

진화 알고리즘을 이용한 TEM CELL의 최적설계

Optimization of TEM Cell Using Evolution Strategy

채수정, 강노원, 정현교 · 서울대학교

최경 · 강원대학교

Soo-Jeong Chae, No-Weon Kang, Hyun-Kyo Jung · Seoul National University

Kyung Choi · Kangwon National University

ABSTRACT

본 논문에서는 TEM Cell의 최적 설계방법을 제안한다. 임피던스 부정합을 최소화시키기 위해 Cell 내부의 특성 임피던스를 50Ω 으로 유지하며, 동시에 중심 도체판(septum)의 길이와 도체판 날개(winglet)의 각을 변화 시킴으로써 내부 전자파의 균일도(Uniformity)를 최대화 하는 TEM Cell의 최적설계방법을 제안하며 (1+1)ES를 적용하여 시험영역을 최대화 하는 최적 설계 변수들을 제시한다.

I. 서론

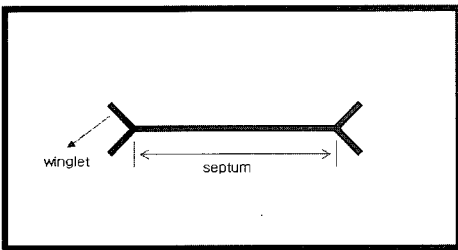
TEM Cell은 여러 장비의 전자파 방사시험(Radiation test) 또는 Susceptibility 시험에 널리 사용되고 있다. 이러한 시험을 하기 위한 기존의 방법은 표준이득 horn 안테나와 평행판 라인을 사용하였다. 그러나 이 경우 전자파 에너지가 주위로 방사되어 외부와 간섭을 일으키거나, 주위 환경에 의하여 내부의 전자계가 영향을 받을 수 있으므로 불가피하게 고가의 전

자파 무반향실을 필요로 하게 된다. 그러나 TEM Cell을 이용하게 되면 외부와의 전자파 간섭이 차단되어 무반향실이 필요치 않게 되며, 제작 또한 비교적 경제적이라는 이점이 있다.

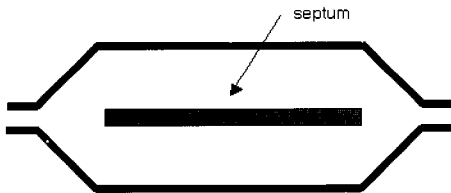
TEM Cell을 설계하기 위해서는 몇 가지 사항을 고려해야 한다. 먼저 Cell 내부에서 사용될 수 있는 시험 영역을 최대로 확보해야 하며, Cell 내부의 특성 임피던스의 부정합을 최소화 시켜야 하며, 시험영역 내부에서의 전자파의 균일도(Uniformity)를 최대화 시켜야 한다[1]. 균일도를 최대화시키기 위한 노력으로 기존의 중심 도체판(Septum)에 날개(Winglet) 구조를 추가한 Modified TEM CELL 구조가 제안되었다[2]. 그러나 Cell 내부 전 영역에서 전자파가 균일하지는 않으며 시험영역을 넓게 확보하는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

II. 해석모델과 문제정의



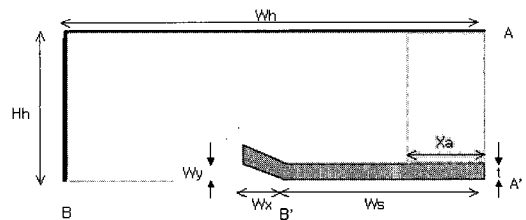
[그림 1] Modified TEM Cell 의 정면구조



[그림 2] Modified TEM Cell 의 측면구조

[그림 1]과 [그림 2]는 TEM CELL의 단면 구조를 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 사이 공간의 1/3정도가 되는 공간이므로 이 부분에 EUT가 놓이게 된다.

[그림 3]은 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.



[그림 3] 1/4 해석모델

첫째로 TEM CELL은 커넥터를 통해 외부 라인과 연결되어 사용되므로 임피던스 부정합(mismatch)을 최소화시키기 위해서 Cell 내부의 특성 임피던스를 50Ω 으로 맞추어야 한다. 그러나 본 논문에서의 모델은 1/4해석모델이므로 $50 \times 4 \Omega$ 으로 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 ϵ_o 은 공기 중에서의 유전율이며, ϵ_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 Δu 는 두 도체사이의 전위차 (Potential difference)를 의미한다. 또한 정전 용량과 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 전자 파가 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 크기이며, $\overline{E_v}$ 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 가능

한 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(Xa)의 초기값은 중심도체판 길이(Ws)로 정하였다. 그리고 시험영역 너비(Xa)를 조금씩 줄여 나가면서 UI가 0.03 이하가 되는 시험영역을 반복계산에 의해 찾을 수 있었다.

Ⅲ. 최적화 방법

최적화 기법은 크게 결정론적 방법 (Deterministic Method)과 비결정론적 방법 (Non-deterministic Method, Stochastic Algorithm)으로 나눌 수 있다. 결정론적 알고리즘이 일반적으로 빠른 수렴 특성을 나타내는 반면에 결정론적 알고리즘을 사용할 경우 국부 최적점 (Local Minima)에 빠질 위험성이 커진다는 단점이 있다.

비결정론적 방법의 대표적인 것으로는 진화 알고리즘(Evolution Strategy), 유전 알고리즘 (Genetic Algorithm), 면역 알고리즘(Immune Algorithm), 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing) 등을 들 수 있는데, 그 중에서도 진화 알고리즘은 결정론적인 방법에 가장 가까우면서도 구현이 간단하여 즐겨 사용되고 있다. 본 연구에서도 계산 상의 부담을 줄이기 위하여 진화 알고리즘을 사용하였다.

진화 알고리즘은 재생산, 선택, 적응의 세가지 과정으로 이루어져 있다. 첫째로 재생산은 부모개체를 기본으로 유전적 구축 범위 내에서 변이를 일으키는 과정이다. 재생산을 통하여

발생된 지식개체의 목적함수화 부모개체의 목적함수를 비교하여 우수한 개체를 다음 세대의 부모개체로 선택하는 선택 과정은 자연계의 적자 선택의 원리를 모사한 것이다. 마지막으로 변화된 주위 환경에 적응하는 과정은 금속의 제련과정중 플립과정을 모사한 알고리즘인 시뮬레이티드 어닐링을 적용한 부분이다. 주위 환경이 변하면 보다 큰 변이폭을 갖게 되고 적응해 나가는 정도에 따라 변이폭이 변하며 안정된 상태에 접근할수록 좁은 변이폭을 갖게된다. 진화 알고리즘은 절대 최적값을 찾아갈 수 있고, 빠른 수렴 특성을 나타낸다. 진화 알고리즘의 과정은 다음과 같다. 우선 초기 변수와 초기 목적함수를 전체 유전적 범위 내에서 설정을 하고 지식세대의 발생을 위하여 재생산 과정을 수행한다. 이때 초기 변수를 정해진 변이폭 내에서 변화시켜 새로운 변수를 발생하게 되는데 변이폭은 초기의 정해진 변이폭과 α 의 곱으로 나타나게 된다. 여기서 α 는 초기에는 1의 값을 갖게 되고 목적함수의 개선 회수가 목적함수 계산 회수의 20[%] 이상이면 0.85를 나누어 증가시키고 그렇지 않으면 0.85를 곱해 준다. 이는 현 상태가 최적점 근처에서 수렴하고 있으면 세밀한 변화를 위하여 변이폭을 감소시켜야 하고 그렇지 않으면 보다 많은 가능성을 찾아야 하기 때문에 변이폭을 늘려야 한다. 이러한 과정을 통하여 발생된 지식 개체에 대하여 목적함수를 계산한 후 부모개체의 목적함수와 비교하여 자연선택에 의한 보다 우수한 개체를 다음 세대의 부모개체로 선택한다. 이 과정에서 국부해를 향해 수렴하기 시작하면 절대 최적점으로 옮겨갈 확률이 줄어들게 된다. 이 때 국부해로 수렴할 확률을 줄여주기 위하여 전체 유전적 범위내에서 임의의 개체를 발생시킨 후 목적함수를 계산하여 현재의 부모개

체와 비교하는 과정을 추가할 수도 있다. 여기서도 자연의 적자 선택의 원리가 적용되어 다음 세대의 부모개체는 보다 우수한 개체로 치환된다. 이러한 재생산, 선택, 적응의 반복적인 과정을 통하여 목적함수를 최대로 하는 변수값을 찾을 수 있다.

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 Ω 으로 만들기 위한 항이며 200 Ω 에 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.

IV. 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 3]에 명시되어 있다. 외부 도체의 높이와 너비, 중심 도체판의 두께는 기존의 논문에 사용된 치수를 사용하였다[1].

<표 1>은 설계변수들의 변화범위이며, <표 2>는 최적화 결과를 보여주고 있다. <표 2>에서 특성 임피던스 Z_0 와 균일도 지수(UI)는 각

각 200 Ω과 0.03에 수렴했음을 알 수 있으며, 그때의 시험영역의 너비(Xa)는 235.76mm로 최적화 되었다. TEM cell의 시험영역은 전자파 내성(EMS)시험에 대한 국제 규격인 IEC61000-4-3(전기전자 제품에 대한 내성 규격)에 의해 시험영역 중심지점의 전계의 세기와 최대값(최소값)의 편차는 +/-3dB 이내에 있어야 한다고 정의하고 있다. 본 논문에서 제안한 시험영역에서의 전계의 편차는 -2.112~1.894dB이며 상당히 균일한 전계 분포를 얻을 수 있었다.

<표 1> 설계 변수의 범위

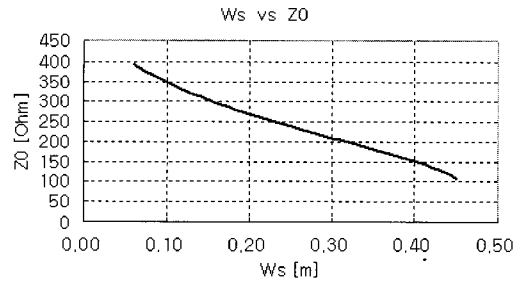
설계 변수	Ws [mm]	Wx [mm]	Wy [mm]
Min.	10	10	10
Max.	400	50	50

<표 2> 최적화 결과

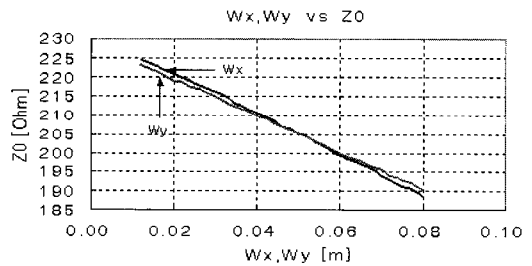
Parameter	Value
Wh [mm]	541
Hh [mm]	450
t [mm]	0.79
Ws [mm]	379.12
Wx [mm]	23.4
Wy [mm]	47.479
Z ₀ [Ω]	200.0079
UI	0.029727
Xa [mm]	235.76
Maximum field strength deviation with Center field strength [dB]	1.894 ~ -2.112

[그림 4]와 [그림 5]는 각각의 설계 변수가 특성 임피던스(Z₀)에 미치는 영향을 보여주고 있

다. 설계 변수의 길이가 길어질수록 특성 임피던스는 거의 선형적으로 감소함을 알 수 있다.

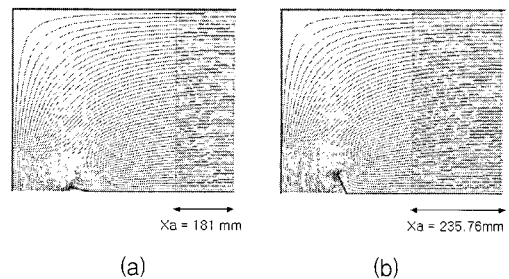


[그림 4] 특성임피던스와 중심도체판 길이(Ws)와의 관계



[그림 5] 특성 임피던스와 Winglet의 X-Y 방향의 길이와의 관계

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



[그림 6] 최적화 전(a)과 후(b)의 시험영역 비교

V. 결 론

본 논문에서는 TEM CELL의 최적설계를 제시하였다. Cell 내부의 특성 임피던스를 50 Ω으로 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.

■참고문헌

- [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 Transactions on 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, *Electromagnetics 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

저자 소개



채수정

2002년 전북대 전자공학과 졸업
2002년 ~ 현재 서울대 대학원 전
기공학부 석사과정

Tel : 02-880-7262

E-mail : jubilee@elecmech.snu.
ac.kr



정현교

1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업
1984년 동 대학원 전기공학과 졸업
(공학박)

1987년-1989년 뉴욕 Polytechnic
Univ. 객원 교수

1984년-1993년 강원대 전기공학과
부교수. 현재 서울대 전기
공학부 교수

Tel : 02-880-7242

E-mail : hkjung@snu.ac.kr



강노원

1991년 서울대 전기공학부 졸업
1993년 동 대학원 전기공학부 졸업
(석사)

1997년 ~ 현재 동 대학원 전기공
학부 박사과정

Tel: 02-880-7262

E-mail : knw@elecmech.snu.ac.kr



최경

1981년 서울대 공대 전기공학과 졸업
1983년 동 대학원 전기공학과 졸업
(석사)

1988년 동 대학원 전기공학과 박사
과정 졸업, 현재 강원대학
교 공과대학 전기전자정보
통신공학부 교수

Tel : 033-250-6324

E-mail : Kyunchoi@kangwon.ac.
kr