

전자기장 프로브 교정용 비대칭형 TEM cell의 설계 및 성능 평가

정회원 윤재훈*, 이혁재*, 황호정**

Design and performance of asymmetric TEM cell for calibrating field probes

Jae-Hoon Yun*, Hyuck-Jae Lee*, and Ho-Jung Hwang** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 전기장 프로브 교정용 비대칭형 TEM cell의 설계과정과 제작결과에 대해 나타내었다. 2cm×2cm 인 시험 공간(test space)에서 전자기장의 균일도가 ±2 dB내를 유지하면서, 제1공진 주파수는 1.5GHz 이하에서 출현하도록 하고 제2공진 주파수는 약 2GHz 에서 출현할 수 있도록 제작하였다. 제작 결과 계산된 결과와 실험된 데이터가 일치함을 볼 수가 있었다.

ABSTRACT

The design techniques of an asymmetric TEM (ATEM) cell for calibrating E/H field probes are presented in this paper. The authors describe the techniques to obtain not only the arbitrary frequency window between first resonant frequency and second resonant frequency, but also the test space with ±2dB field uniformity. We could design an ATEM cell that the measured data, electric field distribution inside the cell, impedance matching and resonant frequencies, agree with the calculated results.

I. 소개

근래에 들어, 전자파가 인체에 미치는 영향에 관한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 선진국을 중심으로 이미 오래 전부터 인체 보호 지침(안)이 마련되어, 권고 사항으로 적용되어 왔다. 또한 최근에 휴대폰에 대한 인체 위해에 대한 시비가 미국에서 발생되어, 미국은 1997년부터 FCC를 중심으로 이에 대한 보호법을 마련하여

시행하고 있고, 유럽에서는 CENELEC을 중심으로 보호법을 마련하여 시행 예정에 있다. 그러나 이러한 보호법을 시행하기 위해서는 인체 내에 침투

한 전기장에 대한 정확한 측정이 이루어져야 한다. 이러한 전기장에 대한 측정은 전류원으로 부터 인접에 위치한 영역(근역장)에서 측정되어야 하고, 미세한 지역에 까지 측정되어야 하므로 전기장 프로브는 매우 작아야만 한다. 전기장 세기를 측정하여 전파흡수율(SAR)을 환산 규제하고 있어 전기장 프로브에 대한 정확하고 주기적인 교정이 반드시 국가적으로 필요한 실정이다. 기존 전기장 프로브의 교정 장치로는 1GHz 까지는 대칭형 TEM cell^[1]이 활용되고 있고, 1GHz 이상에서는 도파관^[2]을 보편적으로 이용하고 있다^[3]. 본 논문에서는 비대칭형 TEM cell^[4]을 프로브 교정용으로 제작하여 사용 주파수 대역을 확장하는 기술에 대해 나타내었다.

* 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소

** 중앙대학교 전기전자제어공학부

논문번호: 99379-0913 접수일자: 1999년 9월 13일

TEM cell류는 야외 시험장 혹은 전자파무반사실에 비해 매우 저렴한 가격으로 제작이 가능하고, 작은 공간에서 이동이 자유롭고 저전력으로도 매우 높은 전자파 조성이 가능하다. 또한 입력 전력에 따른 내부 균일영역(uniform area, 내부도체와 외부도체 사이의 1/3 영역)에서 발생하는 전자기장의 세기를 정확히 예측가능하고, 높은 전자파 균일도 (field uniformity) 조성이 가능하다. TEM cell류는 GTEM cell^[5], WTEM cell^[6], TTEM cell^[7], 그리고 YTEM cell^[8]과 같이 한쪽 면을 종단하는 한단 TEM cell (single TEM cell) 과 대칭형 TEM cell^[11], 비대칭형 TEM cell^[4], 6단자TEM cell^[12], 그리고 원통형 TEM cell^[13] 처럼 양단에 입출력 단자를 갖는 양단 TEM cell (double TEM cell)로 구분이 가능하다. 그러나 한단 TEM cell은 사용 주파수 대역이 넓으나, 근역장 특성을 포함하는 일반 표준 전자파 (전파임피던스: $0\Omega \sim \infty\Omega$) 조성이 불가능하다^[9,10,11]. 그러므로 인체 위해 분야에서 사용되는 전기장 프로브의 교정용으로는 대칭형 혹은 비대칭형 TEM cell 처럼 양단에 입출력 포트가 있는 양단 TEM cell이 바람직한 모델이다. 양단 TEM cell 중에서 비대칭형 TEM cell^[4]은 대칭형 TEM cell에 비해, 전자파의 균일도 (field uniformity)가 낮으나 피시험체가 위치하는 균일 영역이 넓은 장점을 갖는다. 이러한 특성은 주파수 특성 관점에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 양단TEM cell은 밀폐형이므로 크기가 크면 클수록 사용 주파수 대역은 낮아지는 특성을 갖고 있기 때문이다. 즉 동일한 크기의 균일 영역을 갖는 대칭형 TEM cell에 비해 비대칭형 TEM cell이 크기가 작아지기 때문에 넓은 사용 주파수 대역을 갖는다.

대칭형 및 비대칭형TEM cell은 인체에 미치는 영향 연구 및 커다란 전자 장비의 고전력 EMC 시험용 cell 처럼 규모가 큰 경우 경제성을 고려해서 사용 주파수 확장 문제가 오래 전부터 대두되었고, 공진 주파수 사이의 가용 주파수 대역(frequency window)을 활용할 수 있음을 이미 Tippet^[14], Weil과 Gruner^[15], Hill^[16] 그리고 Wilson^[17] 등이 입증하기도 하였다. 그들에 의하면 TEM cell은 Q 팩터가 높아 제1차단 주파수(TE_{01}) 와 제1공진 주파수(TE_{011}) 사이에 가용 주파수 대역이 명확히 형성됨을 강조하고 가용 주파수 대역을 활용할 수 있음을 제안하고 있다.

본 논문에서는 전자파흡수율 (SAR) 측정용 프로브에 대한 교정을 지원하기 위해, 시험공간이 2cm

×2cm를 유지시키고 전자기장의 균일도가 $\pm 2\text{dB}$ 를 갖는 비대칭형 TEM셀의 설계 과정을 나타내었으며, 가용 주파수 대역을 확보하는 제작 기술에 대해 소개하고자 한다. 제작에 사용된 프로그램은 이미 앞서 논문을 통해 발표된 결과인 50Ω 특성 임피던스 구조 추적용 프로그램^[12,13,18], 내부 전자계 분포 계산용 프로그램^[19], 고조 모드 차단 주파수 계산용 프로그램^[20, 21]이 사용되었다.

II. 비대칭TEM cell 구조 설계

비대칭형 TEM cell의 단면 구조는 그림1처럼 외부 도체는 구형 도파관의 구조를 갖추고 있으며, 얇은 내부 도체가 좌우로 대칭이고, 상하로 비대칭적으로 놓여 있다. 프로브 교정용 비대칭형 TEM cell 설계 시, 다음과 같은 과정으로 제작하였다.

교정하고자 하는 인체 위해 측정용 전기장 프로브^[3]의 크기는 $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 정도 이하의 크기를 갖는다. 프로브 진입에 따른 내부 전자계의 왜곡 현상을 줄이기 위해, 각 변 당 길이가 2배 이상의 시험공간 ($2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 2\text{cm}$)을 확보할 수 있도록 하였다. 최대의 가용 주파수 확보를 위해 될 수 있는 한 외부 도체의 단면의 모양은 정사각형을 이루도록 설계 하였다. 앞서 발표된 논문^[22]을 통해 외부 도체가 정사각형인 경우, 내부 도체의 높이 (그림 1에서 w)가 외부 도체의 높이 (그림 1에서 h)의 $2/3$ 배 되는 지점에 놓일 때, 균일 영역의 크기는 $1/3h \times 2/9 h$ 의 크기를 갖고 균일도가 $\pm 2.3 \text{ dB}$ 임을 보

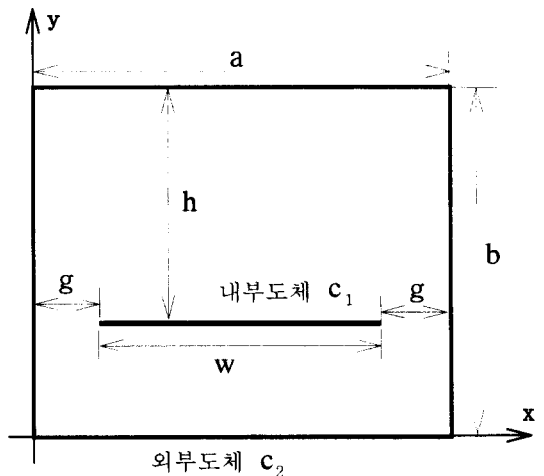


그림 1. 비대칭형 TEM cell의 단면도 및 직각 좌표상에서 위치.

았다. 프로브의 등방성 시험을 고려하여 피시험체가 놓이는 시험영역(test area)은 정사각형을 유지하여야 한다. 그런데 상기 모델의 시험 영역(test area)을 $2/9h \times 2/9 h$ 의 크기로 축소했을 때, 균일도가 약 ± 2 dB임을 확인할 수가 있다. 그러므로 우리는 상기 유형의 모델이 우리가 원했던 전기장 프로브 교정용으로 적합함을 알 수가 있었다. 시험 영역(교정 시 프로브가 직접 놓이는 영역)을 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 로 하면, 균일 영역은 $3\text{cm} \times 2\text{cm}$ 되므로 외부도체의 단면의 크기는 $9\text{cm} \times 9\text{cm}$ 가 된다. 내부 도체와 외부 도체간의 간격 h 는 6cm 이다. 이 때 시중에서 구하기 용이한 0.3cm 알루미늄판으로 설계할 경우, 모멘트법이 혼합된 뉴튼랩스 법 (NRM mixed with MM^[12,13,17])을 이용하여, 50Ω 특성 임피던스를 갖는 내부 도체의 폭 w 를 계산해보면, 6.887cm 임을 알 수가 있다. 이러한 구조에 대한 내부 전기장의 균일도 분포를 모멘트 법^[18, 22]으로 해석한 결과를 그림 2 나타내었다. 그림2는 시험영역 중심지점의 전기장 세기에 대한 dB편차를 나타내고 있다. 그림처럼 시험 영역($2\text{cm} \times 2\text{cm}$)에서 균일도가 약 ± 2 dB를 유지하고 있음을 볼 수가 있다.

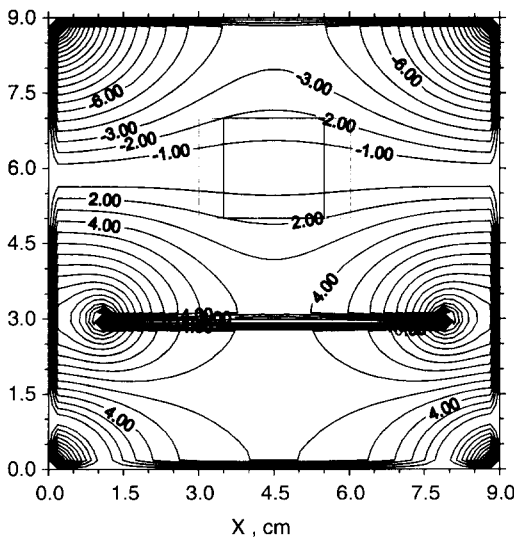


그림 2. 비대칭 TEM cell의 내부 전기장 분포(□: 균일영역, □: $\pm 2\text{dB}$ 영역)

이러한 구조에 대한 고조 모드 차단 주파수를 변분법에 기초한 Galerkin 법^[20,21]을 통해, 계산하면 표1과 같다. 표처럼 제 1 차단 주파수 TE_{01} 모드가 1.105 GHz , 제 2 차단 주파수 TE_{10} 모드가 1.667 GHz , 제 3 차단 주파수 TE_{11} 모드가 2.220 GHz

임을 알 수가 있다. 제 3 차단 주파수 이상에 대한 고조 모드는 2 GHz 이상에서 발생되므로 제 1 차단 주파수와 제 2 차단 주파수에 의한 공진만이 2 GHz 이내에서 발생하게 될 것이다. 이러한 상태에서 사용주파수 대역을 약 2 GHz 까지 사용할 수 있는 비대칭형 TEM cell을 만들고자 한다면, 우선적으로 제 1 차단 주파수에 의해 발생되는 제 1 공진 주파수의 크기를 2GHz 이상에서 발생하도록 해야 할 것이다. 그러나 만일 제 1 공진 주파수가 2 GHz 이상에서 발생이 불가능할 경우, 제 2 공진 주파수가 2 GHz 이상에서 발생하도록 하고, 제 1 공진 주파수는 많이 사용하지 않는 주파수 대역에 들 수 있도록 중심 영역의 길이 L_c 와 테이퍼 영역의 총길이 L_e 를 선택해야 할 것이다. 임피던스 정합을 위해 중심 영역의 길이 L_c 는 테이퍼 영역의 총길이 L_e 와 같게 설계함^[1]을 고려할 때, 중심 영역의 길이 L_c 는 공진 주파수 f_i 및 차단 주파수 f_c 와 다음과 같은 수식적인 관계를 갖는다^[16].

표 1. 제작된 비대칭형 TEM cell 의 차단 주파수 및 공진 주파수

공진 모드	계산된 차단주파수 f_c (GHz)	X_{mn} [14]	$(c/2L_{mm})$	공진 f_r (MHz)	
				계산값	측정값
TE_{011}	1.105	0.77	0.918	1.436	1.36
TE_{012}			1.836	2.143	1.98
TE_{101}	1.667	0.47	1.105	2.000	1.96
TE_{102}			2.211	2.769	2.65
TE_{111}	2.220	0.43	1.136	2.493	2.48
TE_{112}			2.273	3.177	3.18
TM_{110}	3.010	1.00	0.000	3.010	3.11

$$L_c = \frac{pc}{2(1 + X_{mn})\sqrt{f_r^2 - f_c^2}} \quad (1)$$

상기 식에서 X_{mn} 는 테이퍼 영역에 대한 유효 길이의 상수를 의미하며, 이는 모드에 따라 각기 다른 값으로 결정된다. Hill^[16]은 TEM cell들에 적용할 수 있는 평균치를 실험을 통해 계산하였으며 다른 모델에 대해 적용한 결과 매우 정확함을 확인하였고 그 값은 다음과 같다. $X_{01} = 0.77$, $X_{10} = 0.47$, $X_{11} = 0.43$ 이다. c 는 전파 속도를 의미하고 $p = 1, 2, 3, \dots$ 으로 공진의 z 성분 모드를 의미한다. 상기 수식으로부터 제 1 차단 주파수에 의한 제 1 공진 주파수가 2 GHz 이상이 되도록 하려면, L_c 는

(1)식으로 부터 4.9 cm 이하를 유지시켜야 함을 볼 수가 있다. 그런데, L_c 가 4.9 cm 이라면, 시험 공간(test space)에서 z 변의 길이는 1.6 cm 이므로 우리가 원했던 시험 공간을 확보 할 수 없다. 시험 공간(test space)에서 z 변의 길이를 2 cm 이상 확보 하기 위해 L_c 는 6cm 이상이 되고, (1)식으로 부터 제 1 공진 주파수는 2 GHz 이하에 놓이게 됨을 볼 수가 있다. 그러므로 앞서 제시되었던 바처럼 우리는 제1 공진 주파수와 제 2 공진 주파수 사이의 가용 주파수 대역을 활용하기 위해 제 2 공진 주파수 (TE₁₀₁ 모드)를 2 GHz 이상에서 유지되도록 하였다. 그러므로 중심 영역의 길이 L_c 는 (1)식으로 부터 9.23 cm 이하를 유지하면 됨을 쉽게 계산할 수 있다. 즉 중심 영역의 길이 L_c 는 최소 6 cm이상 그리고 9.23 cm이내에 있어야만 한다. 제 1 공진 주파수 (TE₀₁₁ 모드)를 이동 통신에서 많이 사용하고 있는 1.75GHz ~ 1.870GHz 대역을 피하기 위해 1.5 GHz 이하 대역을 유지하도록 하고, 제 2 공진은 약 2 GHz 대역 이상에서 발생하도록 설계 하였다. 본 논문에서 제작하고자 하는 비대칭형 TEM cell은 임피던스 정합을 고려하여 될 수 있는 한 중심영역의 길이 L_c 는 최대 길이를 선택하여 설계하였다. (1)식으로 부터 L_c 가 9.23 cm 이므로 제 2 공진 주파수는 약 2 GHz가 유지됨을 알 수가 있다. 이로써 모든 설계 변수인 a, b, w, h, L_c, L_E 가 모두 결정되었다. 다음 절에서는 설계 결과와 제작 결과에 대해 나타낼 것이다.

III. 프로브 교정용 비대칭 TEM cell의 제작 결과

"II 장"에서 제 1 공진 주파수가 1.436 GHz 이고 제 2 공진 주파수가 2.000 GHz인 전기장 및 자기장 교정용 비대칭 TEM cell의 설계 도면을 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 프로브가 내부 시험 공간에 접근하고, 등방성 특성을 시험하기 위해 3개의 출입구를 설치하였다. 전파흡수율(SAR) 측정 시, 전파의 방향이 프로브의 상단 쪽으로 전 달해오는 점을 감안하여, 테이퍼 영역으로 부터 프로브가 설치될 수 있도록 출입구를 내었다. 그리고 직접 제작된 사진을 그림 4에 나타내었으며, 제작된 비대칭형 TEM 셀에 대한 정재파비에 대한 측정 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림5(a)에서 보여주듯이 제1공진 주파수(이론치: 1.436 GHz) 대역 이하의 주파수에서 1.154 이하의 정재파비를 유지하고 있음을 볼 수가 있다.

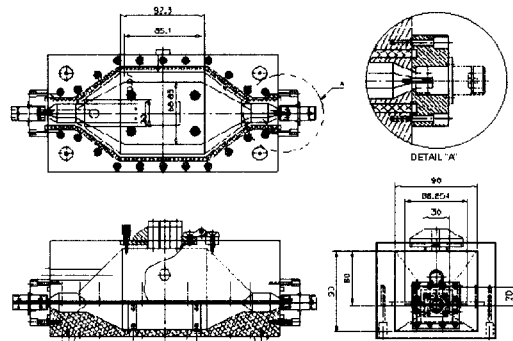


그림 3. 프로브 교정용 비대칭형 TEM cell의 설계도

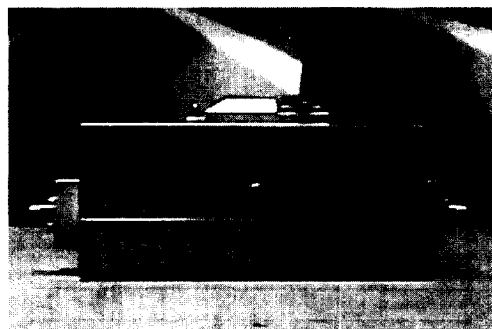
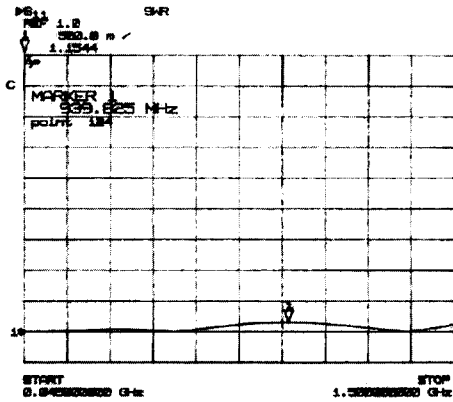


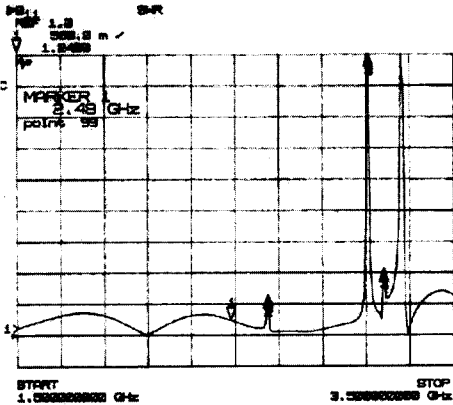
그림 4. 제작된 비대칭형 TEM cell의 사진

그러므로 제 1공진 주파수 대역 까지 상기 제작된 비대칭형 TEM cell의 임피던스 정합이 매우 좋음을 볼 수가 있다. 그러나 제1공진 주파수 이후에 형성되는 주파수창은 임피던스 정합 특성이 좋지 않음을 볼 수가 있다. 이러한 주파수 영역에서는 반드시 반사파를 고려한 교정을 실시해야만 할 것이다. 표1에서 변분법에 기초한 Galerkin 법^{19, 20}을 이용하여 계산한 공진주파수와 측정된 값을 비교하였다. 표1에서 TE₁₁₁ 모드, TE₁₀₂ 모드에 대한 공진 주파수는 그림5(b)에서 마커1, 마커2 로부터 측정된 것이다. Hill¹⁶의 논문에서도 지적되었듯이 모든 공진 모드가 정재파비로 측정할 수가 없음을 볼 수가 있다. 표1의 다른 모드들의 공진 주파수는 전자계에 대한 주파수 소인법¹⁶으로 측정할 수가 있었다. 예 측한 값과 거의 일치하고 있음을 볼 수가 있다.

비대칭형 TEM cell내부에 표준전자파를 발생하기 위한 시스템을 그림6에 나타내었다. 방향성결합기는 광대역 특성의 고전력 전송이 가능한 직각방향성결합기²³가 사용되었다. 시험영역 중심에서의 전기장의 세기 E 는 입력전력 P 에 의해 다음처럼 쉽게 결정된다¹¹.



(a)



(b)

그림 5. 제작된 비대칭형 TEM cell의 정재파비

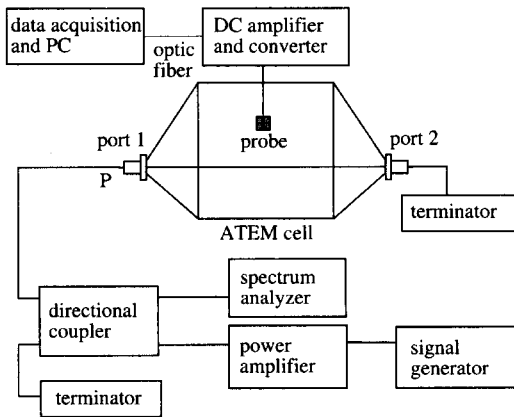


그림 6. 비대칭형 TEM cell내의 표준전자파 측정 시스템

$$E = \alpha \frac{\sqrt{50P}}{h} \quad (2)$$

즉 내부에 입력되는 전력을 알면 내부에서 발생

되는 전기장의 세기를 알 수가 있다. 교정하는 관점에서 입력전력이 주어질 때 정확한 피측정체가 위치하는 시험공간 중심에서 정확한 전기장의 세기를 예측하는 것은 매우 중요하다. 상기 (2)식의 경우, 외부 도체 폭이 높이에 비해 크고 내부도체의 폭이 클 경우 $\alpha = 1$ 로 접근하여 별도로 α 에 대한 계산이 필요 없다^{1, 4)}. 그러나 (비)대칭형 TEM cell에서는 이러한 구조를 갖고 있지 않으므로 발생될 수 있는 보정계수 α ^[13]의 계산이 필요하다. 제작 모델에 대해 모멘트 법^{19, 22)}으로 계산해보면 $\alpha = 0.984$ (그림7의 결과로부터 계산 가능함)임을 알 수가 있다. 모멘트 법으로 내부의 전기장 분포를 계산한 결과와 측정된 결과를 그림 7에 나타내었다. 900 MHz에서 입력전압이 1 V일 때 측정한 결과이다. 측정 시스템을 그림 6에 나타내었으며 측정에 사용된 전기장 프로브는 DASY-ET3DV5R 모델이다. 프로브의 엘리먼트 길이가 약 0.3 cm 이고 3개의 직교 엘리먼트의 떨어진 거리가 약 0.3 cm 떨어져 있어 전기장의 분포 변화율이 높은 곳에서 등방성 특성이 저조한 문제점을 갖는 특성을 지니고 있는 모델이다. 측정된 결과에서 보듯이 프로브가 시험영역 (그림7에서 $x = 0.045$ m의 측정값)에서 벗어날 때 예측된 값보다 큰 값이 측정되고 있음을 볼 수가 있다. 이는 프로브에서 3축 엘리먼트의 급전점이 구조상 한 점에 위치하지 않기 때문에 발생하는 것이다. 그림 2와 그림 7에서 볼 수가 있듯이, 시험영역에서 벗어나서 벽쪽($x = 0, 0.09$ m)으로 갈수록 내부도체 쪽에서는 x성분의 전기장 세기가 그 반대 방향에서는 y성분의 전기장 세기가 큰 값을 유지하기 때문에 측정된 전기장 절대치 E가 커지는 현상에서 비롯된 것이다. 다른 실험적 결과^{11, 2)}에서 검증되었듯이 모멘트법을 사용하여 예측된 전기장의 세기는 매우 정확하다. 프로브의 3축상의 직교 엘리먼트들의 급전점이 서로 멀리 떨어질 경우 비균일한 영역에서의 정확한 전기장 측정이 사실상 불가능함을 나타내고 있다. 또한 이러한 실험을 통해 볼 수가 있듯이 프로브에 대한 등방성 시험은 균일영역에서 행해지고 있으나 비균일영역에서도 시험되어야 할 것으로 사료된다.

그림 7을 통해 볼 수 있듯이, 전기장의 균일도가 높은 시험영역(그림7에서 $x = 0.045$ cm)의 중심에 프로브가 위치할 때, 예측된 전기장의 세기에 매우 근접하고 있음을 볼 수가 있다. 프로브의 교정은 시험영역에 프로브의 엘리먼트를 위치시켜 수행 하기 때문에, 제작된 비대칭형 TEM cell은 프로브 교정

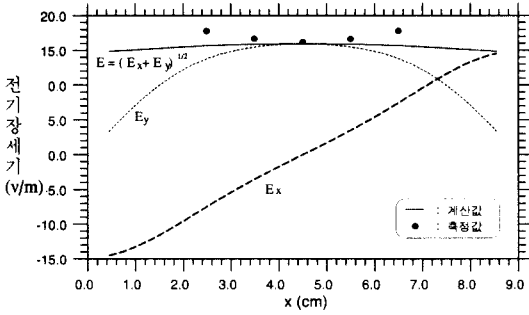


그림 7. 제작된 비대칭형 TEM cell 내부에서 전기장 세기 ($y = 6\text{cm}$)

용으로 합당한 구조를 갖추고 있음을 볼 수가 있다. 본 논문에는 데이터를 포함하지 않았지만, 중심에 전기장 프로브를 위치시켜 각 주파수에 대한 전기장 세기를 측정할 결과, 제1공진이 발생하는 주변 주파수 1.35 GHz~ 1.37 GHz 대역을 제외한 제2공진 주파수 바로 전의 주파수인 1.95GHz 까지 (2)식의 입력 전력에 대한 전기장 조성비가 정확하게 조성됨을 볼 수가 있었다.

IV. 대칭형 TEM cell과의 성능 비교

본절에서는 시험영역(test area)의 크기가 같은 대칭형 TEM cell과의 성능을 비교한 결과를 나타내었다. 시험영역이 2cm×2cm을 유지하기 위해서는 내부도체와 외부도체간의 거리를 6cm로 유지해야 하므로, 외부도체의 단면의 높이는 12cm×12cm 임을 쉽게 계산할 수가 있다. 비대칭 TEM cell처럼 시중에서 구하기 용이한 0.3cm 인 알루미늄판으로 제작한다고 가정하고, 모멘트법이 혼합된 뉴튼랩스법 (NRM mixed with MM^[13,14,18])을 이용하여, 50 Ω 특성 임피던스를 갖는 내부 도체의 폭 w 을 계산해보면, 9.563 cm임을 알 수가 있다. 임피던스 정합을 위해 중심 영역의 길이 L_c 는 테이퍼 영역의 총길이 L_E 와 같게 설계하고, 중심영역의 길이와 단면상의 외부도체 높이와 같게 설계한다^[11] 이 들은 모두 12 cm가 될 것이다.

이러한 모델과 유사하게 제작되는 비대칭형 TEM cell의 차단주파수 및 공진 주파수를 비교하면, 표2와 같다. 여기서 주의할 점은 유사한 비대칭형 모델을 비교하기 위해, 비대칭형 TEM cell의 중심 영역의 길이와 테이퍼 영역의 총길이를 같게 설계하고, 중심영역의 길이와 단면상의 외부도체 높이가 같은 모델 즉 9 cm 가 되는 모델과 비교하였다. 표와 같

이 비대칭형 TEM cell이 보다 높은 주파수 대역까지 사용이 가능함을 볼 수가 있다. 제1공진주파수가 약 1.4배 가량 높은 대역에서 발생함을 볼 수가 있다. 그러므로 앞에서도 언급하였듯이 비대칭 TEM cell은 대칭형 TEM cell의 균일도($\pm 1\text{dB}^{[1]}$)보다도 저하되는 특성을 갖고 있으나, 보다 높은 주파수 대역까지 측정 가능한 모델임을 볼 수가 있다.

표 2. 대칭형 TEM cell 과 비대칭형 TEM cell의 공진주파수 특성 비교

공진 모드	차단주파수(GHz)		공진주파수(GHz)	
	대칭형 TEM cell	비대칭형 TEM cell	대칭형 TEM cell	비대칭형 TEM cell
TE ₀₁₁	0.757	1.105	1.035	1.452
TE ₀₁₂			1.602	2.183
TE ₁₀₁	1.250	1.667	1.512	2.016
TE ₁₀₂			2.110	2.815
TE ₁₁₁	1.624	2.220	1.844	2.507
TE ₁₁₂			2.386	3.219
TM ₁₁₀	2.799	3.010	2.799	3.010

V. 결론

본 논문에서는 시험공간이 2cm×2cm 이고 전기장의 균일도가 $\pm 2\text{dB}$ 인 프로브 교정용 비대칭형 TEM cell의 설계 과정과 제작 결과를 나타내었다. 설계 이전에 가용 주파수 대역, 균일도 조건 등을 만족하는 설계 치수를 결정하기 위해서 50 Ω 특성 임피던스 구조 추적용 프로그램 이외에도 균일장 영역의 균일도 측정 프로그램, 차단 주파수 계산 프로그램을 활용하였다. 제작 결과 제1공진이 1.36 GHz, 제2공진이 1.96GHz인 가용 주파수 대역을 갖는 비대칭형 TEM cell을 얻을 수가 있었다. 또한 제1공진까지 정재파비가 1.1544 이하를 유지하고 있어 임피던스 정합이 매우 좋음을 볼 수가 있었다. 비대칭 TEM cell은 대칭형 TEM cell에 비해 균일도가 저하되는 특성을 보이고 있으나, 보다 높은 주파수 대역까지 사용할 수 있음을 볼 수가 있었다. 제한된 균일도 조건을 만족하는 최적의 사용주파수 대역을 갖는 비대칭형 TEM cell의 설계 기술은 EMI/EMS, 전자파 생체 영향연구 분야 등에서 매우 중요한 기술이다. 이러한 분야에 대한 최적의 비대칭형 TEM cell 설계 분야에 응용이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] M. L. Crawford, "Generation of standard EM fields using TEM transmission cells," IEEE Trans. on EMC, vol. 16, pp.189~195, 1974.
- [2] D. Hill, "Waveguide technique for the calibration of miniature implantable electric-field probe for use in microwave-bioeffects studies," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 30, pp. 92-99, Jan. 1982.
- [3] K. Meier, M. Burkhardt, T. Schmid, and N. Kuster, "Broadband calibration of E-field probes in lossy media," IEEE Trans. MTT, vol. 44, no. 10, October 1996.
- [4] M. L. Crawford and J. L. Workman, "Asymmetric versus symmetric TEM cell for EMC measurements," IEEE Symp. on EMC, Atlanta, pp.368~375, 1978.
- [5] D. Konigstein and D. Hansen, "A new family of TEM cells with enlarged bandwidth and optimized working volume," Proc. 7th Inter. Symp. on EMC, Zurich, pp.127~132, 1987
- [6] L. Carbonini, "Modal analysis of multi-connected waveguides," IEEE Trans. on MTT, 40, pp.665~671, 1992.
- [7] F. B. J. Leferink, "A Triple TEM cell: three polarization in one setup," Proc. 10th Inter. Symp. on EMC, Zurich, pp.573~578, 1993.
- [8] Jae-Hoon Yun, Kwang-Yun Cho, Hyuck-Jae Lee and Jung-Ki Kim, "A new type TEM cell for generating standard EM fields", Inter. Symp. on EMC, Roma, pp. 813~815, September 1998.
- [9] S. K. Das, V. Venkatsan, G. Uma, and B. K. Sinha, "A technique of electromagnetic interference measurements in high impedance electric and low impedance magnetic field inside TEM cell," IEEE Inter. Symp. on EMC Rec., Washington, D. C., pp. 367~369, 1990.
- [10] M. T. Ma, E. B. Larsen and M. L. Crawford, "Electromagnetic fields with arbitrary wave impedance generated inside a TEM cell," IEEE Trans. on EMC, 33, pp.358~362, 1991.
- [11] Jae-Hoon Yun, Hyuck-Jae Lee and Jung-Ki Kim, "Generation of the standard EM fields with arbitrary wave impedance at the center of a TEM cell," IEICE trans. communication, pp. 1286~ 1289, June 1998.
- [12] Jae-Hoon Yun, Hyuck-Jae Lee and Jung-Ki Kim, "Design and analysis of six port-TEM cell for generating standard electromagnetic field," Electron. Lett., vol. 32, no. 23, pp. 2127 ~ 2128, 1996.
- [13] Jae-Hoon Yun and Jung-Ki Kim, "Circular TEM cell for generating standard electromagnetic field," Electron. Lett., vol. 33, no. 22, pp. 1853~1856, 1997.
- [14] J. C. Tippet, D. C. Chang, and M. L. Crawford, "An analytical and experimental determination of cutoff frequencies of higher-order TE mode in a TEM cell," Nat. Bur. Stand., Boulder, CO, Rep. NBSIR 76-841, June 1976.
- [15] C.M. Weil and L. Gruner, "Higher order mode cutoff in rectangular striplines," IEEE Trans. MTT, vol. MTT-32, pp. 638~641, June 1984.
- [16] D. A. Hill, "Bandwidth limitations of TEM cells due to resonances," J. Microwave Power, vol. 18, pp. 181~195, June 1983.
- [17] P. F. Wilson and M. T. Ma, "Simple approximate expressions 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.
- [18] 윤재훈, "8단자 가변 임피던스 전자파발생장치를 이용한 표준 복사 전자기장 조성 연구," 한국통신학회 논문지, vol.21, no.3, pp. 771~784, 1996. 3.
- [19] 윤재훈, 최익권, "모멘트법을 이용한 임의의 구형 내부도체를 갖는 TEM cell의 특성분석," 한국통신학회 논문지, vol.15, no.11, pp. 898~908, 1990. 11.
- [20] 윤재훈, 최익권, "TEM cell들의 고주 모드 차단 주파수에 대한 수치 코드 개발," 한국전자통신논문지, vol. 12, no. 4, pp. 61~72, 1991.1.
- [21] Jae-hoon Yun, Hyuck-jae Lee and Jung-ki Kim, "Numerical solution of higher order mode cutoff frequencies in asymmetric TEM cells by Galerkin method," to be published in

