 다음 식을 이용하여 피시험기로부터의 총 복사 전력(total radiated power), P_0 을 계산한다.

$$P_0 = 10k_0^2 \left[|\bar{a}_0^{xx'}|^2 + |\bar{a}_0^{yy'}|^2 + |\bar{a}_0^{zz'}|^2 \right] \quad (4)$$

GTEM 셀에서 직접 측정된 총 복사 전력은 자유공간 혹은 접지면상에서의 원역장 분포 계산에 이용될 수 있다. 여기서 피시험기를 전기적으로 매우 작다고 가정하였으므로 피시험기의 중심에 등가 다이폴이 존재한다고 생각하여 원역장에서의 전개 분포를 다음과 같이 간단히 예측할 수 있다. 즉, 접지면상에 놓은 전기적으로 작은 다이폴 모멘트에 의한 원역장 전개 분포는 영상 이론(image theory)을 이용하면 다음 식 (5) 및 (6)과 같이 전기장의 수평성분 (E_h)과 수직성분 (E_v)을 간단히 예측할 수 있다.

$$E_h = 30 \left(\frac{P_0}{10} \right)^{1/2} \left[\frac{e^{-jk_0 R_1}}{R_1} - \frac{e^{-jk_0 R_2}}{R_2} \right] \quad (5)$$

$$E_v = 30 \left(\frac{P_0}{10} \right)^{1/2} \left[\frac{x^2 e^{-jk_0 R_1}}{R_1^2} - \frac{x^2 e^{-jk_0 R_2}}{R_2^2} \right] \quad (6)$$

여기서 R_1 과 R_2 는 실제 다이폴 모멘트와 영상 소스(image source)로부터 관측점까지의 거리를 나타낸다.

15 방위 알고리즘^{[9],[10]}의 경우에는 3방위와 마찬가지로 $xx'-yy'-zz'$ 에서 셀의 수직 방향, 즉 y 축에 대해 반시계 방향으로 ϕ_r 를 각각 $0, \pi/4, \pi/2, \pi, 3\pi/4$ 만큼 회전시켰을 때 출력단에서 얻게 되는 전력 값을 이용하여 다이폴 모멘트의 크기와 상대적인 위상 차이에 대한 정보를 얻고 이로부터 피시험 기기에서 복사되는 전자파의 수직 성분 계산한다. 마찬가지로 수평 성분의 경우에는 $xy'-yz'-zx'$ 와 $xz'-yx'-zy'$ 에서 수직 성분 계산과 같이 y 축을 중심으로 반시계 방향으로 피시험기를 $0, \pi/4, \pi/2, \pi, 3\pi/4$ 로 회전시키며 출력단에서의 전력을 측정하여 필요한 정보를 얻어 계산할 수 있다. 15 방위 알고리즘에 의해 얻어진 다이폴 모멘트에 대한 정보로

부터 접지면상에서의 전기장의 수직 및 수평 성분 계산은 참고문헌^[9]의 식 (6)과 (7), 그리고 <표 1>을 이용하여 얻을 수 있다.

IV. 국제 표준화 동향

국제전기기술위원회(IEC)는 1994년 스위스 국가 위원회(National Committee)로부터 TEM 셀을 이용하여 5 GHz까지 EMI/EMS 측정을 위한 절차와 TEM 셀에 대한 요구사항 등에 대해 표준화 연구를 제안 받은 이후 CISPR/A와 TC77B 위원회가 공동으로 TEM 도파관 관련 Ad-hoc 그룹을 만들어 표준화 활동을 추진하여 왔으며 최근 표준화를 위한 마무리 단계에 있다.^[11] 기본적으로 TEM 도파관을 이용한 내성 시험(immunity test)은 무선 주파수 대역에서 전자파에 대한 전기 및 전자 기기의 성능을 평가하기 위해 제정된 IEC 61000-4-3^[12]의 내성 시험 관련 내용을, 복사 방출 시험(radiated emission test)은 정보기술기기(ITE)를 포함한 전기 및 전자 기기로부터 복사되는 전자파에 대한 측정 방법과 레벨 등에 대해 기술하고 있는 CISPR 22^[13]의 관련 시험 내용을 기본 바탕으로 제정되었다.

본 절에서는 TEM 도파관을 이용한 EMI/EMS 측정과 관련된 국제 표준에 대해 IEC/CISPR에서 진행 중인 TEM 도파관 관련 표준화 내용을 중심으로 관련 Ad-hoc 그룹에서 TEM 도파관 표준화 활동의 결과로 만들어진 문서(CISPR/A/308/CD)^[14]의 내용을 정리한 것이다.

상기 문서는 여러 가지 유형의 TEM 도파관을 이용한 전기 및 전자 기기에 대한 방출 및 내성 시험 표준에 관련된다. 이것은 개방 구조(예를 들면, 스트립 선로, EMP 시뮬레이터 등) 및 폐쇄 구조(TEM 셀, GTEM 셀 등)를 포함하는데 이들은 추가로 단일 포트(single port), 이중 포트(two port) 또는 다중 포트(multi port) TEM 도파관으로 분류될 수 있다.

주파수 범위는 구체적인 시험 요구 사항과 특정 TEM 도파관 형태에 따라 달라진다.

TEM 도파관에 대한 표준의 목표는 다음을 기술하는 것이다.

- * 대표적인 주파수 범위와 EUT 크기 제한을 포함한 TEM 도파관 특성
- * EMC 측정을 위한 TEM 도파관 검증 방식
- * 시험 가능한 EUT의 정의
- * TEM 도파관에서의 복사 방출 시험을 위한 시험 설정, 절차, 요구 사항
- * TEM 도파관에서의 복사 내성 시험을 위한 시험 설정, 절차, 요구 사항

이를 위해 상기 문서에는 다음과 같은 내용으로 구성되어 있다.

4-1 TEM 도파관 요구 사항

TEM 도파관이 방출 및 내성 측정을 위해 만족해야 하는 항목들, 즉 TEM 모드 검증, 시험 영역 및 최대 EUT 크기, 그리고 Loaded TEM 도파관의 영향 등과 관련된 내용에 대해 기술한다. 또한, 개방형 TEM 도파관 등과 같은 특정 유형의 TEM 도파관에 대한 요구 사항을 기술한다.

4-1-1 TEM 모드 검증

TEM 도파관은 횡단면의 크기 및 도파관 길이에 의해 결정되는 차단 주파수 이상에서 공진을 나타낼 수가 있다. 실제 전자파 적합성 시험에 사용되어질 경우, TEM 도파관에서의 전자기장은 다음 요구 사항들이 충족될 때 TEM 모드로 전파되는 것으로 간주된다. 일반적으로 TEM 도파관 제조업체는 요구 주파수 범위에서 TEM 모드 작동을 검증하고 문서화하여야 하며 검증 데이터를 시스템 문서에 포함시켜야 한다. 또한 사용자들은 TEM 도파관에 대

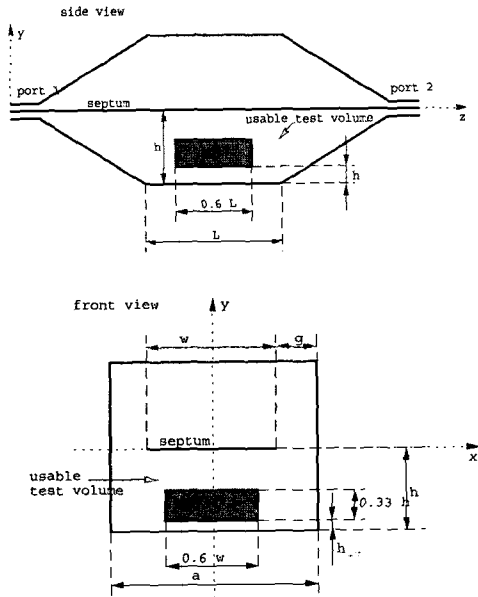
해 정기적으로 요구사항의 충족 여부를 확인해야 한다.

내성 시험을 위한 균일 영역 교정 절차^[14]를 이용하면, TEM 도파관의 정의된 횡단면(전파 진행 방향에 수직인)에서 측정점의 적어도 75% 이상에서 이차(의도하지 않은) 전기장 성분은 일차 전기장 성분의 세기에 비해 6 dB 이상 낮아야 한다. 이러한 75%의 측정점의 경우 시험 주파수(적어도 1 개 이상의 주파수에 대해)의 최대 3%에 대해 일차 전기장 성분의 최고 -2 dB의 이차적 전기장 성분 레벨이 허용된다. 주파수 범위는 30 MHz에서 의도된 TEM 도파관 용도의 최고 주파수까지이지만 적어도 1 GHz까지이다. 첫번째 주파수 단계(step)는 기준 주파수의 1%를 초과해서는 안되며, 그 후에는 선행 주파수의 1%를 초과해서는 안 된다. 스위프(sweep) 속도의 한 가지 제약 조건은 전자기장 탐침의 반응 시간이다. TEM 모드에 대한 이러한 검증은 내성 시험 및 방출 시험에 대해 유효하다.

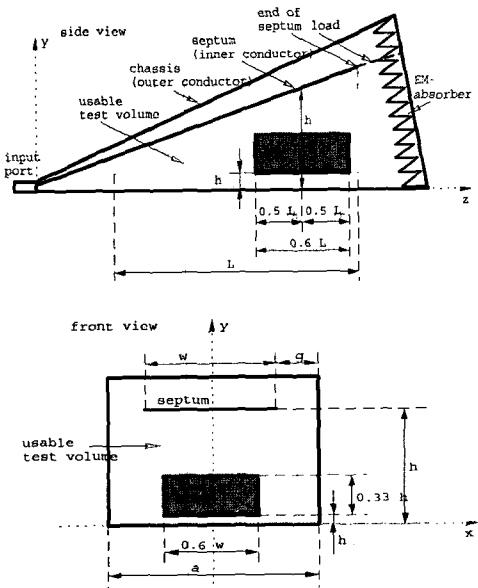
EUT의 최대 크기는 TEM 도파관의 "이용할 수 있는 시험 영역"(available test volume)의 크기와 관련이 있다. TEM 도파관의 "이용할 수 있는 시험 영역"은 전자기장의 크기, 구조, 그리고 공간적 분포에 달려 있다. [그림 5]와 [그림 6]에서 TEM 셀과 GTEM 셀에 대한 이용할 수 있는 시험 영역에 대해 보여준다.

4-1-2 시험 영역 및 최대 EUT 크기

TEM 도파관의 "이용할 수 있는 시험 영역"은 도파관 내부의 "균일 영역"에 달려 있다. 도파관에서 TEM 모드의 전파 방향(z-축)은 균일 영역(횡단면, xy 면)에 수직이다. xy 면에서 이용할 수 있는 시험 영역의 전체 횡단면은 균일 영역의 요구 사항을 충족시켜야 한다. EUT와 각 도체나 도파관의 흡수체(absorber) 사이의 거리 h_{EUT} 를 위한 최소 값(그림



[그림 5] TEM 셀[Double Port Device]의 구조 및 시험 가능 영역.



[그림 6] GTEM 셀[Single Port Device]의 구조 및 시험 가능 영역.

6~7 참조)은 균일 영역의 경계선과 도체 사이의 거리로 알 수 있다. 그러나 h_{EUT} 는 "0"가 아니어야만 EUT와 도파관의 접촉을 피할 수가 있다(권고: h_{EUT} 는 h 의 5%보다 커야 한다). z -축을 따라(전파 진행 방향) 이용할 수 있는 시험 영역은 $z_{min} \leq z \leq z_{max}$ 에 의해 제한된다. 시험 영역의 길이는 $L = z_{max} - z_{min}$ 이다. 균일 영역에 대한 요구 사항은 $z_{min} \leq z \leq z_{max}$ 범위 내의 각 위치 z 에서 충족하여야 한다.

EUT의 최대 크기는 "이용할 수 있는 시험 영역"의 크기와 관련이 된다. EUT는 $0.6w \times 0.6L$ 보다 클 수 없다(그림 6-7 참조). ISO 11452-시리즈는 $0.33w \times 0.6L$ 의 EUT 크기를 권고한다. 그리고 MIL-STD-462 D는 $0.5w \times 0.5L$ 의 크기를 권고한다.

최대 이용 가능한 EUT 높이는 $0.33h$ 가 바람직하다. h 는 시험 영역의 EUT 위치에서 내부 도체와 외부 도체간의 거리에 해당된다(예를 들면, TEM 셀에서의 내부도체(septum)와 바닥 간의 거리). 모든 TEM 도파관에 있어 EUT는 모든 회전 위치에 대해 이용할 수 있는 시험 영역 내에 적합하여야 한다. 대부분의 표준들은 EUT 크기를 $0.33h$ 로 제한한다. TEM 셀 공급 업체로부터 나온 대부분의 데이터들은 EUT 높이를 최대 $0.5h$ 로 제한한다. 전자기장 탐침과 센서 등에 대한 고도로 정확한 교정을 제외하고는 EUT 높이가 $0.33h$ 를 초과할 수 있지만, 제조 업체의 권고안을 초과해서는 안된다.

4.1.3 EUT 유형

EUT 유형은 전자기 특성이나 기계적 치수에 충분한 유사성이 있어서, 동일 시험 설비와 동일 시험 절차의 사용이 가능한 제품군으로서 소형 EUT와 대형 EUT로 구분할 수 있다. 일반적으로 EUT의 최대 크기가 최고 시험 주파수의 한 파장보다 적은 경우, 그리고 EUT에 어떠한 케이블도 연결되어 있지 않은 경우의 EUT를 소형으로 정의하고 그 외 다른

모든 EUT들은 대형으로 정의된다.

4-2 전자파 방출 시험

여기서는 TEM 도파관에서의 방출 시험(emission test)에 대해 기술한다. 제안된 표준 문헌에는 전자파 복사 방출 시험을 위한 TEM 도파관 검증 방법 및 절차에 대해 기술하고 있으며, 측정된 결과로부터 야외시험장에서의 EMI 측정 결과를 얻기 위한 상관관계 알고리즘에 대해서는 EUT를 등가의 전기 및 자기 다이폴로 모델링하는 멀티폴 모델과 GTEM 셀과 같은 단일 포트 구조의 TEM 도파관에 대해 3방위 알고리즘을 제안하고 있다. 그리고 EUT 유형에 따른 방출 측정 방법과 시험 결과 보고서 내용에 대해 기술한다.

TEM 도파관을 이용한 방출 시험에서 이용되고 있는 TEM 도파관의 적절성을 입증하기 위해 EUT 유형에 대한 TEM 도파관의 검증을 필요로 한다. 동일 EUT 제품군(product family) 내에서의 상대적인 비교만이 수행되는 경우에는 OATS나 기타 시험 시설과의 상관관계가 필요하지 않다. 그와 같은 경우에는 제품 위원회가 측정 데이터의 적합성을 결정하기 위한 특정 허용치를 제시하여야 한다. GTEM 셀에 대한 3방위 기법을 사용한 상관관계 알고리즘은 3.2에서 15방위 기법과 함께 간단히 기술하였다. 상관관계 알고리즘은 등가 OATS 전자기장 레벨을 추정하기 위해 TEM 도파관에서 측정된 전압을 이용하며, 자유 공간에서의 전자기장 레벨 역시 추정할 수 있다. TEM 도파관과 상관관계 알고리즘을 사용하여 얻어진 전자기장 레벨들은 구속력을 갖는 표준(normative standard)의 요구 사항과 비교할 수가 있다. 보통 시험 절차들은 모든 세 축에 대하여 EUT를 회전시킬 것을 요구한다. 그러기 위해서 EUT는 기계적으로 안정되고 중력과는 상관이 없어야 할 필요가 있다.

4-2-1 TEM 도파관 검증

TEM 도파관에 대한 검증을 위해서는 측정하고자 하는 EUT 유형에 따라서 다음과 같은 기준 복사원을 사용하여 검증한다. 여기서 사용되는 Comb Generator는 전체 관심 있는 주파수 범위 상에서 매 10 MHz 또는 그 이하마다 스펙트럼 라인(line)을 생성한다. 스펙트럼 라인들은 검증 시험 기간 동안 편차가 1 dB 미만으로 안정적이어야 한다. 현재 대형 EUT에 대한 측정 방법 및 절차에 대해서는 고려중이다.

- 1) [소형 EUT] 광대역 안테나를 가진, 배터리로 전력을 공급 받는 Comb Generator.
- 2) [대형 EUT] 출구 케이블이 없으며 선이 부착된 배터리로 전력을 공급 받는 Comb Generator.
- 3) [대형 EUT] 출구 케이블이 부착된 배터리-전력 Comb Generator.
- 4) [대형 EUT] 내장된 Comb Generator가 있고 최소한 두 개의 출구 케이블이 있으며, 출구 케이블이 달린 대형 EUT의 한 예로서 만들어진 19U(480 mm) 케이스

4-3 전자파 내성 시험

TEM 도파관에서의 내성 시험을 기술하는 것으로서, 입사 전자기장에 대한 전기 및 전자 기기의 내성을 시험할 수 있도록 하려는 것을 목적으로 다음과 같은 내용들을 기술한다.

- 내성 시험을 위해 필요한 시험 기기 및 EUT 배치
- 셀 내부의 시험 영역에서의 균일장 검증 및 교정 수행 절차
- 내성 시험 절차

4-3-1 시험기기

다음 유형의 시험 기기가 권고된다.

- EUT를 수용할 만큼 충분한 크기의 균일 전자기장을 유지하기에 적절한 크기의 TEM 도파관
- EMI 필터
- RF 신호 발생기
- 전력 증폭기
- 3개의 직교 축을 따라 존재하는 전자기장을 각각 분리해서 감시할 수 있는 전자기장 센서: 모든 탐침 헤드 회선과 광 전자 제품은 측정될 전자기장에 대해 적절한 내성과 TEM 도파관 밖에 있는 표시기에 대한 광 섬유 링크를 가지고 있어야 한다. TEM 도파관은 전기장이 모든 세개의 직교 축을 따라 개별적으로 측정되도록 하는 전자기장 탐침을 필요로 한다. 작은 단일 축 안테나가 이용되는 경우 그것은 각 전자기장 성분들을 별도로 측정하기 위해 위치를 새롭게 정하여야 한다.
- 측정된 전력을 기록할 수 있는 측정 관련 기기

4-3-2 도파관 내부의 전자기장 검증

TEM 도파관을 이용한 내성 시험에서는 전자기장 크기의 변화가 적은 전자기장 전파 진행 방향에 가상의 수직면인 균일 영역의 개념을 이용하고 있다. EUT가 보다 적은 영역에서 충분히 비추어질 수 없는 한 TEM 도파관의 크기가 균일 영역의 크기를 결정한다. 따라서 EUT의 최대 크기는 이용할 수 있는 시험 영역의 크기와 관련이 있다.

수직면은 TEM 모드 전파 진행 방향의 근사 수평(z축으로 배열)이라고 가정한다. TEM 모드 전파 방향이 다른 방향인 경우, 균일 영역 면은 그에 따라 방향이 재지정되어야 한다.

원칙적으로 균일 영역은 입력 포트로부터 어떤 거리에도 위치할 수 있다. 그 위치는 특정 도파관 구조에 달려 있다. 균일 영역은 입력 포트로부터 그것이 교정되는 거리에 대해서만 유효하다. EUT 회

<표 2> 균일 영역 교정점.

치 수	측정점의 배치 및 수	-0 dB ~ +6 dB 기준을 충족시킬 점 수
1.5 m×1.5 m	4×4 = 16	12
1.0 m×1.5 m	3×4 = 12	9
1.0 m×1.0 m	3×3 = 9	7
0.5 m×1.0 m	2×3 = 6	5
0.5 m×0.5 m	4 + 1(중심) = 5	4
0.25 m×0.25 m	4 + 1(중심) = 5	4
0 m×1.5 m	2×4 = 8	6

전을 위해서는 균일 영역은 적어도 후면으로부터 최대 케이스 크기보다 더 긴 거리의 간격을 두어야 한다.

균일 영역의 크기에 따라 적어도 <표 2>에 따른 측정점 수로 측정이 된다. 정의된 영역 상에서의 일차(의도된) 전기장 성분의 크기가 정격 크기의 -0 dB ~ +6 dB 이내에 있다면, 그리고 이차적(의도하지 않은) 전기장 성분의 크기가 측정점의 적어도 75 % 상에서 일차 성분보다 적어도 6 dB이 작다면 그 전자기장은 균일한 것으로 간주된다.

<표 2>에 기재되지 않은 영역들은 제안된 영역을 충분히 포함하는 가장 작은 0.5 m 격자에 의해 정의되는 격자수를 이용하여 교정되어야 하고 격자 간격은 각 측면을 따라 균일하다. 전술한 바와 같이 내성 측정을 위해 전자기장의 균일도를 맞추기 위해서는 측정점의 75 %는 균일 기준을 충족시켜야 한다. 시험 설정에서 EUT는 그 전면이 이 면과 일치하게 비추어지도록 하여야 한다.

4-3-3 시험절차

시험은 입력 포트(generator port)를 향하고 있는 EUT의 4 면 각각에 대해 수행되어야 한다. TEM 도파관의 경우 전자기장은 단일 방향(보통 수직으로)으로 편파된다. 따라서, EUT가 수평 및 수직 편파

에 동일하게 충분히 노출되도록 하기 위해서는 EUT를 회전시킬 필요가 있다. 예를 들면, 수직 편파 전자기장의 경우 동일한 수평 편파 노출 방법은 먼저 EUT를 균일 영역에 수직인 축 주변으로 90도 회전시킴으로써(TEM 모드 전달 방향) 최초의 EUT 전면 방향을 다시 정하고, 그 다음에 다른 EUT 전면을 노출시키기 위해 균일 영역을 따라 수평 축을 중심으로 세 번 회전한다. 이것은 방향에 따라 달라지는 EUT의 어떤 TEM 도파관에서의 시험을 배제시킬 수가 있다.

V. 결 론

본 문서에서는 최근 전자파 적합성 시험을 위한 기본 측정 시설인 야외시험장 혹은 전자파 반-무반사실에 대한 대응 측정 시설로서 사용되고 있는 TEM 도파관에 대한 전기적·구조적 특성과 야외시험장과의 상관관계 알고리즘에 대해 간단히 알아보았으며, 현재 IEC/CISPR에서 진행중인 TEM 도파관 관련 표준화 활동의 결과에 대해 간단히 기술하였다.

TEM 도파관을 이용한 내성 시험(immunity test)은 무선 주파수 대역에서 전자파에 대한 전기 및 전자 기기의 성능을 평가하기 위해 제정된 IEC 61000-4-3의 내성 시험 관련 내용을, 복사 방출 시험(emission test)은 정보기술기기(Information Technology Equipment)를 포함한 전기 및 전자 기기로부터 복사되는 전자파에 대한 측정 방법과 레벨 등에 대해 기술하고 있는 CISPR 22의 관련 시험 내용을 기본 바탕으로 제정되었다. 그 외에도 새로 제안되고 있는 TEM 도파관 관련 표준 규격에는 전자파 적합성 시험을 위해 만족해야 하는 TEM 모드 검증 방법, 전자기장 균일 영역 및 시험 가능 영역에 대한 조건과 같은 TEM 도파관의 특성과 EUT 유형과 배치, 그리고 전자파 내성 및 복사 시험 방법 등 보다

세부 내용까지 규정하고 있다. 또한 전자파 복사 시험을 하기 위해 TEM 도파관을 이용하여 야외시험장 결과를 모의하는 상관관계 알고리즘에 대해서 기술하고 있으며 특히 GTEM 셀의 경우에는 3방위 기법이 표준(안)으로 제안되어 있는 상태이다.

TEM 셀이나 GTEM 셀과 같은 TEM 도파관 형태의 시험 시설을 이용할 경우 TEM 도파관의 전기적(구조적인 장점 이외에도 적은 비용으로 설치 및 유지가 가능할 뿐 아니라 중소기업에서도 자체 전자파 장해 시험 시설을 구축할 수 있다는 장점이 있어 관련 표준안이 국제 규격으로 될 경우 국내에서도 많은 활용이 예상된다. 따라서 대응 측정 시설로서의 TEM 도파관에 대한 정확한 특성 해석을 바탕으로 차단 주파수를 높이고 전자기장 균일도(uniformity)를 높이기 위한 연구와 제작 및 설계 기술에 대한 연구 등이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] M. L. Crawford, "Generation of standard EM field using TEM transmission cells", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-16, pp. 189-195, Nov. 1974.
- [2] D. Hansen, P. Wilson, D. Keenigstein and H. Schaer, "A broadband alternative EMC test chamber based on a TEM cell anechoic chamber hybrid concept", in *Proc. IEEE 1989 International Symp. on EMC*, Nagoya, Japan, pp. 133-137, Sept. 1989.
- [3] "FCC Accepts GTEM Data!," *Editorial, EMC Test & Design*, Jan. 1994.
- [4] R. E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, IEEE Press, New York, 1991.
- [5] Mark T. Ma and Galen H. Koepke, "A method to quantify the radiation characteristics of an

- unknown interference source", *National Bureau Standards (now NIST)*, Boulder, CO., Tech. Note TN-1059, Oct. 1982.
- [6] Ippalapalli Sreenivasiah, David C. Chang, and Mark T. Ma, "Emission characteristics of electrically small radiating sources from tests inside a TEM cell", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-23, no. 3, pp.113-121, Aug. 1981.
- [7] P. Wilson, D. Hansen, and D. Koenigstein, "Simulating open area test site emission measurements based on data obtained in a novel broadband TEM cell," in *Proc. IEEE 1989 Nat. Symp. on Electromagn. Compat.*, Denver, CO, pp.171-177, May 1989.
- [8] P. Wilson, "On Correlating TEM Cell and OATS Emission Measurements", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-37, no. 1, pp 1-16, Feb. 1995.
- [9] A. K. Lee, "An advanced correlation algorithm between GTEM and OATS for radiated emission tests", *ETRI Journal*, vol. 17, no. 3, pp.45-63, Oct. 1995.
- [10] A. K. Lee, "An algorithm for an advanced GTEM to ground plane correlation of radiated emission test", *IEEE Intl. Symp. Electromagn. Compat.*, Santa Clara, CA, pp. 58-62, 1996.
- [11] Sigurd Bentz, "Use of the TEM cell for Compliance Testing of Emissions and Immunity, an IEC Perspective," in *Proc. IEEE Nat. Symp. on Electromagn. Compat.*, pp. 43-47, 1996.
- [12] IEC 61000-4-3: Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques-Section 3: Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test, IEC, 1995.
- [13] CISPR 22: Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of information technology equipment, IEC, 1993
- [14] Committee Draft IEC 61000-4-20 CISPR/A/308/CD, "IEC 61000-4-20: Electromagnetic Compatibility(EMC) - Part 4-20: Testing and measurement techniques - Emission and immunity testing in transverse electromagnetic(TEM) waveguides", May 2001.

≡ 필자소개 ≡

권 중 화



1994년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)

1999년 2월: 충남대학교 전파공학과 대학원 전파공학 전공 (공학석사)

1999년 1월~현재: 한국전자통신연구원 무선방송연구소 전파기술연구부 연구원

[주 관심분야] 전자기 이론, EMI/EMC