

FDTD를 이용한 TEM Cell의 차단주파수에 관한 분석

Analysis of Cutoff Frequencies of TEM Cell using FDTD

윤영설 · 공순철 · 윤재훈* · 김정기

Young-Seol Yun · Soon-Cheol Kong · Jae-Hoon Yun* · Jeong-Ki Kim

요 약

본 논문에서는 FDTD법을 이용하여 TEM Cell의 차단주파수를 분석하고, 모드를 확인하기 위하여 FDTD에 맞는 경계조건 등 분석방법을 제시한다. 그리고 이전에 발표된 논문들과의 결과비교를 통해 FDTD의 효율성을 확인한다. 그와 더불어 이전에 발표된 논문들 중에서 TEM Cell 특히 symmetric TEM Cell의 차단주파수에서 논쟁이 되었던 부분에 대해 FDTD 결과를 이용해 의견을 제시한다.

Abstract

In this paper, we analyze the cutoff frequencies of the TEM Cells by the FDTD, and introduce new boundary condition for the FDTD to identify the modes. Then, we confirm efficiency of the FDTD comparing results in previous papers. We also give our opinion from the results by FDTD to the arguments, which is resulted from different results about cutoff frequencies in the TEM Cells, especially the symmetric TEM Cells

I. 서 론

TEM Cell은 1974년 Crawford^[1]에 의해 개발되어서, 현재까지 많은 변화와 발전을 이루어왔다. 그와 더불어 TEM Cell의 분석을 위한 다양한 방법들도 제시되었다. 그 중에서 본 논문에서는 TEM Cell의 차단 주파수에 관한 부분만을 다룰 것이다.

TEM Cell에서 요구되는 가용 주파수 대역이 높아짐으로써, 고차모드의 사용이 불가피해졌다. 따라서 고차모드의 그 차단주파수의 분석이 TEM Cell의 주요한 부분이 되었다. TEM Cell의 차단주파수에 관한 분석은 여러 구조에 대해서 여러 가

지 방법으로 행해졌다. 특히 Symmetric TEM Cell의 차단주파수에 대해서는 많은 논문이 발표되었다. 우선 Hill^[1]의 실험에 의한 결과, Wilson & Ma^[3]의 분석적 방법에 의한 결과, Chang^[4]이 제시한 TLM법에 의한 결과 그리고 DAS와 Shin-ha^[5]가 제시한 FEM법에 의한 결과등이 발표되었다. 이 논문들을 비교해 보면 서로 상이한 부분이 존재한다. 이 부분에 대해, FDTD결과를 이용해 해답을 제시하고자 시도한다.

FDTD(유한차분 시간영역 : Finite Difference Time Domain)는 현재 널리 알려진 수치해석법으로 전자계 분포를 구하기 위해 맥스웰 방정식의 미분형을 직접 사용하므로, 시간상의 전자계 분포

* 중앙대학교 전파통신연구실(Radio Laboratory, Chungang University)

* 한국전자통신연구원(ETRI)

· 논 문 번 호 : 980907-084

· 수정완료일자 : 1998년 11월 26일

를 직접 확인할 수 있다는 장점이 있고, 또 본 논문의 결과에서처럼 주파수 영역의 해석도 가능하다. Navarro는 FDTD를 이용하여 EM Device의 차단 주파수 해석 방법을 [6]에서 간단한 Device에 대해 처음 제시했으며, 또한 [7]에서는 각 모드에서의 필드 분포를 알아낼 수 있었다. 하지만 장치의 구조가 복잡해지면서, 해석 방법에도 변화가 필요해졌다. 본 논문에서는 다른 수치해석법에서 이용된 경계조건을 FDTD에 적용시켜 각 모드를 해석하는데 효율을 높였다.

본 논문의 결과는 TEM Cell의 차단 주파수를 처음으로 FDTD를 이용해 구한 것이다. 그래서 FDTD에 맞는 분석방법을 개발하게 되었으며, 그 방법을 이용한 결과는 유한 차분에 의한 오차를 고려한다면 비교적 정확한 값을 나타내었다. 이러한 분석방법은 차후 좀 더 복잡한 구조를 가진 전자기 장비의 차단주파수를 구하고, 모드를 확인하는데 이용될 수 있을 것이다.

FDTD의 결과에 의한 어떤 모드의 필드분포를 보면, TEM Cell 내부의 가장자리에서는 일치하지만 시험 영역내에서는 일치하지 않는 경우가 있다. 그 특성을 연구할 필요성이 있겠다. TEM Cell의

모드 해석 과정에 도파관과는 달리, TE21모드에서 감지되어서는 안 되는 E_y 성분이 감지되었다. 이것은 TEM Cell과 도파관의 구조차이에 의해 생성되는 것으로 여겨지지만, 앞으로 이 부분에 대해서도 연구가 필요하겠다.

II. 분석방법

차단주파수를 구하기 위해서는 3차원 모의실험보다는 2차원 모의 실험이 간편하며, 더욱 정확한 값을 구하는 것으로 알려져 있다^{[6],[7]}. 본 논문에서도 2차원 모의실험을 통해 차단주파수를 구하게 되며, 도체는 완전도체로, TEM Cell 내부는 자유 공간으로 가정하였다.

본 논문에서는 [4]에서 사용된 경계 조건을 FDTD에 적용시켰다. 그림 1은 FDTD의 공간상의 셀을 나타낸 것으로, 경계면에서는 그 면에 평행한 전계 성분과 수직인 자계 성분만 존재한다는 것을 알 수 있다.

그림 2는 Symmetric TEM Cell의 단면을 나타내었다. 본 논문에서는 시간과 메모리 사용효율을 높이기 위해 전체 영역의 해석보다는 A영역만을

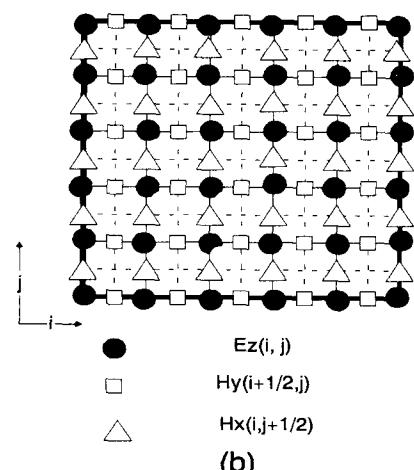
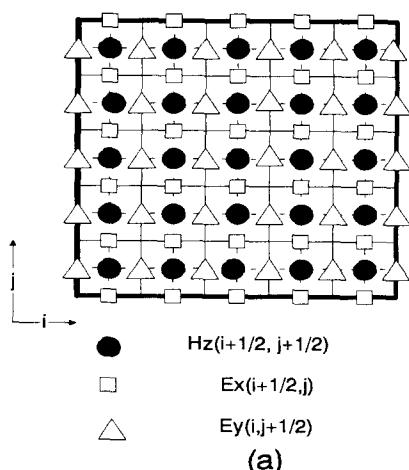


그림 1. FDTD Cells. (a) TE mode에 대해, (b) TM mode에 대해

Fig. 1. FDTD Cells. (a) for TE modes, (b) for TM modes

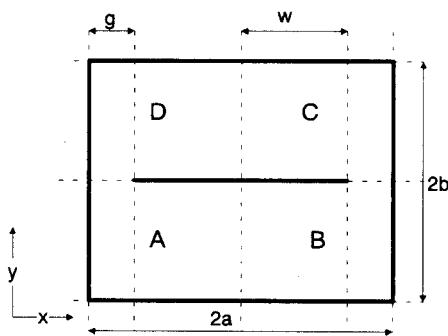


그림 2. Symmetric TEM Cell의 단면

Fig 2. Cross section of symmetric TEM Cell.

해석하였다. 그리고 결과는 전체 영역에 대한 해석과 동일한 것으로 확인되었다. A영역만을 해석하기 위해서는 경계 조건을 설정해 주어야 하는데, 본 논문에서는 [4]에서 사용된 경계조건을 FDTD에 맞게 바꾸었다. 위에서 설명한 경계면에서의 전자계 성질을 이용하여 경계가 금속(그림 3에서 굵은 실선, 완전도체로 1 가정)일 경우 전계와 자계의 각 성분이 0의 값을 가지게 하고, 폐경계면(그림 3에서 가는 실선)일 경우는 식 (1), (3)를 적용하고,

개경계면(그림 3에서 가는 점선)일 경우는 식 (2), (4)를 적용시켰다. 여기서 금속도체에서는 전계와 자계가 모두 적용되지만, 폐경계면과 개경계면에서는 전계성분만 고려해 주면 되므로, 이것이 FDTD의 알고리즘을 간편하게 한다. 아래 식은 $y=b$ 인 경계면에서의 경계조건식을 나타내고 있다.

TE 모드에 대해

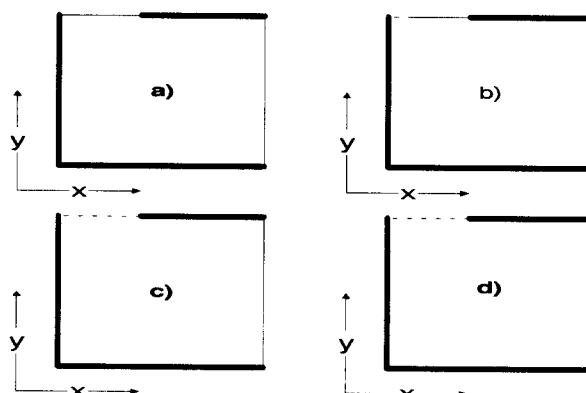
$$E_x(n+1, i+1/2, b) = C_1 \cdot E_x(n, i+1/2, b) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E_x(n+1, i+1/2, b) &= C_1 \cdot E_x(n, i+1/2, b) \\ &\quad - 2 \cdot C_2 \cdot [Hx(n+1/2, i+1/2, b-1/2) \end{aligned} \quad (2)$$

TM 모드에 대해

$$\begin{aligned} E_z(n+1, i, b) &= C_3 \cdot E_z(n, i, b) \\ &\quad + C_4 \cdot [Hy(n+1/2, i+1/2, b) \\ &\quad - Hy(n+1/2, i-1/2, b)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_z(n+1, i, b) &= C_3 \cdot E_z(n, i, b) \\ &\quad + C_4 \cdot [Hy(n+1/2, i+1/2, b) \end{aligned}$$

그림 3. 경계 조건 (a) TE(2m, 2n) 모드에 대해 ($m, n=0, 1, 2, \dots$), (b) TE(2m+1, 2n)모드에 대해
(c) TE(2m, 2n+1)모드에 대해, (d) TE(2m+1, 2n+1)모드에 대해

굵은 실선 : 금속(완전도체로 가정), 가는 실선 : 폐경계면, 가는 점선 : 개경계면

Fig 3. Boundary condition. (a) for TE(2m, 2n), ($m, n=0, 1, 2, \dots$), (b) for TE(2m+1, 2n),
(c) for TE(2m, 2n+1), (d) for TE(2m+1, en+1)

thick lines : metal(PEC), thin dotted lines : closed boundary, thin lines : open boundary.

$$+ 2 \cdot C_5 \cdot [H_x(n+1/2, i, b-1/2)] \quad (4)$$

여기서 C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 는 FDTD에서 이용되는 계수들이다^[8].

III. 결과와 비교

첫번째로 Symmetric TEM Cell에 대해 차단 주파수를 구하고 모드 특성을 확인하였다($a=3.05\text{ m}$, $b=3.65\text{ m}$, $g=1.02\text{ m}$). 표 1에서와 같이, FDTD에 의한 결과는 다른 방법에 의한 결과들과 비교하여 차이가 거의 없다. 그리고 아직까지 제시되지 않은 각 모드에서의 전자계 분포도 직접 확인할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에 의해 도출된 결과에 의해서도 역시 각 모드가 정확하게 나타났다. 하지만, 이 결과는 [2]의 결과와는 다르고, [4]의 결과와 아주 유사하다. [2]에서 Hill은 TE21모드가 TE20모드보다 낮은 주파수에서 출현한다고 주장했다. [4]에서 Zhang은 모드와 차단주파수와의 관계를 근거로 TE21모드가 아니라, TE03모드일 것이라고 주장했고, [9]에서도 이 부분에 대한 언급을 하고 있다. FDTD에 의한 결과는 전자계 분포

표 1. Symmetric TEM Cell의 차단 주파수

($a=3.05$, $b=3.65$, $g=1.02$)

Table 1. Cutoff frequencies in a Symmetric TEM Cell.

Mode	차단주파수(MHz)			
	FDTD	TLM	Hill	Wilson&Ma
TE01	15.0	15.2	15.2	15.5
TE10	24.6	24.6	24.6	24.6
TE11	31.0	31.0	31.3	31.9
TE02	41.0	41.1	41.1	41.1
TE12	47.9	47.8	47.8	47.8
TE20	49.2	49.2	49.2	49.2
TE03	45.2	45.4	45.4	-

*Hill은 TE21 모드로 주장하였다.

로써 [4],[9]의 주장을 지지한다.(그림 4).

그림 4를 보면, x축으로 자계가 항상 양수임을 알 수 있다. 그리고 y축으로의 변화를 관찰해 보면, 자계가 양수에서 음수로, 그리고 경계면에서는 0으로 된다. 이것은 TE m,n 모드에서 m 이 0이고 n 이 3임을 나타낸다. 이로써 45.4 MHz에서는 TE03모드임을 알 수 있다. 이것은 다른 주파수에서 모드 확인 결과를 토대로 추정한 것이지만, 차단 주파수를 정확하게 찾아 내었고, 다른 모드와의 유사성을 통해 찾아낸 것이기에 TE03모드라고 확신하는 것이다. 여기서 새로이 발생한 문제는 TEM Cell의 공간상의 시험 영역에서의 모드가 확실하지 않다는 것이다. 이 부분에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다. 그리고 그림 5와 같이, 54.5 MHz에서의 자계 분포를 분석해보면 이것이 TE21모드라는 것을 확인할 수 있다.

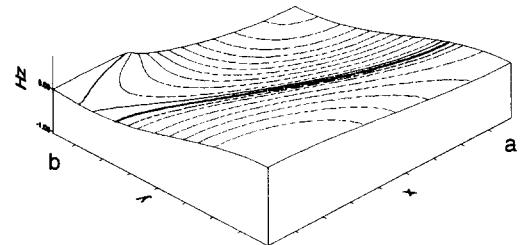


그림 4. TE03모드의 자계 분포($fc=45.2\text{ MHz}$)

Fig. 4. Magnetic field distribution of TE03 mode in $fc=45.2\text{ MHz}$.

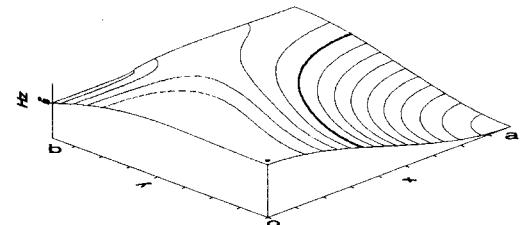


그림 5. TE21모드의 자계 분포($fc=54.0\text{ MHz}$)

Fig. 5. Magnetic field distribution of TE21 mode in $fc=54.0\text{ MHz}$.

표 2. Symmetric TEM Cell의 정규화된 차단 주파수
 $2a/\lambda_c$ ($a/b=2$)

Table 2. Normalized cutoff frequencies $2a/\lambda_c$ for the higher order modes in a symmetric TEM Cell.

W/a	$2a/\lambda_c$				
	TE01	TE11	TW21	TM11	TM21
0.0	1.0000	1.1180	1.4242	1.1180	1.4142
0.1	0.9789	1.1174	1.3869	1.3704	1.4408
0.2	0.9162	1.1163	1.3330	1.4617	1.5013
0.3	0.8227	1.1086	1.2956	1.5640	1.5904
0.4	0.7237	1.0800	1.2824	1.6883	1.7114
0.5	0.6368	1.0515	1.2813	1.8357	1.8664
0.6	0.5609	0.9932	1.2780	1.9731	2.0413
0.7	0.4938	0.9184	1.2615	2.0380	2.1744
0.8	0.4300	0.8359	1.2208	2.0534	2.2228
0.9	0.3596	0.7424	1.1570	2.0556	2.2316

표 3. Symmetric NBS Cell의 차단 주파수

($a = b = 1.5$, $g = 0.26[\text{m}]$)

Table 3. Cutoff frequencies in a Symmetric NBS Cell.

Mode	차단주파수[MHz]		
	FDTD	TLM	Wilso&Ma
TE01	27.8	29.0	29.2
TE10	50.0	50.0	50.0
TE11	63.1	63.9	64.3
TM11	111.4	111.8	115.9
TM12	111.4	111.8	111.8

두번째로 $a/b=2$ 일 때, w 의 크기에 따른 Symmetric TEM Cell의 차단 주파수에 대해서 분석해 보았다. 표 2는 각 모드와 변화된 w 에 대해 차단 주파수를 정규화시켜 나타내었다. 그리고 그 결과

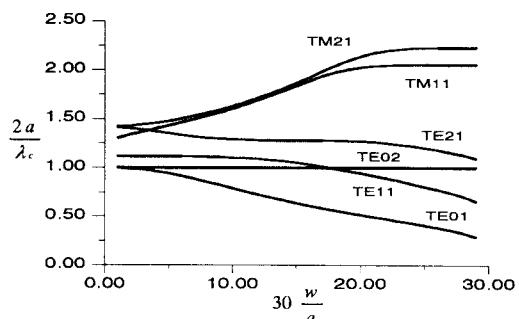


그림 6. Symmetric TEM Cell의 정규화된 차단주파수 $2a/\lambda_c$ ($a/b=2.0$)

Fig. 6. Normalized cutoff frequencies $2a/\lambda_c$ of symmetric TEM Cell.

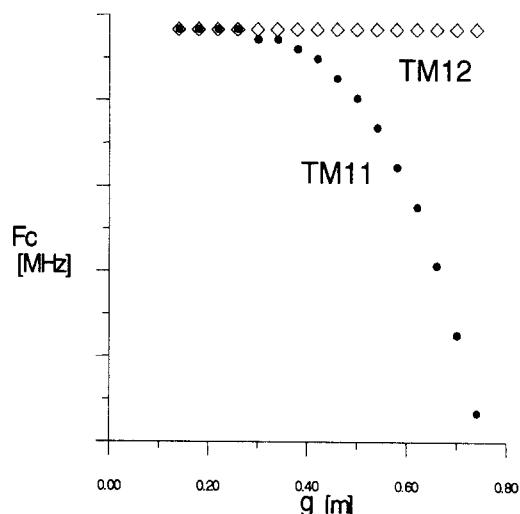


그림 7. g 의 변화에 따른 Symmetric NBS Cell의 차단주파수 ($a = b = 1.5[\text{m}]$)

Fig. 7. Cutoff frequencies of symmetric NBS Cell as g varies ($a = b = 1.5[\text{m}]$).

를 그림 6에 도시하였다. 이 결과는 TLM과 아주 유사하게 나왔으나, 작지만 오차가 발생하였음을 알 수 있다. 그리고 이 그림을 통해 TM21모드는 TM11모드보다 항상 높은 주파수에서 출현함을 확인할 수 있고, 따라서 본 논문의 결과에 의하면 일부 주파수 영역에서 TM21모드가 TM11모드보다 낮은 주파수에서 출현한다는 Grunner의 주장

[10]은 옳지 않음을 알 수 있다.

세번째로 [1],[2],[4]에서 분석된 Symmetric NBS Cell에 대한 차단 주파수를 분석해 보았다 ($a=b=1.5\text{ m}$, $g=0.26\text{ m}$). 표 3은 결과를 정리한 것으로, TE01모드를 제외하고는 결과가 아주 유사한 것을 알 수 있다. TM모드에 대한 결과를 보면 TLM법에 의한 결과와는 거의 일치하지만, [2]와는 많은 차이가 있다. FDTD의 결과는 [4]의 결과와 마찬가지로 TM11모드가 TM12모드보다 항상 같거나 낮은 주파수에서 출현함을 알 수 있다. 이것을 그림 7에 나타내었으며, g 의 크기가 감소할수록 TM11모드의 차단 주파수가 TM12모드의 차단 주파수에 수렴해 가지만, TM12보다 높은 차단 주파수를 가지지 못한다. 그래서 [2]의 결과는 잘못된 것임을 알 수 있다.

위의 결과들의 정확성은 셀의 크기를 조정하거나, 전체 분석시간 N 을 많이 할수록 매우 향상된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 FDTD를 이용하여 여러 구조의 Symmetric TEM Cell의 차단주파수에 대해서 분석해보았다. 첫번째 결과와 같이 FDTD는 찾아낸 차단주파수에서의 필드 분포를 통해 모드를 확인함으로써 다른 수치해석법보다 좀 더 정확한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 그리고 다양한 구조의 분석으로 FDTD가 TEM Cell의 차단주파수 분석에 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

그리고 각 모드에서의 필드 분포도 확인할 수 있었다. TEM Cell을 고차모드에서 효과적으로 이용하기 위해서는, 이 결과를 실험을 통해 검증하는 과정이 요구된다. 따라서 추후 연구 과제는 이 차단주파수 분석의 정확도를 높이는 기술 개발과 더불어 고차 모드에서 찾아낸 필드 분포를 효율적으로 이용하기 위한 실험과 기술 개발에 집중될 필요가 있겠다.

참 고 문 헌

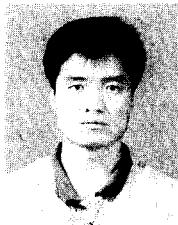
- [1] M. L. Crawford, "Generation of standard EM fields Using TEM transmission cells", *IEEE Trans. EMC*, EMC-16, 189-195, Nov. 1974.
- [2] D. A. Hill, "Bandwidth limitations of TEM cells due to resonances", *J. Microwave Power*, vol. 18, pp. 181-195, June 1983.
- [3] P. F. Wilson and M. T. Ma, "Simple approximation expressions for higher order mode cutoff and resonant frequencies in TEM cells", *IEEE Trans. on EMC*, vol. EMC-28, No. 3, August 1986.
- [4] J. Zhang and J. Fu, "Higher order mode cutoff frequencies in TEM cells calculated with TLM method", *IEEE Trans. on EMC*, vol. 30, No. 4, Nov. 1988.
- [5] S. K. Das and B. K. Sinha, "Numerical solution of higher order mode cut-off frequencies in symmetric TEM cells using finite element method", *IEEE Trans. on EMC*, vol. 32, No. 4, Nov. 1990.
- [6] A. Navarro, M.J. Nunez, and E. Martin, "Finite difference time domain FFT method applied to axially symmetrical electromagnetic resonant devices", *IEE Proc._H*, vol 137, Pt. H, No. 3, June 1990.
- [7] E. A. Navarro and V. Such, "Study of TE and TM modes in waveguides of arbitrary cross-section using an FD-TD formulation", *IEE Proc._H*, vol. 139, No. 6, Dec. 1992
- [8] Allen Taflove, "Computational electrodynamics - The finite difference time domain method", pp. 67, 1995.
- [9] 윤재훈, 최익권, "TEM Cell들의 고조 모드

차단 주파수에 대한 수치 코드 개발”, 한국
전자통신연구소, 1991.

[10] C. Weil and L. Gruner, “High-order mode

cutoff In rectangular stripline”, *IEEE Trans. On MTT*, vol. MTT-32, No. 6, June 1984.

윤 영 설



1998년 2월: 중앙대학교 전자공학과
(공학사)

현재: 중앙대학교 전자공학과(공학
석사)

[주 관심분야] 도파관, TEM Cell
모드 해석, FDTD, EMI/EMC

공 순 철



1995년: 중앙대학교 전자공학과(공
학사)

1997년: 중앙대학교 대학원 전자공
학과(공학석사)

현재: 중앙대학교 대학원 전자공학
과 박사과정

[주 관심분야] 안테나 및 전파전파,
FDTD

윤 재 훈



1984년: 중앙대학교 전자공학과(공
학사)

1986년: 중앙대학교 대학원 전자공
학과(공학석사)

현재: 한국전자통신연구원 선임연구
원

김 정 기



1965년: 연세대학교 전기공학과(공
학사)

1969년: 연세대학교 대학원 통신공
학과(공학석사)

1975년: 연세대학교 대학원 통신공
학과(공학박사)

현재: 중앙대학교 전자공학과 교수
[주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 마이크로파 소자 등