

직사각형 개구면이 있는 함체 내부에 위치한 PCB로부터의 복사 방출 예측 기법의 정확도 연구

Research on the Accuracy of Prediction of Radiation Emission from PCB within an Enclosure with a Rectangular Aperture

박 용 배 · 정 기 범* · 정 연 춘**

Yong Bae Park · Ki-Bum Jung* · Yeon-Choon Chung**

요 약

본 논문에서는 직사각형 개구면이 있는 함체 내부에 위치한 PCB로부터의 복사 방출 예측 이론을 제안한다. PCB scanner를 이용하여 PCB로부터의 근접장을 측정하여 등가 전원으로 모델링하고, 등가 전원에 의한 전자기장을 계산한다. 함체 내부의 등가 전원을 그린 함수를 이용하여 표현하고, 함체 외부의 전자기장은 푸리에 변환을 이용하여 표현한다. 모드 정합법을 이용하여 개구면에서의 전자기장을 계산하고, 표면 등가 원리 및 영상 정리를 이용하여 OATS(Open Area Test Site) 환경에서의 복사 방출을 계산한다. 계산 결과를 측정치와 비교하여, 복사 방출 예측 이론의 정확성을 확인한다.

Abstract

In this paper, we propose the prediction algorithm of radiation emission from the PCB in an enclosure with a rectangular aperture. PCB scanner is used to measure the near field, which is substituted with an equivalent electric dipole source. Green function and Fourier transform are utilized to represent the electromagnetic fields within and outside the enclosure, respectively. The radiation emission is estimated by using the mode matching technique and surface equivalent theorem. The theoretical results are compared with the measurement to check the accuracy of our analysis.

Key words : Radiation Emission, Rectangular Aperture, Fourier Transform, Green Function, EMI/EMC

I. 서 론

최근에 멀티미디어 대용량의 데이터를 처리하기 위하여 회로의 동작 주파수는 수십~수백 GHz 대역까지 높아지고 있으며, 이에 따라 PCB 설계 시 EMI/EMC 문제의 해결을 위한 연구가 많이 이루어지고 있다. 또한, EMI/EMC 규격을 만족시키기 위해서 PCB로부터의 복사 방출을 정확히 예측할 필요성이

있으며, PCB scanner를 이용해 근거리에서의 전자기장을 정확히 측정할 수 있게 되었다^{[1],[2]}. PCB scanner를 이용해 측정된 신호로부터 OATS(Open Area Test Site) 환경에서의 복사 방출을 예측할 수 있는 알고리즘의 개발이 요구되며, 이를 위해 개구면이 있는 함체 내에 전류원이 있을 경우에 개구면에서의 전자기장을 구해야 한다. MOM(Method of Moments), FDTD(Finite Difference Time Domain), FEM(Finite Ele-

「이 연구는 2007년 정보통신부(MIC) 및 정보통신연구진흥원의 EMC 기술지원사업의 연구 결과로 수행되었음(IITA-2007-(7300-1000-449)).」

아주대학교 전자공학부(Division of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

*EMC 기술지원센터(EMC Center)

**서경대학교 정보통신공학과(Department of Information and Communications Engineering, Seokyeong University)

· 논문 번호 : 20080317-035

· 수정완료일자 : 2008년 8월 6일

ment Method), TLM(Transmission Line Matrix)과 같은 수치 해석 방법^{[3]~[6]}과 Fourier transform을 이용한 해석적인 방법^[7]을 이용하여 개구면에서의 전자기장을 계산하는 연구가 많이 이루어져 왔다. 본 논문에서는 해석적인 방법을 이용하여 PCB로부터의 복사 방출 예측 이론을 제안하고자 한다. PCB scanner 측정 신호를 이용해 PCB를 등가 전원으로 모델링하고, Fourier 변환, 그린 함수를 이용하여 합체 외부와 내부에서의 전자기장을 표현한다. 모드 정합법을 이용하여 구한 연립 방정식의 해와 표면 등가 원리, 영상 정리를 이용하여 원거리에서의 전자기장을 계산하고, 측정치와의 비교를 통해 이론의 정확성을 확인한다.

II. 전자기장 계산

그림 1과 같이 직사각형 개구면이 있는 합체 내부에 위치한 PCB로부터의 복사 방출을 예측하기 위해서 그림 2의 PCB scanner로 측정된 근거리장을 분석하여 등가 전원을 모델링한다. 근거리장에서 전기장이 우세한 경우에는 신호원을 전기장 신호원(전기다이프)으로 모델링하고, 자기장이 우세한 경우에는 신호원을 자기장 신호원(자기다이프)으로 모델링한다^[8]. 그림 3의 측정 샘플에 대해 근거리장을 측정된 결과는 그림 4와 같다. 전기장의 측정 위치는 측정 샘플로부터 3 mm 떨어진 점이며, 측정 주파수는 0 ~ 1 GHz이다. 전기장으로부터 등가 전원을 계산할 때, 전기장의 값이 최대가 되는 곳에 등가 다이폴(점전원)을 위치시킨다. 측정된 전기장은 측정 샘플이 위치한 면에 대해 수직인 성분과 수평인 성분이 있고, 최대값을 가지는 전기장의 방향은 측정 샘플과 수평한 방향이며, 이에 따른 등가 전기 다이폴은 점전원에 의한 3차원 그린 함수로부터 다음 식에 의해 구할 수 있다^[9].

$$I_{y,dl} = \frac{4\pi E_y}{\eta} \left[\frac{-i\beta}{l} + \frac{1}{l^2} + \frac{i}{\beta l^3} \right]^{-1} e^{-i\beta l} \quad (1)$$

식 (1)의 E_y 는 그림 4의 E_H 와 같다. 식 (1)은 등가 다이폴이 점전원(point source)일 때 구한 식이므로 근사식이 아니다. 위 식으로부터 구한 등가 전기 다이폴이 직사각형 개구면이 있는 합체 내에 위치할 경우에 개구면에 여기되는 전자기장을 구하면, 표면

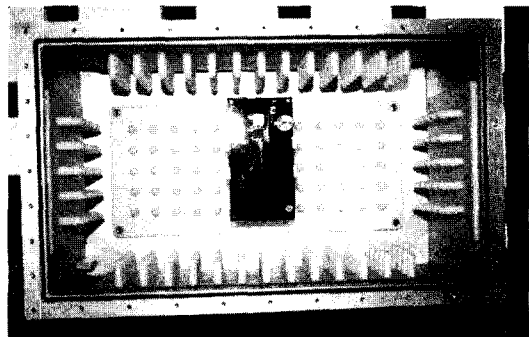
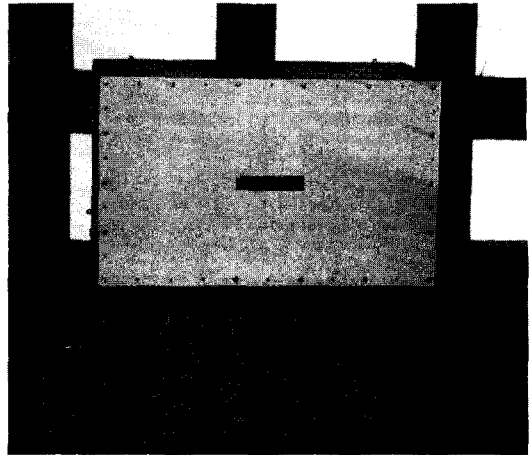


그림 1. 개구면이 있는 합체와 내부의 PCB
Fig. 1. PCB within an enclosure with a rectangular aperture.

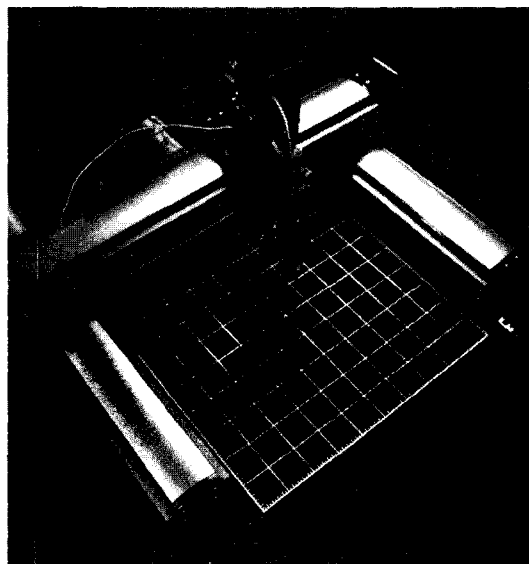


그림 2. PCB 스캐너
Fig. 2. PCB scanner.

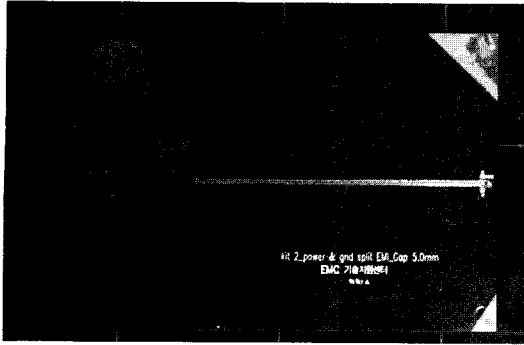


그림 3. 측정 샘플
Fig. 3. Measurement sample.

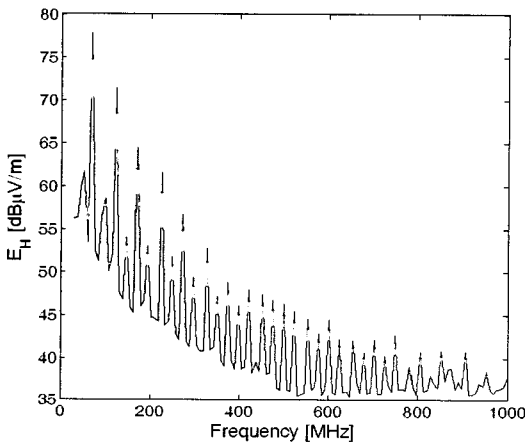


그림 4. 근거리장 측정 결과
Fig. 4. Near-field measured data.

등가 원리와 영상 정리로부터 원거리에서의 전자기장을 구할 수 있다. 그림 5와 같이 직각 개구면이 있는 직육면체 합체 내부에 전기 다이폴, 즉, 점전원 ($\vec{J} = \hat{y}I_y dl \delta(x-x')\delta(y-y')\delta(z-z')$)이 있는 경우를 고려한다. 개구면이 있는 면은 무한 도체면이라고 가정한다.

개구면의 가로 길이, 세로 길이, 높이 각각 $2a$, $2b$, d 이며, 합체의 가로 길이, 세로 길이, 높이는 각각 $2g$, $2h$, t 이다. 점전원에 의한 직육면체 합체 내부의 그린 함수는 다음과 같이 주어진다^[10].

$$A_y^i = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-\mu I_y dl}{x_y \sin(2x_y h)} \frac{1}{g \frac{t}{2}} \sin \frac{m\pi}{2g} (x' + g) \sin \frac{m\pi}{2g} (x + g) \sin \frac{n\pi}{t} (z' + d) \sin \frac{n\pi}{t} (z + d)$$

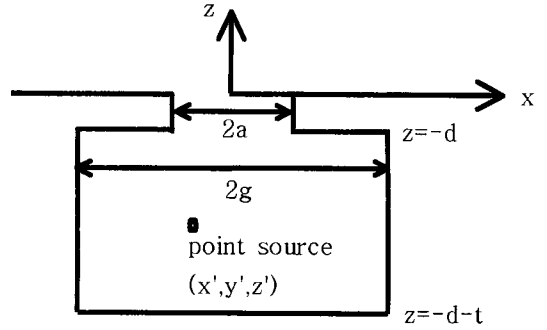


그림 5. Prototype 문제
Fig. 5. Prototype problem.

$$\times \begin{cases} \cos x_y (y' + h) \cos x_y (y - h), & y' < y < h \\ \cos x_y (y' - h) \cos x_y (y + h), & -h < y < y' \end{cases} \quad (2)$$

여기에서 $x_y = \sqrt{k_1^2 - \left(\frac{m\pi}{2g}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{t}\right)^2}$, $k_1 = \omega \sqrt{\mu_1 \epsilon_1}$ 이다.

합체 내부의 산란 전자기장은 다음의 벡터 포텐셜 A_z , F_z 를 이용해 구할 수 있다.

$$A_z^1 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m\pi}{2g} (x + g) \sin \frac{n\pi}{2h} (y + h) \cos x_{mn} (z + d + t) \quad (3)$$

$$F_z^1 = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} B_{mn} \cos \frac{m\pi}{2g} (x + g) \cos \frac{n\pi}{2h} (y + h) \sin x_{mn} (z + d + t) \quad (4)$$

여기에서 $x_{mn} = \sqrt{k_1^2 - \left(\frac{m\pi}{2g}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{2h}\right)^2}$ 이다.

개구면 내부의 산란 전자기장도 합체 내부와 마찬가지로 벡터 포텐셜을 이용해 구한다.

$$A_z^2 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{m\pi}{2a} (x + a) \sin \frac{n\pi}{2b} (y + b) [C_{mn} e^{i\gamma_{mn} z} + D_{mn} e^{-i\gamma_{mn} z}] \quad (5)$$

$$F_z^2 = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \cos \frac{m\pi}{2a} (x + a) \cos \frac{n\pi}{2b} (y + b) [E_{mn} e^{i\gamma_{mn} z} + F_{mn} e^{-i\gamma_{mn} z}] \quad (6)$$

여기에서 $\gamma_{mn} = \sqrt{k_2^2 - \left(\frac{m\pi}{2a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{2b}\right)^2}$, $k_2 = \omega \sqrt{\mu_2 \epsilon_2}$ 이다.

합체 외부에서의 전자기장을 구하기 위해 벡터 포텐셜을 푸리에 변환으로부터 다음과 같이 구할 수

있다.

$$A_z^3 = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{A}_z(\zeta, \eta) e^{-i\zeta z - i\eta y + ixz} d\zeta d\eta \quad (7)$$

$$F_z^3 = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{F}_z(\zeta, \eta) e^{-i\zeta z - i\eta y + ixz} d\zeta d\eta \quad (8)$$

여기에서 $x = \sqrt{k_3^2 - \zeta^2 - \eta^2}$, $k_3 = \omega \sqrt{\mu \epsilon_3}$ 이다. 모든 영역에서의 벡터 포텐셜을 위와 같이 표현한 다음, 합체 내부 및 개구면, 개구면 및 합체 외부 사이에서 전자기장의 경계 조건을 사용하여 개구면에서의 모드 계수 A_{mn} , B_{mn} , C_{mn} , D_{mn} , E_{mn} , F_{mn} 에 관한 연립 방정식을 얻을 수 있고, 이 연립 방정식을 풀면 개구면에서의 전자기장과 그에 따른 등가 전류 \vec{J}_s , \vec{M}_s 를 구할 수 있다.

연립방정식을 유도하는 과정은 아래와 같다.

첫 번째, $z = -d$ 에서 접선 성분의 전기장 연속 조건,

$$E_{x,y}^i(x, y, -d) + E_{x,y}^1(x, y, -d) = \begin{cases} E_{x,y}^2(x, y, -d), & -a < x < a, -b < y < b \\ 0, & elsewhere \end{cases} \quad (9)$$

에 모드 함수의 직교성을 적용하여 다음 연립 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & -\frac{i}{\omega\mu\epsilon} A_{mn} \frac{m\pi}{2g} ghx_{mn} \sin(x_{mn}t) \\ & + \frac{1}{\epsilon} B_{mng} \frac{n\pi}{2h} h \sin(x_{mn}t) \alpha_m \\ & = \frac{i}{\omega\mu\epsilon} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m'\pi}{2a} A_1 B_1 \\ & \quad [i\gamma_{m'n'} C_{m'n'} e^{-i\gamma_{m'n'} d} - i\gamma_{m'n'} D_{m'n'} e^{i\gamma_{m'n'} d}] \\ & \quad + \frac{1}{\epsilon} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n'\pi}{2b} A_1 B_1 [E_{m'n'} e^{-i\gamma_{m'n'} d} \\ & \quad + F_{m'n'} e^{i\gamma_{m'n'} d}] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{i}{\omega\mu\epsilon} A_{mng} \frac{n\pi}{2h} hx_{mn} \sin(x_{mn}t) \\ & - \frac{1}{\epsilon} B_{mn} \frac{m\pi}{2g} gh \sin(x_{mn}t) \alpha_n \\ & = \frac{i}{\omega\mu\epsilon} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} B_2 \frac{n'\pi}{2b} \frac{n}{i} A_2 \cdot \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [i\gamma_{m'n'} C_{m'n'} e^{-i\gamma_{m'n'} d} - i\gamma_{m'n'} D_{m'n'} e^{i\gamma_{m'n'} d}] \\ & - \frac{1}{\epsilon} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{m'\pi}{2a} B_2 A_2 [E_{m'n'} e^{-i\gamma_{m'n'} d} \\ & + F_{m'n'} e^{i\gamma_{m'n'} d}] \end{aligned} \quad (11)$$

여기에서

$$\begin{aligned} A_1 = & \frac{\cos\left(\frac{m'-m}{2}\pi\right) \sin\left(\frac{m'\pi}{2} - \frac{m\pi}{2g}a\right)}{\frac{m'\pi}{2a} - \frac{m\pi}{2g}} \\ & + \frac{\cos\left(\frac{-m'+m}{2}\pi\right) \sin\left(\frac{m'\pi}{2} + \frac{m\pi}{2g}a\right)}{\frac{m'\pi}{2a} + \frac{m\pi}{2g}} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} B_1 = & \frac{\cos\left(\frac{n'-n}{2}\pi\right) \sin\left(\frac{n'\pi}{2} - \frac{n\pi}{2h}b\right)}{\frac{n'\pi}{2b} - \frac{n\pi}{2h}} \\ & - \frac{\cos\left(\frac{-n'+n}{2}\pi\right) \sin\left(\frac{n'\pi}{2} + \frac{n\pi}{2h}b\right)}{\frac{n'\pi}{2b} + \frac{n\pi}{2h}} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} A_2 = & \frac{\cos\left(\frac{n'-n}{2}\pi\right) \sin\left(\frac{n'\pi}{2} - \frac{n\pi}{2h}a\right)}{\frac{n'\pi}{2a} - \frac{n\pi}{2h}} \\ & + \frac{\cos\left(\frac{-n'+n}{2}\pi\right) \sin\left(\frac{n'\pi}{2} + \frac{n\pi}{2h}b\right)}{\frac{n'\pi}{2b} + \frac{n\pi}{2h}} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} B_2 = & \frac{\cos\left(\frac{m'-m}{2}\pi\right) \sin\left(\frac{m'\pi}{2} - \frac{m\pi}{2g}a\right)}{\frac{m'\pi}{2a} - \frac{m\pi}{2g}} \\ & - \frac{\cos\left(\frac{-m'+m}{2}\pi\right) \sin\left(\frac{m'\pi}{2} + \frac{m\pi}{2g}a\right)}{\frac{m'\pi}{2a} + \frac{m\pi}{2g}} \end{aligned} \quad (15)$$

이다. 두 번째, $z = -d$ 에서 자기장의 접선 성분의 연속 조건,

$$\begin{aligned} & H_{x,y}^i(x, y, -d) + H_{x,y}^1(x, y, -d) \\ & = H_{x,y}^2(x, y, -d), \quad -a < x < a, -b < y < b \end{aligned} \quad (16)$$

에 모드 함수의 직교성을 적용하여 다음 연립 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\mu} a \frac{n\pi}{2b} b [C_{mn} e^{-i\gamma_{mn} d} + D_{mn} e^{i\gamma_{mn} d}] \\ & - \frac{i}{\omega\mu\epsilon} \frac{m\pi}{2a} ab [i\gamma_{mn} E_{mn} e^{-i\gamma_{mn} d} - i\gamma_{mn} F_{mn} e^{i\gamma_{mn} d}] \alpha_n \\ & = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_{vd}}{x_{y,\sin(x,y,t)}} \frac{2}{gt} \sin \frac{m'\pi}{2g} (x' + g) B_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{n'\pi}{t} \sin \frac{n'\pi}{t} (z'+d)X_1 \\
 & + \frac{1}{\mu} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{m'n'} B_3 \frac{n'\pi}{2h} A_3 \cos x_{m'n'} t \\
 & - \frac{i}{\omega\mu\epsilon} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} B_{m'n'} \frac{m'\pi}{2g} B_3 A_3 x_{m'n'} \cos x_{m'n'} t
 \end{aligned}
 \left[\begin{aligned}
 & \frac{\sin(x_y b - \frac{n\pi}{2}) \cos(x_y h - \frac{n\pi}{2})}{x_y - \frac{n\pi}{2b}} \\
 & + \frac{\sin(x_y b + \frac{n\pi}{2}) \cos(x_y h + \frac{n\pi}{2})}{x_y + \frac{n\pi}{2b}}
 \end{aligned} \right] \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{\mu} \frac{m\pi}{2a} ab [C_{mn} e^{-i\gamma_{mn}d} + D_{mn} e^{i\gamma_{mn}d}] \\
 & - \frac{i}{\omega\mu\epsilon} a \frac{n\pi}{2b} b [i\gamma_{mn} E_{mn} e^{-i\gamma_{mn}d} - i\gamma_{mn} F_{mn} e^{i\gamma_{mn}d}] a_{mn} \\
 & = -\frac{1}{\mu} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{m'n'} \frac{m'\pi}{2g} A_4 B_4 \cos x_{m'n'} t \\
 & - \frac{i}{\omega\mu\epsilon} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} B_{m'n'} A_4 \frac{n'\pi}{2h} B_4 x_{m'n'} \cos x_{m'n'} t
 \end{aligned} \quad (18)$$

여기에서

(가) $y' < -b$ 일 경우,

$$X_1 = \cos x_y (y' + h) \times$$

$$\left[\begin{aligned}
 & \frac{\sin(x_y b - \frac{n\pi}{2}) \cos(x_y h + \frac{n\pi}{2})}{x_y - \frac{n\pi}{2b}} \\
 & + \frac{\sin(x_y b + \frac{n\pi}{2}) \cos(x_y h - \frac{n\pi}{2})}{x_y + \frac{n\pi}{2b}}
 \end{aligned} \right] \quad (19)$$

(나) $-b < y' < b$ 일 경우

$$\begin{aligned}
 X_1 = & \frac{\cos x_y (y' - h)}{2} \times \\
 & \left[\begin{aligned}
 & \frac{\sin \left[\left(x_y - \frac{n\pi}{2b} \right) y' + x_y h - \frac{n\pi}{2} \right] + \sin(x_y b - x_y h)}{x_y - \frac{n\pi}{2b}} \\
 & + \frac{\sin \left[\left(x_y + \frac{n\pi}{2b} \right) y' + x_y h + \frac{n\pi}{2} \right] + \sin(x_y b - x_y h)}{x_y + \frac{n\pi}{2b}}
 \end{aligned} \right] \\
 & + \frac{\cos x_y (y' + h)}{2} \times \\
 & \left[\begin{aligned}
 & \frac{\sin(x_y b - x_y h - n\pi) - \sin \left[\left(x_y - \frac{n\pi}{2b} \right) y' - x_y h - \frac{n\pi}{2} \right]}{x_y - \frac{n\pi}{2b}} \\
 & + \frac{\sin(x_y b - x_y h + n\pi) - \sin \left[\left(x_y + \frac{n\pi}{2b} \right) y' - x_y h + \frac{n\pi}{2} \right]}{x_y + \frac{n\pi}{2b}}
 \end{aligned} \right] \quad (20)
 \end{aligned}$$

(다) $y' > b$ 일 경우

$$X_1 = \cos x_y (y' - h) \times$$

이다. 그리고,

$$\begin{aligned}
 A_3 = & \frac{\cos \left(\frac{n-n'}{2} \pi \right) \sin \left(\frac{n\pi}{2} - \frac{n'\pi}{2h} b \right)}{\frac{n\pi}{2b} - \frac{n'\pi}{2h}} \\
 & + \frac{\cos \left(\frac{n+n'}{2} \pi \right) \sin \left(\frac{n\pi}{2} + \frac{n'\pi}{2h} b \right)}{\frac{n\pi}{2b} + \frac{n'\pi}{2h}} \quad (22)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_3 = & \frac{\cos \left(\frac{m-m'}{2} \pi \right) \sin \left(\frac{m\pi}{2} - \frac{m'\pi}{2g} a \right)}{\frac{m\pi}{2a} - \frac{m'\pi}{2g}} \\
 & - \frac{\cos \left(\frac{m+m'}{2} \pi \right) \sin \left(\frac{m\pi}{2} + \frac{m'\pi}{2g} a \right)}{\frac{m\pi}{2a} + \frac{m'\pi}{2g}} \quad (23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_4 = & \frac{\cos \left(\frac{m-m'}{2} \pi \right) \sin \left(\frac{m\pi}{2} - \frac{m'\pi}{2g} a \right)}{\frac{m\pi}{2a} - \frac{m'\pi}{2g}} \\
 & + \frac{\cos \left(\frac{m+m'}{2} \pi \right) \sin \left(\frac{m\pi}{2} + \frac{m'\pi}{2g} a \right)}{\frac{m\pi}{2a} + \frac{m'\pi}{2g}} \quad (24)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_4 = & \frac{\cos \left(\frac{n-n'}{2} \pi \right) \sin \left(\frac{n\pi}{2} - \frac{n'\pi}{2h} b \right)}{\frac{n\pi}{2b} - \frac{n'\pi}{2h}} \\
 & - \frac{\cos \left(\frac{n+n'}{2} \pi \right) \sin \left(\frac{n\pi}{2} + \frac{n'\pi}{2h} b \right)}{\frac{n\pi}{2b} + \frac{n'\pi}{2h}} \quad (25)
 \end{aligned}$$

이다.

세 번째, $z=0$ 에서 전기장의 접선 성분의 연속 조건,

$$\begin{aligned}
 E_{x,y}^3(x, y, 0) \\
 = & \begin{cases} E_{x,y}^2(x, y, 0), & -a < x < a, -b < y < b \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (26)
 \end{aligned}$$

에 푸리에 역변환을 적용하면 다음 관계식을 얻을 수 있다^[11].

$$\begin{aligned} & -\frac{i}{\omega\mu\epsilon} \overline{A}_z(\zeta, \eta)\zeta x + \frac{i}{\epsilon} \overline{F}_z(\zeta, \eta)\eta \\ & = \frac{i}{\omega\mu\epsilon} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m\pi}{2a} C_1 D_1 [i\gamma_{mn} C_{mn} - i\gamma_{mn} D_{mn}] \\ & \quad + \frac{1}{\epsilon} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} C_1 \frac{n\pi}{2b} D_1 [E_{mn} + F_{mn}] \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{i}{\omega\mu\epsilon} \overline{A}_z(\zeta, \eta)\eta x - \frac{i}{\epsilon} \overline{F}_z(\zeta, \eta)\zeta \\ & = \frac{i}{\omega\mu\epsilon} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} D_2 \frac{n\pi}{2b} C_2 [i\gamma_{mn} C_{mn} - i\gamma_{mn} D_{mn}] \\ & \quad - \frac{1}{\epsilon} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{m\pi}{2a} D_2 C_2 [E_{mn} + F_{mn}] \end{aligned} \quad (28)$$

여기에서

$$C_1 = \frac{\zeta [(-1)^m e^{i\zeta a} - e^{-i\zeta a}]}{i \left[\zeta^2 - \left(\frac{m\pi}{2a} \right)^2 \right]} = \frac{\zeta}{i} x_m(\zeta a) \quad (29)$$

$$D_1 = -\frac{\frac{n\pi}{b} [(-1)^n e^{i\eta b} - e^{-i\eta b}]}{2 \left[\eta^2 - \left(\frac{n\pi}{2b} \right)^2 \right]} = -\frac{n\pi}{2b} x_n(\eta b) \quad (30)$$

$$C_2 = \frac{2\eta [(-1)^n e^{i\eta b} - e^{-i\eta b}]}{2i \left[\eta^2 - \left(\frac{n\pi}{2b} \right)^2 \right]} = \frac{\eta}{i} x_n(\eta b) \quad (31)$$

$$D_2 = -\frac{\frac{m\pi}{a} [(-1)^m e^{i\zeta a} - e^{-i\zeta a}]}{2 \left[\zeta^2 - \left(\frac{m\pi}{2a} \right)^2 \right]} = -\frac{m\pi}{2a} x_m(\zeta a) \quad (32)$$

이다.

위 두 관계식으로부터, $\overline{A}_z(\zeta, \eta)$, $\overline{F}_z(\zeta, \eta)$ 의 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \overline{A}_z(\zeta, \eta) & = -\frac{i}{x} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m\pi}{4ab} x_m(\zeta a) x_n(\eta b) \\ & \quad [i\gamma_{mn} C_{mn} + i\gamma_{mn} D_{mn}] \\ & + \omega\mu \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(\zeta^2 + \eta^2)x} \left(\frac{\zeta^2 n^2 \pi^2}{4b^2} - \frac{\eta^2 m^2 \pi^2}{4a^2} \right) \\ & x_m(\zeta a) x_n(\eta b) [E_{mn} + F_{mn}] \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \overline{F}_z(\zeta, \eta) & = -\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\zeta\eta}{(\zeta^2 + \eta^2)} \left(\frac{m^2 \pi^2}{4a^2} + \frac{n^2 \pi^2}{4b^2} \right) \\ & x_m(\zeta a) x_n(\eta b) [E_{mn} + F_{mn}] \end{aligned} \quad (34)$$

네 번째, $z=0$ 에서 자기장의 접선 성분의 연속 조건,

$$\begin{aligned} H_{x,y}^3(x, y, 0) & = H_{x,y}^2(x, y, 0), \\ & -a < x < a, -b < y < b \end{aligned} \quad (35)$$

에 모드 함수의 직교성을 적용하고, 위에서 구한 $\overline{A}_z(\zeta, \eta)$, $\overline{F}_z(\zeta, \eta)$ 을 대입하면 다음 연립 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\mu} a \frac{n\pi}{2b} b [C_{mn} + D_{mn}] \\ & - \frac{i}{\omega\mu\epsilon} \frac{m\pi}{2a} ab [i\gamma_{mn} E_{mn} - i\gamma_{mn} F_{mn}] \alpha_n \\ & = -\frac{im\pi}{32\mu a^2 b} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} m' n' \\ & \quad [i\gamma_{m'n'} C_{m'n'} - i\gamma_{m'n'} D_{m'n'}] I_1 \\ & + \frac{m\pi}{8\pi^2 a} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} [E_{m'n'} + F_{m'n'}] \\ & \left[-\frac{1}{\omega\mu\epsilon} \left(\frac{m'^2 \pi^2}{4a^2} + \frac{n'^2 \pi^2}{4b^2} \right) I_2 + \frac{\omega m'^2 \pi^2}{4a^2} I_1 \right] \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{\mu} \frac{m\pi}{2a} ab [C_{mn} + D_{mn}] \\ & - \frac{i}{\omega\mu\epsilon} a \frac{n\pi}{2b} b [i\gamma_{mn} E_{mn} - i\gamma_{mn} F_{mn}] \alpha_m \\ & = \frac{in\pi}{32\mu a^2 b} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} m' n' \\ & \quad [i\gamma_{m'n'} C_{m'n'} - i\gamma_{m'n'} D_{m'n'}] I_3 \\ & - \frac{n\pi}{8\pi^2 b} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} [E_{m'n'} + F_{m'n'}] \\ & \left[-\frac{\omega n'^2 \pi^2}{4b^2} I_3 + \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \left(\frac{m'^2 \pi^2}{4a^2} + \frac{n'^2 \pi^2}{4b^2} \right) I_2 \right] \end{aligned} \quad (37)$$

여기에서

$$I_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\eta^2}{x} x_{m'}(\zeta a) x_{n'}(\eta b) x_m(-\zeta a) x_n(-\eta b) d\zeta d\eta \quad (38)$$

$$I_2 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\zeta^2 \eta^2}{x} x_{m'}(\zeta a) x_{n'}(\eta b) x_m(-\zeta a) x_n(-\eta b) d\zeta d\eta \quad (39)$$

$$I_3 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\zeta^2}{x} x_{m'}(\zeta a) x_{n'}(\eta b) x_m(-\zeta a) x_n(-\eta b) d\zeta d\eta \quad (40)$$

이다.

앞에서 유도한 여섯 개의 연립 방정식 (10), (11), (17), (18), (36), (37)을 풀면 모드 계수 A_{mn} , B_{mn} ,

$C_{mn}, D_{mn}, E_{mn}, F_{mn}$ 을 구할 수 있고, 모든 영역에서의 전기장 및 자기장을 구할 수 있다. 적분식 I_1, I_2, I_3 는 근사법을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다^[12].

$$I_k \approx \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \frac{P_k(\xi_{ij}, \eta_{ij})}{\sqrt{1+\rho_{ij}}} \Delta \alpha \begin{cases} -\frac{2}{3}(\rho+2)\sqrt{1-\rho} \left| \frac{\rho_{ij} + \Delta\rho/2}{\rho_{ij} - \Delta\rho/2} \right|, & \rho_{ij} + \Delta\rho/2 \leq 1 \\ -i\frac{2}{3}(\rho+2)\sqrt{\rho-1} \left| \frac{\rho_{ij} + \Delta\rho/2}{\rho_{ij} - \Delta\rho/2} \right|, & \rho_{ij} - \Delta\rho/2 \geq 1 \end{cases} \quad (41)$$

여기에서

$$P_1(\xi_{ij}, \eta_{ij}) = \frac{16k_z \eta_{ij}^2 (1 - (-1)^m \cos 2\xi_{ij} \rho) (1 - (-1)^n \cos 2\eta_{ij} b)}{\left[\xi_{ij}^2 - \left(\frac{m\pi}{2a}\right)^2 \right] \left[\xi_{ij}^2 - \left(\frac{m\pi}{2a}\right)^2 \right] \left[\eta_{ij}^2 - \left(\frac{n\pi}{2b}\right)^2 \right] \left[\eta_{ij}^2 - \left(\frac{n\pi}{2b}\right)^2 \right]} \quad (42)$$

$$P_2(\xi_{ij}, \eta_{ij}) = \frac{16k_z \xi_{ij}^2 \eta_{ij}^2 (1 - (-1)^m \cos 2\xi_{ij} \rho) (1 - (-1)^n \cos 2\eta_{ij} b)}{\left[\xi_{ij}^2 - \left(\frac{m\pi}{2a}\right)^2 \right] \left[\xi_{ij}^2 - \left(\frac{m\pi}{2a}\right)^2 \right] \left[\eta_{ij}^2 - \left(\frac{n\pi}{2b}\right)^2 \right] \left[\eta_{ij}^2 - \left(\frac{n\pi}{2b}\right)^2 \right]} \quad (43)$$

$$P_3(\xi_{ij}, \eta_{ij}) = \frac{16k_z \xi_{ij}^2 (1 - (-1)^m \cos 2\xi_{ij} \rho) (1 - (-1)^n \cos 2\eta_{ij} b)}{\left[\xi_{ij}^2 - \left(\frac{m\pi}{2a}\right)^2 \right] \left[\xi_{ij}^2 - \left(\frac{m\pi}{2a}\right)^2 \right] \left[\eta_{ij}^2 - \left(\frac{n\pi}{2b}\right)^2 \right] \left[\eta_{ij}^2 - \left(\frac{n\pi}{2b}\right)^2 \right]} \quad (44)$$

ξ_{ij}, η_{ij} 는 분할된 영역 $|\rho - \rho_{ij}| \leq \Delta\rho/2, |\alpha - \alpha_{ij}| \leq \Delta\alpha/2$ 의 중심을 나타낸다.

개구면 ($z=0$)의 전기장으로부터 표면 등가 원리 (surface equivalence theorem)를 이용하여 등가 전류 \vec{M}_s 를 다음 식으로부터 구할 수 있다^[13].

$$\vec{M}_s = -2 \hat{z} \times \vec{E}^z = 2E_y^z \hat{x} - 2E_x^z \hat{y} \quad (45)$$

여기에서

$$E_x^z = \frac{i}{\omega\mu\epsilon} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m\pi}{2a} \cos \frac{m\pi}{2a} (x+a) \cdot \sin \frac{n\pi}{2b} (y+b) [i\gamma_{mn} C_{mn} - i\gamma_{mn} D_{mn}] + \frac{1}{\epsilon} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \cos \frac{m\pi}{2a} (x+a) \frac{n\pi}{2b} \cdot \sin \frac{n\pi}{2b} (y+b) [E_{mn} + F_{mn}] \quad (46)$$

$$E_y^z = \frac{i}{\omega\mu\epsilon} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{m\pi}{2a} (x+a) \frac{n\pi}{2b} \cdot$$

$$\cos \frac{n\pi}{2b} (y+b) [i\gamma_{mn} C_{mn} - i\gamma_{mn} D_{mn}] - \frac{1}{\epsilon} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{m\pi}{2a} \sin \frac{m\pi}{2a} (x+a) \cos \frac{n\pi}{2b} (y+b) [E_{mn} + F_{mn}] \quad (47)$$

이다.

등가 전류에 의한 복사 전자기장은 다음의 벡터 포텐셜로부터 구할 수 있다.

$$\vec{F} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-b}^b \int_{-a}^a \vec{M}(x', y', z') \frac{e^{-i\beta R}}{R} dx' dy' \quad (48)$$

원거리에서의 근사에 의해 복사 전자기장은 다음과 같이 주어진다.

$$E_{r1} \approx 0, E_{\theta 1} = \frac{i\beta e^{-i\beta r_1}}{4\pi r_1} L_{\theta 1}, E_{\phi 1} = \frac{-i\beta e^{-i\beta r_1}}{4\pi r_1} L_{\phi 1} \quad (49)$$

$$H_{r1} \approx 0, H_{\theta 1} = \frac{i\beta e^{-i\beta r_1}}{4\pi r_1} \frac{L_{\theta 1}}{\eta}, H_{\phi 1} = \frac{i\beta e^{-i\beta r_1}}{4\pi r_1} \frac{L_{\phi 1}}{\eta} \quad (50)$$

여기에서

$$L_{\theta 1} = - \int_{-b}^b \int_{-a}^a 2E_x^z \cos \theta_1 e^{-i\beta y' \sin \theta_1} dx' dy' = - \frac{2 \cos \theta_1}{\epsilon} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n^2 \pi^2 a}{b^2} [E_{0n} + F_{0n}] \frac{(-1)^{n+1} e^{-i\beta b \sin \theta_1} + e^{i\beta b \sin \theta_1}}{\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - (2\beta \sin \theta_1)^2} \quad (51)$$

$$L_{\phi 1} = - \int_{-b}^b \int_{-a}^a 2E_y^z e^{-i\beta y' \sin \theta_1} dx' dy' = - \frac{2}{\omega\mu\epsilon} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m\pi}{2b} [i\gamma_{mn} C_{mn} - i\gamma_{mn} D_{mn}] \cdot [(-1)^m - 1] \cdot \frac{4\beta \sin \theta_1 [(1)^n e^{-i\beta b \sin \theta_1} - e^{i\beta b \sin \theta_1}]}{\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - (2\beta \sin \theta_1)^2} - \frac{2i}{\epsilon} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{m\pi}{2a} [E_{mn} + F_{mn}] [(-1)^m - 1] \cdot \frac{4\beta \sin \theta_1 [(1)^n e^{-i\beta b \sin \theta_1} - e^{i\beta b \sin \theta_1}]}{\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - (2\beta \sin \theta_1)^2} \quad (52)$$

이다.

등가 전류의 영상 전류는 다음과 같이 주어진다.

$$\vec{M}'_s = 2E'_y \hat{x} + 2E'_x \hat{y} \quad (53)$$

영상 전류에 의한 복사 전자기장은 다음과 같이 주어진다.

$$E_{r2} \approx 0, E_{\theta 2} = \frac{i\beta e^{i\beta r_2}}{4\pi r_2} L_{\theta 2}, E_{\phi 2} = \frac{-i\beta e^{i\beta r_2}}{4\pi r_2} L_{\phi 2} \quad (54)$$

$$H_{r2} \approx 0, H_{\theta 2} = \frac{i\beta e^{i\beta r_2}}{4\pi r_2} \frac{L_{\theta 2}}{\eta}, H_{\phi 2} = \frac{i\beta e^{i\beta r_2}}{4\pi r_2} \frac{L_{\phi 2}}{\eta} \quad (55)$$

$$\begin{aligned} L_{\theta 2} &= \int_{-b}^b \int_{-a}^a 2E'_x \cos \theta_2 e^{-i\beta y' \sin \theta_2} dx' dy' \\ &= \frac{2 \cos \theta_2}{\epsilon} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n^2 \pi^2 a}{b^2} [E_{0n} + F_{0n}] \\ &\quad \frac{(-1)^{n+1} e^{-i\beta b \sin \theta_2} + e^{i\beta b \sin \theta_2}}{\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - (2\beta \sin \theta_2)^2} \end{aligned} \quad (56)$$

$$\begin{aligned} L_{\phi 2} &= - \int_{-b}^b \int_{-a}^a 2E'_y e^{-i\beta y' \sin \theta_2} dx' dy' \\ &= - \frac{2}{\omega \mu \epsilon} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\pi}{2b} [i\gamma_{mn} C_{mn} - i\gamma_{mn} D_{mn}] \\ &\quad [(-1)^{m-1}] \\ &\quad \frac{4\beta \sin \theta_2 [(-1)^n e^{-i\beta b \sin \theta_2} - e^{i\beta b \sin \theta_2}]}{\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - (2\beta \sin \theta_2)^2} \\ &\quad - \frac{2i}{\epsilon} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{m\pi}{2a} [E_{mn} + F_{mn}] [(-1)^{m-1}] \\ &\quad \frac{4\beta \sin \theta_2 [(-1)^n e^{-i\beta b \sin \theta_2} - e^{i\beta b \sin \theta_2}]}{\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - (2\beta \sin \theta_2)^2} \end{aligned} \quad (57)$$

위에서 기술한 방법으로 PCB scanner로부터 측정 한 근거리장을 이용해 등가 전원을 구하고, 개구면 이 있는 합체 내부에 이 등가 전원이 있을 경우에 복사 방출을 계산할 수 있다. 다수개의 개구면이 있는 경우에도 동일한 방법으로 해석할 수 있다.

III. 측정 및 결과 분석

이론의 정확성을 검증하기 위해, 그림 6과 같은 측정 setup으로 측정하였다. 합체와 개구면의 크기는 그림 5에서 $a=5$ cm, $b=1$ cm, $g=25$ cm, $h=15$ cm, $t=0.3$ cm이다. 접지면에서 합체의 높이는 80 cm, 합체와 측정 안테나 사이의 거리는 3 m, 접지면에서 측정 안

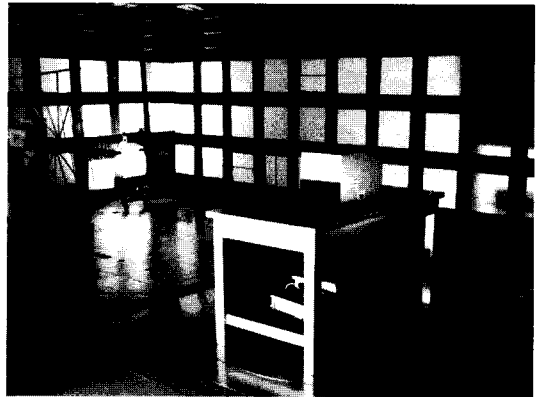
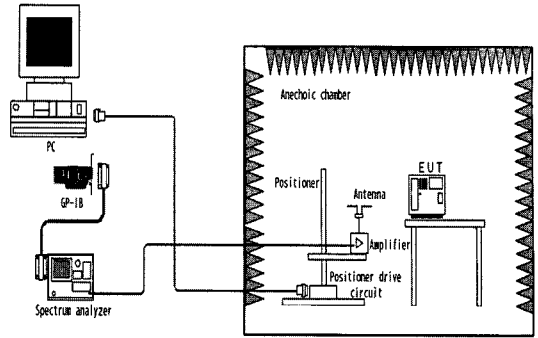


그림 6. 측정 setup
Fig. 6. Measurement setup.

테나까지의 높이는 2 m이다. 등가 전원의 위치 $(x', y', z') = (-0.002, -0.0012, -16.3)$ cm이다. 그림 7은 측정값과 이론치를 비교한 것이다. PCB scanner 측정값으로부터 등가 전기 다이폴을 구한 뒤, 앞에서 제시한 이론과 C 프로그램을 이용하여 원거리에서의 전기장을 계산하였다. 무한 급수 계산시 m 과 n 은 합체 및 개구면에서 모든 전파 모드(propagation modes)와 몇 개의 감쇄 모드(evanescent modes)가 포함되도록 정한다. $m=3$ 및 $n=3$ 일 경우, 이산 모드 계수는 0.1% 이내의 오차를 가지며, 이것은 무한 급수가 빠르게 수렴함을 나타낸다. 원거리에서의 전기장은 식 (49)와 식 (54)를 더하여 크기를 계산하였고, 측정값과 약 80~190 dB 정도의 차이를 보인다. 오차가 발생하는 이유는, 제시한 이론에서는 점전원에 의한 전기장만을 고려하였고, 실제 측정 샘플은 유한한 길이의 전류원이기 때문이다.

측정 샘플은 접지면 위에 마이크로스트립이 있는 구조이므로, 근사적으로 PEC 위에 유한한 길이의

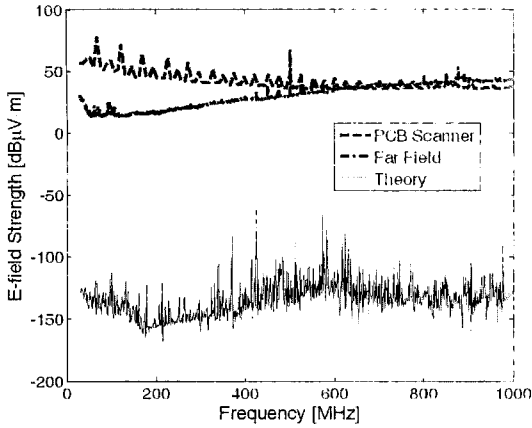


그림 7. 이론치와 측정치 비교
Fig. 7. Comparison between theory and measured data.

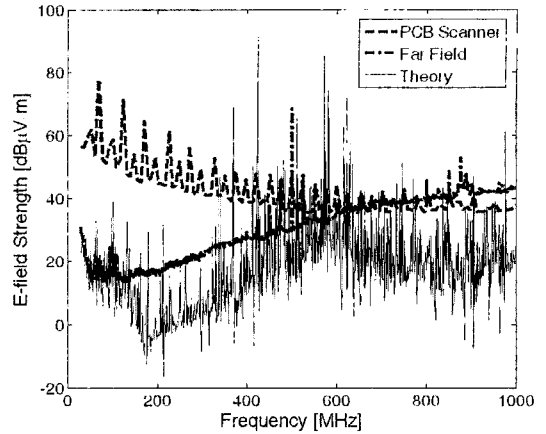


그림 8. 이론치와 측정치 비교
Fig. 8. Comparison between theory and measured data.

static 선전류가 있는 경우라고 가정하고, 등가 다이폴의 크기를 다음 식을 이용하여 구하였다^[14].

$$I_y = \left| \vec{H} \right| \frac{4\pi\rho_1\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} \quad (58)$$

여기에서 ρ_1 은 PCB scanner probe와 기판 사이의 거리이고, ρ_2 는 PCB scanner probe와 영상 선전류 사이의 거리이다. 이 식을 이용하여 구한 등가 다이폴 값을 넣어서 계산한 결과는 그림 8과 같다. 그림 7과 비교해 볼 때, 측정치와의 오차가 상당히 감소하였다. 그림 8에서도 오차가 발생하는데, 이것은 전류를 static current로 가정하였기 때문이다. 선전류의 분포를 정확히 알 수 있다면, 점전원에 의한 그린 함수로부터 선전류에 의한 그린 함수를 계산할 수 있다. 일반적인 PCB 구조에서 PCB scanner 측정값의 최대값이 상대적으로 클 경우에는 본 논문에서 제시한 해석 방법, 즉 PCB를 점전원을 모델링하는 방법이 타당하다. 그러나, 위의 측정 샘플과 같이 하나의 마이크로스트립이 있는 경우에는 선전류 분포가 주어지면, 점전원에 의한 그린 함수로부터 선전류에 의한 그린 함수를 계산할 수 있다.

IV. 결 론

직사각형 개구면이 있는 합체 내부에 위치한 PCB로부터의 복사 방출을 예측하기 위해 PCB scanner 측정 신호를 이용해 PCB를 등가 전원으로 모델링하였다. OATS 환경에서 등가 전원으로부터의 복사 방

출을 해석하였다. 그린 함수를 이용하여 전원을 표현하고, 모드 정합법과 푸리에 변환, 표면 등가 원리를 이용하여 개구면에서의 등가 전원을 구한 뒤, 등가 전원 및 영상 전원으로부터의 복사 전자기장을 계산하였다. 계산 결과와 측정 결과를 비교한 결과, 큰 오차가 발생하였는데, 측정 샘플은 유한한 길이의 선전류이고, 계산 결과는 점전원에 의한 것이기 때문이다. 선전류로부터 등가 다이폴을 구한 뒤 측정치와 비교한 결과, 오차가 상당히 감소하였음을 확인할 수 있다. 또한, 점전원에 의한 그린 함수로부터 유한한 길이의 선전류에 의한 그린 함수를 구할 수 있으므로, 제시한 해석 방법에서 전원항만 바꾸어 주면, 유한한 길이의 선전류에 의한 복사 방출을 예측할 수 있다. 본 논문에서 제시한 방법은 근사법이 아닌 full-wave 해석 방법이므로, 모든 주파수 영역에서 사용할 수 있으며, 다수개의 개구면, 원형이나 고리형의 개구면에 대해서도 동일한 방법을 적용할 수 있다. 향후, 본 논문에서 개발한 알고리즘을 PCB scanner에 구현하여, PCB로부터의 복사 방출 예측에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] J. Shi, M. A. Cracraft, K. P. Slattery, M. Yamaguchi, and R. E. Dubroff, "Calibration and compensation of near-field scan measurements", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 47, no. 3, pp. 642-

- 650, Aug. 2005.
- [2] J. Shi, M. A. Cracraft, J. Zhang, and R. E. Dubroff, "Using near-field scanning to predict radiated field", *Proceeding of 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, vol. 1, pp. 14-18, 2004.
- [3] G. Cerri, R. D. Leo, and V. M. Primiani, "Theoretical and experimental evaluation of the electromagnetic radiation from apertures in shielded enclosures", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 34, no. 4, pp. 423-432, Nov. 1992.
- [4] J. -M. Jin, J. L. Volakis, "Electromagnetic scattering by and transmission through a three-dimensional slot in a thick conducting plane", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 39, no. 4, pp. 543-550, Apr. 1991.
- [5] R. Luebbers, C. Penney, "Scattering from apertures in infinite ground planes using FDTD", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 42, no. 5, pp. 731-736, May 1994.
- [6] M. P. Robinson, et al., "Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 40, no. 3, pp. 240-248, Aug. 1998.
- [7] H. H. Park, H. J. Eom, "Electromagnetic scattering from multiple rectangular apertures in a thick conducting plane", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, no. 6, pp. 1056-1060, Jun. 1999.
- [8] M. I. Montrose, EMC를 고려한 PCB 설계 기술, Wiley, pp. 68-74, 2006년.
- [9] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Wiley, p. 280, 1989.
- [10] J. W. Zeong, H. J. Eom, "Radiation from cavity-backed apertures in a conducting plane", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 53, no. 8, pp. 2761-2764, Aug. 2005.
- [11] H. H. Park, H. J. Eom, "Electrostatic potential distribution through a rectangular aperture in a thick conducting plane", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 44, no. 10, pp. 1745-1747, Oct. 1996.
- [12] H. H. Park, H. J. Eom, "Acoustic scattering from a rectangular aperture in a thick conducting plane", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 101, no. 1, pp. 595-598, Jan. 1997.
- [13] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Wiley, pp. 329-334, 1989.
- [14] M. N. O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*, Oxford, p. 238, 2007.

박 용 배

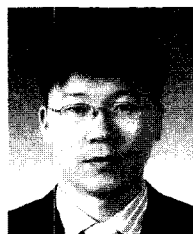


1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
 2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 2003년 2월~2006년 8월: KT 인프

라연구소 선임연구원

2006년 9월~현재: 아주대학교 전자공학부 조교수
 [주 관심분야] 전자장 해석, 전자파 산란, EMI/EMC

정 기 범



1999년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학석사)
 2002년~2004년 2월: 한양대학교 전파공학과 박사수료
 2004년~2008년: EMC 기술지원센터

터 팀장

[주 관심분야] EMI/EMC 측정 및 설계·대책, EMC를 고려한 PCB 설계, EMC Management Plan

정 연 춘



1984년 2월: 경북대학교 물리학과 (이
학사)

1986년 2월: 경북대학교 물리학과 (이
학석사)

1999년 8월: 충남대학교 전자공학
과 (공학박사)

1985년 12월~2001년 5월: 한국표

준과학연구원 전자기환경그룹 책임연구원 그룹장

2000년 3월~2001년 2월: Univ. of York, Visiting Academics

2001년 6월~2002년 2월: (주)AMIC 중앙연구소장, 부사장

2002년 3월~현재: 서경대학교 정보통신공학과 교수

2005년 6월~현재: EMC 기술지원센터 센터장

[주 관심분야] EMI/EMC 측정 및 대책 기술, 전자파 재료