

# 전자파 차폐 합체 개구부 및 최적 PCB 배치 설계 해석

김병욱 · 박현호 · 정연춘

한국표준과학연구원  
전자기연구부 전자기환경그룹

## I. 서 론

전자파 내성 규제가 본격적으로 시작됨에 따라 전자파 차폐(electromagnetic shielding)에 대한 관심이 고조되고 있다. 전자파 차폐 기술은 두가지 측면에서 다루어진다: 하나는 재료적인 측면이다. 주로 저주파 자기장 차폐에 관한 관심으로써 차폐 재료의 선택과 합체(enclosure)의 모양이나 구조에 대한 연구가 주 관심사항이다. 다른 하나는 차폐 개구부의 설계에 관한 사항이다. 이는 주로 초고주파 영역에서 관심을 가지는 것으로서 합체의 다양한 개구부를 통해 어떻게 전자파가 침투하며, 침투한 전자파가 어떻게 합체 내부에 분포하는가 하는 것이다. 이러한 문제는 대개 전자장 수치해석 연구의 한 분야로 취급되어 왔다. 본고는 후자의 차폐 기법에 대한 내용만을 다루고 있다.

전자파 차폐 합체는 일반적으로 전원선, 신호선 등을 위한 개구부와 냉각용으로 사용하기 위한 개구부 등 많은 종류의 개구부를 가지게 되며, 개구부를 통하여 침투한 전자기장은 합체의 내부에서 위치에 따라 많은 차이를 보이며 분포하게 된다. 개구부의 크기 및 형태가 여러 가지 종류이고 일반적으로 합체에 여러 개의 개구부가 존재하게 되어, 이러한 개구부에 의한 전자파 차폐효과의 변화를 예측하기 어려우며, 전자파 차폐효과를 예측하여도 합체의 내부에 분포하는 전자기장의 크기가 위치에 따라 많은 차이를 보여 합체의 내부에서 전자기장의 분포를 예측하는 것은 중요하다. 이러한 예측은 유한요소법(FEM, Finite Element Method), 유한차분 시간영역법(FDTD, Finite Difference Time

Domain), 전송선로근사방법(TLM, Transmission Line Method) 등 3차원 구조의 전자기장 분포에 대한 근사해를 계산할 수 있는 수치해석적인 방법을 사용하여야만 가능할 것이다. 또한 이러한 방법을 사용함으로써 개구부를 가진 합체의 내부에 PCB(Printed Circuit Board)등이 놓인 경우 PCB로 유도되는 전자기장의 크기 등에 예측이 쉬워진다.

본 기술해설은 한국표준과학연구원 전자기환경 그룹에서 전자파 차폐 합체 설계기술에 대해 그동안 연구해 온 결과를 요약 정리한 것이다. 기술한 내용은 크게 두 분야로 나누어진다. 하나는 유한요소법을 이용한 합체 개구부 해석 방법이고, 다른 하나는 시간영역 유한차분법을 이용한 합체 내부에서의 PCB 간의 전자기적 결합 해석 방법에 관한 내용이다. 이러한 연구 내용은 우리 산업체가 전기, 전자장치의 합체 설계에 반영하여 활용할 수 있을 것으로 기대하며, 나아가서 우리 연구그룹에서 추진하고 있는 "전자파 장애 해석 소프트웨어"와 연동되어 확대 발전해 나갈 것이다.

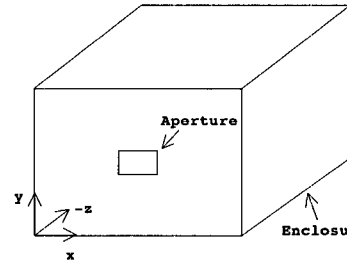
## II. 유한요소법을 이용한 차폐합체의 전자기장 침입 및 분포 해석

3차원 유한요소법을 적용하여 평면파가 전자파 차폐 합체에 입사하여 합체가 가지고 있는 개구부를 통과하여 합체 내부에 침입 분포하는 전자기장의 근사해를 구하였고, 측정된 측정결과 및 차폐효과를 간단하게 예측하기 위해 사용되는 있는 Schulz의 식 [2]등과 비교하여 해석의 유효성을 증명하였다.

유한요소법을 적용하여 전자기장의 근사해를 구하기 위해서는 첫째, 유한한 크기의 풀이하려고 하는 구조, 둘째, 풀이하려고 하는 구조의 내부에서 만족하는 전자기장의 미분방정식, 셋째, 풀이하려고 하는 구조를 이루고 있는 경계들에서 만족하는 전자기장의 경계 조건 등이 주어지면 된다<sup>[1]</sup>. 풀이하려고 하는 구조는 개구부의 형태, 크기, 개수 등과 전자파 차폐 합체의 크기, 모양 등에 의해 결정될 것인데, 풀이하여야 할 영역을 유한하게 제한하여야만 유한요소법의 적용이 가능하므로 차폐 합체를 이루는 도체와 차폐 합체의 개구부들을 경계로 하여 둘러싸인 영역을 유한요소법의 풀이 영역으로 하였다. 차폐 합체의 내부를 지배하는 전자기장의 미분방정식은 맥스웰(Maxwell) 방정식으로부터 유도 가능한 파동방정식(Vector wave equation)이 된다. 차폐 합체를 이루고 있는 도체를 전도도가 무한한 완전한 도체라 가정하여도 많은 오차의 요인이 되지 않으므로, 이러한 가정을 사용한다면 완전한 도체면에서 전자기장의 경계조건이 잘 알려져 있으므로<sup>[1]</sup>, 유한요소법을 적용할 영역을 이루고 있는 또 다른 경계면인 개구부에서의 경계조건이 주어진다면 모든 경계조건이 알려져서, 유한요소법을 이용하여 전자파 차폐용 합체에 입사된 전자기장의 근사해를 얻을 수 있을 것이다.

[그림 1]은 개구부를 포함하고 있는 전형적인 전자파 차폐 합체이다. [그림 1]에서와 같은 좌표계를 사용하기로 한다. 유한요소법의 적용을 위하여 차폐 합체를 합체의 외부 영역과 합체의 내부 영역의 두 개의 부분으로 나누어 생각하였다. 합체 내부의 전자기장은 유한한 영역이므로 유한요소법을 적용하여 전자기장의 근사해를 얻을 수 있을 것이다. 또한 합체의 외부에서 만족하는 전자기장은 그린(Green) 함수를 이용하여 적분방정식의 형태로 나타낼 수 있을 것이다. 그러므로 개구부에서 합체의 내부의 전자기장과 합체 외부의 전자기장

에 대하여 연속조건을 적용한다면 모든 곳에서 유효한 전자기장을 얻을 수 있다.



[그림 1] 개구부를 포함한 전자파 차폐합체의 예

## 2-1 경계적분방정식

합체의 외부에서 전자기장은 다음의 파동방정식(Vector Wave Equation)을 만족할 것이다.

$$\nabla \times \nabla \times E(r) - k_0^2 E(r) = -jk_0 Z_0 J(r) \quad (1)$$

방사되는 전자기장을 구하기 위해 다음의 다이아딕 그린함수 (Dyadic Green's Function)을 정의한다.

$$\nabla \times \nabla \times \overline{\overline{G}}_e(r, r') - k_0^2 \overline{\overline{G}}_e(r, r') = \overline{\overline{I}} \delta(r - r') \quad (2)$$

이 그린함수를 이용하면 전기장은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E(r) = -jk_0 Z_0 \int \int_{V_s} J(r') \cdot \overline{\overline{G}}_e(r, r') dV - \oint \oint_{S_\infty} \{ [\hat{n} \times E(r')] \cdot [\nabla' \times \overline{\overline{G}}_e(r, r')] + [\hat{n}' \times \nabla' \times E(r')] \cdot \overline{\overline{G}}_e(r, r') \} dS' \quad (3)$$

여기서  $V_s$ 는 합체의 외부를 이루는 영역을 의미하고,  $S_\infty$ 는 외부영역을 이루고 있는 경계면이며,  $\hat{n}$ 은 경계면에 수직인 단위벡터이고,  $\nabla'$ 은

$\nabla$  이 프라임(prime)좌표계에 대해서만 이로부터 의미를 의미한다. 식 (3)에서 만약 개구부가 차폐 합체에 비하여 매우 작다면 그린함수를 반공간그린함수(Half Space Green's Function)로 사용할 수 있을 것이다. 이와 같은 가정에 의하여 식 (3)은 식 (4)와 같이 나타내어질 수 있다<sup>[1],[3],[4],[6],[7]</sup>

$$\begin{aligned}
 E(r) = & -jk_0 Z_0 \int \int_{V'} J(r') \cdot \overline{G}_0(r, r') dV' \\
 & + jk_0 Z_0 \int \int_{V'} J(r') \cdot [\overline{G}_0(r, r_i') \\
 & - 2\overline{G}_0(r, r')] dV + 2 \int \int_{S_a} [\hat{z} \times E(r')] \\
 & \cdot [\nabla' \times \overline{G}_0(r, r')] dS' \quad (4)
 \end{aligned}$$

여기서,  $\overline{G}_0$ 는 반공간 다이아드 그린함수이며,  $r_i$ 는 이미지 소스위치,  $S_a$ 는 개구부면을 나타낸다. 식 (4)의 우변의 첫 번째 항은 자유공간에서 전류  $J$ 에 의하여 방사되는 전기장이므로  $E^{inc}$ 로 나타낼 수 있으며, 두 번째 항은  $J$ 의 이미지 전류에 의하여 방사되는 전기장이므로  $E^{ref}$ 로 나타낼 수 있을 것이다. 세 번째 항은 개구부에 의하여 산란되는 전기장에 해당할 것이다. 이러한 방법으로 식 (4)의 각각의 항을 정의하면 식 (4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E(r) = & E^{inc} + E^{ref} \\
 & + 2 \int \int_{S_a} [\hat{z} \times E(r')] \cdot [\nabla' \times \overline{G}_0(r, r')] dS' \quad (5)
 \end{aligned}$$

수학적 계산으로 식 (5)를 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \nabla \times E(r) = & -jk_0 Z_0 H^{inc} - jk_0 Z_0 H^{ref} \\
 & - 2k_0^2 \int \int_{S_a} [\hat{z} \times E(r')] \cdot \overline{G}_0(r, r') dS' \quad (6)
 \end{aligned}$$

식 (6)은 전기장과 자기장의 관계를 나타냄으로

합체의 내부에서 전기장의 근사해를 구하기 위하여 유한요소법을 적용할 때 개구부의 경계조건으로 사용이 가능할 것이다. 개구부에서 경계조건을 얻기 위하여 식 (6)에서 좌표  $z$ 를 0으로 다가가게 하면 다음의 식을 얻을 수 있으며, 개구부에서의 경계조건으로 사용이 가능할 것이다.

$$\begin{aligned}
 \hat{z} \times [\nabla \times E(r)]_{z=0+} = & -2jk_0 Z_0 \hat{z} \times H^{inc}(r) \\
 & - 2k_0^2 \hat{z} \times \int \int_{S_a} [\hat{z} \times E(r')] \cdot \overline{G}_0(r, r') dS' \quad (7)
 \end{aligned}$$

## 2-2 지배방정식

합체의 내부에서 전자기장이 만족하는 지배방정식은 맥스웰 방정식으로부터 유도 가능한 소스를 가지지 않는 파동방정식(Vector Wave Equation)이 된다.

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_r} \nabla \times E(r) \right) - w^2 \epsilon E(r) = 0 \quad r \in V \quad (8)$$

전기장의 경우 도체면에 대한 경계조건을 인가를 인가할 때 미지수가 감소하므로 풀이하여야 할 행렬의 크기를 감소시킬 수 있어서 전기장으로 이루어진 식을 선택하였다.

## 2-3 경계조건

전기장을 풀이 변수로 선택하였으므로 전기장에 대한 각각의 경계면에서의 경계조건을 유도하고 인가하여야 한다. 유한요소법의 적용 영역인 합체의 내부를 둘러싸고 있는 경계면은 도체로 이루어진 부분과 개구부로 이루어진 부분이다. 합체가 완벽한 도체로 이루어져 있다면 전기장은 합체의 결면에서 전기장의 수평성분이 0이 되는 다음의 조건을 만족할 것이다.

$$\hat{n} \times E = 0 \quad (9)$$

개구부에서의 경계조건은 식 (7)에 연속조건을 적용하면 얻을 수 있으며 다음과 같다<sup>[1]</sup>

$$\hat{z} \times \left[ \frac{1}{\mu_r} \nabla \times E \right] + P(E) = U^{inc} \quad (10)$$

여기서,

$$U^{inc} = -2jk_0 Z_0 \hat{z} \times H^{inc}(r)$$

$$P(E) = 2k_0^2 \hat{z} \times \int \int_{S_a} [\hat{z} \times E(r')] \cdot \overline{G_0}(r, r') dS'$$

#### 2-4 유한요소법의 적용

유한요소법을 적용하기 위하여 사용하는 방법인 Ritz의 방법을 적용한다면 합체 내부의 전기장을 구하는 문제는 다음의 문제와 동가이다<sup>[1]</sup>.

$$\begin{cases} \delta F(E) = 0 \\ \hat{n} \times E = 0 \end{cases} \text{ at cavity wall} \quad (11)$$

여기서,

$$F(E) = \frac{1}{2} \int \int \int_V \left[ \frac{1}{\mu_r} (\nabla \times E) \cdot (\nabla \times E) - k_0^2 \epsilon_r E \cdot E \right] dV$$

$$- \int \int_{S_a} \left[ \frac{1}{2} E \cdot P(E) - E \cdot U^{inc} \right] dS$$

식 (11)를 계산할 때 그린함수의 특이성(Singularity)에 의하여 나타나는 적분의 어려움을 피하기 위해 수학적 계산으로 식 (11)로부터 다음의 식 (12)를 유도할 수 있다<sup>[1],[2]</sup>.

$$F(E) = \frac{1}{2} \int \int \int_V \left[ \frac{1}{\mu_r} (\nabla \times E) \cdot (\nabla \times E) - k_0^2 \epsilon_r E \cdot E \right] dV - k_0^2 \int \int_{S_a} [\hat{z} \times E(r)]$$

$$\cdot \left\{ \int \int_{S_a} [\hat{z} \times E(r')] G_0(r, r') dS' \right\} dS$$

$$+ \int \int_{S_a} \{ \nabla \cdot [\hat{z} \times E(r)] \} \left\{ \int \int_{S_a} G_0(r, r') \nabla' \cdot [\hat{z} \times E(r')] dS' \right\} dS + 2jk_0 Z_0 \int \int_{S_a} [\hat{z} \times E(r)] \cdot H^{inc}(r) dS \quad (12)$$

#### 2-5 전자파 차폐합체의 전자기장 침입 및 분포 해석 프로그램

앞에서 설명한 해석방법을 바탕으로 GUI를 가지는 해석용 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 직사각형의 합체에 대하여 적용이 가능하며, 합체의 한면에 개구부가 포함된 경우에 대하여 해석이 가능하도록 하였다. 개구부의 형태는 원형 및 직사각형에 대하여 적용이 가능하다. 합체의 내부에 격벽이 포함된 경우에도 사용이 가능하도록 개발되었으며, 합체 내부의 격벽이 원형 또는 직사각형의 개구부를 가질 수 있도록 하였다. 유한요소법의 기본 요소로 사각벽돌형 및 삼각뿔요소를 사용하도록 하였는데, 개구부가 직사각형이고 합체에 비하여 매우 작을 때는 사각벽돌형의 사용이 유리하고, 개구부가 원형일 때는 삼각뿔요소의 사용이 유리하다<sup>[2]</sup>. [그림 2]는 개발된 프로그램의 흐름도이다.

##### 1. 프리프로세서

- (1). 합체 크기 및 도체 두께 결정
- (2). 격벽이 존재하는 경우 격벽 삽입
- (3). 개구부 삽입
- (4). 요소분할을 위한 변수 결정
- (5). 계산주파수, 입사파의 크기 및 편파 결정

##### 2. 메인

- (1). 요소 생성
- (2). 계산

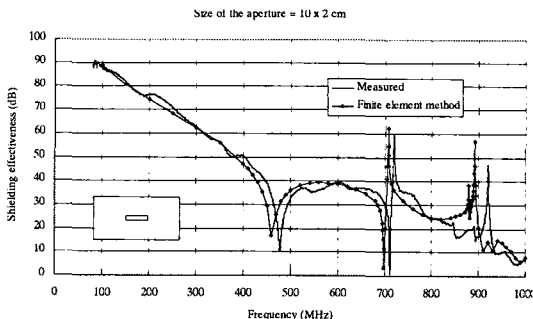
##### 3. 포스트프로세서

- (1) 결과분석

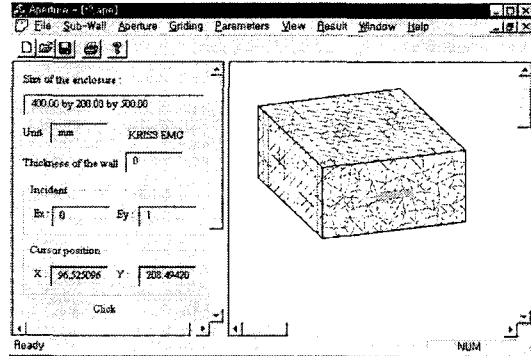
[그림 2] 개발된 프로그램의 흐름도

프로그램은 크게 프리프로세서, 메인과 포스트프로세서로 구분되어 있다. 프리프로세서와 포스트프로세서는 윈도우 95환경에서 동작하도록 개발되었으며, 메인 부분은 많은 계산 비용을 요구함으로 중형컴퓨터 이상에서 사용하도록 개발되었다. 프리프로세서는 개구부를 포함한 합체를 디자인하는 부분으로 합체의 크기, 개구부의 모양, 격벽의 위치, 계산할 주파수, 입사파의 크기 및 편파, 합체를 이루고 있는 도체의 두께 등을 결정한다. 메인부분은 계산하는 과정으로 요소를 생성하는 프로그램과 유한요소법을 적용하여 계산하는 프로그램으로 구성되어 있다. 기본 요소가 삼각뿔 요소인 경우 덜러니 분할 알고리즘을 이용하여 요소를 생성하였다<sup>[3]</sup>. 요소를 생성하는 과정도 계산비용이 많이 필요한 부분으로 중형컴퓨터이상에서 사용하도록 개발되었다. 요소 생성을 마친 뒤 유한요소법을 이용하여 계산하도록 프로그램된 프로그램을 이용하면 메인부분이 종료된다. 포스트프로세서는 유한요소법으로 계산한 결과를 분석하는 과정으로 합체 내부의 전기장 분포를 파악할 수 있다.

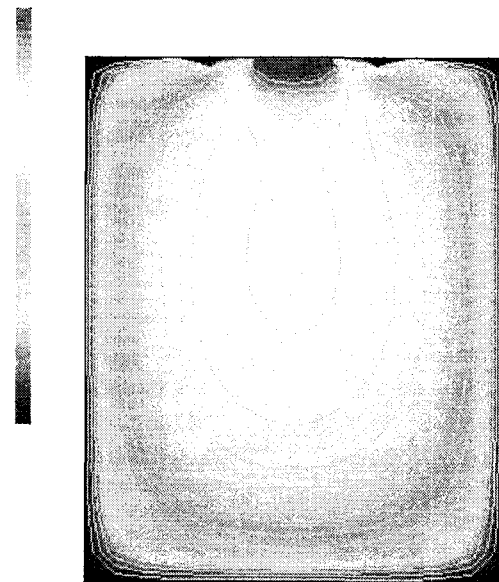
[그림 3]은 합체의 크기는 400×200×500 mm이고, 사각형 개구부 1개가 합체의 전면에 놓인 경우로 개구부의 크기는 100×20 mm인 경우 합체에 직경이 2 mm이고, 크기가 80 mm인 모노폴 프르브를 합체의 중앙에 삽입하여 측정된 값과 유한요소



[그림 3] 해석결과와 측정결과와의 비교



[그림 4] 개구부를 가지는 전자파 차폐 합체의 설계의 예



[그림 5] 전자파 합체 내부의 전기장 분포의 예

법을 이용하여 계산한 값을 비교한 것이다. 유한요소법을 적용할 때 프르브를 모델링하여 실험결과와 비교할 수 있는 결과를 얻을 수 있도록 하였다<sup>[2]</sup>. [그림 4]는 개발된 프로그램을 이용하여 개구부를 가지는 합체를 설계한 예이며, [그림 5]는 합체의 크기는 400×200×500 mm인 합체의 전면에 100×80 mm의 개구부가 있는 경우, 450 MHz의 주

파수 에서  $y = 100 \text{ mm}$ 인 평면의 전자장의 분포를 개발된 프로그램으로 보인 것이다.

## 2-6 결 론

유한요소법을 이용하여 개구부를 가지는 전자파 차폐 합체의 전자기장 침입 및 분포 특성 해석 프로그램을 개발하였다. 원형 및 사각형 개구부를 가지는 임의의 크기의 전자파 차폐용 합체에 적용이 가능하므로 냉각용 팬 등의 사용을 위한 개구부의 설계에 응용이 가능하며, 합체 내부의 전자기장 분포 예측이 가능하여 전자기장에 민감한 회로소자의 배치 등에 대한 설계자료로 사용이 가능하다.

## Ⅲ. 시간영역 유한차분법(FDTD)를 이용한 전자파차폐 합체 해석

### 3-1 서 론

개구부를 가지는 전자파차폐 합체의 차폐효과에 대한 연구는 여러 가지 방법으로 연구되어 왔으며, 주로 수치 해석적인 방법인 모멘트법, 유한요소법, 시간영역 유한차분법, 그리고 전송선 모델방법 등이 많이 사용되고 있다<sup>[3]~[5]</sup>. 시간영역 유한차분법은 전자기장 산란문제를 시간영역에서 풀이하여 펄스 전자파에 의한 전자파 산란 등의 문제 해석에 유리하여 전자파 산란문제 해석을 위해 많이 사용되어 왔다<sup>[6]</sup>.

본 절에서는 차폐구조물이 여러 개의 개구부를 가지는 경우의 차폐효과를 시간영역 유한차분법을 이용하여 해석한 결과를 기술하였다. 단일 개구부를 가지는 차폐구조물의 차폐효과를 예측하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 최근 여러 개의 개구부를 가지는 경우에 대하여 여러 가지 방법으로 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 차폐 구조물은 여러

개의 개구부를 가지고 있는 것이 보통이며, 개구부들의 배치에 따라 차폐효과는 많은 차이를 보이고 있다. 같은 면적의 개구부를 가지더라도 개구부를 어떻게 배치하느냐에 따라 차폐 구조물 내부의 전기장과 자기장의 분포에 많은 영향을 주게 된다.

또한 차폐 구조물 내부에 PCB가 놓여 있는 경우, 차폐 구조물 외부로부터 개구부를 통해 침투한 전자파가 PCB의 놓여 있는 전송선에 간섭을 일으키는 정도를 연구하였다. 차폐 구조물 내부의 PCB 배열 방법에 따라 외부로부터 침투한 전자파와의 간섭 정도가 크게 변하게 되므로 이에 대한 연구가 중요하다. 또한 차폐 구조물 내부에 격벽을 이용한 또 다른 차폐공간이 있는 경우에 대해서도 해석하였다. 시스템의 내부에 전자파를 많이 방출하는 회로가 있는 경우 차폐구조물 내부에 또 다른 차폐공간을 만들어 다른 회로에 영향을 줄이는 것이 보통이어서, 이러한 해석은 중요하다.

### 3-2 시간영역유한차분법을 이용한 차폐구조물 해석

시간영역 유한차분법에 대한 자세한 내용은 잘 알려져 있으므로 기본적인 내용들만 간단히 살펴보기로 하겠다.

선형(linear), 균질(homogeneous)이고 등방성(isotropic)인 매질에서의 미분형태의 맥스웰 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (13)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \quad (14)$$

맥스웰 방정식에서 전기장과 자기장의 각 성분들을 시간과 공간에 대해서 유한차분형식으로 표현할 수 있다. 예를 들어  $z$ 방향의 전기장 성분을 유한차분형식으로 나타내면 다음과 같다.

$$E_z(x, y, z; t) = E_z^n(i, j, k) \quad (15)$$

여기서  $x = i \times \Delta x$ ,  $y = j \times \Delta y$ ,  $z = k \times \Delta z$ , 그리고  $t = n \times \Delta t$ 이다. 편의상 공간상의 증가량  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ 를  $\Delta$ 로 동일하게 사용하기로 한다. 맥스웰 컬(curl) 방정식에서 시간과 공간에 대해서 centered finite-difference로 표현하고, 그들을 반복계산(iterative calculation)이 가능한 형태로 고쳐 쓰면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} E_x^{n+1}(i, j, k) &= C_x^e(i, j, k) E_x^n(i, j, k) \\ &+ \frac{C_x^h(i, j, k)}{\Delta y} [H_z^{n+1/2}(i, j, k) \\ &- H_z^{n+1/2}(i, j-1, k)] - \frac{C_x^h(i, j, k)}{\Delta z} \\ &\cdot [H_y^{n+1/2}(i, j, k) - H_y^{n+1/2}(i, j, k-1)] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} E_y^{n+1}(i, j, k) &= C_y^e(i, j, k) E_y^n(i, j, k) \\ &+ \frac{C_y^h(i, j, k)}{\Delta z} [H_x^{n+1/2}(i, j, k) \\ &- H_x^{n+1/2}(i, j, k-1)] \\ &- \frac{C_y^h(i, j, k)}{\Delta x} [H_z^{n+1/2}(i, j, k) \\ &- H_z^{n+1/2}(i-1, j, k)] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} E_z^{n+1}(i, j, k) &= C_z^e(i, j, k) E_z^n(i, j, k) \\ &+ \frac{C_z^h(i, j, k)}{\Delta x} [H_y^{n+1/2}(i, j, k) \\ &- H_y^{n+1/2}(i-1, j, k)] \\ &- \frac{C_z^h(i, j, k)}{\Delta y} [H_x^{n+1/2}(i, j, k) \\ &- H_x^{n+1/2}(i, j-1, k)] \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} H_x^{n+1/2}(i, j, k) &= H_x^{n-1/2}(i, j, k) \\ &- \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} [E_z^n(i, j+1, k) - E_z^n(i, j, k)] \end{aligned}$$

$$+ \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} [E_y^n(i, j, k+1) - E_y^n(i, j, k)] \quad (19)$$

$$\begin{aligned} H_y^{n+1/2}(i, j, k) &= H_y^{n-1/2}(i, j, k) \\ &- \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} [E_x^n(i, j, k+1) - E_x^n(i, j, k)] \\ &+ \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} [E_z^n(i+1, j, k) - E_z^n(i, j, k)] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} H_z^{n+1/2}(i, j, k) &= H_z^{n-1/2}(i, j, k) \\ &- \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} [E_y^n(i+1, j, k) - E_y^n(i, j, k)] \\ &+ \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} [E_x^n(i, j+1, k) - E_x^n(i, j, k)] \end{aligned} \quad (21)$$

여기서,

$$\begin{aligned} C_l^e(i, j, k) &= \frac{2\varepsilon_l(i, j, k) - \sigma_l(i, j, k) \Delta t}{2\varepsilon_l(i, j, k) + \sigma_l(i, j, k) \Delta t} \\ C_l^h(i, j, k) &= \frac{2\Delta t}{2\varepsilon_l(i, j, k) + \sigma_l(i, j, k) \Delta t} \end{aligned}$$

이며,  $l$ 은  $x$ ,  $y$  또는  $z$ 를 나타낸다. 변수  $\mu$ ,  $\varepsilon_l(i, j, k)$ ,  $\sigma_l(i, j, k)$ 는 각각 매질의 투자율, 유전률, 그리고 전도율이다.

식 (16)~(21)은 Yee's relations로 알려져 있으며, 이 관계식은 계산할 때 ABC(Absorbing Boundary Condition)경계와 입사 전원을 인가하는 평면을 제외한 모든 영역에서 사용되어진다. 변수  $\varepsilon_l(i, j, k)$ 와  $\sigma_l(i, j, k)$ 는 전기장이 정의되어지는 노드에서만 정의하면 된다. 계산할 때 단위격자의 간격  $\Delta$ 는 1 cm로 하였으며, 전도도는 알루미늄의 전도도인  $\sigma = 3.72 \times 10^5$  S/cm를 사용하였고, 차폐 구조물의 도체 두께는 무시하였다. Yee 알고리즘의 안정성을 위해서 단위 시간 간격  $\Delta t$ 는  $\Delta / (2c_0)$ 로 하였다. 여기서  $c_0$ 는 자유공간의 빛의 속도를 나타낸다.

계산 영역을 제한하기 위한 흡수경계조건으로 Mur의 1차, 2차 흡수경계조건을 사용하였다. Mur

의 1차 흡수경계조건은 계산 영역 경계의 모서리나 꼭지점에서 사용되었고, 나머지 경계면에서는 Mur의 2차 흡수경계조건이 사용되었다.

Total-field/scattered-field formulation을 사용하여 입사 전기장을 인가하였으며, 입사 전기장으로는 Gaussian-pulse를 사용하였다.

$$E_z^i(t) = \exp\{-(t-t_0)^2/T^2\} \quad (22)$$

여기서  $t_0$ 와  $T$ 는 Gaussian-pulse의 모양을 결정하는 변수이며,  $t_0 = 0.5$  ns,  $T = 0.1$  ns가 사용되었다. 또한 어느 특정 주파수에서 좀더 정확한 결과를 얻기 위하여 단일 주파수의 sine함수를 사용한 계산도 수행되었다.

주파수 영역에서의 결과를 얻기 위해서 시간 영역에서 얻은 결과를 FFT하였으며, 여기서는 16384 points FFT를 사용하였다.

### 3-3 해석 결과

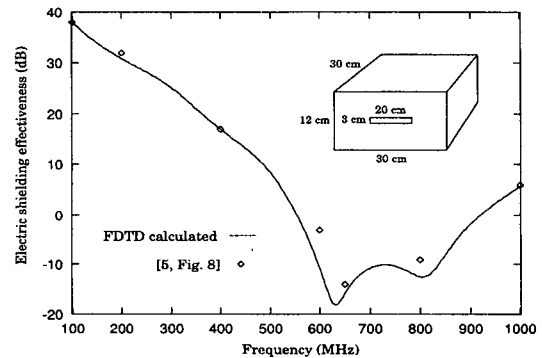
#### (1) 차폐구조물의 개구면에 의한 차폐효과

전기장 차폐효과(electric shielding effectiveness)를 식 (23)과 같이 임의의 점에서 차폐 구조물이 없는 경우의 전기장의 세기( $E_1$ )와 차폐 구조물이 있는 경우의 전기장의 세기( $E_2$ )의 비로 다음과 같이 정의할 수 있다.

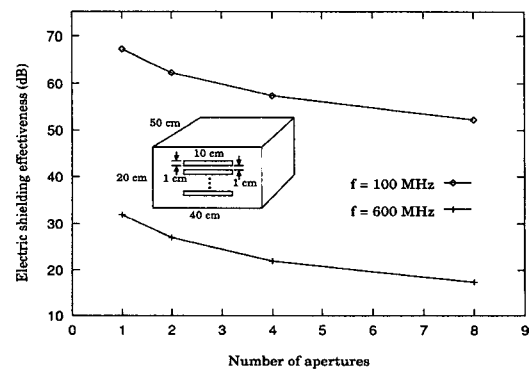
$$SE^e = -20 \log_{10}\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad [\text{dB}] \quad (23)$$

[그림 6]은  $30 \times 12 \times 30$  cm의 사각형 차폐구조물의 전기장 차폐효과이다. 입사 전기장인 Gaussian-pulse가 개구면( $20 \times 3$  cm)이 있는 차폐구조물 개구면으로부터 전방 10 cm에서 인가되었을 때 차폐구조물의 중심에서의 전기장 차폐효과이다. 해석적인 공식을 이용한 계산한 결과와 비교하여 잘 일치함을 알 수 있다<sup>[7]</sup>. [그림 7]과 [그림 8]은  $40 \times 20 \times$

50 cm의 사각형 차폐구조물에서 개구면의 배치상태가 변함에 따른 전기장 차폐효과의 변화를 보여주고 있다. [그림 7]은  $10 \times 1$  cm인 개구면의 짧은 쪽 방향으로 전기장이 입사될 때에 개구면의 개수가 늘어남에 따른 전기장 차폐효과의 변화이고, [그림 8]은  $2 \times 10$  cm 개구면의 긴 쪽으로 입사전기장이 들어올 때에 개구면의 개수가 늘어남에 따라 전기장의 차폐효과를 나타낸 그림이다. 주파수는 각각  $f = 100$  MHz인 경우와  $f = 600$  MHz인 경우로, 사각형 차폐구조물의 첫 번째 내부 공진 주파수인  $f = 480$  MHz의 전과 후이다. [그림 7]과 [그림 8]의 결과에서 주파수에 관계없이 개구면의

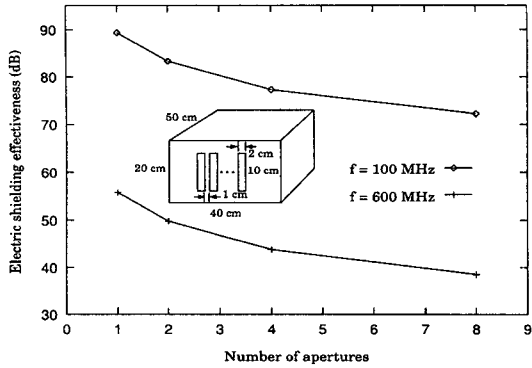


[그림 6]  $20 \times 3$  cm의 개구면을 가지는  $30 \times 12 \times 30$  cm의 차폐구조물의 전기장 차폐효과

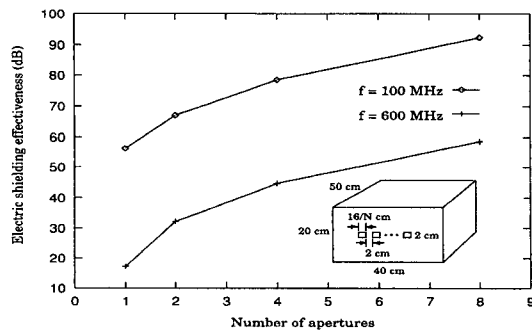


[그림 7]  $10 \times 1$  cm의 다중 개구면을 가지는  $40 \times 20 \times 50$  cm의 차폐구조물의 전기장 차폐효과

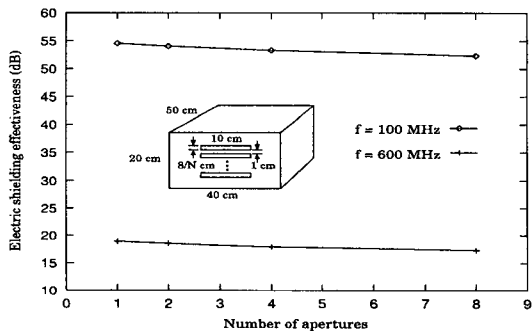




[그림 8]  $2 \times 10$  cm의 다중 개구면을 가지는  $40 \times 20 \times 50$  cm의 차폐구조물의 전기장 차폐효과



[그림 9]  $16/N \times 1$  cm ( $N=1,2,4,8$  : 개구면의 개수)의 다중 개구면을 가지는  $40 \times 20 \times 50$  cm의 차폐구조물의 전기장 차폐효과



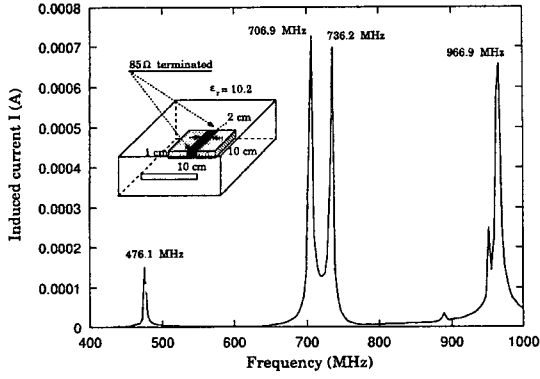
[그림 10]  $10 \times 8/N$  cm ( $N=1,2,4,8$  : 개구면의 개수)의 다중 개구면을 가지는  $40 \times 20 \times 50$  cm의 차폐구조물의 전기장 차폐효과

개수가 두 배로 늘어남에 따라 전기장의 차폐효과가 약 5~6 dB씩 감소함을 알 수 있다. 만약 6 dB씩 감소한다고 보면 개구면의 개수가 두 배가 됨에 따라(즉 차폐 구조물의 열려있는 영역이 두 배가 됨에 따라) 전기장이 두 배로 증가하는 것으로 생각할 수 있다. 전력이 두 배가 되지 않고 전기장이 두 배(전력은 네 배)가 된다는 것이 주목할 만한 사실이다. [그림 7]과 [그림 8]을 비교해 보면 [그림 7]의 경우보다 [그림 8]의 경우 전체적인 전기장의 차폐효과가 약 23 dB 정도 높음을 알 수 있다. 이는 [그림 7]의 경우에는 개구면에서 생길 수 있는 가장 지배적인 전기장의 성분과 입사 전기장의 성분이 서로 같은 방향이어서 개구면을 통한 전자기장의 차폐구조물 내부로의 침투가 용이하며, 반대로 [그림 8]의 경우는 개구면에서 생기는 가장 낮은 모드의 전기장의 방향과 외부에서 입사되는 전기장의 방향이 서로 수직이 되어 개구면을 통한 차폐구조물 내부로의 전기장의 간섭이 잘 이루어지지 않음을 알 수 있다.

[그림 9]와 [그림 10]은 전체 개구면의 열려있는 면적은 동일하게 유지하고 개구면의 개수를 증가시킬 경우에 따른 차폐효과의 변화를 본 것이다. [그림 9]는  $16 \times 2$  cm인 개구면을 입사하는 전기장과 수직인 방향으로 몇 개의 작은 개구면으로 나누었을 경우의 전기장 차폐효과이다. 개구면의 개수가 두배가 되면 차폐효과는 약 11~14 dB씩 증가함을 알 수 있다. [그림 10]은  $10 \times 8$  cm인 개구면을 입사하는 전기장의 방향으로 나누었을 경우 개구면의 개수가 두 배가 되면 차폐효과가 약 0.5 dB 정도씩 감소함을 알 수 있다.

3-4 차폐함체의 개구부를 통한 외부 전자파의 침투와 함체 내부의 격벽에 의한 효과

[그림 11]은  $10 \times 2$  cm 사각형 개구면을 가지는



(a)

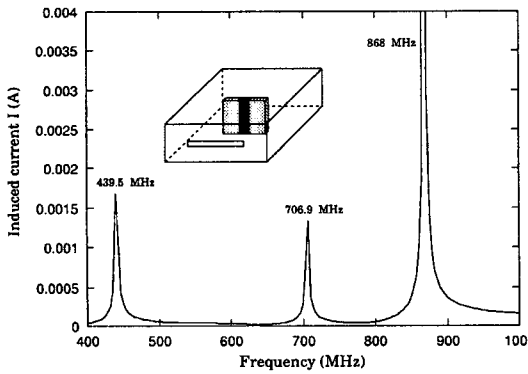
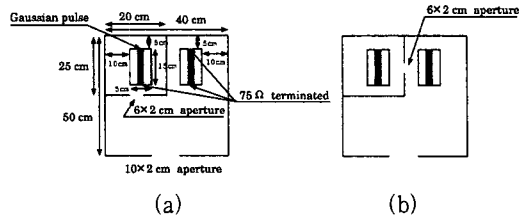
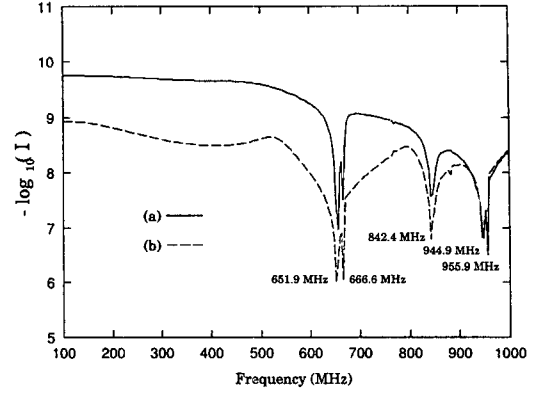


그림 11. PCB위에 있는 전송선에 유기되는 전류 (a) 전송선이 입사 전기장과 수직으로 놓여있는 경우 (b) 전송선이 입사전기장과 수평으로 놓여있는 경우

40×20×50 cm인 차폐구조물의 내부 중심에 PCB 전송선이 놓여있는 경우, 외부에서 침투한 전자파가 전송선에 간섭을 일으키는 정도를 보여주는 것으로, 전송선에 유도된 전류를 주파수에 따라 나타낸 것이다. [그림 11](a)는 외부로부터 침투되어 들어오는 전기장의 방향과 전송선이 서로 수직이 되도록 PCB가 놓여있는 경우를 나타내며, 전송선에 유도된 전류에서 peak가 생기는 주파수( $f=476.1, 706.9, 966.9$  MHz)는 차폐구조물의 공진 주파수( $f=479.8, 703.2, 970.6$  MHz)와 거의 일치하고,



[그림 12] 내부 격벽안에 있는 전송선에 흐르는 전류에 의한 외부의 전송선에 유기되는 전류

주파수  $f=736.2$  MHz에서 예외적인 peak가 발생하였음을 알 수 있다. 이 주파수에서 발생하는 peak는 예측이 불가능했던 값으로 이에 대한 연구가 필요하다. [그림 11](b)는 침투되어 들어오는 전기장의 방향과 전송선이 서로 평행하게 되도록 PCB를 놓은 경우이다. [그림 11](a)의 경우에 비해 유도된 전류의 크기가 대략 10배 정도 큰 것을 알 수 있다. 또한 peak가 생기는 첫 번째 주파수는 사각형 차폐구조물의 첫 번째 공진이 일어나는 주파수에 비해 약 40 MHz 정도 작게 나타나며, 두 번째 peak가 일어나는 주파수는 사각형 차폐구조물의 두 번째 공진 주파수와 거의 일치함을 알 수 있다. 이 경우에도 예측이 불가능했던 peak가  $f=868.9$  MHz에 존재하였으며 원인에 대한 연구가 필요하다.

[그림 12]는 사각형 차폐구조물이 내부 격벽을 가지는 경우, 격벽 내부의 전송선에 Gaussian-pulse를 인가한 경우 내부 격벽이 가지는 개구면을 침

투하여 격벽 외부에 있는 전송선에 전자파가 간섭을 일으키는 정도를 보여주고 있다. [그림 12](a)에서는 내부 격벽의 개구면이 전송선의 앞쪽에 있는 경우이고, [그림 12](b)에서는 개구면이 전송선의 옆쪽에 있는 경우이다. [그림 12](b)의 경우에 외부의 전송선에 유도되는 전류의 크기가 [그림 12](a)에 비해 더 클 것을 예측할 수 있다. 외부 전송선에 유도되는 전류를 주파수에 따라 대수단위(log-scale)로 나타내었는데,  $f=651.9, 666.6, 842.4, 944.9, 955.9$  MHz에서 전류가 많이 유도되는 것을 알 수 있다. 여기서  $f=651.9, 666.6, 842.4$  MHz는 외부 전송선이 놓여 있는 L-shaped 공진기의 공진 주파수이며,  $f=944.9, 955.9$  MHz는 내부 격벽의 첫 번째 공진 주파수와 일치한다. 또한 예측대로 (a)의 경우보다 (b)의 경우가 유도되는 전류의 크기가 큼을 알 수 있다.

### 3-5 결 론

FDTD 방법을 이용하여 차폐 구조물의 개구면의 모양과 배치에 따른 차폐 효과의 변화를 연구하였고, 사각형 차폐 구조물의 내부에 놓여 있는 PCB 전송선에 외부로부터 침투되어온 전자파의 간섭현상과 차폐 구조물이 내부 격벽을 가지는 경우 격벽 내부의 전원에 의해 격벽 외부에 존재하는 전송선에서 일어나는 간섭현상을 알아보았다. 이러한 결과들은 차폐 구조물의 개구면 설계와 차폐 구조물 내부에 PCB 전송선의 효율적인 배치에 도움을 줄 것이다.

### 참 고 문 헌

[1] 정낙삼 외, 전자파장해 측정 사업, 과학기술처 KRIS-98-027-IR, 1998.  
 [2] Min Li, Kuang-Ping Ma, David M. Hockan-

son, "Numerical and Experimental Corroboration of an FDTD Thin-Slot Model for Slots Near Corners of Shielding Enclosures," *IEEE Trans. on EMC*, vol. 39, pp. 225-232, August 1997.  
 [3] K. P. Ma, M. Li, J. L. Drewniak, T. H. Hubing, and T. P. Van Doren, "Comparison of FDTD algorithms for subcellular modeling of slots in shielding enclosures," *IEEE Trans. Electromagn. and Compat.*, vol. EMC-39, no. 2, pp. 147-155, May 1997.  
 [4] H. Kogure, H. Nakano, K. Koshiji, and E. Shu, "Analysis of electromagnetic field inside equipment housing with an aperture," *IEEE Trans. Commun.*, vol. E80-B, no. 11, pp. 1620-1623, Nov. 1997.  
 [5] B. W. Kim, Y. C. Chung, and T. W. Kang, "Analysis of electromagnetic penetration through apertures of shielded enclosure using finite element method," 14th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, vol. II, pp. 795-798, March 1998.  
 [6] A. Taflove, *Computational Electrodynamics : The Finite-Difference Time-Domain Method*, Norwood, MA: Artech House, 1995.  
 [7] M. P. Robinson, T. M. Benson, C. Christopoulos, J. F. Dawson, M. D. Ganley, A. C. Marvin, S. J. Porter, and D. W. P. Thomas, "Analytical Formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures," *IEEE Trans. Electromagn. and Compat.*, vol. EMC-40, no. 3, pp. 240-248, Aug. 1998.