

## 진화 알고리즘을 이용한 TEM CELL의 최적설계

채수정<sup>1</sup>, 강노원<sup>1</sup>, 정현교<sup>1</sup>, 최경<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>서울대학교, <sup>2</sup>강원대학교

### Optimization of TEM Cell Using Evolution Strategy

Soo-Jeong Chae<sup>1</sup>, No-Weon Kang<sup>1</sup>, Hyun-Kyo Jung<sup>1</sup>, Kyung Choi<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Seoul National University, <sup>2</sup>Kangwon National University

**Abstract** - 본 논문에서는 TEM Cell의 최적 설계방법을 제안한다. 임피던스 부정합을 최소화 시키기 위해 Cell 내부의 특성 임피던스를 50Ω으로 유지하며, 동시에 중심 도체판(septum)의 길이와 도체판 날개(winglet)의 각을 변화 시킴으로써 내부 전자파의 균일도(Uniformity)를 최대로 하는 TEM Cell의 최적설계 방법을 제안하며 (1+1)ES를 적용하여 시험영역을 최대로 하는 최적 설계 변수들을 제시한다.

#### 1. 서론

TEM Cell은 여러 장비의 전자파 방사시험(Radiation test) 또는 Susceptibility 시험에 널리 사용되고 있다. 이러한 시험을 하기 위한 기존의 방법은 표준이득 horn 안테나와 평행판 라인을 사용하였다. 그러나 이 경우 전자파 에너지가 주위로 방사되어 외부와 간섭을 일으키거나, 주위 환경에 의하여 내부의 전자계가 영향을 받을 수 있으므로 불가피하게 고가의 전자파 무반향실을 필요로 하게 된다. 그러나 TEM Cell을 이용하게 되면 외부와의 전자파 간섭이 차단되어 무반향실이 필요치 않게 되며, 제작 또한 비교적 경제적이라는 이점이 있다.

TEM Cell을 설계하기 위해서는 몇 가지 사항을 고려해야 한다. 먼저 Cell 내부에서 사용될 수 있는 시험 영역을 최대로 확보해야 하며, Cell 내부의 특성 임피던스의 부정합을 최소화 시켜야 하며, 시험영역 내부에서의 전자파의 균일도(Uniformity)을 최대화 시켜야 한다(1). 균일도를 최대화 시키기 위한 노력으로 기존의 중심 도체판(Septum)에 날개(Winglet) 구조를 추가한 Modified TEM CELL 구조가 제안되었다(2). 그러나 Cell 내부 전 영역에서 전자파가 균일하지는 않으며 시험영역을 넓게 확보하는 만큼 그 영역에서의 균일도는 감소하는 경향이 있다. 그러므로 본 논문에서는 Cell 내부의 특성 임피던스를 50Ω으로 유지하면서 중심 도체판(septum)의 길이와 날개(winglet)의 각을 변화시킴으로써 내부 전자파의 균일도를 최대로 하는 최적설계방법을 제시하며 진화알고리즘을 적용하여 시험영역을 최대로 하는 최적설계변수를 제안한다.

Cell 내부의 전자파 분포와 특성 임피던스를 구하기 위해 유한요소법(FEM)을 사용하였으며, 최적 설계 변수를 구하기 위해서 (1+1)ES(Evolution strategy) 알고리즘을 사용하였다.

#### 2. 해석모델과 문제정의

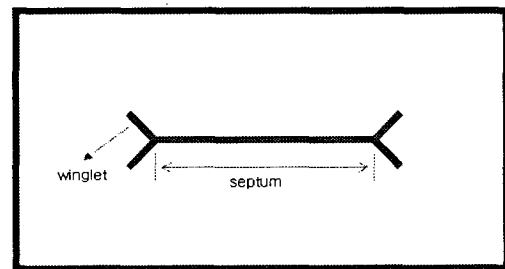


그림 1. Modified TEM Cell의 정면구조

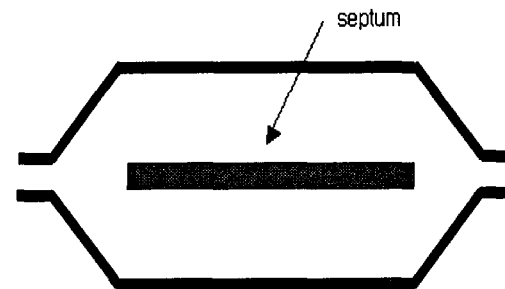


그림 2. Modified TEM Cell의 측면구조

그림 1과 그림 2는 TEM CELL의 단면구조를 보여주고 있다. 중심 도체판(Septum) 양 끝에 V자 형태의 구조는 Cell 내부 전자파의 균일도(Uniformity)를 높이기 위해 첨가된 구조이며 기존의 TEM CELL과 구분하기 위해서 Modified TEM CELL이라 불리운다(2). 그림에서 보시다시피 EUT(Equipment Under Test)가 놓이는 부분은 중심 도체판 아래에 있는 공간이며, 실제적으로 균일한 전자파가 형성되는 공간은 중심도체판과 아래 도체판 사이공간의 1/3정도가 되는 공간이므로 이 부분에 EUT가 놓이게 된다.

그림 3은 본 논문에서 해석할 1/4모델의 구조를 보여주고 있다. Cell의 단면이 상하좌우 정확히 대칭을 이루고 있기 때문에 1/4 모델 해석이 가능하다. 또한 선 AA'와 BB'는 Neumann 경계조건으로 처리하였으며 외부 도체판과 내부 도체판은 Dirichlet 경계조건으로 처리하였다. 위 모델을 해석하기 위해서 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

첫째로 TEM CELL은 커넥터를 통해 외부라인과 연

결되어 사용되므로 임피던스 부정합(mismatch)을 최소화

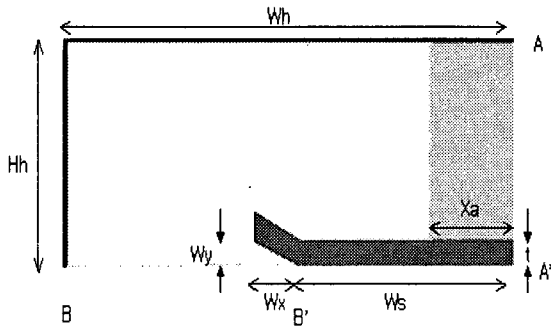


그림 3. 1/4 해석모델

화시키기 위해서 Cell 내부의 특성 임피던스를 50 Ω으로 맞추어야 한다. 그러나 본 논문에서의 모델은 1/4해석모델이므로 50 × 4 Ω으로 조정하였다. 특성 임피던스를 구하기 위해서는 유한요소법을 이용하여 Cell 내부에 저장된 에너지를 먼저 계산하여야 한다[3],[4]. 매질에 상관없이 Cell 내부에 저장된 에너지는 다음 식과 같다.

$$W = \frac{1}{2} \int \epsilon_o \epsilon_r \nabla u \cdot \nabla u \, dS \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_o$ 은 공기 중에서의 유전율이며,  $\epsilon_r$ 은 비유전율, 그리고  $u$ 는 전위(Electrical scalar potential)이다. 에너지를 구한 후 정전용량은 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$C = \frac{2W}{(\Delta u)^2} \quad (2)$$

여기서  $\Delta u$ 는 두 도체사이의 전위차(Potential difference)를 의미한다. 또한 정전용량과 특성 임피던스와의 관계는 다음과 같다.

$$Z_0 = \frac{1}{v_0 C} \quad (3)$$

여기서  $v_0$ 은 자유공간에서의 빛의 속도이다.

둘째로 EUT(Equipment Under Test)를 정확하게 시험하기 위해서는 시험영역 내부의 전자파가 최대한 균일하게 생성되어야 한다. 그러므로 내부 전자파의 균일도를 해석하기 위해서 UI(Uniformity Index)라는 균일도 지수를 정의하였다.

$$UI = \frac{\sum |E_v - \overline{E}_v| + \sum |E_h - \overline{E}_h|}{(\text{number of element})} \times \frac{\overline{E}_h}{\overline{E}_v} \quad (4)$$

여기서  $E_v$ 와  $E_h$ 는 유한요소법 해석시 각 요소(Element)에서의 전계의 수직성분과 수평성분의 크기

이며,  $\overline{E}_v$ 와  $\overline{E}_h$ 는 시험영역 내부에서의 E-field의 수직성분과 수평성분의 평균값이다. 본 논문에서는 Field의 분산값을 균일도 지수로 사용하였으며, 수직성분이 아닌 균일한 field를 얻는 것을 방지하기 위해서  $\overline{E}_h/\overline{E}_v$  값을 곱해 주었다. 또한 균일도 지수(UI)가 0.03 이하가 되면 시험영역으로서 가능하다고 판단하였으며, UI를 최대 0.03 이하가 되도록 유지하였다.

마지막으로 고려하여야 할 사항은 사용 가능한 시험영역을 최대화 시키는 것이다. Cell 내부의 전자파가 영역 전체에 걸쳐 균일하지 못하기 때문에 전 영역이 시험영역이 될 수 없다. 그러므로 일정한 균일도 지수를 가지는 시험영역을 최대로 확보해야 한다. 시험 영역의 높이는 외부 도체의 높이(Hh)로 고정시켰으며, 시험영역 너비( $X_a$ )의 초기값은 중심도체판 길이( $W_s$ )로 정하였다. 그리고 시험영역 너비( $X_a$ )를 조금씩 줄여 나가면서 UI가 0.03 이하가 되는 시험영역을 반복계산에 의해 찾을 수 있었다.

### 3. 최적화 방법

본 논문의 주요 관심은 특성 임피던스  $Z_0$ 을 일정하게 유지하면서 높은 균일도(Uniformity)를 가지는 시험영역을 최대로 확보하는 것이다. 그러므로 다음과 같은 목적함수를 정의하였다.

$$F = \frac{1}{|Z_0 - 200| + 1} + \frac{X_a}{L} \quad (5)$$

여기서  $Z_0$ 은 특성 임피던스이며,  $X_a$ 는 시험영역의 너비이다. 첫 번째 항은 특성 임피던스를 200 Ω으로 만들기 위한 항이며 200 Ω에 가까워질수록 1로 수렴한다. 두 번째 항은 시험영역을 최대화시키기 위한 항이다. 여기서 L은 가중치 계수(Weighting Factor)이며 양쪽 항의 차수를 맞추기 위하여 0.25를 사용하였다. 그리고 최적화된 결과를 얻기 위하여 (1+1)ES 알고리즘을 사용하였다.

### 4. 최적화 결과

최적화를 위해서 3개의 설계변수가 사용되었다. 각각은 중심 도체판의 길이( $W_s$ ), 날개(Winglet)의 X방향 길이( $W_x$ )와 Y방향 길이( $W_y$ )이며 이는 그림 3에 명시되어 있다. 외부 도체의 높이와 너비, 중심 도체판의 두께는 기존의 논문에 사용된 치수를 사용하였다[1].

표 1은 설계변수들의 변화범위이며, 표 2는 최적화 결과를 보여주고 있다. 표 2에서 특성 임피던스  $Z_0$ 와 균일도 지수(UI)는 각각 200 Ω과 0.03에 수렴했음을 알 수 있으며, 그때의 시험영역의 너비( $X_a$ )는 235.76mm로 최적화 되었다. TEM cell의 시험영역은 전자파 내성(EMS)시험에 대한 국제 규격인 IEC61000-4-3(전기전자 제품에 대한 내성 규격)에 의

해 시험영역 중심지점의 전계의 세기와 최대값(최소값)의 편차는 +/-3dB 이내에 있어야 한다고 정의하고 있다. 본 논문에서 제한한 시험영역에서의 전계의 편차는 -2.112~1.894dB이며 상당히 균일한 전계 분포를 얻을 수 있었다.

표 1. 설계 변수의 범위

설계 변수	Ws [mm]	Wx [mm]	Wy [mm]
Min.	10	10	10
Max.	400	50	50

표 2. 최적화 결과

Parameter	Value
Wh [mm]	541
Hh [mm]	450
t [mm]	0.79
Ws [mm]	379.12
Wx [mm]	23.4
Wy [mm]	47.479
Z <sub>0</sub> [Ω]	200.0079
UI	0.029727
Xa [mm]	235.76
Maximum field strength deviation with Center field strength [dB]	1.894 ~ -2.112

그림 4와 그림 5는 각각의 설계 변수가 특성 임피던스(Z<sub>0</sub>)에 미치는 영향을 보여주고 있다. 설계 변수의 길이가 길어질수록 특성 임피던스는 거의 선형적으로 감소함을 알 수 있다.

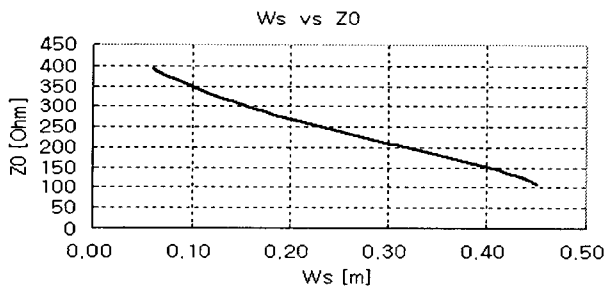


그림 4. 특성임피던스와 중심도체판 길이(Ws)와의 관계

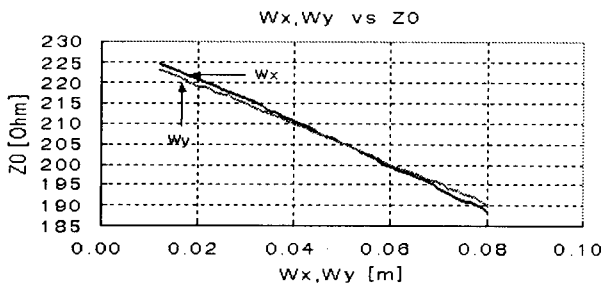


그림 5. 특성 임피던스와 Winglet의 X-Y 방향의 길이와의 관계

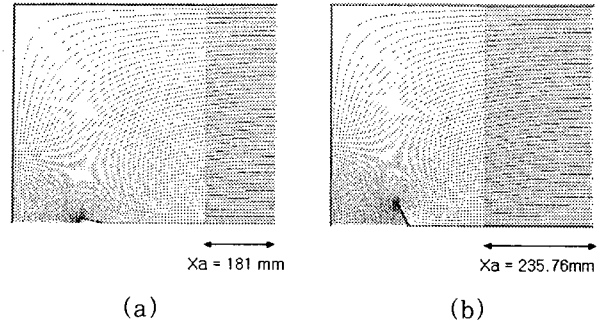


그림 6. 최적화 전(a)과 후(b)의 시험영역 비교

그림 6은 최적화 하기 전(a)과 후(b)의 Cell 내부의 시험영역 비교 그림이다. 최적화 후 시험영역의 너비가 54mm 정도 더 확보되었음을 알 수 있다

### 5. 결 론

본 논문에서는 TEM CELL의 최적설계를 제시하였다. Cell 내부의 특성 임피던스를 50Ω으로 유지하면서 중심 도체판(septum)의 길이와 도체판 날개(winglet)의 각을 변화시킴으로써 내부 field의 균일도를 최대로 하는 TEM Cell의 최적설계방법을 제시하였으며 (1+1)ES를 적용하여 시험영역을 최대로 하는 최적 설계 변수들을 제시하였다. 이 모델은 기존의 다른 TEM CELL보다 향상된 균일도(Uniformity)를 가지고 있으며 최적화된 시험영역을 확보할 수 있다는 장점을 가진다.

### [참 고 문 헌]

- [1] M. L. Crawford, "Generation of standard EM field using TEM transmission cells", IEEE Trans. EMC, vol 16, no.4, pp. 189-193, Nov.1974
- [2] Eugenio Costamagna, "Modified TEM Cell Design using Mixed Simulated Annealing-Deterministic Optimization", IEEE Trans.Magnetics, vol 32, no 3, pp.1202-1205, May, 1996
- [3] P. P. Silvester and R. L. Ferrari, *Finite Elements for Electrical Engineers*: Third Edition. Cambridge University Press, 1996, ch. 2.
- [4] Nathan Ida and J. P. A. Bastos, *Electromagnetic and Calculation of Fields*: Second Edition. Springer-Verlag New York, Inc., 1997, ch. 3.
- [5] K.Malathi, "Analysis of Field in a Symmetric TEM CELL by FEM", proceeding of INCEMIC, pp.49-53, 2001