

Galerkin 법을 적용한 TEM cell들의 고조 모드 차단 주파수 해석

준회원 윤재훈*, 이혁재*, 김정기**

Solution of higher order mode cutoff frequencies in TEM cells by Galerkin method

Jae-Hoon Yun*, Hyuck-Jae Lee*, and Jung-Ki Kim** *Regular Members*

요약

본 논문에서는 Crawford TEM cell들의 고조 모드 차단 주파수에 대한 해석 결과를 나타내었다. 1/2 모드 경계 영역을 제시하고, 변수 분리에 기초한 Galerkin 법을 적용하여 해석하였다. 대칭형은 물론 비대칭형 TEM 셀에 대한 차단 주파수를 정확히 예측할 수 있었다. 기존 대칭형 TEM cell과 직접 제작된 비대칭형 TEM cell에 적용한 결과 측정치와 매우 일치하고 있음을 볼 수가 있었다.

ABSTRACT

The higher mode cutoff frequencies in Crawford TEM cells computed by the Galerkin method(GM) describe in this paper. The authors also report the half mode boundaries to solve not only the cut-off frequencies of symmetric TEM cells and those of asymmetric TEM cells. It is shown that the measured resonant frequencies of the present symmetric TEM cells and a designed asymmetric TEM cell are agreed with the calculated results.

I. 소개

EMC (Electromagnetic Compatibility) 분야에서 널리 사용되고 있는 Crawford TEM cell은 내부도체가 어느 곳에 위치하는가에 따라 두 종류로 구분된다. 중심에 위치하는 대칭형 TEM cell [1] 과 그림1 처럼 중심에서 벗어나서 위치하는 비대칭형 TEM cell [2]이 있다. 비대칭형 TEM cell은 대칭형 TEM cell에 비해, 전자파의 균일도 (field uniformity) 가 낮으나 피시험체가 위치하는 균일장 영역(uniform area)이 넓은 장점을 갖는다. TEM cell은 동축 전송 낮으나 피시험체가 위치하는 균일장 영역(uniform 선로 내부에서 발생하는 TEM 모드가

평면파 특성을 유지하는데 착안하여 개발된 것이다. 이는 야외 시험장 혹은 전자파무반사실에 비해 매우 저렴한 가격으로 제작이 가능하고, 저주파대 표준 전자파 발생이 용이하며, 작은 공간에서 이동이 자유롭고 저전력으로도 강한 전자파 조성이 가능하다. 또한 외부 전자파 환경과 무관하게 사용할 수가 있다. 그러나 TEM cell을 제안한 Crawford 자신도 언급하였듯이 다음과 같은 문제점을 지니고 있다^[1]. (i) 사용 주파수가 제한되며, (ii) 조성하고자 하는 전자파의 분극이 수직으로 고정되며, (iii) 균일장 영역(uniform area)의 크기 및 전자장 균일도(field uniformity)가 제한된다. 근래에 이러한 문제점을 개선한 모델들이 제안되었다. 그 일례로, (i)의 문제점

* 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소

** 중앙대학교 전기전자공학부

논문번호 : 98189-0427, 접수일자 : 1998년 4월 27일

을 해결한 모델이 GTEM cell^[3], WTEM cell^[4] 이며, (i)과 (ii)의 문제점을 동시에 개선한 모델이 TTEM cell^[5]이다. (i)과 (ii) 그리고 (iii)의 문제점을 동시에 해결한 모델이 YTEM cell^[6]이다. 그러나 상기 개선된 모델들은 한쪽 단을 중단하는 구조를 갖고 있어, 근역장 특성을 포함하는 일반 표준 전자파 (전파임피던스: $0\Omega \sim \infty\Omega$) 조성이 불가능하다^[7, 8, 9]. 이 외에도 일반 표준 전자파 조성이 가능한 특성을 유지하면서, (ii)와 (iii)의 문제점을 해결한 모델들이 국내에서도 개발되기도 하였다^[10, 11].

그러나 앞서서도 언급하였듯이 Crawford TEM cell 들은 단면의 구조가 구형 동축 선로 이고 좌우가 줄어들는 밀폐형 구조이므로 고조 모드가 발생되어 사용 주파수의 제한을 받는다. 그러므로 국제 EMC 규격^[12, 13]에서는 고조 모드가 출현할 수 있는 차단 주파수(TE_{01})까지 사용을 권장하고 있다. 그러나 인체에 미치는 영향 연구 및 커다란 전자장비의 고전력 EMC 시험용 cell 처럼 규모가 큰 경우 경제성을 고려해서 사용 주파수 확장 문제가 대두되었고, 또한 무선기기 감도 혹은 프로브 교정용처럼 특정 고주파 대역에 대한 전자파 발생 분야에서 공진주파수 사이의 가용 주파수 대역 (frequency window)을 활용할 수 있음을 실험적으로 입증하기도 하였다. 이러한 측면에서 Tippet^[14], Weil 과 Gruner^[15], Hill^[16] 그리고 Wilson^[17]은 TEM cell의 공진 문제를 다루었다. 그들에 의하면 TEM cell은 Q 팩터가 높아 제1차단 주파수(TE_{01})와 제1공진 주파수 (TE_{011}) 사이에 가용 주파수 대역이 명확히 형성됨을 강조하고 사용 주파수 범위를 제1 공진 주파수까지 넓힐 수 있음을 제안하고 있다. 사용 주파수 대역은 우선 설계 이전 부터 정해져야 한다. 즉 사용 주파수 대역에 의해 그 크기가 정해지기 때문이다. 그러므로 TEM cell 분야에서 정확한 공진 주파수의 예측은 매우 중요한 일인 것이다. TEM cell의 공진 주파수는 유효 길이와 차단 주파수에 의해 결정된다. TEM cell은 양 끝단에 테이퍼되는 영역을 가지고 있어, 유효 길이를 구하는 문제도 평범한 문제가 아니다. Hill^[16]은 공진에 대한 실험적 데이터에 근거하여 여러 종류의 cell에 대해 적용할 수 있는 각 고조 모드에 대한 유효 길이 팩터를 구하였다. 정확한 공진 주파수를 예측하기 위해서는 각 고조 모드에 대한 차단 주파수를 정확히 예측하는 일이 매우 중요하다. 이러한 목적으로 제시된 기존 수치 해석에 대한 연구를 살펴보면 다음과 같다. Lampe^[18]는 전계 적분 방정

식(electric field integral equation)에 대해 MM (moment method)으로 TE_{01} 모드에 대한 차단주파수 해석을 하였고, Jingjun과 Junmei^[19]은 TLM (transmission line matrix) 법으로, Das^[20]는 FEM (finite element method)을 이용하여 해석하였다. 이들의 결과는 매우 정확하나, 모두 1/4 모드 경계 영역을 정의하여 해석하고 있어 내부도체가 위아래 놓이는 비대칭형 TEM cell에 대한 차단주파수 해석은 불가능하다. 본 논문에서는 임의의 비대칭형 TEM cell에 대해 적용 가능한 1/2 모드 경계 영역을 제시하고, 변수 분리에 기초한 GM (Galerkin method)을 적용하여 해석하였다. 또한 직접 제작된 비대칭형 TEM cell로 부터 측정된 공진 주파수와 계산된 값을 비교하였다.

II. 비대칭 TEM cell의 50 W 구조 와 모드 경계 영역

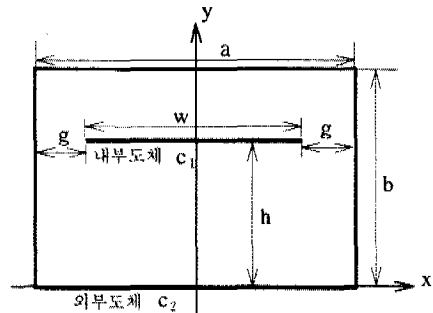


그림 1. 비대칭형 TEM cell의 단면도 및 직각 좌표상에서 위치.

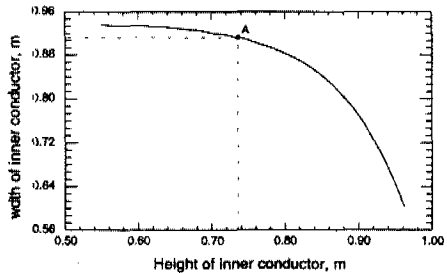


그림 2. 비대칭형 TEM cell의 50Ω 구조 (a=b=1.1m, d=0.003m)

비대칭형 TEM cell의 단면 구조는 그림1처럼 외부도체는 구형 도파관의 구조를 갖추고 있으며, 얇은 판의 구조를 갖는 내부도체는 좌우로 대칭이고, 상하로 비대칭적으로 놓여 있다. 통상 대형 TEM cell을 제외한 모델 대부분은 특성 임피던스

가 50Ω의 구조로 되어 있다. 그러므로 설계 순서는 외부도체의 크기 및 내부도체의 두께와 높이가 결정되면, 내부도체의 폭 w 은 특성 임피던스가 50Ω이 되도록 결정하는 것이 바람직하다. 비대칭형 TEM cell의 50Ω구조를 추적하는 수치 알고리즘이 앞서 개발되었다^{[21], [22]}. 개발된 수치 알고리즘 코드를 활용하여 50Ω 특성 임피던스를 갖는 구조들의 일 예를 그림 2에 나타내었다.

그림 2는 비대칭형 TEM cell에서 외부도체의 높이 b 가 1.1m 이고 외부도체의 폭 a 가 1.1m 일 때, 두께 d 가 0.003m인 내부도체를 중심으로 $+y$ 방향으로 올림에 따른 50Ω 특성 임피던스를 유지하기 위한 내부도체의 폭 w 를 나타내고 있다. 내부도체를 $+y$ 방향으로 올림에 따라 내부도체와 외부도체 벽이 가까이 놓이게 되어 캐패시턴스 결합량의 증가로 인해, 50Ω을 유지하기 위해 내부도체 폭이 줄어 들고 있음을 볼 수가 있다. 참고적으로 상기 그림2에서 $h=0.735m$ 일 때, 50Ω 구조를 갖추기 위해서는 $w=0.913m$ 임을 볼 수가 있다(그림 2에서 "A"). 이러한 구조로 직접 제작된 모델의 사진을 그림 3에 나타내었다.



그림 3. 제작된 비대칭형 TEM cell의 사진

TEM cell의 차단 주파수를 해석함에 있어서 우선 먼저 모델에 적합한 모드 경계 영역이 설정되어야 한다. 모드 경계 영역의 설정은 수식의 간략화, 제한된 컴퓨터 메모리 최적의 활용, 그리고 모델 적용 범위를 결정하기 때문에 매우 중요하다. 기존 TEM cell의 모드 경계 영역으로는 우선 Tippet^[14]과 Wilson^[17]의 수식 유도에서 사용된 1/2 모드 경계 영역이 있다. 이는 상단 영역(그림1에서 내부도체 윗단 영역)과 하단 영역(그림1에서 내부도체 아래단 영역)으로 구분하고 있다. 그들은 직교성을 갖는 기저 함수를 통해 상단 영역과 하단 영역에 Helmholtz 방정식을 만족하는 그런 함수를 구하고

이들 영역이 접하는 경계면(그림1에서 g 영역)의 연속 조건을 적용하여 해를 구하고 있다. 그러나 이러한 경계 영역을 수치해석에 도입할 경우 결국 전구간 경계 영역^[23]처럼 전구간에 대한 기저 함수 정의를 통해 해석할 수 밖에 없다. 전구간 경계 영역은 내부 도체가 좌우 및 상하로 어느 곳에 위치하더라도 해석이 가능한 반면, 분할 요소 수가 증가하는 문제점을 지니고 있다. 분할 요소 수의 증가는 반올림 오차(round off error)에 의한 영향이 발생되어, 내삽 오차(interpolation error)가 증가로 이어져 정확한 수치해석이 어려운 문제점을 지니게 된다^[18-20]. 두번째로는 Lampe^[18], Jingjun과 Junmei^[19] 그리고 Das^[20]가 사용하고 있는 1/4 모드 경계 영역이 있다. 그러나 1/4 모드 경계 영역은 적은 분할 요소 수로도 해석이 가능한 반면, 비대칭형 TEM cell의 적용하는 것은 불가능하다. 왜냐하면 비대칭 TEM cell은 상하로 내부도체가 임의의 위치에 놓여야 때문이다. 그러므로 본 논문에서는 비대칭형 TEM cell의 내부도체가 항상 좌우 대칭적으로 놓이고 상하로 비대칭적으로 위치하는 점을 감안하여, 그림 4 처럼 좌우 1/2 모드 경계 영역을 제시하고자 한다.

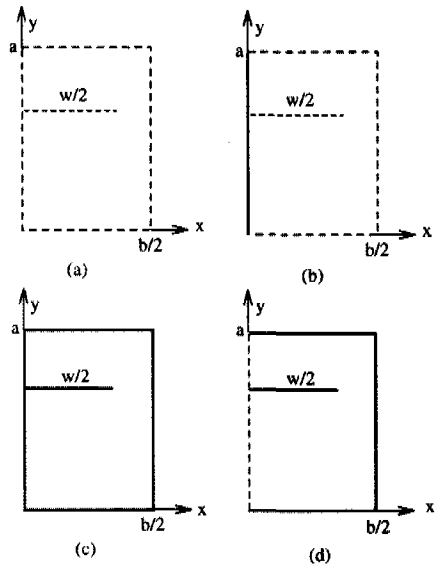


그림 4. 비대칭형 TEM cell의 1/2 모드 경계 영역
(a) TE_{Even}, x 모드, (b) TE_{Odd}, x 모드,
(c) TM_{Even}, x 모드, (d) TM_{Odd}, x 모드
; ----: Neumann 경계 조건, : Dirichlet 경계조건

그림 4은 각각 (a) TE_{Even}, x 모드, (b) TE_{Odd}, x 모드, (c) TM_{Even}, x 모드, (d) TM_{Odd}, x 모드 ($x = 0, 1$,

2, ...) 에 대한 1/2 모드 경계 영역을 나타내고 있다. 상기 그림에서 “----”는 Neumann 경계 조건 ($\partial\phi/\partial n=0$)을 의미한다. Neumann 경계 조건식에서 ϕ 는 Helmholtz 방정식을 만족하는 스칼라 함수이다. 즉 TE 모드에서는 진행 방향 성분의 자계인 H_z 를 나타내고 TM 모드에서는 진행 방향 성분의 전계인 E_z 를 나타낸다. n 는 윤곽선(그림 1에서 C_1, C_2)에 대한 법선 성분을 의미한다. 또한 “—”는 Dirichlet 경계 조건 ($\phi=0$)을 나타낸다. 다음 절에서는 이러한 경계 조건을 적용한 GM 에 대해 살펴보고자 한다.

III. Galerkin 법을 적용한 모드 해석

내부 도체와 외부 도체 사이의 공간에서 ϕ 는 스칼라 파동 방정식인 2차원 Helmholtz 방정식을 만족하므로 다음과 같다^[14-16].

$$-\nabla_t^2 \Phi = k^2 \Phi \tag{1}$$

$$\nabla_t^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \tag{2}$$

상기 수식에서로서 파수를 의미한다. (1)식은 고유치가 k^2 인 고유치 문제이므로 내적을 통한 GM을 적용할 수 있다. GM 적용 시 우선 선행해야 할 일은 문제 유형에 적합한 기저 함수를 선택하는 것이다. 기저 함수는 구조가 복잡하므로 전 구간 함수 (Entire domain function) 보다는 구간 함수 (Subdomain function)을 선택하는 것이 바람직하다. 구간 함수는 펄스 함수, 삼각 함수, 구간 정현 함수 (piece-wise sinusoidal function), Hermite 함수, Lagrange 함수, Cubic spline 함수 등이 있다. 특히 Cubic spline 함수는 노드(node) 점에서 연속은 물론 1차 및 2차 미분 연속 가능한 함수이고, 한 분할 요소에 대해 여러 함수로 span하므로 적은 기저 함수 수로도 정확한 해석이 가능하다^[24]. 그러나 여기서는 구조가 복잡하고, 특히 모서리(edge)에 대한 경계 조건을 만족하는 함수를 만들기 어려운 점을 감안하여, 각 구간 별 정의가 용이한 삼각함수를 기저 함수로 선택하였다. 상기 (1)식의 ϕ 를 2차원 삼각함수로 근사화하고, 양변에 내적(inner product)을 취해 변수 분리된 적분 형태로 유도하면 다음과 같다^[23].

$$[\beta_{ij}][a_j] = \lambda[\gamma_{ij}][a_j] \tag{3}$$

$$\beta_{ij} = \int_0^{a/2} T(x-x_{ix})T(x-x_{jx})dx + \int_0^b \frac{\partial T(y-y_{iy})}{\partial y} \frac{\partial T(y-y_{jy})}{\partial y} dy + \int_0^b T(y-y_{iy})T(y-y_{jy})dy + \int_0^{a/2} \frac{\partial T(x-x_{ix})}{\partial x} \frac{\partial T(x-x_{jx})}{\partial x} dx \tag{4}$$

$$\gamma_{ij} = \int_0^{a/2} T(x-x_{ix})T(x-x_{jx})dx + \int_0^b T(y-y_{iy})T(y-y_{jy})dy \tag{5}$$

$$T(t-t_{pi}) = \begin{cases} 1 - \frac{t-t_{pi}}{t_{pi+1}-t_{pi-1}} & (t_{pi} \leq t \leq t_{pi+1}) \\ 1 + \frac{t-t_{pi}}{t_{pi}-t_{pi-1}} & (t_{pi-1} \leq t \leq t_{pi}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{6}$$

행렬 방정식 (3)은 $\det |\beta_{ij} - \gamma_{ij}| = 0$ 일때 해를 가지므로 이로부터 고유치 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots (=k^2)$ 을 쉽게 구할 수 있다^[23]. 상기 식들에서 첨자 i 와 j 는 각각 기중함수, 기저함수 번호를 의미하며, 정의 방법은 아래 그림 5 와 같이 하였다.

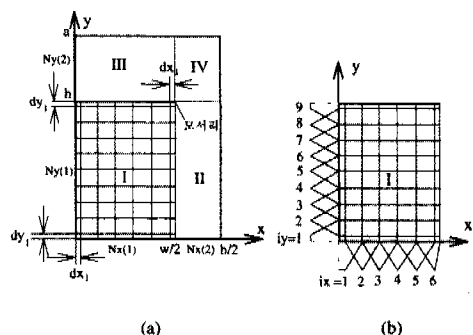


그림 5. GM을 적용하기 위한 1/2 모드 경계 영역의 (a) 분할구간 및 노드점 정의, (b) $TE_{\text{even}, x}$ 모드에 대한 I 구간의 기저함수 정의

그림 5는 $TE_{\text{even}, x}$ 모드에 대한 정의로서, 편리상 전체 구간을 4개 구간 (I, II, III, IV)으로 정의하였다. 왜냐하면 내부도체의 높이와 폭 그리고 외부도체의 높이와 폭 변화에 따른 신속적인 분할 요소

의 수 배치를 운용하기 위함이다. 이러한 분할 요소의 수에 대한 배치가 수치 해석의 정확도에 매우 큰 영향을 준은 익히 알려진 사실이다^[10]. 또한 본 논문의 저자들은 임피던스 행렬 크기가 일정할 때, Neumann 경계 영역에 접한 분할 요소의 길이가 정확도에 매우 큰 영향을 주고 있음을 발견할 수 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 그림 5 처럼 GM을 적용하기 위한 1/2 모드 경계 영역($TE_{x\text{even}}$, x 모드)의 분할 구간 정의에서 Neumann 경계 영역에 접한 법선 성분의 분할 요소 길이(그림5 에서 dx_1 , dx_2 , dy_1 , dy_2)를 나타내었다. 상기 그림에서 표기가 난이하여, dx_1 , dy_1 에 대한 정의를 표기하지 않았다. dx_1 는 II, IV 구간에서 좌우 측 벽에서 정의되는 분할 요소의 x 성분 길이를 의미하고, dy_1 는 III, IV 구간에서 위아래 측 벽에서 정의되는 분할 요소의 y 성분 길이를 의미한다. 각 구간에 대한 분할 요소 길이 및 수를 표 1.에 나타내었다.

표 1. 구간별 분할 요소 길이 및 수

구간	분할요소의 길이 (경계 제외)		분할요소수
	x 성분	y 성분	
I	$(W/2-2dx_1)/Nx(1)$	$(h-2dy_1)/Ny(1)$	$(Nx(1)+1) \cdot (Ny(1)+1)$
II	$(g-2dx_2)/Nx(2)$	$(h-2dy_1)/Ny(1)$	$(Nx(2)+1) \cdot (Ny(1)+1)$
III	$(W/2-2dx_1)/Nx(1)$	$(b-h-2dy_2)/Ny(2)$	$(Nx(1)+1) \cdot (Ny(2)+1)$
IV	$(g-2dx_2)/Nx(2)$	$(b-h-2dy_2)/Ny(2)$	$(Nx(2)+1) \cdot (Ny(2)+1)$

상기 (5)~(6)식처럼 변수 분리에 기초한 GM은 각 기저함수 및 가중함수의 위치 및 분할 요소의 길이가 결정되면 (6) 과 (7)식의 적분 수식을 손으로 쉽게 값을 구할 수가 있다^[23]. 즉 손으로 직접 풀어, 컴퓨터 계산에서 발생하는 반올림 오차(round off error)를 최소화 하였다. 수치해석에서 반올림 오차를 최소화 시키는 일은 매우 중요한 작업이다. 왜냐하면 임피던스 행렬의 크기를 보다 크게 잡을 수 있어 내삽 오차(interpolation error)를 최소로 할 수 있는 조건을 만들어 주기 때문이다. 또한 내부도체의 모서리(그림 5 참조)에 대한 기저함수 처리는 매우 중요하다. 특히 Neumann 경계 조건을 갖는 TE 모드에 대한 처리는 해의 정확도와 밀접한 관계를 갖는다. Mur^[25]는 이러한 모서리에 대한 처리를 위해 Jones^[26]의 모서리 인접에 대한 TE 모드 Φ (즉 H_z) 에 대한 수식에 근거를 두어

정확한 해를 구하였다. 본 논문에서도 또한 TE 모드에서는 모서리 인접에서는 방향과 무관하게 $F(H_z)$ 가 일정한 값을 지니고 있는 특성^[26, 27]을 이용하여 모서리를 중심으로 한 국부 기저 함수(local basis function) 를 적용하였다. TEM cell의 TM 모드에 대한 모서리는 GM에서 큰 영향을 미치지 않고 있음은 익히 알려진 바 이다. 왜냐하면 직각을 이루고 있는 모서리 인접에서 TM 모드 $\Phi(E_z)$ 는 영이 되려는 특성을 갖고 있는 기저 함수의 정의가 매우 용이하기 때문이다^[23]. 다음 절에서는 이러한 수치 해석에 대한 결과를 살펴볼 것이다.

IV. 수치 해석 결과

앞 절에서도 지적했듯이 1/2 모드 경계 영역에 의한 분석은 기존 1/4 모드 경계 영역에 의한 분석이 지원할 수 없었던 비대칭형 TEM cell에 대한 차단 주파수 분석이 가능하다. 게다가 기존 1/4 모드 경계 영역에 의한 대칭형 TEM cell의 분석에서는 $TE_{x\text{even}}$ 모드 차단 주파수를 도파관 수식으로 부터 계산하고 있으나^[18, 19, 20], 본 논문에서는 이들을 포함한 모든 분석이 가능하다. 우선 상기 수치 결과가 얼마 만큼의 정확도를 유지하는 지를 보기 위해, 여러 연구가들의 결과가 있는 기존 대칭형 TEM cell 구조의 차단 주파수에 대해 적용하여 비교한 결과를 표2에 나타내었다.

표 2. 대형 대칭형 TEM cell의 차단 주파수

모드	차단주파수 f_c (MHz)					
	FEM [20]	TLM [19]	Hill [16]	Wilson [17]	도파관 수식	제한된 방법
TE ₀₁	15.3	15.1	15.2	15.5	-	15.2
TE ₁₀	-	-	-	-	24.6	24.6
TE ₁₁	31.2	31.0	31.3	31.9	-	31.1
TE ₀₂	-	-	-	-	41.1	41.2
TE ₂₁	45.5	45.4	45.4	52.9	-	45.5
TE ₁₂	-	-	-	-	47.8	47.9
TE ₂₀	-	-	-	-	49.2	49.2
TE ₀₃	54.2	-	-	-	-	54.2
TE ₁₃	62.1	-	-	-	-	61.3
TE ₂₂	-	-	-	-	64.1	64.2
TE ₂₃	73.2	-	-	-	-	72.6
TE ₃₀	-	-	-	-	73.8	74.0
TE ₃₁	76.9	-	-	-	-	75.8
TE ₁₂	-	-	-	-	84.4	84.7
TE ₃₃	87.2	-	-	-	-	86.5
TM ₁₁	47.9	47.6	47.5	52.2	-	47.8
TM ₁₂	-	-	-	-	47.8	48.0
TM ₂₁	64.3	-	-	-	-	63.8
TM ₂₂	-	-	-	-	64.1	64.2

표2에서는 $N_x(1)=9, N_x(2)=5, N_y(1)=11, N_y(2)=11$ 일 때, 대형 대칭형 TEM cell [20] ($a=6.1\text{m}, b=7.6\text{m}, w=4.06\text{m}$)에 대해 계산된 차단 주파수를 비교하였다. 표2에서 Wilson의 수식 [17]은 g 가 비교적 크므로 비교적 부정확한 결과를 나타내고 있음을 볼 수가 있다. 그의 논문 [17]에서 지적하듯이 g 가 크면 전반적으로 부정확하고, 특히 TM모드의 차단 주파수는 이와는 상관없이 부정확하다고 보고 하고 있다. 이러한 관점에서 Wilson의 결과[17]보다는 FEM 법[20] 및 TLM 법[19]으로 해석된 값이 보다 정확한 값으로 보인다. 그러나 본 논문에서 제시된 GM에 의한 해석 결과는 전반적으로 Hill의 결과 (Gruner의 수식 결과치[15]이며, Hill이 실험적으로 확인한 결과임[16])에 근접하고 있음을 볼 수가 있다. FEM법, TLM법, 그리고GM법의 대칭형 TEM cell 차단 주파수 해석 결과 중에 어느쪽이 정확한 가라는 질문에 대한 응답은 확신할 수 없다. 왜냐하면 각각 분할 요소의 수 혹은 셀의 수를 얼마만큼 나누어 해석하였고, 어떠한 방식으로 분배하였는 지에 따라 각기 다른 값을 나타낼 수 있기 때문이다. NIST (National Institute of Standards Technique)에서 제작된 모델인 $a=b=3\text{ m}, w=2.48\text{m}, L_e=L_c=3.0\text{m}$ 구조를 갖고 있는 대칭형 TEM cell에 적용해 보고, Wilson [17]의 수식 결과와 그리고 Hill의 실험치와 비교한 결과를 표3에 나타내었다.

표 3. NIST에서 제작된 대칭형 TEM cell의 차단 주파수 및 공진 주파수

모드	Wilson 수식[17]			제안된 방법		실험치[16] f_c (MHz)
	f_c (MHz)	X_{mn} [16]	f_c^* (MHz)	f_c (MHz)	f_c^* (MHz)	
TE ₀₁₁	29.2	0.77	40.6	29.2	40.6	40.0
TE ₀₁₂			63.5		63.5	63.0
TE ₀₁₃			89.5		89.5	89.0
TE ₁₀₁	50.0	0.47	60.5	50.0	60.5	60.0
TE ₁₀₂			84.4		84.4	84.0
TE ₁₁₁	64.3	0.43	73.2	64.2	73.1	73.0
TE ₁₁₂			95.0		94.9	95.0
TM ₁₁₀	115.9	1.00	115.9	112.1	112.1	-

$$*f_c = (f_c^* + (pc/2L_{mn})^2)^{0.5}, L_{mn} = X_{mn}L_e + L_c, p = 1, 2, [16].$$

앞에서도 언급하였듯이, 상기 표에서 Wilson의 수식 결과는 외부도체가 표3 처럼 정사각형($a=b$)을 유지하는 50Ω 대칭형 TEM cell의 경우, 내부도체

와 외부도체 사이의 간격이 작아지기 때문에 표2의 결과와는 달리 Hill의 결과치에 매우 근접한 것이다. 상기 표에서 처럼 본 논문에서 제시된 방법도 Hill의 실험치에 매우 일치하고 있음을 볼 수가 있다. 그러나 TM 모드의 계산 결과는 약간의 차를 보이고 있음을 볼 수가 있었다.

다음은 제안된 수치 해석을 비대칭형 TEM cell에 확대 적용하도록 할 것이다. 내부도체가 +y 방향으로 올림에 따라 즉 내부도체의 높이가 높아지거나, 낮아짐에 따라 TE₀₁ 모드 차단 주파수가 높아지는 현상과, 내부 도체 폭이 감소함에 따라 높아지는 현상이 있음이 보고 되었다[23]. 이러한 특성은 비대칭형 TEM cell이 대칭형 TEM cell 보다도 사용 주파수 대역이 넓어지고 있음을 의미한다. 이미 앞 절(그림2. 참조)에서 지적하였듯이 내부도체를 +y 방향 (혹은 -y방향)으로 올림에 따라 50Ω 특성 임피던스 정합을 위해서는 내부 도체 폭이 그 만큼 줄어들 수 밖에 없음을 그림 2를 통해 확인할 수 있다.

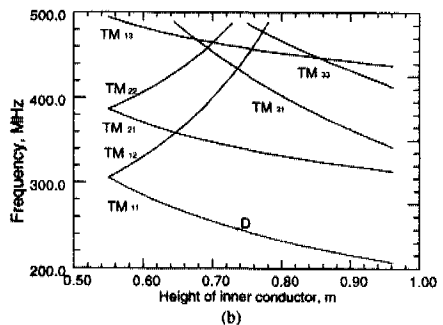
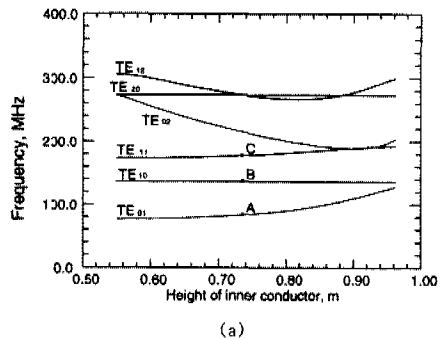


그림 6. $a=b=1.1\text{m}$ 인 50Ω 비대칭 TEM cell에서 내부도체를 올림에 따른 (a) TE 모드, (b) TM 모드 차단 주파수

즉 내부 도체와 외부 도체 벽 사이의 간격가 매우 커지므로 Wilson의 수식은 비대칭 TEM cell의

차단주파수를 해석하는 데 부적합하다는 것을 볼 수가 있다. 50Ω 비대칭형 TEM cell들의 차단주파수가 어떻게 변화하고 있는지를 분석하는 일은 설계상 매우 중요한 의미를 갖는다. 왜냐하면 프로브 고정, 무선기기 감도 측정용 등에 활용되는 TEM cell을 설계 시, 사용 주파수에 의해 외부 도체의 폭 및 길이를 결정해야 하기 때문이다. 그림 2 처럼 내부 도체의 높이가 높은 곳에 위치함에 따라 50Ω 특성 임피던스를 유지하기 위해서는 내부도체 폭이 감소하고 있어, TE₀₁ 모드 차단 주파수는 더욱 높아질 것임을 쉽게 예측할 수가 있다. 그림6는 그림2의 구조에서 내부도체가 임의의 위치에 놓이는 50W 비대칭 TEM cell들의 차단주파수를 나타내고 있다. TEM cell의 내부도체를 +y 방향으로 이동시킬 때의 TE 모드 차단 주파수 특성은 그림 6(a)에 그리고 TM 모드 차단 주파수 특성은 그림 6(b)에 각각 나타내고 있다. 내부도체가 +y 방향으로 이동함에 따라, 앞서 예측했듯이 TE₀₁ 모드의 차단주파수가 증가함을 볼 수가 있다. 그러나 대칭형 TEM cell에서, TE_{x, even} 모드와 TM_{x, even} 모드의 차단주파수는 Weil과 Gruner 논문 [3]에서 지적되고 있듯이, 내부도체를 제거시킨 구형 도파관의 TE_{x, even} 모드와 TM_{x, even} 모드의 차단주파수와 같은 값으로 일정하다고 보고되고 있으나, 비대칭형 TEM cell에서는 내부도체가 +y 방향으로 이동함에 따라, TE_{x0} 모드 (x = 1, 2, 3 ...)의 차단 주파수만 일정한 특성을 가지고 있고, 다른 모드들은 내부 도체의 위치에 영향이 크게 작용하고 있다. 즉 TE_{x0}모드를 제외한 TE_{x, even} 모드와 TM_{x, even} 모드에 대해서 대칭형 TEM cell처럼 도파관 수식을 적용할 수 없음을 볼 수 있는 것이다. 표2. 와 그림 6 (a)의 결과를 통해 지금까지 논란이 되고 있던 TEM cell에서의 TM₁₁ 모드와 TM₁₂ 모드 차단주파수 특성이 명백히 나타나고 있음을 볼 수가 있다. 표 2에서 본 논문에서 제안된 GM에 의한 계산 결과는 TM₁₁ 모드 차단 주파수는 FEM의 결과치^[20]에 접근하고 있으나, “TM₁₂ 모드 차단주파수가 TM₁₁ 모드 차단주파수보다 작게 나타난다”는 S. K. Das and B. K. Sinha의 결론^[20]에 대해서는 지지할 수 없다. 왜냐하면 그림 6 (a)에서 볼 수 있듯이, 내부도체가 중심에서 멀어질 수록 TM₁₂ 모드 차단주파수는 TM₁₁ 모드 차단주파수보다 항상 큰 값을 나타내는 특성을 보이고 있으며, 내부 중심으로 갈수록 그 크기가 같은 값으로 가는 물리적인 현상이 관찰되고 있기 때문이다. 또한 표 2에서 처럼 대칭형인 경우 즉 내부도

체가 중심에 있을 때, TM₁₂ 모드 차단주파수는 TM₁₁ 모드 차단주파수보다 항상 큰 값을 갖고 있기 때문이다. 그러므로 “TM₁₂ 모드 차단주파수는 TM₁₁ 모드 차단주파수보다 항상 큰 값을 갖는다”라는 Z. Jingjun and F. Junmei의 결론^[19]이 매우 타당성 있는 결론인 것이다.

그림3의 직접 제작된 비대칭형 TEM cell (a=b=1.1m, w=0.913m, L_c=1.1m 그리고 L_s=1.1m)에 대해 GM을 적용한 수치 결과와 측정된 결과를 표4에 나타내었다.

표 4. 직접 제작된 비대칭형 TEM cell의 차단 주파수 및 공진 주파수

공진 모드	차단주파수 f _c (MHz)	유효길이		공진 f _r (MHz)	
		X _{max} [16]	c/2L _{min}	계산치	측정치
TE ₀₁₁	83.16	0.77	74.11	111.39	109.89*
TE ₀₁₂			148.22	169.96	169.09*
TE ₁₀₁	136.4	0.47	90.14	163.49	167.89**
TE ₁₀₂			180.29	226.07	230.95**
TE ₁₁₁	177.15	0.43	92.82	199.99	203.95**
TE ₁₁₂			185.64	256.60	256.39**
TM ₁₁₀	245.9	1.00	0.00	245.9	245.35*

* 주파수 소인에 의한 내부 전계 변화를 이용한 측정법, ** VSWR 측정법

그림6로 부터 TE₀₁ 모드 차단 주파수는 83.16 MHz (그림6(a)에서 “A”) 이고, TE₁₀ 모드 차단주파수는 136.4 MHz (그림6(a)에서 “B”) 이고, TE₁₁ 모드 차단주파수는 177.15 MHz (그림6(a)에서 “C”) 이고, TM₁₁ 모드 차단주파수는 245.9 MHz (그림 6(b)에서 “D”) 임을 볼 수가 있다. Hill의 공식^[16]으로 각 모드에 대한 유효 길이를 계산하여 공진 주파수를 계산하였다.

그림 7에 상기 제작된 비대칭형 TEM cell의 VSWR 측정 결과를 나타내었다. Hill의 보고에서 처럼, VSWR 측정을 통해 측정되는 공진 주파수는 내부 피시험체의 위치에 따라 간섭을 유발하기 쉬운 공진 주파수인 TE_{10x}, TE_{11x} 모드가 측정되고 있음을 볼 수가 있다. 그림 7에서 마커(marker) 1은 167.89 MHz (TE₁₀₁ 모드), 마커 2은 203.95 MHz (TE₁₁₁ 모드), 마커 3은 230.95 MHz (TE₁₀₂ 모드) 그리고 마커 4는 256.39 MHz (TE₁₁₂ 모드)임을 볼 수가 있다. 상기 측정치는 계산치와 잘 일치하고 있음을 볼 수가 있다. 또한 VSWR 측정에서 잡히지 않는 제1차단 주파수에 대한 공진 주파수(TE₀₁₂ 모

드, TE₀₁₂ 모드)는 주파수 소인에 의한 내부 전계 변화를 이용한 측정법^[16]으로 측정할 수 있었다. 측정 결과 표4.에서 처럼 계산치와 좋은 일치율을 보이고 있다.

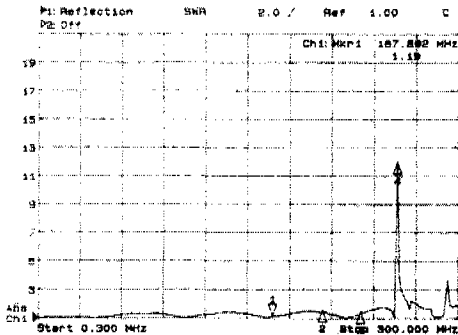


그림 7. 제작된 비대칭형 TEM cell의 VSWR

V. 결론

본 논문에서는 비대칭형 TEM cell에 대해서도 적용 가능한 1/2 모드 경계 영역을 제시하고 변수 분리에 기초한 Galerkin법을 적용하여 수치해석을 시도하였다. 기존 여러 모델에 대해 적용한 결과 실험치에 근접한 결과를 얻어낼 수 있었다. 비대칭형 TEM cell에 대한 정확한 차단 주파수 및 공진 주파수의 예측 가능하게 되었다. 또한 직접 제작된 비대칭형 TEM cell에 적용한 결과, 대칭형 TEM cell 처럼 VSWR 측정을 통해 TE_{01x}, TE_{11x} 모드 공진 주파수를, 주파수 소인에 의한 내부 전자계 분포 측정을 통해 TE_{01x}, TM_{11x} 모드 공진 주파수를 측정할 수 있음을 보았으며, 계산치와 잘 일치하고 있음을 보았다. Weil에 의해 대칭형 TEM cell에서는 TE_{x, even} 와 TM_{x, even} 모드는 내부 도체가 영향을 주지 않는다고 보고 되었으나, 비대칭형 TEM cell에서는 내부도체가 +y 방향으로 이동함에 따라, TE_{x0}모드 (x = 1, 2, 3 ...) 이외의 모든 모드에 대해 영향을 주고 있음을 볼 수 있었다. 또한 내부도체가 중심에서 멀어질 수록 TM₁₂ 모드 차단주파수는 TM₁₁ 모드 차단주파수 보다 항상 큰 값을 나타내고 있으며, 내부 중심으로 갈수록 그 크기가 같은 값으로 가는 현상이 관찰할 수 있었다.

상기 논문을 통해 완성된 프로그램은 프로브 혹은 무선기기 감도 측정 등에서 활용되는 특정 주파수 대역에 대한 소형 TEM cell을 개발하거나, 인체

위해 연구나 비행기 혹은 탱크와 같은 군사 시설에 대한 EMP 시험용 대형 TEM cell을 설계 시 직접 적용 가능하다.

참고 문헌

- [1] M. L. Crawford, "Generation of standard EM fields using TEM transmission cells," IEEE Trans. on EMC, 16, pp.189~195, 1974.
- [2] M. L. Crawford and J. L. Workman, "Asymmetric versus symmetric TEM cell for EMC measurements," IEEE Symp. on EMC, Atlanta, pp.368~375, 1978.
- [3] 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
- [4] L. Carbonini, "Modal analysis of multi-connected waveguides," IEEE Trans. on MTT, vol. 40, pp.665~671, 1992.
- [5] F. B. J. Leferink, "A Triple TEM cell: three polarization in one setup," Proc. 10th Inter. Symp. on EMC, Zurich, pp.573~578, 1993.
- [6] 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, 1998 .
- [7] S. K. Das, V. Venkatsan, G. Uma, and B. K. Sinha, "A technique of electro-magnetic 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.
- [8] 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.
- [9] 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, E81-B(6), pp. 1286~1289, June 1998.
- [10] 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., 32(23), pp. 2127 ~ 2128, 1996.
- [11] Jae-Hoon Yun and Jung-Ki Kim, "Circular TEM cell for generating standard electromagnetic field," Electron. Lett., 33(22), pp. 1853~1856, 1997.
- [12] IEC 1000-4-20, "Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4: Testing and measurement techniques-Section 20: Immunity and emission in TEM cells," 1995.
- [13] ISO/TC 22/SC 3, "Road vehicles-Electrical disturbances by narrow-band radiated electromagnetic energy-Component test methods-Part 3: Transverse electromagnetic mode (TEM) cell." 1993.
- [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(3), pp. 125~130, August 1986.
- [18] R. Lampe et al., "Analysis and experiment concerning the cutoff frequencies of rectangular striplines," IEEE Trans. MTT, vol. MTT-34, pp. 898~899, August 1986.
- [19] Z. Jingjun and F. Junmei, "Higher order mode cutoff frequencies in TEM cells calculated with TLM method," IEEE Trans. EMC, vol. EMC-30(4), pp. 563~567, November 1988.
- [20] 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, vol. EMC-32(4), pp. 264~268, November 1990.
- [21] 윤재훈, 최익권, "모멘트법을 이용한 임의의 구형 내부도체를 갖는 TEM cell의 특성 분석," 한국통신학회 논문지, Vol.15, No.11, pp. 898~908, 1990. 11.
- [22] 윤재훈, "8단자 가변 임피던스 전자파발생장치를 이용한 표준 복사 전자기장 조성 연구," 한국통신학회 논문지, Vol.21, No.3, pp. 771~784, 1996. 3.
- [23] 윤재훈, 최익권, "TEM cell들의 고조 모드 차단주파수에 대한 수치 코드 개발," 한국전자통신논문지, Vol. 12(4), pp. 61~ 72, 1991.1.
- [24] 이직렬, "회전형 완전 도체의 전자장 특성에 관한 적분 방정식 유도 및 수치 해법," 중앙대학교 박사학위 논문, 1985.
- [25] G. Mur, "The modeling of singularities in the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equation," IEEE Trans. MTT, vol. MTT-29(10), pp.1073~1077, October 1981.
- [26] D.S. Jones, *Theory of Electromagnetism*, Oxford, England: Pergamon, 1964, pp. 566
- [27] 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," IEEE Trans. EMC, 1999 (to be published).

윤재훈(Jae-hoon Yun) 정희원
 1984년 중앙대학교(공학사)
 1999년 중앙대학교(공학박사)
 1990년~현재 한국전자통신연구원 선임연구원
 <주관심 분야> 표준 전자파 발생기술, 전자파 적합성 기술, PCB 복사 해석기 개발, 그리고 안테나 교정 기술 개발

이혁재(Hyuck-jae Lee) 정희원
 1968년 서울대학교(공학사)
 1982년 Oregon State University(공학박사)
 1982년~현재 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소장
 1998년~현재 한국전자파학회 회장

