

# 4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로의 누화 해석

## Crosstalk Analysis of Coupled Lines Connected with Vias in a 4-Layer PCB

한 재 권 · 박 동 철

Jae-Kwon Han · Dong-Chul Park

### 요 약

소형 고주파 회로 설계에서 PCB 레이아웃의 집적도가 증가하면서 다층 기판이 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 다층 기판의 한 예인 4층 기판에서 비아(via)로 연결된 결합 선로의 누화를 회로 접근법을 사용하여 이론적으로 계산하는 방법에 대해 연구해 보았다. 4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로를 세 구간, 즉, 접지면을 그라운드로 사용하는 마이크로스트립 결합 선로와 비아 상단 구간, 비아 중간단 구간, 그리고 비아 하단과 전력면을 그라운드로 사용하는 마이크로스트립 결합 선로 구간으로 나누고 각 구간을 ABCD 행렬로 나타내었다. 이 세 구간을 직렬 연결하여 4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로의 누화를 근사적으로 계산하였다. 계산된 결과와 HFSS 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 4층 기판에서 비아로 연결된 몇 가지 형태의 결합 선로에서의 누화를 근사적으로 계산하는 방법의 타당성을 보였다.

### Abstract

Multi-layer PCBs are often used in compact microwave circuit design as density of PCB layout is increased. In this paper, the crosstalk between coupled lines connected with vias in a 4-layer PCB is investigated theoretically based on the circuit-concept approach. Coupled lines connected with vias in a 4-layer PCB are divided into three sections, which are coupled microstrip lines and upper via section, center via section, and lower via and coupled microstrip lines section, respectively. Each section is represented by ABCD matrix. By cascading these three ABCD matrices crosstalk between coupled lines connected with vias in a 4-layer PCB is approximately calculated. The validity of this theoretical approach is verified by comparing the calculated results with the simulated ones using HFSS.

Key words : Crosstalk, 4-layer PCB, Coupled Lines, Vias, Circuit-Concept Approach, ABCD Matrices

### I. 서 론

인쇄 회로 기판(Printed Circuit Boards: PCB)에서 레이아웃의 집적도가 높아지고, 고속 데이터 전송을 위해 사용되는 신호의 성분이 높은 주파수 영역으로 확장됨에 따라 불요 전자파 문제가 발생되고 있다. PCB에서 전송선들 사이에서 나타나는 누화(cross-

talk)는 가장 해석하기 힘든 문제 중의 하나로 부각되고 있다.

다중 전송선간의 결합 문제는 Paul<sup>[1]</sup>에 의해 많이 연구되었는데 전송선들의 길이가 같고 같은 방향으로 놓인 경우로 제한되었다. 이와는 달리 Kami<sup>[2],[3]</sup>가 제안한 회로 접근법을 이용하여 전송선 문제를 해석하면 길이가 서로 다른 전송선이 임의의 방향으

「본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원 사업의 연구 결과로 수행되었음(IITA-2005-(C1090-0502-0014).」

충남대학교 전파공학과(Dept. of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20060330-033

· 수정완료일자 : 2006년 5월 18일

로 놓여 있을 경우에도 전송선간의 결합 문제를 계산할 수 있다. 최근에는 이것을 다중 전송선까지 확장하여 실제로 PCB 상에서 구현될 수 있는 임의의 방향으로 놓인 다중 전송선이나 비아 펜스(via fence)에 대해 해석한 연구 결과가 발표되었다<sup>[4],[5]</sup>.

그간에는 2층 기판에 국한하여 연구가 되어 왔으나 본 논문에서는 연구 범위를 다중 기판으로 확장하여 4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로간의 누화에 대하여 해석해 보았다. 누화량은 전송선들 간에 일어나는 상호 결합뿐만 아니라 비아를 통해 흐르는 전류에 의한 영향 또한 무시할 수 없으므로 이러한 비아의 커플링도 고려되었다. 비아 부분을 기준으로 전력/접지면을 그라운드로 사용하는 1층과 4층에서의 결합 선로간의 누화에 대한 해석은 회로 접근법을 사용하여 ABCD 행렬로 나타내었고, 비아의 부분 또한 재질과 단면적에 대한 비아 임피던스 모델링을 통해 ABCD 행렬로 나타낸 후 이 행렬들을 직렬 연결하는 방법을 사용하였다. 본 논문에서 제시한 방법으로 계산한 누화의 결과와 HFSS 시뮬레이션 결과를 서로 비교하여 회로 접근법을 이용하여 4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로의 누화 해석 방법에 대해 검증해 보았다.

## II. 회로 접근법에 의한 마이크로스트립 결합 선로의 누화 해석

두 전송선이 같은 그라운드 위에 매우 근접하게 위치하고 있는 마이크로스트립 결합 선로 모델을 그림 1에 나타내었다. 전송선의 길이, 높이, 방향이 각각  $l_1, h_1, x_1$  그리고  $l_2, h_2, x_2$ 인 두 전송선 #1

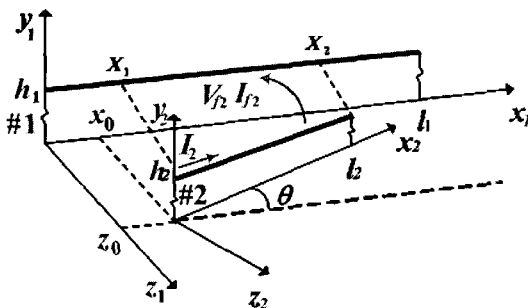


그림 1. 결합 선로 모델  
Fig. 1. Coupled lines model.

과 #2가  $\theta$ 의 각도를 갖고 자유 공간에 놓여 있다. 각 전송선의 단면적이 누설 전자파의 파장에 비해 매우 작다고 하면 두 전송선에서의 전파 모드는 각각 TEM 모드로 해석되어질 수 있다.

또한, 두 전송선 간의 누화가 매우 미약하다고 가정하면 각각의 전송선은 인접한 전송선의 영향을 받지 않고 근사적으로 독립적인 특성 임피던스를 갖는 하나의 선로로 생각할 수 있다. 이때 외부의 전자기파가 전송선에 야기되면 그 전송선에는 유도 전류가 발생한다. 이는 전송선과 전자기파의 전자기적 결합 현상이 일어난 것으로 간주할 수 있다. 또한, 어느 한 전송선에 영향을 주는 전자기파가 인접한 전송선으로부터 발생한 전자기파라고도 간주할 수 있다. 따라서 전송선 #1에서 각주파수  $\omega$ 의 외부 전자기파 또는 인접한 전송선 #2에서 발생한 전자기파가 야기되었을 때의 결합 현상은 식 (1)과 같이 전송선 #1의 선 전압과 선 전류로 표현될 수 있고, 일반해는 식 (2)와 같다<sup>[2],[3]</sup>.

$$-\frac{d}{dx_1} \begin{bmatrix} V_1(x_1) \\ I_1(x_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & j\omega L_1 \\ j\omega C_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(x_1) \\ I_1(x_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{R2}(x'_1) \\ I_{R2}(x'_1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_1(0) \\ I_1(0) \end{bmatrix} = F_1(l_1) \begin{bmatrix} V_1(l_1) \\ I_1(l_1) \end{bmatrix} - \int_0^{l_1} F_1(x'_1) \begin{bmatrix} V_{R2}(x'_1) \\ I_{R2}(x'_1) \end{bmatrix} dx'_1 \quad (2)$$

식 (1)의 우변의 두 번째 항인  $V_{R2}(x'_1), I_{R2}(x'_1)$ 는 인가된 항(forcing term)으로서 인접한 전송선 #2에 흐르는 전류로부터 발생한 전자기파에 의한 #1에서의 전압, 전류를 의미한다.  $V_{R2}(x'_1), I_{R2}(x'_1)$ 는 벡터 포텐셜(vector potential)을 이용하여 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_{R2}(x'_1) \\ I_{R2}(x'_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j\omega \left\{ \int_0^{h_1} \left( \frac{\partial A_{y1}}{\partial x_1} - \frac{\partial A_{x1}}{\partial y_1} \right) dy'_1 \right\} \\ j\omega C_1 \left\{ -j\omega \int_0^{h_1} A_{y1} dy'_1 + \frac{(\nabla \cdot \vec{A}_1) h_1}{j\omega \mu \epsilon} \right\} \end{bmatrix} \quad (3)$$

주파수가 높아짐에 따라 SMA 커넥터 등이 연결되는 라이저(riser) 부분에 의한 영향을 무시할 수 없기 때문에 식 (3)은 전송선 선로와 라이저에 의한 전자

4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로의 누화 해석

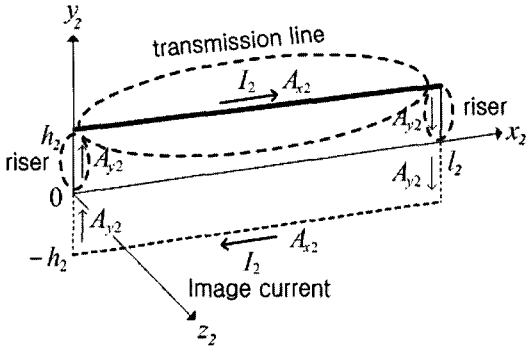


그림 2. 전송선 #2에 의한 벡터 포텐셜  
Fig. 2. Vector potential due to line #2.

기과의 영향을 모두 고려한 수식이다. 전송선 #2가 놓여져 있는  $(x_2, y_2, z_2)$  좌표계에서 전송선 선로와 라이저를 통해 흐르는 전류  $I_2$ 에 기인한 임의의 한 지점에서의 벡터 포텐셜  $A_{x2}$ 와  $A_{y2}$ 를 그림 2에 보였다.

전송선 부분을 통해 흐르는 전류로부터 발생하는 벡터 포텐셜 중  $x$  성분인  $A_{x2}$ 는 식 (4)와 같다. 식 (4)에서 괄호안의 두 번째 항은 이미지 전류에 의한 것이고,  $R_{x1}, R_{x2}$ 는 다음과 같다.

$$A_{x2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \int_0^{l_2} I_2(x'_2) \frac{\exp(-j\beta R_{x1})}{R_{x1}} dx'_2 - \int_0^{l_2} I_2(x'_2) \frac{\exp(-j\beta R_{x1})}{R_{x1}} dx'_2 \right\} \quad (4)$$

$$R_{x1} = \sqrt{(x_2 - x'_2)^2 + (y_2 - h_2)^2 + z_2^2} \quad (5)$$

$$R_{x2} = \sqrt{(x_2 - x'_2)^2 + (y_2 + h_2)^2 + z_2^2} \quad (6)$$

또한, 라이저를 통해 흐르는 전류로부터 발생하는 벡터 포텐셜 중  $y$  성분인  $A_{y2}$ 는 식 (7)과 같다. 여기서의  $R_{y1}, R_{y2}$ 는 다음과 같다.

$$A_{y2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \int_{-h_2}^{h_2} I_2(0) \frac{\exp(-j\beta R_{y1})}{R_{y1}} dy'_2 - \int_{-h_2}^{h_2} I_2(l_2) \frac{\exp(-j\beta R_{y2})}{R_{y2}} dy'_2 \right\} \quad (7)$$

$$R_{y1} = \sqrt{(x_2)^2 + (y_2 - y'_2)^2 + z_2^2} \quad (8)$$

$$R_{y2} = \sqrt{(x_2 - l_2)^2 + (y_2 - y'_2)^2 + z_2^2} \quad (9)$$

식 (4)와 (7)의 전류  $I_2(x'_2)$ 와  $I_2(0)$ 는 식 (10)과 (11)에서와 같이  $V_2(l_2)$ 와  $I_2(l_2)$ 로 표현될 수 있다.

$$I_2(x'_2) = j \frac{V_2(l_2)}{Z_{02}} \sin \beta(l_2 - x'_2) + I_2(l_2) \cos \beta(l_2 - x'_2) \quad (10)$$

$$I_2(0) = j \frac{V_2(l_2)}{Z_{02}} \sin \beta l_2 + I_2(l_2) \cos \beta l_2 \quad (11)$$

식 (10)과 (11)을 식 (4)와 (7)에 각각 대입하여 정리하고, 이를 다시 아래의 좌표 변환 관계식인 식 (12)를 이용하여 식 (3)에 최종적으로 대입하면 인가된 항인  $V_{R2}(x'_1), I_{R2}(x'_1)$ 를 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_{x1} \\ A_{y1} \\ A_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{x2} \\ A_{y2} \\ A_{z2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

위의 과정을 통해 얻은 인가된 항을 식 (2)에 대입하여 정리하면 종단의 전압과 전류 관계식인 식 (13)과 (14)를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_1(0) \\ I_1(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & b_{11} & a_{12} & b_{12} \\ c_{11} & d_{11} & c_{12} & d_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(l_1) \\ I_1(l_1) \\ V_2(l_2) \\ I_2(l_2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} V_2(0) \\ I_2(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{21} & b_{21} & a_{22} & b_{22} \\ c_{21} & d_{21} & c_{22} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(l_1) \\ I_1(l_1) \\ V_2(l_2) \\ I_2(l_2) \end{bmatrix} \quad (14)$$

식 (13), (14)를 그림 3과 같이 임의의 방향으로 놓여져 있고 길이도 서로 다른 비평행 마이크로스트립 결합 선로에 적용할 수 있고, 여기에 경계 조건을 대입하면 각 입·출력 포트에서의 전압과 전류를 얻을 수 있다.

### III. 4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로의 해석 방법

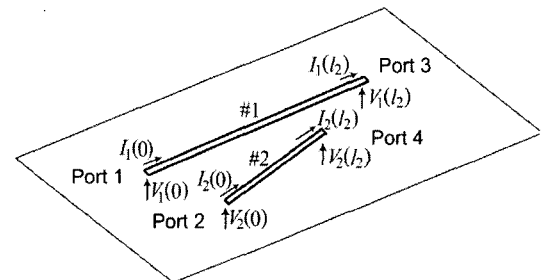


그림 3. 4포트 네트워크 모델  
Fig. 3. 4-port network model.

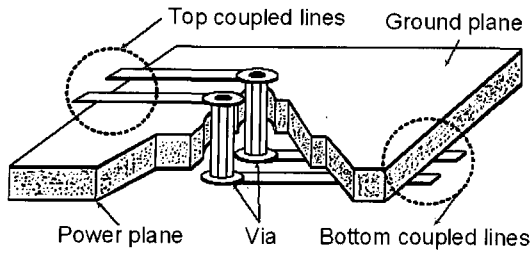


그림 4. 4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로  
Fig. 4. Coupled lines connected with vias in a 4-layer PCB.

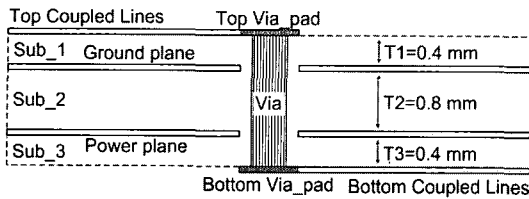
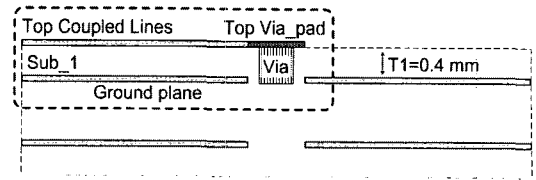


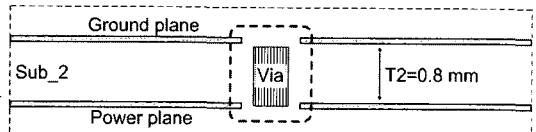
그림 5. 4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로의 측면도  
Fig. 5. Side view of coupled lines connected with vias in a 4-layer PCB.

4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로에 대한 모델을 그림 4에 보였다. 비아를 중심으로 기판의 1층과 4층에 결합 선로가 존재한다. 두 그라운드 평면인 전력/접지면(power/ground plane)이 존재하고 비아를 중심으로 접지면을 그라운드로 사용하는 기판 1층에 놓인 마이크로스트립 결합 선로와 전력면을 그라운드로 사용하는 기판 4층에 놓인 마이크로스트립 결합 선로가 있고, 두 결합 선로는 기판의 1층과 4층을 연결하는 비아에 의해 연결되어 있는 형태이다.

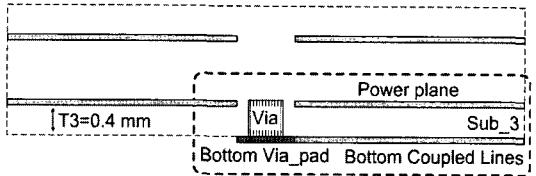
그림 5는 그림 4에 대한 측면도이다. 4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로에서의 누화량 계산은 그림 5를 그림 6에서와 같이 (a), (b), (c) 세 구간으로 나누어 해석할 수 있다. (a), (c)에 해당하는 구간 1과 구간 3을 앞에서 설명한 회로 접근법을 사용하여 각각 종단의 전압, 전류 관계식인 ABCD 행렬로 나타내고, (b)에 해당하는 구간 2 또한 비아 부분의 재질과 단면적에 대한 임피던스 모델링을 통해 ABCD 행렬로 나타내었다. 마지막으로 세 구간의 ABCD 행렬을 직렬로 연결한 후 종단 조건을 적용하여 누화량을 계산하였다.



(a) 1층의 결합 선로와 비아 상단 부분(구간 1)  
(a) Coupled lines on the 1-layer and lower via section (region 1)



(b) 전력/접지면 사이의 중간 비아(구간 2)  
(b) Center via between Power/Ground planes(region 2)



(c) 비아 하단 부분과 4층의 결합 선로(구간 3)  
(c) Lower via section and coupled lines on the 4-layer (region 3)

그림 6. 해석을 위한 구간별 측면도  
Fig. 6. Side views of partitioned structures for analysis.

그림 6(a)는 해석을 위해 그림 7과 같이 나타낼 수 있고 접지면을 그라운드로 사용하는 마이크로스트립 결합 선로와 비아 상단에 대한 구간 1에서의 누화량에 대한 해석은 결합 선로와 비아에 흐르는 전류에 의한 각각의 벡터 포텐셜  $A_{z2}$ 와  $A_{z1}$ 를 통해 인가된 항을 구함으로서 계산될 수 있다. 결과적으로 각 종단 전압, 전류는 식 (15)와 같다.

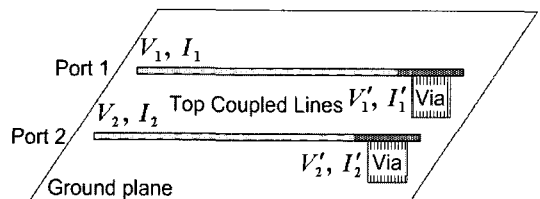


그림 7. 구간 1에서 각 종단에서의 전압과 전류  
Fig. 7. The voltage and current at each terminal in region 1.

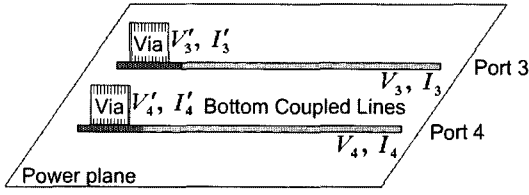


그림 8. 구간 3에서 각 종단에서의 전압과 전류  
Fig. 8. The voltage and current at each terminal in region 3.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & b_{11} & b_{12} \\ a_{21} & a_{22} & b_{21} & b_{22} \\ c_{11} & c_{12} & d_{11} & d_{12} \\ c_{21} & c_{22} & d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_1 \\ V'_2 \\ I'_1 \\ I'_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

마찬가지로 그림 6(c)는 그림 8과 같이 나타낼 수 있고 구간 3 또한 구간 1에서와 같이 각 종단 전압, 전류는 식 (16)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V'_3 \\ V'_4 \\ I'_3 \\ I'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & b_{11} & b_{12} \\ a_{21} & a_{22} & b_{21} & b_{22} \\ c_{11} & c_{12} & d_{11} & d_{12} \\ c_{21} & c_{22} & d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_3 \\ V_4 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (16)$$

그림 6(b)는 그림 9에서와 같이 유전체 안에 반지름이  $r_w$ 이고 길이가  $l$ 인 두 개의 비아가 거리  $d$ 만큼 떨어져 있는 형태이다. 두 비아 사이의 결합량을 계산하기 위한 셀프 인덕턴스  $l_{11}$ 과 상호 인덕턴스  $l_{12}$ 는 식 (17), (18)과 같고 캐패시턴스 행렬은 식 (19)와 같다<sup>[1]</sup>.

$$l_{11} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{d^2}{r_w^2}\right) H/m \quad (17)$$

$$l_{12} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{r_w}\right) H/m \quad (18)$$

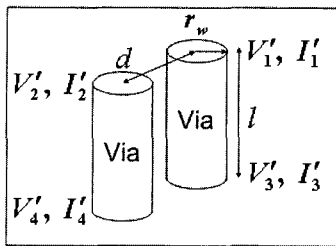


그림 9. 구간 2에서 각 종단에서의 전압과 전류  
Fig. 9. The voltage and current at each terminal in region 2.

4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로의 누화 해석

$$C = \mu\epsilon L^{-1} \quad (19)$$

이를 체인 행렬 형태로 변환한 식 (20)을 이용하여 비아 구간을 ABCD 행렬로 표현하면 식 (21)과 같다.

$$\begin{aligned} \Phi_{11} &= \Phi_{22} = \cos(\beta L) = \begin{bmatrix} a'_{11} & b'_{11} \\ c'_{11} & d'_{11} \end{bmatrix} \\ \Phi_{12} &= \frac{-j}{\mu\epsilon} \sin(\beta)L = \begin{bmatrix} a'_{12} & b'_{12} \\ c'_{12} & d'_{12} \end{bmatrix} \\ \Phi_{21} &= \frac{-j}{\mu\epsilon} \sin(\beta)C = \begin{bmatrix} a'_{21} & b'_{21} \\ c'_{21} & d'_{21} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} V'_1 \\ V'_2 \\ I'_1 \\ I'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} & b'_{11} & b'_{12} \\ a'_{21} & a'_{22} & b'_{21} & b'_{22} \\ c'_{11} & c'_{12} & d'_{11} & d'_{12} \\ c'_{21} & c'_{22} & d'_{21} & d'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_3 \\ V'_4 \\ I'_3 \\ I'_4 \end{bmatrix} \quad (21)$$

지금까지 구한 각 구간 종단에서의 전압과 전류의 관계식인 (15), (21), (16)을 직렬 연결한 후 경계 조건을 적용하면 최종적으로 4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로에 대한 누화량을 계산할 수 있다.

#### IV. 계산 및 시뮬레이션 결과

그림 10은 4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로의 시뮬레이션을 위한 HFSS 모델이다. 각 층 사이 유전체의  $\epsilon_r = 4.6$ , 전력/접지면과 결합 선로 사이의 거리  $T1=T3=0.4$  mm(그림 5 참조), 접지면과 전력면

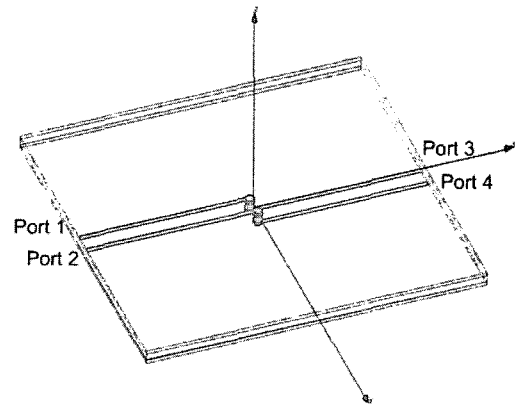


그림 10. 4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로의 HFSS 모델

Fig. 10. HFSS model of coupled lines conncted with vias in a 4-layer PCB.

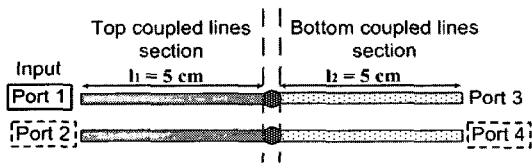
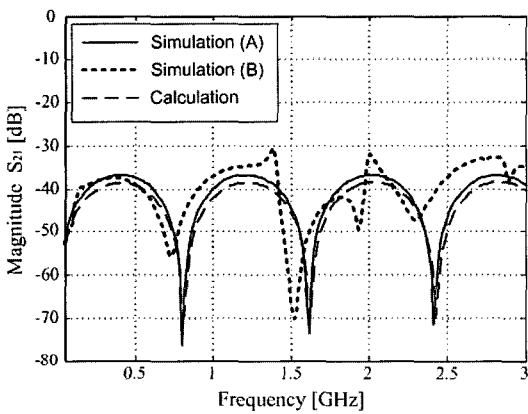


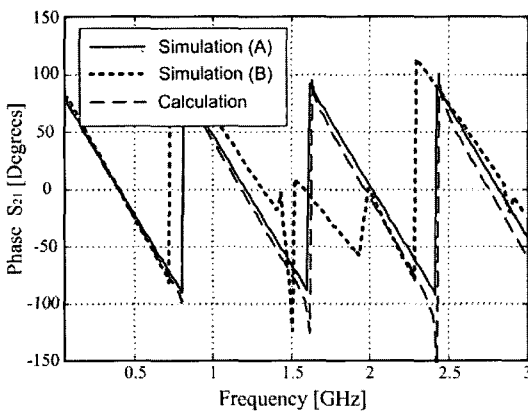
그림 11. 비아로 연결된 1층과 4층의 평행 결합 선로  
Fig. 11. Parallel coupled lines connected with vias in 1-layer and 4-layer.

사이의 거리  $T2=0.8$  mm, 그리고 결합 선로의 폭과 선로간의 간격은 각각 0.72 mm, 2.16 mm이다.

그림 11은 4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로



(a) Near-end에서의 누화( $S_{21}$ 의 크기)  
(a) Near-end crosstalk(Magnitude of  $S_{21}$ )



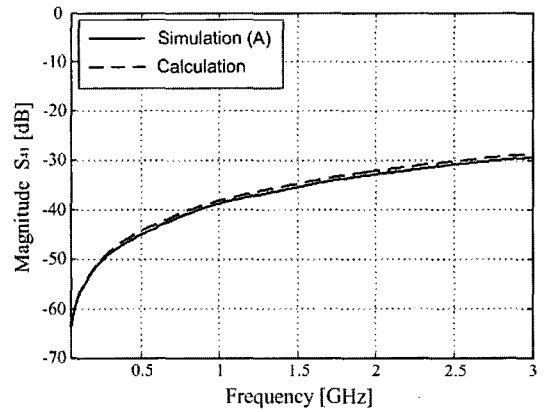
(b) Near-end에서의 누화( $S_{21}$ 의 위상)  
(b) Near-end crosstalk(Phase of  $S_{21}$ )

그림 12. 그림 11 구조에서의 near-end 누화 계산 및 시뮬레이션 비교

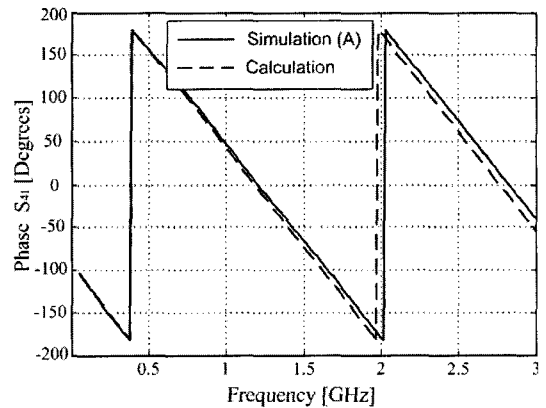
Fig. 12. Comparison of calculated and simulated near-end crosstalks for the structure in Fig. 11.

의 한 형태로서 평행 결합 선로가 비아를 기준으로 기판의 1층과 4층에 놓여져 있는 형태이며 그림 12와 13은 그림 11에 대한 near-end와 far-end에서 계산 및 시뮬레이션한 누화량의 크기와 위상을 비교한 것이다.

그림 12의 Simulation (A)는 전력/접지면 사이에서 공간이 발생하지 않게 흡수 경계 조건을 적용한 경우의 HFSS 시뮬레이션 결과이고, Simulation (B)는 실제 PCB와 같은 조건으로 HFSS 시뮬레이션하여 공간이 관측되게끔 한 결과이다. 본 논문에서 누화량 해석을 위해 사용된 회로 접근법은 무한대의 그라운



(a) Far-end에서의 누화( $S_{41}$ 의 크기)  
(a) Far-end crosstalk(Magnitude of  $S_{41}$ )



(b) Far-end에서의 누화( $S_{41}$ 의 위상)  
(b) Far-end crosstalk(Phase of  $S_{41}$ )

그림 13. 그림 11 구조에서의 far-end 누화 계산 및 시뮬레이션 비교

Fig. 13. Comparison of calculated and simulated far-end crosstalks for the structure in Fig. 11.

4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로의 누화 해석

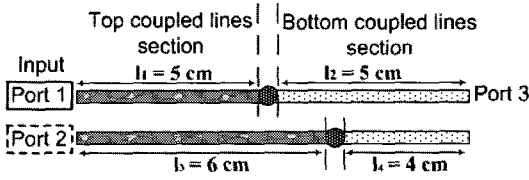
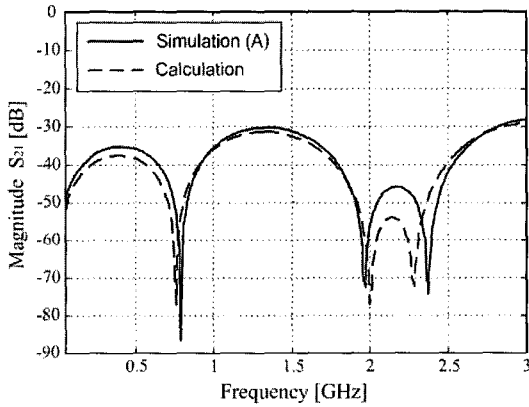


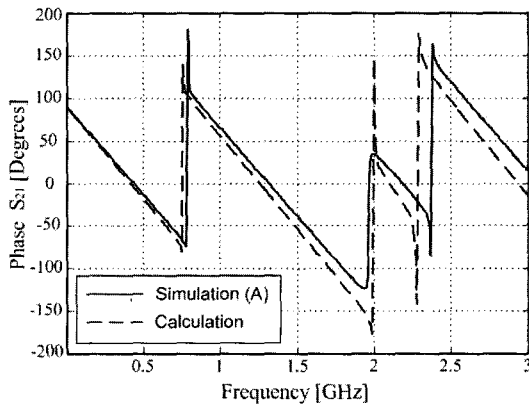
그림 14. 비아로 연결된 1층과 4층의 길이가 다른  
평행 결합 선로

Fig. 14. Different-length parallel coupled lines connected with vias in 1-layer and 4-layer.

드 크기를 가정하여 이론을 전개하고 있기 때문에  
향후 시뮬레이션과 계산의 비교에서는 Simulation



(a) Near-end에서의 누화( $S_{21}$ 의 크기)  
(a) Near-end crosstalk(Magnitude of  $S_{21}$ )



(b) Near-end에서의 누화( $S_{21}$ 의 위상)  
(b) Near-end crosstalk(Phase of  $S_{21}$ )

그림 15. 그림 14 구조에서의 near-end 누화 계산  
및 시뮬레이션 비교

Fig. 15. Comparison of calculated and simulated near-end crosstalks for the structure in Fig. 14.

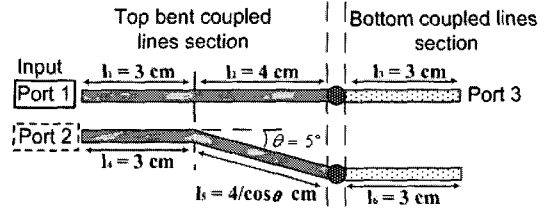


그림 16. 비평행 결합 선로의 예

Fig. 16. Example of nonparallel coupled lines.

(A)만을 도시하였다. 그림 12(a)의 시뮬레이션 (A)와  
시뮬레이션 (B)를 통해서 알 수 있듯이 실제 전력/접  
지면 사이에서 공진이 발생한 경우와 흡수 경계 조  
건을 적용하여 공진이 발생하지 않은 경우를 비교해  
볼 때 전반적인 누화 특성은 잘 일치하고 있음을 알  
수 있다. 또한 전력/접지면의 공진 주파수도 캐비티  
모드 해석을 통해 쉽게 예측할 수 있으나 이러한 부  
분은 본 논문의 핵심이 아니기에 별도로 다루지는  
않겠다.

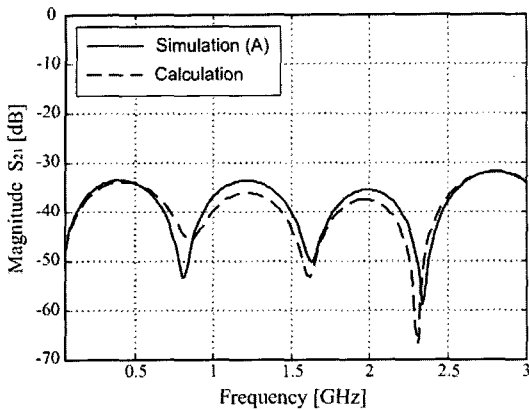
그림 14는 비아가 서로 다른 위치에 있어 선로의  
길이가 서로 다른 평행 결합 선로가 비아를 기준으  
로 기판의 1층과 4층에 놓여져 있는 형태이다. 그림  
15는 그림 14에 대한 near-end에서 계산 및 시뮬레이  
션한 누화량의 크기와 위상을 비교한 것이다.

그림 16은 구부러진 결합 선로가 기판의 1층에 놓  
여 있고 평행 결합 선로가 4층에 놓여 있는 형태이며  
그림 17은 그림 16에 대한 near-end에서 계산 및 시  
뮬레이션한 누화량의 크기와 위상을 비교한 것이다.

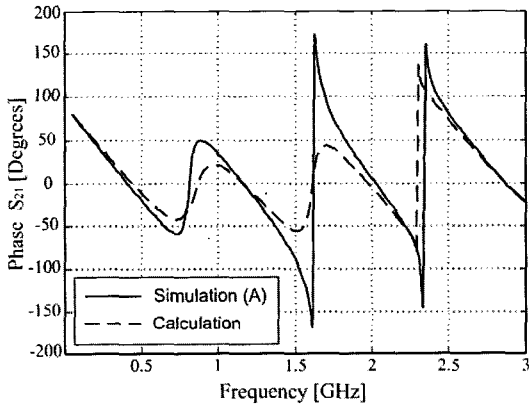
## V. 결 론

본 논문에서는 2층 기판에 국한되어왔던 회로 접  
근법의 적용 연구 범위를 다층 기판으로까지 확장하  
여 4층 기판에서 비아로 연결된 결합 선로의 누화를  
해석하는 방법을 제시하였다. 회로 접근법을 통해  
유도된 수식을 바탕으로 4층 기판에서 비아로 연결  
된 결합 선로의 누화 해석을 위한 Matlab 프로그램  
을 개발하였으며, HFSS 시뮬레이션 결과와 비교함  
으로써 논문에서 제시한 누화 해석 방법의 타당성을  
검증하였다.

본 논문에서 제시한 회로 접근법은 전력/접지면  
의 크기를 무한대로 가정하였지만, 실제 4층 기판에  
서는 전력/접지면의 크기가 유한하므로 전력/접지면



(a) Near-end에서의 누화( $S_{21}$ 의 크기)  
(a) Near-end crosstalk(Magnitude of  $S_{21}$ )



(b) Near-end에서의 누화( $S_{21}$ 의 위상)  
(b) Near-end crosstalk(Phase of  $S_{21}$ )

그림 17. 그림 16 구조에서의 near-end 누화 계산 및 시뮬레이션 비교

Fig. 17. Comparison of calculated and simulated near-end crosstalks for the structure in Fig. 16.

사이에서 공진이 발생하고, 비아의 위치에 따라서 발생하는 공진 모드 또한 달라지게 된다. 그 외에도 비아의 구조에 의해서도 누화량이 변화할 수 있다. 향후 이러한 전력/접지면 사이의 공진 현상 및 비아의 구조를 고려한 선로간의 전자기적 결합 현상이 연구되어야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] C. R. Paul, *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*, New York, Wiley-Intersciences, 1994.
- [2] Y. Kami, R. Sato, "Crosstalk of finite-length transmission lines in arbitrary directions on the same ground", *Proc. 1992 IEEE Intn. Symp. Electromagn. Compat.*, pp. 247-250, Aug. 1992.
- [3] Y. Kami, W. Liu, "Analysis of coupling between transmission lines in arbitrary directions", in *IEEE Intn. EMC Symp. Denver, Co*, pp. 952-957, 1998.
- [4] S. W. Park, D. C. Park, "Analysis of finite-length multiconductor transmission lines in arbitrary directions", *5th Asia-Pacific Engineering Research Forum on Microwaves and Electromagnetic Theory*, Fukuoka, Japan, pp. 139-144, Jul. 2004.
- [5] 김종호, 한재권, 박동철, "구부러진 전송선에서 비아 홀 펜스에 의한 누화 감소 해석", *한국전자과학회논문지*, 16(10), pp. 1036-1042, 2005년 10월.



한 재 권

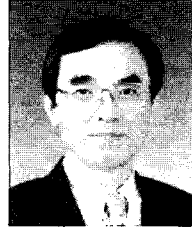


2005년 2월: 충남대학교 전기전자  
정보통신공학부 (공학사)

2005년 3월~현재: 충남대학교 전  
파공학과 석사과정

[주 관심분야] EMI/EMC, 전자장  
수치해석

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 전자공학  
과 (공학사)

1976년 2월: 한국과학기술원 전기  
전자공학과 (공학석사)

1984년 12월: Univ. of California,  
Santa Barbara (공학박사)

1977년~1978년: Ruhr University, Bo-  
chum, Germany 방문교수

1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairperson

1998년~2001년: IEEE EMC Korea Chapter Chairperson

2000년~2001년: 한국전자과학회 회장

1976년~현재: 충남대학교 전파공학과 교수

2005년 4월~현재: 대덕 Wireless 포럼 회장

[주 관심분야] Microwave and millimeterwave passive com-  
ponents, Antennas, EMI/EMC