

〈特別寄稿〉

# 전자파 감시 대책

李相檜\* · 金正祺\*\*

(\*대유공업전문대학 전자과 교수,

\*\*중앙대학교 전자공학과 교수)

I. 서론	II. 본론	III. 결론
-------	--------	---------

## I. 서론

최근 전자산업의 급속한 발전으로 인하여 전기, 전자제품 중 정보기기가 사회 각분야에 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 방법과 일정한 규제치의 전자파 환경 내에서도 장애를 받지 않고 정상적인 동작을 할 수 있는 내성을 강화시키는 방법이었다. 이

두 가지가 조화를 이루어 기기들이 공존할 수 있는 능력을 갖게하는 것이 전자파 양립성(EMC : Electromagnetic Compatibility) 연구의 궁극적인 목표라 할 수 있다.

불요 전자파에 의해 어떤 시스템의 기능이 파괴 가능성을 안고 있는 경우 EMC 목표에 접근하는 데 있어 사후 처리와 사전 감시의 두 가지 경로를 생각할 수 있다. 인체에 미치는 영향은 물론이고 정보의 유출 가능성이나 경제적 부담 및 국제 사회에서의 기술적 신뢰도를 고려할 때 사전감시책이 보다 효과적이고 바람직하다 할 수 있다. 이 상황에 적합한 감시 시스템은 운반과 측정이 비교적 간편하고 정확도 면에서도 객관성과 일관성을 갖는 측정 시스템이 필수적이다. 그러한 측정시설 중 복사성 잡음에 대해 표준 전자장의 발생을 이용하여 전자파 감응성(EMS : electromagnetic susceptibility) 측정에 사용되는 TEM cell은 그 크기에 따라 상한주파수를 갖는 단점이 있으나 현재까지의 표준 평면파를 발생시키는 적합한 시설로 이용되고 있다.

본 고에서는 여러 자료들을 참고하여 현재 사용되고 TEM cell의 물리적 특성과 그 응용에 대해 살펴봄으로써 TEM cell에서 측정 공간의 확보와 사용주파수 대역의 광대역화의 가능성을 제안한다. 그리고 TEM cell이 RE와 RS문제를 동시에 해결할 수 있는 통합된 장비로서 전자파 사전감시를 위한 측정시스

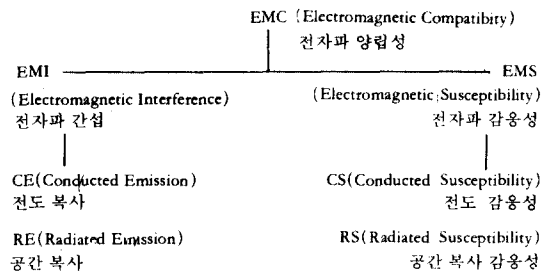


그림 1. EMI / EMC 측정 분야

템으로 활용될 수 있음을 제시하고자 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.

## II. 본 론

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

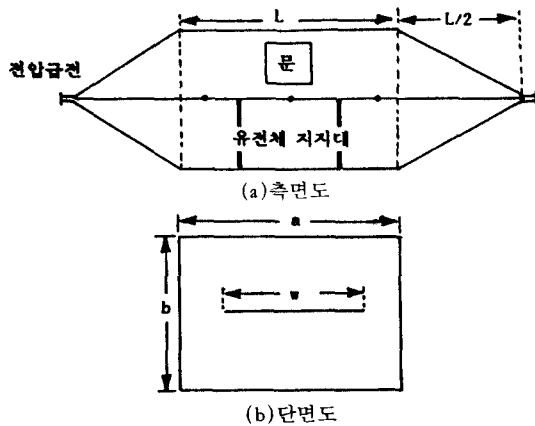
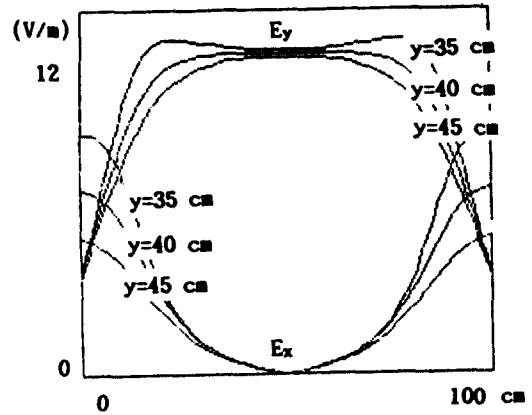


그림 2. TEM cell 구조

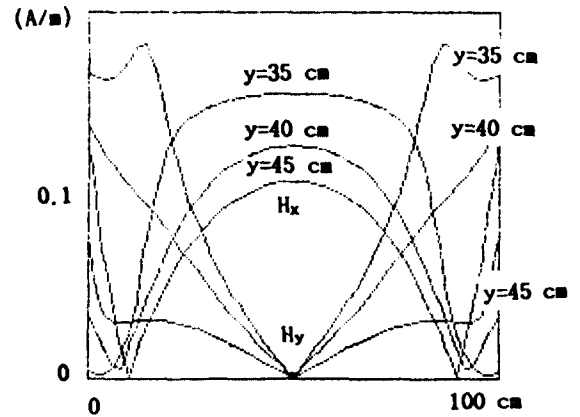
동축케이블이 TEM모드를 형성하는 원리와 동일하게 고차모드 차단주파수 이하에서 급전시 장방향 cell 구조내에서 TEM모드를 전파하며 파형이 비교적 균일한 cell의 중앙 부분의 셉텀 상에서 시험체를 측정하게된다. 이 중앙 부분의 전장, 자장 분포를 그림 3에 나타내었다. 그러나 이 분포는 주파수가 고차 모드의 차단 주파수 이하일 때만 보장된다.

### • 표준전자장 측정(RS측정)<sup>(1)</sup>

TEM cell은 장방향 동축전송선 형태로 된 가운데 부분과 양쪽 끝으로 가늘어져 연결기에 이르는 부분



(a) 전장 분포



(b) 자장 분포

그림 3. TEM cell 단면에서의 전장 및 자장 분포

으로 되어있으며 그 장방향 동축선에 일정한 크기의 전자장을 발생시켜 전자파 장해를 측정할 수 있다. cell 중앙에서 발생하는 전장의 세기는 내부를 가르는 도체판과 외부 도체판과의 거리를  $d$ 라하고 입사되는 순 전달 전력(net delivered power)을  $P_{net}$ 라 하면

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

이다. 이것은 주파수는 저주파대(TEM 모드)에서, 위치는 측정영역의 중앙에서만 보장되는 양이다. 고차

모드가 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<sup>[2-6]</sup>.

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 50Ω으로 접속하여 완전히 흡수하게 된다. RF볼트메타는 cell의 입력단에서 tee연결선에 의한 셉텀과 벽면 전위를 읽을 수 있다. 그림 4.(b)는 입력단의 입력전력과 반사전력을 읽는 전력메타에 연결되는 양방향결합기(dual direction coupler)에 의해 대치된다.

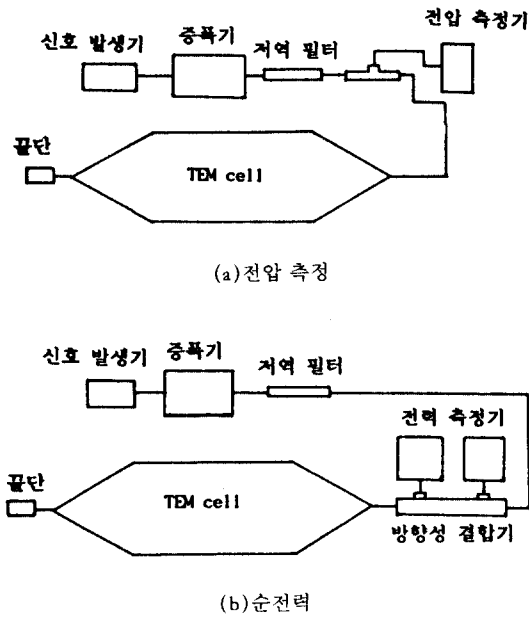


그림 4. TEM cell 표준 전자장 발생의 측정 절차

순 전력  $P_{net}$  watt, 임피던스의 실수성분 R로 부터 septum과 wall사이 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 cell중앙에서 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 1/4이 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 TEM 파의 정확한 값을 얻으려면 cell의 전기적인 길이와 전송선의 VSWR을 고려해야 한다. 이렇게 구한 전압을 가지고 식(1)을 사용하여 cell 중앙의 전체 크기를 구한다. 이 전장은 cell 중앙부의 선임피던스를 측정하는 시간영역 반사장치를 사용하면 더 정확한 값을 얻을 수 있을 것이다.

• 복사 전력(RE 측정)<sup>[7]</sup>

일반적으로 사용되는 TEM cell은 EUT의 전자파 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 EMS측정과 비슷하나 외부에서 cell내로 전력이 공급되는 것이 아니고 내부에서 유기된 전력이 양 끝단에 전송되어 위상차에 의한 전력의 크기와 위상을 측정하게 된다.

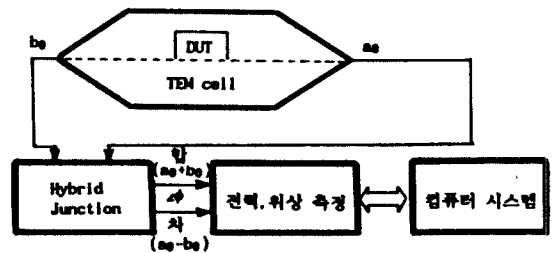


그림 5. 복사 측정 시스템

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

• TEM cell의 특성임피던스

스트립선에 의한 특성 임피던스를 TEM cell에 적용하면

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

표 1. TEM cell 특성 임피던스

fc(MHz)	2a : cm	2b : cm	t : cm	ΔC
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

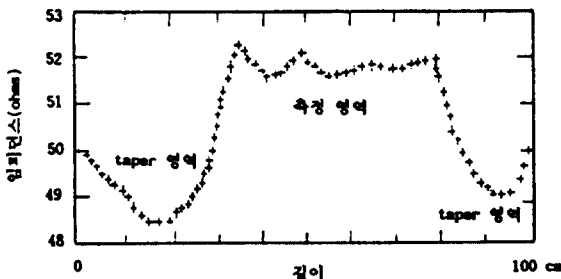


그림 6. TEM cell내에서 z축을 따른 시간영역 반사메타에 의한 특성 임피던스

근사식을 구할 수 있다[12]. 여기서  $\epsilon_r$ 은 두 도체판 사이 매질에 대한 비유전율, t는 셉텀 두께이고, ΔC는 외변 정전용량(fringing capacitance : pF/cm)으로 표 1에 표시하고 있다.

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

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

여기서  $\eta_0 \cong 120\pi$ 로서 공간 특성임피던스이고,  $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ [F/m]로서 공기중 유전율이며,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)는 자유공간 투자율이며, C는 전파속도이다.  $C_0$ 는 근사표현은

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

이다. ΔC는 외변 정전용량으로  $a/b \geq 1$ 이고  $w/b \geq 1/2$ 이면 무시할 수 있다. 이 식을 사용하여 cell의 특성임피던스 50Ω에 만족하는 셉텀 폭을 계산할 수 있다. 이렇게하여 폭에 의한 전력 반사계수를 최소화할 수 있다.

• TEM cell의 주파수 한계[1-6], [8]

TEM cell은 그림 2(a)의 단면 크기와 셉텀 폭과 외부 도체의 폭의 비에 따라 고차모드의 차단주파수를 갖고, (b)에서 길이 L, L/2에 따라 공진주파수를 갖게 된다. 그림 7에 Gruner의 해석[1]으로부터 cell 구

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

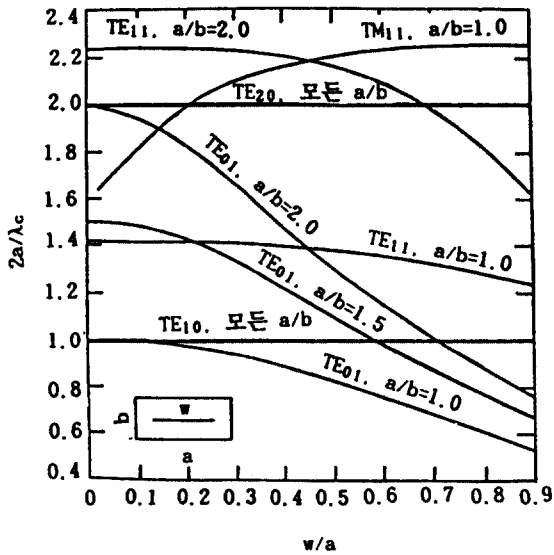


그림 7. TEM cell의 구조에 따른 고차모드의 차단주파수

조와 차단주파수의 관계를 변수  $a/b$ 와  $w/a$ 를 사용하여 보인다. 이는 Wilson<sup>[13]</sup>의 cell 특성 임피던스를  $b/a$ 비로서 계산된 차단주파수로 표시한것과 일치됨을 보이고 있다. 그리고 표 2에 NIST의 대표적인 cell의 차단주파수를 나타내고 있다.

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

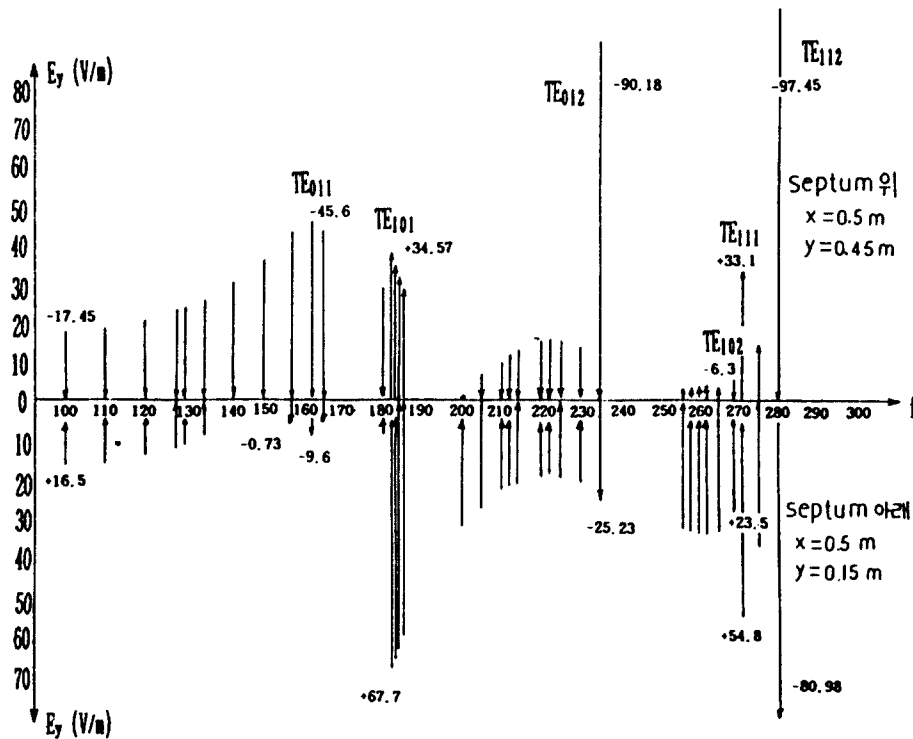
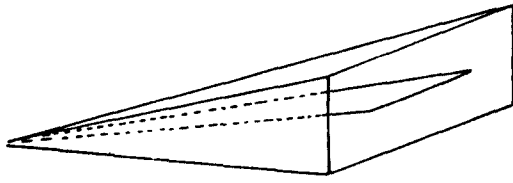
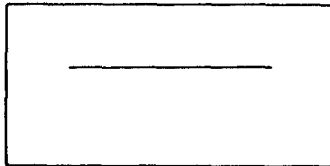


그림 8. 주파수 변화에 따른 TEM cell내 전계 변화

다.



(a)GTEM cell



(b)단면도

그림 9. GTEM cell

그림 9에 보이는 cell은 최근 기존의 TEM cell의 상한 주파수 확장을 위해 개발된 GTEM cell이다. 이 구조는 기울기를 갖는 도체판(taper)을 갖는 구형도파관으로 구성된다. 개방된 면은 흡수체를 부착하여 공진 없이 수 GHz 까지 동작이 가능하다.

### III. 결 론

지금까지 살펴본 TEM cell의 물리적 특성을 이용하여 RS(radiated susceptibility)와 RE(radiated emission) 측정의 가능성과 요구되는 개선 방안을 논의 하였다.

표준 EM 파의 발생과 EMS(electromagnetic susceptibility) 측정에 사용되는 시설은 TEM cell외에도 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 인정 받는 방법이며, 무엇보다 개방접지면과 같이 설치에 많은 경비와 공간을 요하지 않으면서도 원하는 표준 평면파를 얻을 수

있다는 점이다. 따라서 이러한 cell에서 남아있는 문제들인 주파수 한계를 극복하기 위한 새로운 TEM cell의 개발과 크기가 작은 cell에서도 전장의 왜곡을 최소화하면서 측정공간을 확대할 수 있는 비대칭형 cell의 개발을 실현한다면, RE와 RS측정에 동시에 활용할 수 있는 EMC 측정시설로서는 물론 불요 전자파의 감시 시스템으로서 그 역할 또한 충분히 할 수 있을 것이라 생각한다.

### 참 고 문 헌

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), pp.181-195, 1983.
3. C.Weil and L.Gruner, "High-order mode cutoff in rectangular striplines," IEEE Trans. MTT-32(6), 638-641, 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), pp. 125-130, Aug. 1986.
5. M.Kanda, "Electromagnetic-field distortion due to a conducting rectangular cylinder in a transverse electromagnetic cell," IEEE trans. EMC-24(3), pp. 294-301, 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), pp.264-268, 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. 이 애경, 이 상희, 김 정기, "고차모드로 인한 TEM cell의 대역 제한," 대한전자공학회 논문지, Vol. 28-A, No. 11, pp.12-19, Nov. 1991.
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., Joinses W.T., Blackman C.F. and Wood

A.W., "A method for calculating EM fields in TEM cells at ELF," IEEE Trans. Electrmagn. Compat. Vol EMC-29 No.4, pp.265-272, 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. Electro-

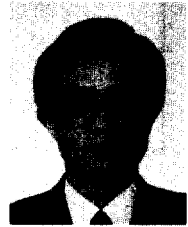
magn. Compat., Vol. EMC-16, No.4, pp.189-195, Nov.1974.

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. Vol.EMC-28, No.3, pp. 125-130, Aug. 1986.

본 연구는 1990년도 체신부 학술단체육성지원금에 의하여 이루어졌음.



李相楡



金正禎

- 1958年 9月 3日生
- 1983年 2月：中央大學校 工科大學 電子工學科 卒業(工學士)
- 1985年 2月：中央大學校 大學院 電子工學科 卒業(工學碩士)
- 1989年 2月：中央大學校 大學院 電子工學科 卒業(工學碩士)
- 1987年 9月~88年 2月：中央大學校 工科大學 電子工學科 講師
- 1989年 3月~現在：大有工業專門大學 電子科 教授

- 1942年 5月 5日生
- 1965年 2月：延世大學校電氣工學科卒業
- 1969年 2月：延世大學校大學院電氣工學科(工學碩士)
- 1975年 2月：延世大學校大學院電氣工學科(工學博士)
- 1970年 3月~1977年 2月：光云工科大學 副教授
- 1977年 3月~現在：中央大學校電子工學科 教授
- 1982年 12月~1983年 12月：美코넬大學校 客員教授