

파수영역법에 의한 PCB에서의 방사전계 계산

김동일* · 김형근** · 정세모*

Calculation of the Radiated E-Field from PCB by spectral Domain Analysis.

Dong Il Kim · Hyung-Guen Kim** · Se-Mo Chung**

Abstract	II-3. 모멘트법
I. 서론	III. 결과 및 고찰
II. 수치해석	IV. 결론
II-1. 파수 영역 해석	참고문헌
II-2. 그린함수의 도출	

Abstract

It is being more and more difficult to suppress emissions from electronic products using PCB(Printed Circuit Board) to the limit. Therefore, the exact evaluation of the emission from PCB has been more important to reduce the required time and the cost at the design phase of the products, especially on board ship's equipments. This research has evaluated the emission radiated from PCB based on the theoretical approach of SDA(Spectral Domain Analysis), which is available to analyze microwave stripline, coplanar line, patch antenna, etc.

According to the theoretical results, it has been clearly shown that the emission radiated from PCB is reduced as the thickness of PCB is thinner, the permittivity of PCB is higher, the length of stripline is shorter, and the frequency is lower.

I. 서론

최근 마이크로프로세서로 대표되는 디지털IC의 비약적인 발전으로, 전자기기의 품질, 정도, 고속

화, 저소비전력 등의 향상에 의해, 그 적용범위가 확대되고 있지만, 오동작으로 인한 안정성, 신뢰성의 문제도 표면화되고 있다. VLSI의 고속화에 따라, PCB기판에서의 반사와 누화 노이즈가 증가되

* 한국해양대학교 (Korea Maritime University)

** 현대자동차연구소(Research Institute of Hyundai Motors), 전자설계팀)

고 있고, 안정된 동작을 확보하기 위한 PCB배선 설계기술이 한층 중요하게 되었다.

특히, EMI방사에 의한 오동작의 약 60% 이상이 PCB기판에서 문제가 발생한 것으로 알려져 있으며, 더욱이 선박용 전자장비의 경우에 있어서는 그 대책이 더욱 중요하다. PCB기판에서의 오동작 문제를 해결하기 위한 가장 근본적인 방법으로서 우선, PCB기판에 어느 정도의 방사전계가 방사되는가를 파악하는 것이 가장 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 유전체 기판이 $x-y$ 방향에 평행으로 무한히 넓고, z 축 방향으로 다층구조를 가진 것으로 가정하고, 실공간 영역의 함수를 푸리에 변환을 행하여 파수 영역의 함수로 취급하여 해석하였다.

II. 수치해석

II-1. 파수 영역 해석

z 축방향으로 층구조를 가지며, $x-y$ 평면에 평행으로 무한히 넓은 경우, 실공간영역의 함수 $\psi(x, y)$ 는 식(1)과 같이 푸리에변환을 하여, 파수영역의 함수 $\bar{\psi}(k_x, k_y)$ 로 취급할 수 있다[1].

$$\bar{\psi}(k_x, k_y) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x, y) \exp j(k_x x, k_y y) dx dy \quad \dots\dots\dots (1)$$

식(1)과 같이 푸리에 변환을 함으로써 전자계가 $k = k_x \vec{x} + k_y \vec{y}$ 의 파수벡터로 전파하는 평면파 성분으로 분해할 수 있다. 여기서, $\bar{\psi}$ 의 bar는 파수영역의 값을 나타내고, 시간변화는 $\exp(j\omega t)$ 로 한다.

매질 (μ, ϵ_1) 의 영역에 있는 전자계의 xy 성분은, z 성분 \bar{E}_{iz} (TM파) 및 \bar{H}_{iz} (TE파)에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다[2].

$$\bar{E}_{ix} = \frac{1}{k_t} (-jk_x \frac{\partial \bar{E}_{iz}}{\partial z} - \omega \mu k_y \bar{H}_{iz}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\bar{E}_{iy} = \frac{1}{k_t} (-jk_y \frac{\partial \bar{E}_{iz}}{\partial z} - \omega \mu k_x \bar{H}_{iz}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\bar{H}_{ix} = \frac{1}{k_t} (-jk_x \frac{\partial \bar{H}_{iz}}{\partial z} - \omega \epsilon_1 k_y \bar{E}_{iz}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\bar{H}_{iy} = \frac{1}{k_t} (-jk_y \frac{\partial \bar{H}_{iz}}{\partial z} - \omega \epsilon_1 k_x \bar{E}_{iz}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서, $k_t = k_x^2 + k_y^2$ 이며, 식(2) ~ (5)의 각 영역에서의 \bar{E}_{iz} 와 \bar{H}_{iz} 를 구할 수가 있으면, 모든 영역의 전자계를 구할 수 있다.

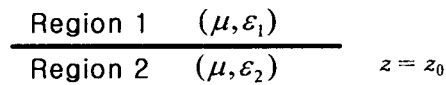


그림 1. 유전율이 다른 매질
Fig. 1. Medium with Different Permittivity.

그림 1과 같이, 영역 1의 매질 (μ, ϵ_1) 과 영역 2의 매질 (μ, ϵ_2) 의 경계상 $(0, 0, z_0)$ 에 단위량의 $+x$ 축 방향의 면전류소 $\vec{J} = \vec{x}$ 를 고려하고, 각 영역의 \bar{E}_{iz} 와 \bar{H}_{iz} 를 다음과 같이 가정한다.

$$\bar{E}_{2z} = A \exp(-jk_{2z}(z-z_0)) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\bar{E}_{1z} = B \exp(+jk_{1z}(z-z_0)) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\bar{H}_{2z} = C \exp(-jk_{2z}(z-z_0)) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\bar{H}_{1z} = D \exp(+jk_{1z}(z-z_0)) \quad \dots\dots\dots (9)$$

경계조건은, $z = z_0$ 에 대해서 다음의 식이 성립하는 것이며, 파원이 z 축방향의 전류소의 경우는 $\bar{E}_{2y} = \bar{E}_{1y} = 1$ 이 되고, 그 외에는 연속이 된다.

$$\bar{E}_{2x} = \bar{E}_{1x} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\bar{E}_{2y} = \bar{E}_{1y} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\bar{H}_{2x} = \bar{H}_{1x} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\bar{H}_{1y} - \bar{H}_{2y} = 1 \text{ (by Ampere's law)} \quad \dots\dots (13)$$

식(6) ~ 식(9)을 식(2) ~ 식(5)에 대입하여, 각 영역의 x, z 성분을 계산하고 경계조건 식(10) ~ 식(13)에 의해 식(6) ~ 식(9)의 A ~ D를 구하면

다음과 같이 된다.

$$A = \frac{k_{1z}k_x}{\omega(\epsilon_1k_{2z} + \epsilon_2k_{1z})} \dots\dots\dots (14)$$

$$B = \frac{k_{2z}k_x}{\omega(\epsilon_1k_{2z} + \epsilon_2k_{1z})} \dots\dots\dots (15)$$

$$C = D = \frac{k_y}{k_{1z} + k_{2z}} \dots\dots\dots (16)$$

II-2. 그린함수의 도출

그림 2와 같은 3층구조를 고려하여, x축 방향의 면전류소가 만드는 영역 1에서의 x축 방향의 전계의 그린함수를 구하는 방법에 관하여 기술한다.

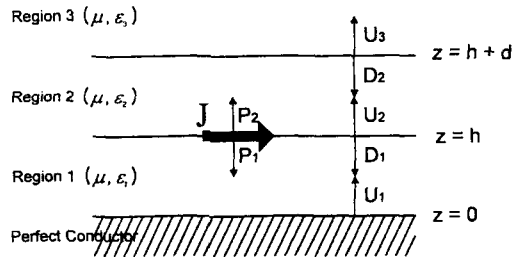


그림 2. 3층 구조의 유전체 기판
Fig. 2. Three-Layer Dielectric Slab.

우선 각 영역의 Eiz (or Hiz)는 다음과 같이 3개의 성분으로 분리된다. 즉, 다층구조의 산란에 의해 생기는 +z 축방향으로 전파하는 파의 성분을 UiM, -z 축방향으로 전파하는 파의 성분을 DiM, 1차 여기파성분을 PiM 이라 하면 P2E=A, P1E=B, P2H=C, P1H=D와 같이 된다. M은 E 또는 H를 나타내며, PiM, UiM, DiM의 관계는 다음과 같이 된다.

$$U_1^M = R_{10}^M (P_1^M + D_1^M) \exp(-jk_{1z}h) \dots\dots\dots (17)$$

$$D_1^M = R_{12}^M U_1^M \exp(-jk_{1z}h) + T_{21}^M D_2^M \exp(-jk_{2z}d) \dots\dots\dots (18)$$

$$U_2^M = T_{12}^M U_1^M \exp(-jk_{1z}h) + R_{21}^M D_2^M \exp(-jk_{2z}d) \dots\dots\dots (19)$$

$$D_2^M = R_{23}^M (P_2^M + U_2^M) \exp(-jk_{2z}d) \dots\dots\dots (20)$$

$$U_3^M = T_{23}^M (P_2^M + U_2^M) \exp(-jk_{2z}d) \dots\dots\dots (21)$$

연립방정식(17)~ (21)을 풀어, DIM과 U3M을 구하면, 영역 1내의 \bar{E}_{1z} , \bar{H}_{1z} 을 이용하여, x축 방향의 면전류소가 만드는 영역 1의 x축방향의 전계의 그린함수 \bar{G}_{xx}^{ej} 는 관측점의 위치 z의 함수로서 다음과 같이 된다 ($0 < z < h$).

$$\bar{G}_{xx}^{ej} = \frac{1}{k_1^2} \left[\frac{-k_x^2 k_{1z} k_{2z}}{\omega(\epsilon_1 k_{2z} + \epsilon_2 k_{1z})} \frac{1 - R_{10}^E \exp(-2jk_{1z}h)}{\Delta^E} - \frac{\omega \mu k_x^2}{(k_{1z} + k_{2z})} \frac{1 + R_{10}^H \exp(-2jk_{1z}h)}{\Delta^H} \right] \dots\dots\dots (24)$$

여기서

$$\Delta^E = 1 - R_{10}^E R_{12}^E \exp(-2jk_{1z}h) \dots\dots\dots (25)$$

$$\Delta^H = 1 - R_{10}^H R_{12}^H \exp(-2jk_{1z}h) \dots\dots\dots (26)$$

II-3. 모멘트법

도체상의 전류분포 $J(x, y)$ 를 N개의 전개함수 $J_n(x, y)$ 에 의해 다음과 같이 전개 할 수 있다[3].

$$J = \sum_{n=1}^N I_n J_n \dots\dots\dots (27)$$

미지함수의 진폭 I_n 은, 이하의 대수 방정식 (28)의 해를 구하여 결정한다.

$$Z_{mn} I_n = V_m \quad (m = 1, 2, \dots, N) \dots\dots\dots (28)$$

x축에 평행하게 놓여진 다이폴의 임피던스는 식(29)로 표현할 수 있으며, 기호(\sim)는 푸리에변환 영역의 값을 나타낸다[4].

$$Z = - \langle \tilde{J}_x, \tilde{E}_x \rangle = - \langle \tilde{J}_x \cdot \tilde{G}_{xx}^e \cdot \tilde{J}_x \rangle = - \frac{1}{4\pi^2} \int \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{J}_x \cdot \tilde{G}_{xx}^e \cdot \tilde{J}_x dk_x dk_y \dots\dots\dots (29)$$

여기서, \tilde{J}_x 는 x축방향으로 흐르는 다이폴상의

전계, \widehat{G}_{xx} 는 푸리에 영역 다이아딕(Dyadic) 그린 함수, \overline{E}_z 는 \overline{J}_z 에 의해 여기된 다이폴상의 전계를 나타낸다. 원방계에서의 전계강도[5]는 아래의 식을 이용하여 구한다.

$$E_s = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{jk_0}{2\pi R} \exp(-jk_0 R) [\cos(\theta) \cdot [\overline{E}_{Vn}(\sin(\phi)\sin(\theta_n)) + \cos(\phi)\cos(\theta_n)] - \overline{E}_{Un}(\sin(\phi)\cos(\theta_n)) - (\cos(\phi)\cos(\theta_n))] \dots (30)$$

III. 결과 및 고찰

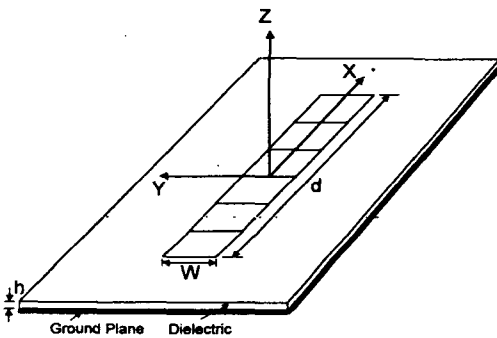


그림 3. 해석모델
Fig. 3. Analysis Model.

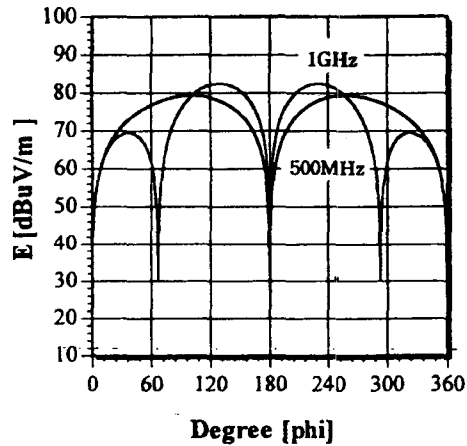
그림 3과 같이, 그라운드가 완전도체이고, 2층이 유전체 ($\epsilon_r=2.6$)인 구조를 가진 PCB기판에 대하여 스트립선로의 길이, 폭, 기판의 유전율 및 두께를 변환시키면서 해석하였다. 본 연구에서는 원방계에서의 거리는 3 m이고, 사용주파수는 1 GHz로 하여 PCB에서의 방사전계량을 파수영역법을 이용하여 고찰하였다.

수치계산에 있어서 주파수, 선로의 길이, 유전율, PCB기판의 두께를 각각 변화시켰을 경우의 전계강도 (E_s)의 계산치를 각각 그림 4 ~ 그림 7에 나타내었다. 이들 수치계산 결과는 예상되는 기대치와 잘 일치하며, 따라서 제시한 수치계산법은 타당한 것으로 판단된다. 일반적으로 PCB선로는 크

게 지선, 분기, 코너 등으로 이루어져 있으므로 분기, 코너 등에서의 방사전계량에 대한 후속 연구가 요망된다.

IV. 결론

본 논문에서는 파수영역법을 이용하여 PCB에서의 방사전계량을 계산하였다. 그린함수를 도출하여 Program화하는 과정에서 계산시간이 많이 소요되므로, 계산식의 간략화가 요구된다. 또한, 위에서 제시한 연구결과는 PCB 배선설계, 방사전계 측정 Simulator등에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

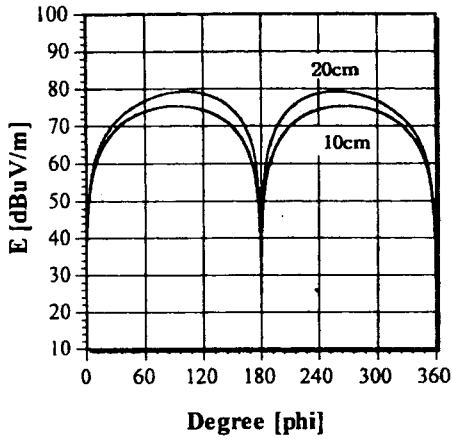


(a) 전계강도

유전율 (ϵ_r)	2.6
선로의 길이(cm)	20
선로의 폭(mm)	40
PCB기판의 두께(mm)	1.6
원방계 계산거리(m)	3

(b) 계산 파라미터

그림 4. 주파수를 변환시켰을때의 전계강도 (E_s)
Fig. 4. Electric Field strength (E_s) according to Frequencies.



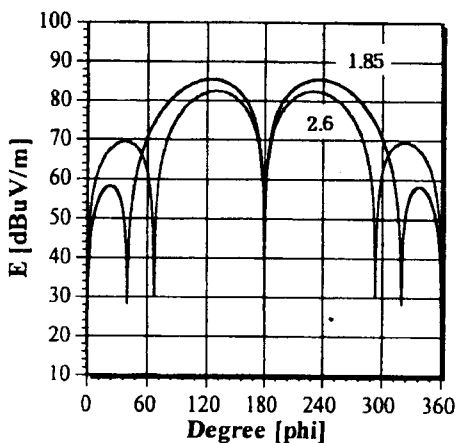
(a) 전계강도

주파수(GHz)	1
유전율 (ϵ_r)	2.6
PCB기판의 두께(mm)	1.6
선로의 폭(mm)	4.0
원방계 계산거리(m)	3

(b) 계산 파라미터

그림 5. 선로의 길이를 변환시켰을때의 전계강도 (E_s)

Fig. 5. Electric Field Strength (E_s) according to Line Lengths.



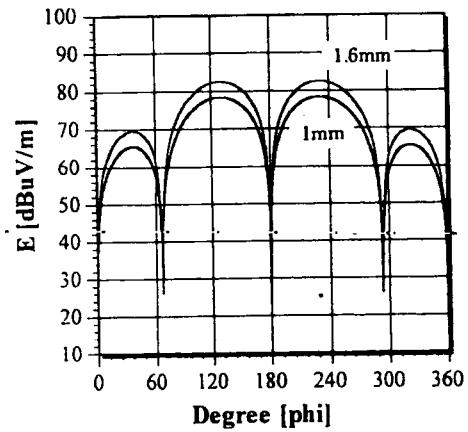
(a) 전계강도

주파수(GHz)	1
선로의 길이(cm)	20
PCB기판의 두께(mm)	1.6
선로의 폭(mm)	4.0
원방계 계산거리(m)	3

(b) 계산 파라미터

그림 6. 유전율을 변환시켰을때의 전계강도 (E_s)

Fig. 6. Electric Field Strength (E_s) according to Dielectric Constants.



(a) 전계강도

주파수(GHz)	1
유전율 (ϵ_r)	2.6
선로의 길이(cm)	20
선로의 폭(mm)	4.0
원방계 계산거리(m)	3

(b) 계산 파라미터

그림 7. PCB기판의 두께를 변화했을 때의 전계강도 (E_s)

Fig. 7. Electric Field Strength (E_s) according to Thickness of PCB.

참고문헌

- 1) 伊藤龍. 스펙트럴領域法, 電磁波問題의基礎的解析法, 第11章, 日本電子情報通信學會, 1985.
- 2) 內藤, 마이크로波·ミリ波工學, 第2章, コロナ社, 1986.
- 3) J. Moore & Pizer. Moment methods in electromagnetics, Wiley, New York, 1984.
- 4) 柿本, 伊藤(精), “電子結合給電によるフ° リントタイホ° ールの解析”, 信學技報, A·P90-55, 1990.
- 5) R. E. Collin, Antenna and Radiowave Propagation, McGraw-Hill, 1985.