

# GTEM 셀 설계를 위한 전자파 모델링 및 회로망 해석 기법 연구

## A Study on the Electromagnetic Modeling and Network Analysis for GTEM Cell Design

이 우 상

Woo Sang Lee

### 요 약

본 논문에서는 DC ~ 18 GHz에서 동작하는 GTEM 셀 설계를 위한 전자파 모델링과 회로망 해석 기법을 제시하였다. GTEM 셀의 동축선 입력 급전부의 모드 변환기, 전송선 길이가 5미터인 확장형 사각 동축선 그리고 전송부 동축선의 전류와 입력단으로부터 입사되는 전자파를 정합시킬 수 있는 종단 부하로 구성되는 3차원 전자파 수치 해석 모델을 제시하였다. GTEM cell의 급전부, 전송선부, 종단 부하부에 대한 등가 회로망 모델을 제시하였으며, 이를 이용하여 전자파 수치 해석 모델에서 구해진 산란 계수로부터 GTEM cell의 성능 평가 지수인 입력 반사 계수를 계산할 수 있도록 하였다. DC ~ 18 GHz에서 동작하는 5.0×2.5×1.7 m 크기의 GTEM cell을 설계, 제작, 성능 평가하여 제안한 기법의 효용성을 입증하였다.

### Abstract

In this paper, the electromagnetic modeling and network analysis are proposed for design of GTEM cell operating from DC to 18 GHz. 3D electromagnetic numerical analysis models composed of the coaxial mode-converter for the feeder of GTEM cell, 5 m expanded rectangular coaxial transmission line, and the resistive termination load for current and field transmitted from the feeder are developed. Equivalent network model of feeder, transmission line, and termination load in the GTEM cell is also proposed, so the return loss of GTEM cell is calculated using S-parameters using the electromagnetic numerical analysis. To verify the proposed design method, the GTEM cell is designed, constructed and tested, with its size of 5×2.5×1.7 m and operating frequency of DC ~18 GHz.

Key words : GTEM Cell, 3D Electromagnetic Modeling, Network Analysis, Septum, Mode Converter

### I. 서 론

GTEM(Gigahertz Transverse Electromagnetic) 셀은 TEM 모드로 신호를 전달하는 평판형 동축선을 길이 방향으로 단면을 확장하여 셀 내부의 시험 공간에 평면파를 발생시켜 주는 장치이다. GTEM 셀은 1974년 M. L. Crawford에 의해 제안된 TEM 셀의 종단부를 전파 흡수체로 매칭시킴으로써 수 GHz까지

도 반사 계수가 작도록 설계되고 있다<sup>[1][2]</sup>. 전자 장비에 대한 EMC(Electromagnetic Compatibility) 실험이 주목적인 GTEM 셀은 CPU 속도와 통신 주파수 대역이 높아짐에 따라 DC ~18 GHz까지 매우 넓은 주파수 대역폭에서 동작해야 한다. 또한, 컴퓨터와 같이 상당히 큰 시험 대상 장비에 균일한 전계 분포를 갖는 quite zone을 만들어 주기 위해서는 GTEM 셀의 전송선 길이가 약 5미터(300 λ@18 GHz) 정도로

국방과학연구소(Agency for Defence and Development)

· 논문 번호 : 20080513-065

· 수정완료일자 : 2008년 7월 16일

매우 커야만 한다.

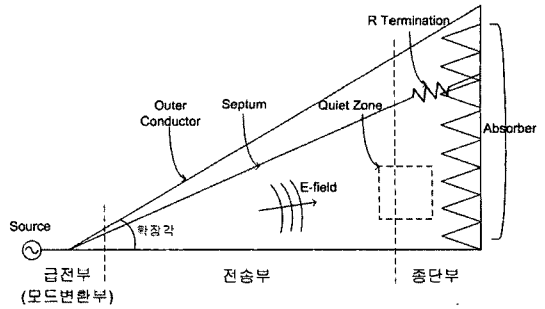
이와 같이 매우 큰 구조를 갖는 GTEM 셀의 효율적인 설계를 위하여 전자파 수치 해석 기법을 이용한 GTEM 셀 해석 및 성능 예측 기법에 대한 다양한 연구가 수년간 이루어져 왔다. 그러나 수치 해석 기법의 발전과 컴퓨터 연산 속도의 증가로 해석 용량이 크게 증가하였지만, 아직까지는 길이가 수백  $\lambda$  정도로 매우 큰 해석 영역을 요구하는 GTEM 셀에 대하여 3차원 전자파 해석하기는 불가능하다. 따라서 이와 같은 거대한 구조의 GTEM 셀 해석 연구는 국한된 방법으로 수행되고 있다. 즉, 해석 용량의 제한으로 전체 GTEM 셀 구조 중 일부분에 대한 영향을 해석하거나, 단일 주파수 또는 GHz 이하의 낮은 주파수 대역에서의 전자파 수치 해석이 주로 시도되어 왔으며, 수 GHz 이상의 반사 계수 특성은 측정에 의존하여 왔다<sup>[3]~[5]</sup>. 이와 같이 기존의 해석 기법으로는 DC부터 18 GHz 주파수 범위에서 GTEM 셀 전체 구조의 특성을 반영하여 반사 계수 특성을 정확히 예측하기가 쉽지 않다.

본 논문에서는 이러한 기술적인 어려운 점을 해결하기 위하여, GTEM 셀을 입력 급전부, 전송선부, 종단 부하부로 세 개의 영역으로 나누어 모델링하여 해석하고, 각 부의 산란 계수 예측 결과들을 등가 회로망에 적용하여 GTEM 셀의 ~18 GHz 반사 계수를 예측할 수 있는 해석 기법을 제시하였다.

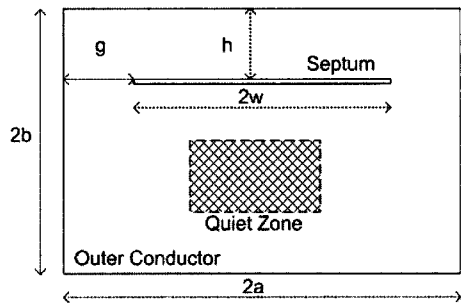
## II. GTEM 셀 설계 이론

### 2-1 GTEM 셀 동작 원리

GTEM 셀은 TEM 셀과 무반사실의 개념을 혼합한 장치로서 GHz 대역까지 자유공간의 평면파를 모사하는 기능을 한다. 이는 그림 1(a)와 같이 TEM 모드로 신호를 전달하는 사각 동축선의 내·외각 도체 단면의 특성 임피던스를 50  $\Omega$ 을 유지하며 가로, 세로 방향으로 단면을 점진적으로 확장하고, 동축선의 끝단을 저항과 전파 흡수체를 이용하여 처리함으로써 가능하게 된다. 이러한 방법으로 TEM 셀의 동축선 확장, 유지, 축소되는 과정에서 발생하는 고차 모드와 공진 구조로 인한 동작 주파수 대역의 한계를 해결한다. 그러나 사각 동축선의 단면을 전파 진행



(a) GTEM 셀의 측면도  
(a) Side cut view of GTEM cell



(b) 전송선의 단면도  
(b) Cut view of transmission line

그림 1. GTEM 셀의 구조

Fig. 1. The structure of GTEM cell.

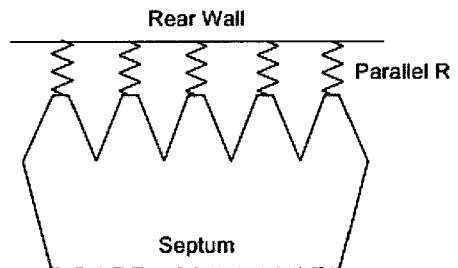


그림 2. 병렬 저항을 이용한 septum 정합

Fig. 2. Termination of the septum with the parallel resistors.

방향에 따라 확장하며 발생하는 경로차에 의해 구면파 성분이 포함된 형태로 신호가 전달되며, 전송선의 모드는 완벽한 TEM 모드가 아닌 Quasi-TEM 모드가 된다.

GTEM 셀을 이용한 복사 실험은 급전부에 RF 신호를 인가하고 셀 내부에 평면파에 근접한 전계가 형성되는 곳에 시험 대상을 위치시켜 시행한다. GTEM 셀의 전파 흡수체 바로 앞단의 내부 도체판(sep-

표 1. GTEM 셀 설계 사양

Table 1. Design requirement of GTEM cell.

항 목	설계 사양
주파수 범위	DC ~18 GHz
크기(길이×넓이×높이)	5.0×2.5×1.7 m
Quiet zone(가로×세로)	70×40 cm
입력 반사 계수	-7 dB 이하
최대 입력 신호 레벨	125 W(CW)
입력 컨넥터 구조	50 Ω N타입

tum) 아래 중앙부 1/3 지역에, 전계 수직 성분이 우세하며 전계 세기 균일성이 좋은 구역을 quiet zone이라 한다. 시험 대상의 전자파 복사 실험은 이 영역에서 시행되며, 따라서 시험 대상의 크기에 따라 quiet zone의 크기와 곧 GTEM 셀의 크기가 결정된다. 본문에서 설계하는 GTEM 셀의 사양을 표 1과 같이 정리하였다.

### 2-2 GTEM 셀 구성 요소의 설계 이론

GTEM 셀은 크게 신호 발생원으로부터 인가받은 RF 신호를 GTEM 셀로 전달하는 급전부, 발생한 신호를 시험 대상까지 전달하는 전송선부, 전송선부 끝단에서 반사되는 RF 신호를 차단하기 위한 종단 부하부로 구성된다.

먼저, 급전부는 발생원으로부터 단면 특성 임피던스가 50 Ω인 원형 동축선 케이블을 통해 전달된 TEM 모드의 신호를 사각 동축선으로 변환하여 전달하는 모드 변환기이다. 모드 변환기에서 생기는 불연속 단면 구조는 고차 모드를 발생시켜 전체 GTEM 셀의 최대 동작 주파수와 반사 계수를 제한하는 주요인이 된다.

둘째, 전송선부는 급전부를 지나서 전달되는 신호를 시험 대상까지 전달하는 역할을 한다. 가능한 급전부에서 전송선부로 이어지는 확장형 사각 동축선 구조의 특성 임피던스를 50 Ω으로 유지하여 전달되는 신호의 반사를 낮추도록 설계한다. 사각 동축선의 특성 임피던스는 외부 도체와 내부 도체의 단면 구조에 의해 결정된다. 즉, 그림 1(b)의 GTEM 셀 단면 구조에서 외부 도체의 가로, 세로 길이가 각각  $2a$ ,  $2b$ 이고, septum의 가로 길이가  $2w$ , ( $g=a-w$ )일 때, 식 (1)을 이용하여 사각 동축선 단면의 특성 임피

던스를 구할 수 있다<sup>[6]</sup>.

$$Z_c \cong \frac{376.7}{4 \left[ \frac{a}{b} - \frac{2}{\pi} \ln \left( \sinh \frac{\pi g}{2b} \right) \right]} \quad (1)$$

GTEM 셀의 길이가 정해진 상태에서 전송선부의 확장각을 줄이면 시험 대상에 도달하는 전파가 평면파에 가까워지나, 내부 높이도 낮아져 Quiet Zone의 크기가 줄어들게 된다.

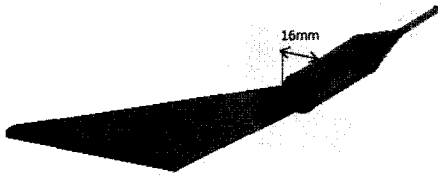
마지막으로, 종단 부하부는 전송선부의 끝단에서 반사되는 신호를 줄이기 위해 임피던스 정합을 해주는 역할을 한다. 100 MHz 이하의 낮은 주파수 대역은 50 Ω 저항을 이용하고, 그 이상의 높은 주파수 대역은 페라이트 타일 타입과 피라미드 타입의 흡수체를 부착하여 정합시킨다. 저항을 이용하여 septum과 뒷면 도체판을 연결할 때 일정폭을 갖는 septum의 구조와 septum의 중앙보다 양쪽으로 더 많은 전류가 흐르는 것을 고려하여, 그림 2와 같이 septum의 끝단을 분할하여 여러 개의 병렬 저항으로 연결하고, 총 저항 값이 50 Ω이 되도록 설계한다.

## III. GTEM 셀 구성 요소의 전자파 모델링

### 3-1 모드 변환 급전부

전자파 수치 해석을 이용하여 GTEM 셀의 급전부를 해석하기 위하여, 그림 3(b)와 같이 모드 변환이 이루어지는 급전부를 모델링 하였다<sup>[7]</sup>. 이상적인 급전부 구조는 직경 3 mm 이하인 N-type 동축선 케이블에 맞추어 septum의 입력단 폭을 수 mm로 설계해야 한다. 그러나 길이가 5 m 이상인 삼각형 철관 형태의 septum 끝단 폭을 3 mm로 정밀하게 제작하고, 급전부와 조립하기엔 기계적인 무리가 크다. 따라서 끝단 폭을 16 mm로 넓게 하였으며, GTEM 셀 제작이 가능하도록 그림 3(a)와 같이 septum 끝단에 원형 동축선을 끼어서 조립할 수 있는 구조로 설계하였다.

급전부는 입력된 TEM 모드의 신호가 가능한 반사 없이 뒷단으로 전달되도록 해야 한다. 이를 위해 모드 변환기의 전 구간 단면 특성 임피던스를 동작 주파수 내에서 50 Ω의 2% 이내가 되도록 설계하였다. 또한, 신호가 동축선을 따라 전송되는 중에 가능한 급격한 불연속 구조를 지나지 않도록, 그림 3과



(a) 모드 변환을 위한 급전부의 모델  
 (a) The model of the feeder for the mode conversion

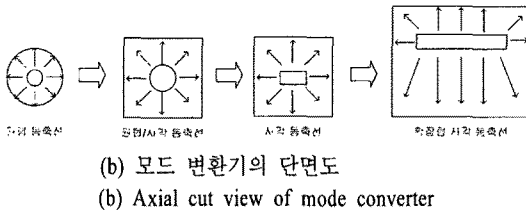


그림 3. 급전부의 모드 변환기의 모델링과 단면 모드 변환 개념도  
 Fig. 3. Modeling of the feeder for mode converter and the concept of mode conversion.

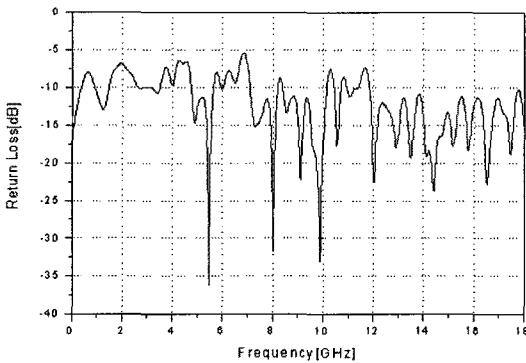


그림 4. 모드 변환 급전부의 입력 반사 손실  
 Fig. 4. Input return loss of the feeder for mode conversion.

같이 케이블 동축선, 확장형 원형 동축선 그리고 전송선부인 사각 동축선으로 연결되는 구조로 설계하였다.

정밀한 급전부 구조와 광대역의 해석 주파수 대역, 해석 용량을 고려하여 급전 포트에서부터 300 mm까지 비교적 짧은 구간을 급전부로 정의하고, 3차원 전자파 수치 해석을 수행하였다.

그림 4는 모델링한 급전부의 ~18 GHz에서의 반사 손실 해석 결과이다. 3차원 전자파 수치 해석 결과, 신호 진행 방향의 단면 특성 임피던스를 50 Ω으로 유지하여도, 원형 동축선에서 확장형 사각 동축선인 septum으로 연결되는 불연속면의 고차 모드에 의해 반사 손실이 높아짐을 확인하였다.

### 3-2 확장형 사각형 동축선 전송선부

두 번째로 급전부와 종단 부하부 사이에 위치하며 TEM 모드로 신호를 전송하는 확장형 사각 동축선 전송선부를 그림 5와 같이 모델링 하였다. 전송선부의 범위는 급전부 뒷단부터 저항을 포함한 종단 부하부의 앞단까지로, 급전 포트 기준으로 300~4,000 mm인 구간으로 정하였다.

전송선부는 급전부나 종단 부하부와 달리 급격하게 변하는 전송 구조가 없으므로 신호의 반사에 영향을 미치는 주요 인자는 전송선부 단면의 특성 임피던스와 확장각으로 좁혀진다. 전송선부의 단면은 특성 임피던스가 전 구간에서 50 Ω이 되도록 설계하였으며, 특성 임피던스는 그림 2(b)와 식 (1)에서와 같이 변수  $a, b, w, h$ 의 비에 의해 결정된다. 여기서  $a:b$ 의 비를 1:0.67,  $a:w$ 의 비를 1:0.64,  $2b:h$ 의 비를 1:0.25로 설정하였다. 외각 도체의 밑면과 윗면 사이의 확장각은 20도 이상으로 커질 경우, 반사 및 투과 계수 특성이 나빠지므로 약 18도로 정하고, 이에 따라 양 옆면 사이의 확장각은 약 28도로 정해진다.

그림 5와 같은 전송선부 모델을 상용 FDTD 전자파 수치 해석 solver를 이용하여 해석하였다. 전송선



그림 5. 사각형 동축선이 확장되는 구조인 전송선부의 모델  
 Fig. 5. The model of a transmission line with flared square coaxial line.

부의 입력 TEM 모드 신호는 밀면 도체판에 평행한 방향으로 인가하였는데, 전송선부는 수직, 수평 방향으로 확장되는 구조이므로 구면파 성분 발생하고 이는 Quasi TEM 모드로 신호가 전달된다. 이러한 영향을 분석하기 위해 출력단으로 전달되는 신호를 5개의 고차 모드까지 포함하여 해석하였다<sup>[7]</sup>.

이 때 전송선부의 입, 출력단에 신호를 인가시키기 위해 그림 6(a)와 같이 일정한 단면 구조의 연장 포트를 추가시켜 주어야 한다. 그러나 실제 GTEM 셀에는 없는 이러한 연장 포트는 불연속 전송 구조가 되어 해석시 원치 않는 고차 모드에 의한 반사 신호를 야기하여 해석 결과의 오차 요인이 된다.

이런 해석 오차를 줄이기 위해 해석 결과를 time gating을 이용한 후처리로 S-파라미터 결과를 보정하였다. 즉, 그림 6(a)와 같이 FDTD 해석 시 입력 포트로 인가된 시간 영역의 신호가 출력 포트로 전달되

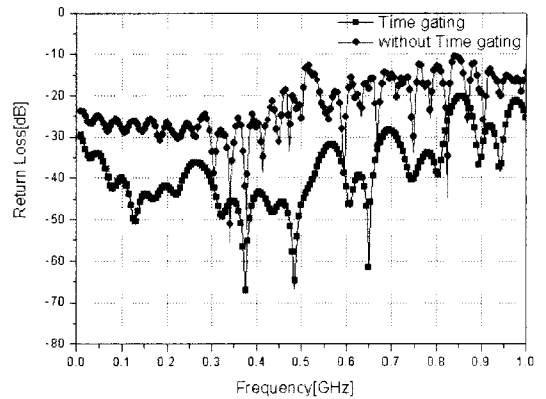


그림 7. 전송선부의 입력 반사 손실  
Fig. 7. Input return loss of transmission line.

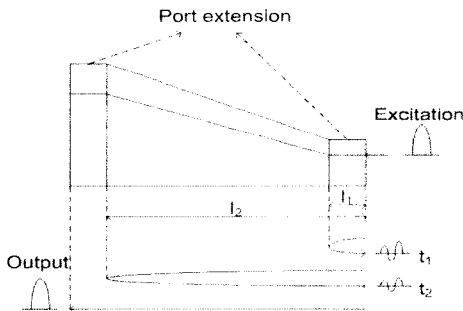
어 나올 때, 두 개의 연장 포트에 의한 불연속면에서 반사되어 되돌아오는 신호의 시간( $t_1$ ,  $t_2$ )을 계산하여 불연속면에 의한 반사 신호를 제거하였다.

즉, 그림 6(b)의 시간 영역 해석 결과에서 입력 포트로 반사되어 돌아오는 TEM 모드 신호의  $t_1$ (4 nsec) ~  $t_2$ (28 nsec) 사이의 결과만을 이용하여 반사 계수를 구하였다. 그림 7은 DC ~1 GHz에서 time gating을 이용하여 보정한 반사 손실과 보정 전의 반사 손실 그래프이다. 보정 전의 그래프는 입출력 단의 연장 포트에 의한 반사에 의해 공진 구조를 형성하여 보정한 결과에 비해 큰 반사 손실과 공진 특성을 확인할 수 있다.

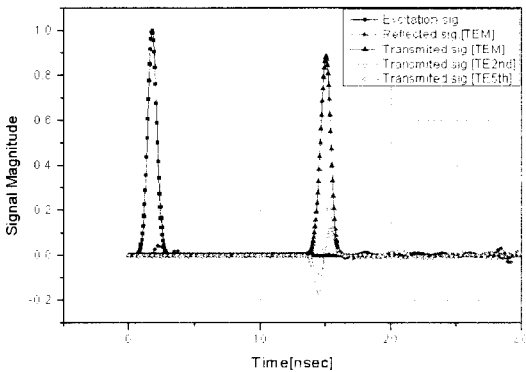
그림 6(b)에서 출력단으로 전달되는 신호를 살펴 보면 기본 모드 외에 고차 모드들이 존재하는 것을 볼 수 있다. 특히 TEM 모드 외에 차단 주파수가 약 75 MHz인 TE 모드와 200 MHz TE 모드 신호가 나오는데(비율 94.5:1) 이는 확장형 전송 구조에 의한 Quasi TEM 모드가 TEM 모드와 고차 모드들의 합으로 표현되기 때문이다.

### 3-3 병렬 저항 Septum을 이용한 종단 부하부

그림 1의 종단 부하부는 전파 흡수체와 정합용 저항으로 구성되어진다. 이때 저항은 DC ~100 MHz의 낮은 주파수 대역의 정합, 즉 septum을 통해 전달되는 전류 성분의 정합을 위해 사용된다<sup>[3]</sup>. 본 논문에서는 이렇게 낮은 주파수 대역에서 저항 정합부의 전자파 수치 해석을 시도하였다. 100 MHz 이상의



(a) 불연속 연장 포트와 반사 신호  
(a) Port extensions with discontinuities and the reflected signals



(b) FDTD 시간 영역 신호  
(b) Time signal at FDTD analysis

그림 6. 전자파 수치 해석 시간 영역 신호 분석  
Fig. 6. Time domain signal of full wave EM analysis.

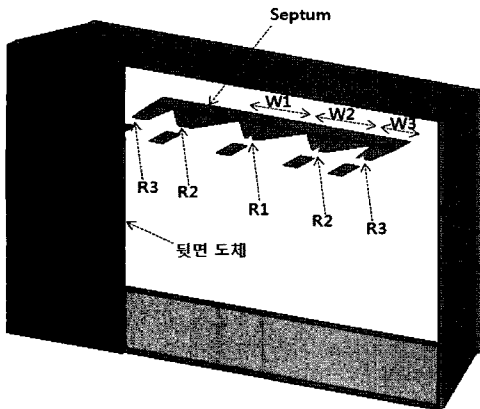


그림 8. 병렬 구조의 집중 저항을 이용한 종단 부하 모델

Fig. 8. Model of the termination load using the parallel lumped resistors.

반사 계수에 대해서는 다음 절의 등가회로망 해석에서 전자파 흡수체의 반사 감쇄율 데이터를 고려하여 분석하였다.

그림 8은 4,000~5,000 mm 구간에 있는 50 Ω 종단 부하부 모델로 septum의 끝단을 5개의 250 Ω 저항판으로 병렬로 분할하여 뒷면과 도체로 연결한 구조이다. 이때 septum 끝단의 저항판 연결부는 가운데를 기준으로 좌우 대칭이며, 저항판 연결면 두께는 동일하고 길이( $w_1, w_2, w_3$ )가 서로 다른 wedge 형태의 사다리꼴 구조로 하였다. Septum을 따라 전달되는 전류의 세기가 가장자리는 높고 중앙은 낮기 때문에 이를 일률적으로 정합하면 quiet zone의 TEM 모드의 전계 균일성이 악화된다<sup>[8]</sup>. 이를 해결하기 위해 각 저항판에 같은 세기의 전류가 흐르도록  $w_1, w_2, w_3$  길이에 따른 저항에 흐르는 전류의 세기를 분석하여 그림 9와 같이 100 MHz 이하의 낮은 주파수 대역에서 동일한 세기의 전류가 흐르도록 설계하였다.

표 2는 그림 8의 최적 설계된 septum 끝단의 wedge 폭과 이들 끝단에 부착된 저항판의 저항값이다. 실제 저항판은 PCB 기판에 소비 전력 0.25 W인 24.9 kΩ 저항 100개를 병렬로 연결하여 제작하였다. 따라서 저항판 하나의 저항값은 약 249 Ω이고, 총 다섯 개의 저항판에 의해 125 W의 전력까지 견딜 수 있도록 설계하였다.

그림 10은 종단 부하부의 DC~300 MHz 사이의 반사 계수 해석 결과이다. 예상대로 100 MHz 이하

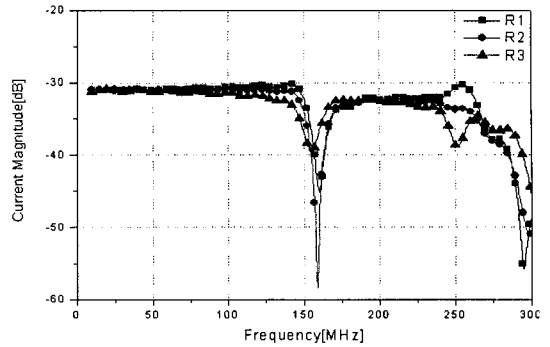


그림 9. 세 개의 병렬 저항에 유겨된 전류 균일도  
Fig. 9. The current uniformity of the three parallel three resistors.

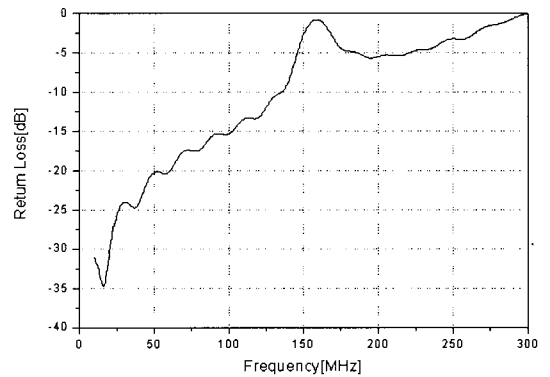


그림 10. 종단 부하의 반사 손실  
Fig. 10. Return loss of the termination load.

표 2. 종단 부하의 설계 변수

Table 2. Design parameter of the termination load.

구분	값	단위
$W_1$	345	mm
$W_2$	340	mm
$W_3$	120	mm
$R_1$	250	Ω
$R_2$	250	Ω
$R_3$	250	Ω

의 대역에서는 -15 dB 이하의 반사 손실 특성을 보이지만, 150 MHz 이상에서는 고주파 리액턴스 성분에 의해 거의 정합되지 않음을 볼 수 있다.

#### IV. 등가회로 모델링 및 해석

3장에서 GTEM 셀의 구조를 급전부, 전송선부,

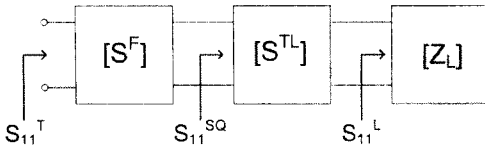


그림 11. GTEM 셀 등가회로 모델  
Fig. 11. Equivalent circuit model of GTEM cell.

중단 부하부로 분할하여 설계하고, 각각의 산란 계수 특성을 예측하였다. 이를 통합하여 그림 11과 같이 세 개의 독립적인 회로가 순차적으로 연결된 등가 회로망 모델링하여 GTEM 셀의 입력단 반사 계수를 해석할 수 있도록 하였다.

먼저, 급전부 산란 계수는 DC~18 GHz 대역에서 3차원 전자파 수치 해석을 통해 구해진 결과를 이용하였다. 중단 부하부는 DC~100 MHz 대역에서 저항 정합부에 의한 산란 계수를 해석하고, 100 MHz~1 GHz와 1~18 GHz 대역은 각각 페라이트 타일과 피라미드 흡수체의 수직 입사 반사 손실에 대한 제작사의 데이터를 적용하였다. 실제로는 흡수체에 완벽한 TEM 모드가 도달하진 않으므로 전파가 수직 입사한 경우의 데이터와 차이가 발생하지만 그 차이가 적고 기본적인 흡수체의 반사 손실이 -20 dB 이하로 낮으므로 고려하지 않았다. 전송선부는 DC~1 GHz 대역에서 전자파 수치 해석으로 산란 계수를 구하고, 1~18 GHz 대역은 1 GHz 이하의 해석 결과를 토대로 반사 계수 -20 dB로 가정하였다.

분할 해석한 세 부분의 산란 계수 해석 결과를 식 (2), (3)에 대입하여 전체 GTEM 셀의 반사 계수인  $S_{11}^T$ 를 계산하였다. 식 (2)로부터 중단 부하부의  $S_{11}$ 과 전송선부의 2-단자망 산란 계수로부터 전송선부 입력단의  $S_{11}$ 을 구하고, 다시 식 (3)으로 식 (2)에서 구한 전송선부의  $S_{11}$ 과 급전부의 2-단자망 S 파라미터를 이용하여 GTEM 셀 입력단에서 바라본 전체 반사 계수를 구하였다.

이렇게 전기적 크기가 커서 한 번에 해석이 불가능한 GTEM 셀을 분할하여 해석함으로써 각 부의 전자파 수치 해석을 통한 산란 계수 예측이 가능하고, 전체 반사 계수 특성에 각 부의 특성이 반영되는 영향도 분석 가능하다.

$$S_{11}^{SQ} = S_{11}^{TL} + \frac{S_{12}^{TL} \cdot S_{21}^{TL} \cdot S_{11}^L}{1 - S_{22}^{TL} \cdot S_{11}^L} \quad (2)$$

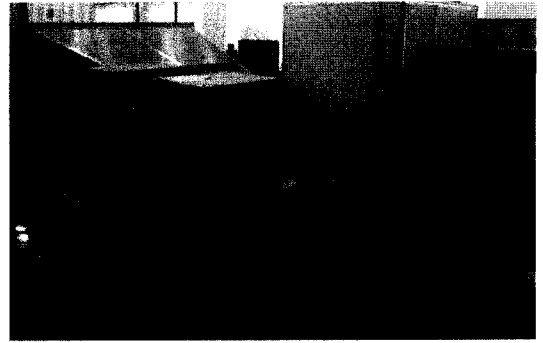


그림 12. GTEM 셀의 성능 측정도  
Fig. 12. The test setup for GTEM cell.

$$S_{11}^T = S_{11}^F + \frac{S_{12}^F \cdot S_{21}^F \cdot S_{11}^{SQ}}{1 - S_{22}^F \cdot S_{11}^{SQ}} \quad (3)$$

## V. 실험 및 결과 고찰

제시한 기법을 적용하여 그림 12와 같은 5×2.5×1.7 m 크기의 GTEM cell을 설계하였다. GTEM cell 양 옆면에 시험 대상을 내부에 위치시키기 위한 문과 케이블을 통과시킬 패널을 설치하고, 밀면엔 이동을 위한 바퀴를 부착하였다. GTEM cell 내부에는 septum을 지지하기 위한 유전율이 약 1인 유전체 지지봉과 시험 대상에 전원을 공급하기 위한 전원 필터와 콘센트를 설치하였다.

중단 부하부 도체판에 부착한 페라이트 타일 흡수체는 SAMWHA Electronics사의 SN-20 100×100×6.7을, 피라미드 흡수체는 ECCOSORB사의 VHP-18-NRL을 사용하였다.

제작한 GTEM 셀을 HP8510C 회로망 분석기로 입력단의 반사 손실 특성을 측정하였다. 그림 13은 등가 회로망 해석을 통해 계산한 1 GHz까지의 저주파 대역의 반사 손실과 측정 결과 그래프이다. 해석 결과, 주파수 100 MHz 이하에서 -8 dB 이하의 반사 손실 특성을 보이고 측정 결과 역시 해석 결과와 일치함을 확인할 수 있다. 단, 측정 결과 400 MHz 이하의 대역에 보이는 리플로 주파수가 DC에 가까워지며 약한 공진 특성이 있는 것으로 확인되었다.

그림 14는 DC~18 GHz 대역의 GTEM 셀 반사 손실 그래프이다. 제안한 회로망 해석 기법을 통해 예측한 전체 반사 손실 그래프는 그림 4의 급전부 반

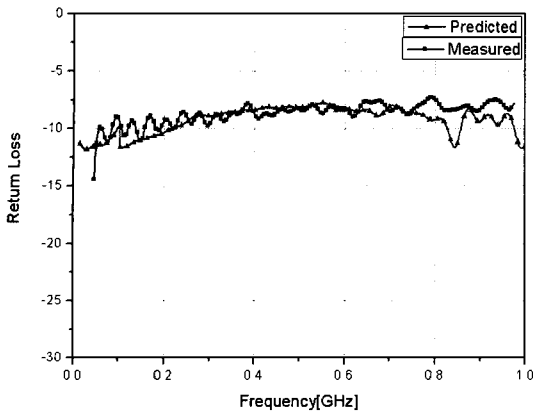


그림 13. 저주파 대역의 GTEM 셀 반사 손실  
Fig. 13. Return loss of GTEM cell upto 1 GHz.

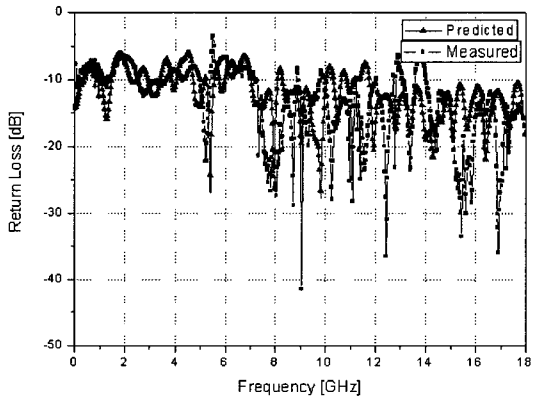


그림 14. GTEM 셀의 광대역 반사 손실 특성  
Fig. 14. Wideband characteristics of GTEM cell upto 18 GHz.

사 손실의 영향을 크게 받는다. 이는 급전부에 비해 전송선부와 종단 부하부의 반사 손실이  $-20$  dB 이하로 낮게 설계되었으므로 급전부 뒷단에 의한 반사 손실의 영향이 상대적으로 작기 때문이다. 그래프를 보면 7 GHz 이하의 반사 손실 예측 결과와 측정 결과가 거의 일치한다. 7 GHz 이상의 대역에서도 회로망 해석과 측정 반사 계수 특성이 공진점이 유사하게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

측정 결과, 제작한 GTEM 셀은 5.5 GHz에서 급전부의 고차 모드에 의해 반사 손실이 높아 튀는 곳을 제외하고 전반적으로  $-7$  dB 이하의 결과를 얻었다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 GTEM 셀을 구성하는 입력 급전부, 전송선부, 종단 부하부에 대한 전자파 모델링 기법을 제시하였다. 또한, 이들 구성품 모델에 대한 산란 계수를 이용하여 GTEM 셀에 대한 등가회로 모델을 제시하였다.

먼저, GTEM 셀의 입력 급전부의 입력 포트는 단면 특성 임피던스가  $50 \Omega$ 인 원형 동축선, 출력 포트는 사각형 동축선으로 변환되는 모드 변환기로 전자파 모델링하였으며, DC~18 GHz 주파수 범위에서 대한 2-단자망 산란 계수를 계산하였다. 두 번째로, GTEM 셀의 전송선부는 입출력 포트를  $50 \Omega$  사각형 동축선인 길이가 5 m인 전송선으로 전자파 모델링을 하였으며, 입출력 포트의 불연속면에서 발생하는 고차 모드들을 고려한 DC~1 GHz까지 2-단자망 산란 계수를 구하였다. 마지막으로, GTEM 셀의 종단 부하부는 입력 포트를  $50 \Omega$  사각형 동축선으로, septum으로 흐르는 낮은 주파수 대역의 전류 정합을 위해 5개의  $250 \Omega$  병렬 저항 부하로 종단 부하를 모델링하였으며, DC~100 MHz까지 최적 설계를 수행하였다.

이와 같이 GTEM 셀의 구성 요소 모델링을 이용하여 GTEM 셀을 2-단자망 입력 급전부, 2-단자망 전송선부, 1-단자망 종단 부하부로 하는 등가회로망 해석을 수행하였다. 회로망 해석시 100 MHz 이상 종단 부하는 페라이트 타일 흡수체와 피라미드 흡수체에 대한 제작사의 반사 계수를 고려하였다.  $5 \times 2.5 \times 1.7$  m 크기의 GTEM 셀을 설계, 제작, 실험 결과, 비교를 통하여 제시한 전자파 모델링 및 회로망 해석 기법의 효용성을 검증하였다. 결과 고찰을 통하여 GTEM 셀의 반사 계수 특성에 가장 민감하게 영향을 주는 것이 입력 급전부에서 제작상 피할 수 없는 부분인 모드 변환기 구조의 불연속면인 것으로 확인되었으며, 향후 이를 개선할 수 있는 모드 변환 구조에 대한 추가 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

- [1] M. L. Crawford, "Generation of standard EM fields using TEM transmission cells", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-16, no. 4, Nov. 1974.



- [2] D. Hansen, P. Wilson, D. Konigstein, and H. Scherer, "A broadband alternative EMC test chamber based on a TEM-cell anechoic-chamber hybrid concept", *Proceedings of the 1989 International Symposium on Electronic Compatibility*, pp. 133-137, Sep. 1989.
- [3] K. Malaric, J. Bartolic, and B. Modlic, "Absorber and resistor contribution in the GTEM-cell", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility 2000*, vol. 2, pp. 891-896, Aug. 2000.
- [4] F. Lisi, W. Guanghui, and B. Zengjun, "FDTD evaluation of transmission characteristic in GTEM cells", *Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics 2003*, pp. 435-438, Nov. 2003.
- [5] S. Ishigami, K. Harima, and Y. Yamanaka, "Estimation of E-field distribution in a loaded GTEM cell", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility 2001*, vol. 1, pp. 129-134, Aug. 2001.
- [6] KRIS/IR-2000-016, 정연춘 외, 전자파장해 측정 사업, 한국표준과학연구원, 1999년 12월.
- [7] B. M. Lee, W. S. Lee, Y. J. Yoon, and J. H. So, "X-band TM<sub>01</sub>-TE<sub>11</sub> mode converter with short length for high power", *Electronics Letters*, vol. 40, no. 18, Sep. 2004.
- [8] K. Malaric, J. Bartolic, "Distribution of currents on septum in GTEM-cell depending on the resistor position", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility 2003*, vol. 1, pp. 48-50, May 2003.

## 이 우 상



안테나

2003년 2월: 연세대학교 전기전자  
공학과 (공학사)

2005년 2월: 연세대학교 전기전자  
공학과 (공학석사)

2005년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소  
연구원

[주 관심분야] EMI/EMC, 고출력