

# TEM Cell의 이론과 응용

최근 전자산업의 급속한 발전으로 인하여 전기, 전자제품 특히 정보기기가 사회 각 분야에 보급됨에 따라 전자파 밀집도가 높아지고 전자파 환경을 악화시키는 경우가 증가하여 설치된 기기가 원래의 목표대로 동작하지 않아 혼란을 일으키거나, 나아가 인체에 장애를 일으키는 등 심각한 문제점으로 대두되고 있다. 이 문제점을 해결하기 위한 접근 방법은 일반적으로 두가지로 나눌 수 있는데 하나는 불요전자파의 방출을 규제치 이하로 억제하는 방법이고, 다른 하나는 일정한 규제치의 전자파 환경 내에서도 장애를 받지 않고 정상적인 동작을 할 수 있는 내성을 강화시키는 방법이다. 이 두가지가 조화를 이루어 기기들이 공존할 수 있는 능력을 갖게 하는 것이 EMC 연구의 궁극적인 목표로 할 수 있다.

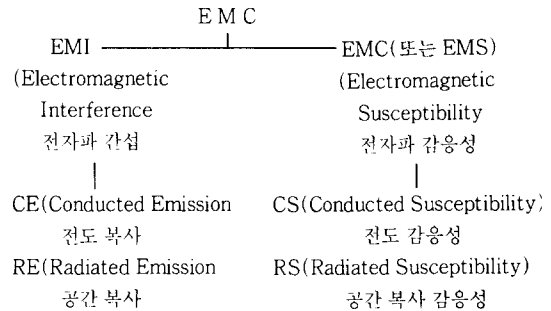


그림 1. EMI/EMC 측정 분야

이를 위해서는 객관성과 일관성을 갖는 유효한 측정 결과를 얻을 수 있는 측정시스템이 필수적이다. 그러한 측정시설 중 복사성 잡음에 대해 표준 전자장의 발생을 이용하여 EMS(electromagnetic susceptibility) 측정에 사용되는 TEM cell은 그 크기에 따라 상한주파수를 갖는 단점이 있으나 현재까지는 표준 평면파를 발생시키는 적합한 시설로 이용되고 있다.

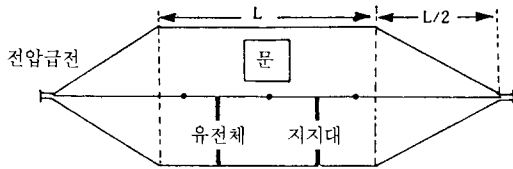
본 고에서는 여러 자료들을 참고하여 현재 사용되는 TEM cell의 물리적 특성과 그 응용에 대해 살펴 보도록 한다. TEM cell에서 주로 논의되는 부분은 평면파 전장의 발생을 최적화 또는 최대화할 수 있는 주파수 범위와 물리적 구조 그리고 급전점과 끝점(end port)의 임피던스 정합, 차단 주파수, EUT에 의한 복사전력 등이다.



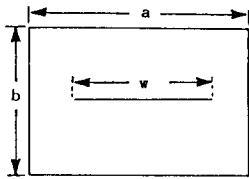
이 애 경, 김 정 기  
중앙대학교 전자공학과

## II. 본 론

TEM cell의 구조는 그림 2에 표시된 것이 원형 동축케이블을 장방향으로 변형시키고 양 끝을 50 동축케이블에 연결한 형태이다. 내부 도체에 해당하는 셉텀은 유전체 지지대에 의해 외부도체에 연결되고 있다. 셉텀과 외부도체는 알루미늄과 같은 전도성이 좋은 금속체로 차폐되어 있으며 외부도체는 접지된다.



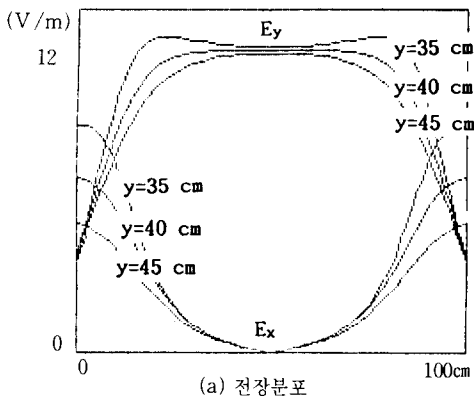
(a) 측면도



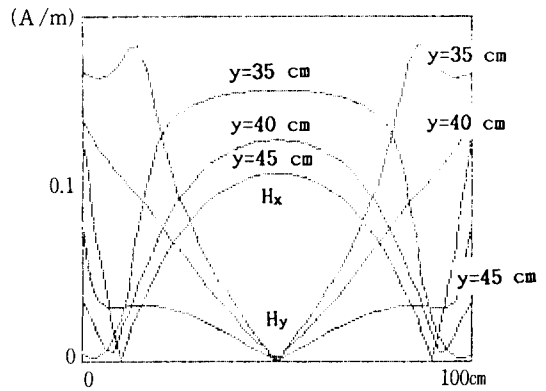
(b) 단면도

그림 2. TEM cell 구조

동축케이블이 TEM 모드를 형성하는 원리와 동일하게 고차모드 차단주파수 이하에서 급전시 장방향 cell 구조내에서 TEM모드를 전파하며 파형이 비교적 균일한 cell의 중앙 부분의 셉텀 상에서 시험체를 측정하게 된다. 이 중앙 부분의 전장, 자장 분포를 그림 3에 나타내었다. 그러나 이 분포는 주파수가 고차 모드의 차단 주파수 이하일 때만 보장된다.



(a) 전장분포



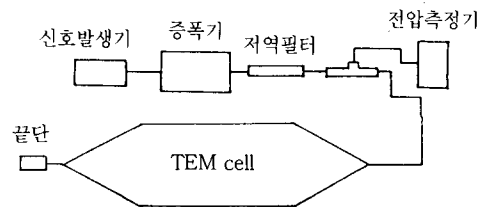
(b) 자장 분포

그림 3. TEM cell 단면에서의 전장 및 자장 분포

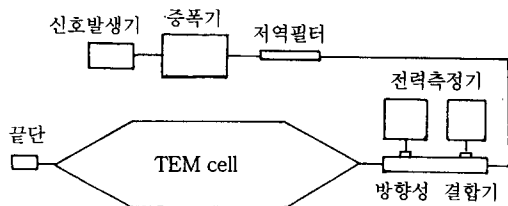
### 1. 표준전자장 측정(RS측정) [1]

TEM cell은 장방향 동축전송선 형태로 된 가운데 부분과 양쪽 끝으로 가늘어져 연결기에 이르는 부분으로 되어 있으며 그 장방향 동축선에 일정한 크기의 전자장을 발생시켜 전자파 장해를 측정할 수 있다. cell 중앙에서 발생하는 전장의 세기는 내부를 가르는 도체판과 외부 도체판과의 거리를 d라 하고 입사되는 순 전달 전력(net delivered power)을  $P_{net}$ 라 하면

$$E = \frac{V}{d} = \frac{\sqrt{50 P_{net}}}{d} \quad (1)$$



(a) 전압측정



(b) 순전력

그림 4. TEM cell 표준 전자장 발생의 측정 절차

이다. 밝혀두지만 이것은 주파수 저주파대(TEM 모드)에서, 위치는 측정영역의 중앙에서만 보장되는 양이다. 고차모드가 존재하는 주파수 대역에서는 그들 모드간의 선형적 결합으로 인해 위치에 따라 매우 복잡해지나 고주파 대역에서도 cell을 사용하기 위해 부분적으로는 측정에 의하거나 수치해석을 포함하는 이론적인 해석이 현재까지 계속되어 왔다.

RF전력이 cell을 통해 흐르면 cell내 전자장은 2개 측정 방법중 하나에 의해 계산될 수 있다. 우선 그림 4. (a)는 신호발생의 출력이 증폭되고 저역필터에 의해 주어진 주파수가 cell을 통하여 흐르게 되며 cell의 출력단은 500으로 접속하여 완전히 흡수하게 된다. RF볼트메타는 cell의 입력단에서 tee연결선에 의한 셉텀과 벽면 전위를 읽을 수 있다. 그림 4. (b)는 입력단과 반사전력을 읽는 전력메타에 연결되는 양방향결합기(dual direction coupler)에 의해 대치된다.

순 전력 Pnet watt, 임피던스의 실수성분 R로부터 셉텀과 벽 사이 측정공간의 중앙에서 식(1)의 전계인 E(V/m)를 가하게 된다. 전송파의 파장이 cell 길이의 수배가 되는 낮은 주파수에서 이 방법이 동일하게 적용된다. 즉, VSWR을 무시하여도 입력단에 측정되는 전위는 cell 중앙에서 값과 크게 다르지 않을 것이다. 그러나 고주파수에서는 cell 중앙부와 각 끝단 사이 명백한 전위 변동이 일어난다. 예를 들어 입사전력과 반사전력 사이를 VSWR 1.2 : 1로 가정한다면 cell을 포함한 전송선로에 전압 정재파(standing voltage wave)가 원인이 되어 전송전위의 최대값은 최소값보다 20% 정도 크게 된다. 전위가 제일 큰 점과 제일 작은 점 사이 거리는  $\lambda$ 의 1/4 이 된다. 따라서 cell 입력단에서 cell 중앙까지의 거리가  $\lambda/4$ 보다 훨씬 작다면 입력단에서 측정된 전압은 cell 중앙의 전압과 거의 일치할 것이다. 만일 cell이 전기적으로 커서 입력전압이 중앙부보다 20% 더 크다면 측정시 입력단의 측정전압을 가지고 중앙부의 TEM파의 정확한 값을 얻으려면 cell의 전기적인 길이와 전송선의 VSWR을 고려해야 한다. 이렇게 구한 전압을 가지고 식(1)을 사용하여 cell 중앙의 전계 크기를 구한다. 이 전장은 cell 중앙부의 선임피던스를 측정하는 시간영역 반사장치를 사용하면 더 정확한 값을 얻을 수 있을 것이다.

## 2. 복사전력(RE 측정) [7]

일반적으로 사용되는 TEM cell은 EUT의 전자

파 감응성(susceptibility) 측정으로 전자파 산란에 의한 내성(immunity) 측정에 주로 사용하였으나 최근 미국 NIST와 IEEE 분과 EMC에서는 TEM cell내에서 EUT의 복사를 측정하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

cell을 이용하여 복사 전력을 측정하는 방법은 그림 5에 표시된 블록도에 나타내고 있다. 이 절차는 앞의 EMS 측정과 비슷하나 외부에서 cell내로 전력이 공급되는 것이 아니고 내부에서 유기된 전력이 양 끝단에 전송되어 위상차에 의한 전력의 크기와 위상을 측정하게 된다.

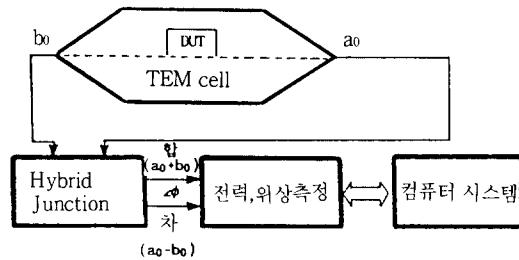


그림 5. 복사측정시스템

전자 장비의 EM 복사나 EM 감응성 측정법이 이미 많은 연구가에 의해 연구되고 있다. 이 측정은 정확도를 요구하기 때문에 외부 전자장 측정 환경으로부터 분리해서 특별한 장소에서 특별한 장비를 사용하여 측정하고 있다. 이 방법 중 하나는 측정실을 지하 갱내에서 설치하여 낮은 복사 저항 조건에서 측정하기도 한다. 이 방법은 수 MHz 주파수 대에서 사용하고 있다. 또 다른 방법은 측정실에서와 같이 중앙 speturm을 갖는 장방형 금속체(TEM cell)을 사용하여 전송선로 모드에 의한 전력 전송을 하도록 한다. 이 장비는 EUT로부터 cell의 측정 단자(end port)까지 쌍으로 전력을 공급하여 복사 측정이나 감응성 측정에 단일 전자장을 형성하게 구성된다.

## 3. TEM cell의 특성임피던스

스트립선에 의한 특성 임피던스를 TEM cell에 적용하면

$$Z_0 \approx \frac{94.15}{(\epsilon_r)^{1/2} \left[ \frac{\omega}{b(1-t/b)} + \frac{\Delta C}{0.0885\epsilon_r} \right]} \text{ (ohms)} \quad (2)$$

근사식을 구할 수 있다. [12] 여기서  $\epsilon_r$ 은 두 도체

판 사이 매질에 대한 비유전율,  $t$ 는 셉텀 두께이고,  $\Delta C$ 는 외변 정전용량(fringing capacitance: pF/cm)으로 표 1에 표시하고 있다.

표 1. TEM cell 특성 임피던스

fc (MHz)	2a : cm	2b : cm	t : cm	$\Delta C$
100	150	123.83	0.157	0.087
100	90	108.15	0.157	0.053
500	50	41.28	0.157	0.087
500	30	36.05	0.157	0.053
500	30	24.77	0.157	0.087
500	18	21.83	0.157	0.053

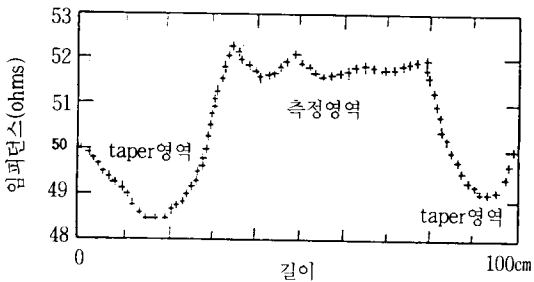


그림 6. TEM cell내에서 z축을 따른 시간영역 반사매타에 의한 특성 임피던스

또 다른 방법으로 RCTL의 특성 임피던스는 전송선로의 단위길이에 대한 용량성  $C_0$ 항으로 표현할 수 있다. [11]

$$Z_0 = \frac{1}{C C_0} = \frac{1}{\frac{-1/2}{(\mu_0 \epsilon_0) C_0}} = \frac{\eta_0 \epsilon_0}{C_0} \quad (3)$$

여기서  $\eta_0 = 120\pi$ 로서 공간 특성임피던스이고,  $\epsilon_r = 10^{-9}/36\pi$  [F/m]로서 공기중 유전율이며,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  (H/m)는 자유공간 투자율이며,  $C$ 는 전파속도이다.  $C_0$ 는 근사표현은

$$\frac{C_0}{\epsilon_0} \cong 4 \left[ \frac{a}{b} - \frac{2}{\pi} \ln \left( \sin \frac{\pi g}{2b} \right) \right] - \frac{\Delta C}{\epsilon_0} \quad (4)$$

이다.  $\Delta C$ 는 외변 정전용량으로  $a/b \geq 1$ 이고  $w/b \geq 1/2$ 이면 무시할 수 있다. 이 식을 사용하여

cell의 특성임피던스  $50\Omega$ 에 만족하는 셉텀 폭을 계산할 수 있다. 이렇게 하여 폭에 의한 전력 반사계수를 최소화할 수 있다.

4. TEM cell의 주파수 한계[1-6], [8]

TEM cell의 그림 2(a)의 단면 크기와 셉텀 폭과 외부 도체의 폭의 비에 따라 고차모드의 차단주파수를 갖고, (b)에서 길이  $L$ ,  $L/2$ 에 따라 공진주파수를 갖게 된다. 그림 7에 Gruner의 해석 [1]으로부터 cell 구조와 차단주파수의 관계를 변수  $a/b$ 와  $w/a$ 를 사용하여 보인다. 이는 Wilson[13]의 cell 특성 임피던스를  $b/a$ 비로서 계산된 차단주파수로 표시한 것과 일치됨을 보이고 있다. 그리고 표 2에 NIST의 대표적인 cell의 차단주파수를 나타내고 있다.

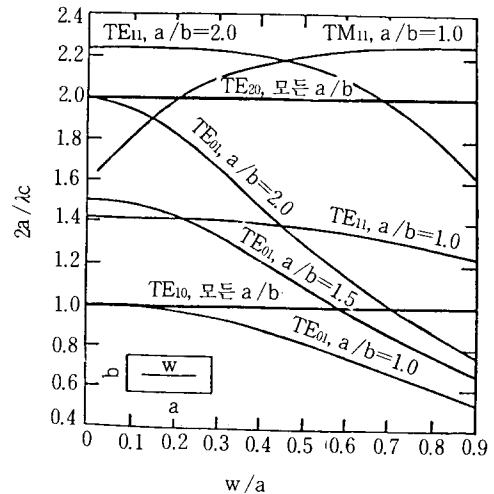


그림 7. TEM cell의 구조에 따른 고차모드의 차단주파수

표 2. NIST의 TEM cell

(단위 : cm)

	2a	2b	2w	TE <sub>10</sub> 차단 주파수
1	300	300	249	29 MHz
2	120	120	100	72 MHz
3	100	60	72	128 MHz
4	120	60	82.8	125 MHz
5	50	30	36	256 MHz
6	30	20	22.8	408 MHz
7	12	12	10	718 MHz

최초의 고차모드가 발생하는 주파수전까지 TEM 모드가 형성되며 그 이상의 주파수 대역에서는 고차모드로 인한 공진이 발생하게 되어 더 이상 균일 평면파를 기대할 수 없다. 따라서 이 주파수를 차단 주파수(cut off frequency)로 하여 이하의 주파수 대역에서만 TEM cell을 동작시킨다. 그러나 cell의 크기가 대형화할 수록 차단주파수가 낮아지므로 사

용 대역폭이 좁아지게 되는 단점으로 최근 이를 개선하기 위한 연구 논문이 발표되고 있다. [9] 그림 8은 표 2의 NIST TEM cell중 세번째 cell의 수치해석에 의한 고차모드 및 공진대역에서의 전계 분포이다. 공진은 모드별로 규칙적이므로 고차모드 대역중 공진이 없거나, 크기가 작은 공진대역에서는 TEM cell을 사용하기도 한다.

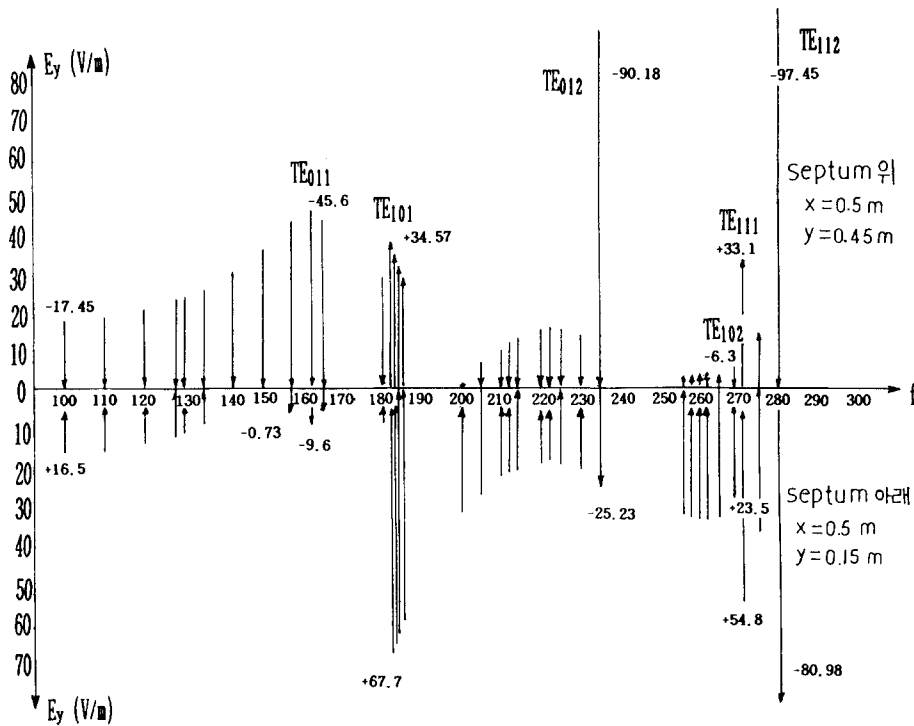
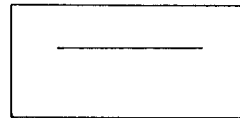


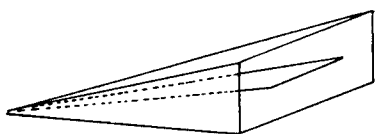
그림 8. 주파수 변화에 따른 TEM cell내 전계 변화

그림 9에 보이는 cell은 최근 기존의 TEM cell의 상한 주파수 확장을 위해 개발된 GTEM cell이다. 이 구조는 기울기를 갖는 도체판을 가지며, 테이퍼(taper)되는 구형도파관으로 구성된다. 개방된 면은 흡수체를 부착하여 공진 없이 동작이 가능하다.



(b) 단면도

그림 9. GTEM cell



(a) GTEM cell

### III. 결 론

지금까지 TEM cell의 물리적 특성을 살펴보고, 그러한 특성을 이용하면, 물론 한계는 있지만 RS

(radiated susceptibility)외에도 RE(radiated emission)측정이 가능함을 알 수 있으며, 그에 따라 요구되는 개선방안을 논의하였다.

표준 EM파의 발생과 EMS(electromagnetic susceptibility) 측정에 사용되는 시설은 TEM cell 외에도 개방 접지면 측정(open site ground screen : 25MHz-1GHz), 차폐된 전송 선로 측정법(waveguide chamber : 300-1000MHz) 그리고 전자파 무반사실 측정 (anechoic chamber : 500MHz-40GHz) 방법이 사용되나, TEM cell이 동작주파수가 낮은 반면 표준 평면파를 발생시키는 것으로는 가장 인정받는 방법이며, 무엇보다 개방접지면과 같이 설치에 많은 경비와 공간을 요하지 않으면서도 원하는 표준 평면파를 얻을 수 있다는 점이다. 따라서 이러한 cell에서 남아있는 문제들, 즉 앞서 논의된 주파수 한계를 극복하기 위한 새로운 TEM cell의 개발과 크기가 작은 cell에서도 전장의 왜곡을 최소화하면서도 측정공간을 확대할 수 있는 비대칭형 cell의 개발을 실현한다면, RE와 RS측정에 동시에 활용할 수 있는 최적의 EMC 측정시설로서 한 몫을 할 것이라 생각된다.

### 참고문헌

1. R.D. Orr and M.Kanda, "Generation of standard electromagnetic fields in a TEM Cell," NBS Tech. Note 1319, Aug. 1988.
2. D.A.Hill, "Bandwidth limitations of TEM cells due to resonances," J.Microwave power, 18(2), pp181-195, 1983.
3. C.Weil and L.Gruner, "High-order mode cutoff in rectangular striplines," IEEE Trans, MTT-32(6), pp638-641, June. 1984.
4. P.F.Wilson and M.T.Ma, "Simple approximate for higher order mode cutoff and resonant frequencies in TEM Cells," IEEE Trans. EMC, EMC-28(3), PP125-130, Aug. 1986.
5. M.Kanda, "Electromagnetic-field distortion due to a conducting rectangular cylinder in a transverse electromagnetic cell," IEEE trans. EMC-24(3), pp294-301, Aug. 1982.
6. S.K. Das and B.K.Sinha, "Numerical solution of higher order mode cutoff frequencies in symmetric TEM cells using Finite Element Method," IEEE Trans. EMC-32(4), pp264-268, Nov. 1990.
7. Galen H.Koepke, M.T.Ma, "Implementation of an automated system for measuring radiating emissions using a TEM cell," IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Vol.38, No.2, Apr. 1989.
8. 이에경, 이상희, 김정기, "TEM cell의 공진주파수 해석," 한국통신학회 하계 논문집, Vol.10, No.2, pp375-379, 1991.8
9. Roberto De Leo, T.Rozzi, "Rigorous analysis of the GTEM cell," IEEE Trans. MTT, Vol.39, No.3, Mar. 1991.
10. Spiegel R.J., Joines W.T., Blackman C.F. and Wood A.W., "A method for calculating EM fields in TEM cells at ELF," IEEE Trans. Electrmagn. Compat. Vol1 EMC-29 4 pp265-272, Nov. 1987.
11. J.C.Tippet and D.C. Chang, "Radiation characteristic of Dipole sources located inside a rectangular coaxial transmission line," NBSIR 75-829, Jan. 1976.
12. Crawford M.L., "Generation of standard EM fields using TEM transmission cells," IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol1. EMC-16, No.4, pp189-195, Nov. 1974.
13. Wilson P.F. and Ma M.T., "Simple approximate expressions for higher order mode cutoff and resonant frequencies in TEM cells," IEEE Trans. Electromagn. Compat. Vol1. EMC-28, No.3, pp125-130, Aug. 1986.