

# Electromagnetic Topology (EMT) 기법을 이용한 Printed Circuit Boards (PCBs) 기관 해석

## Analysis of Printed Circuit Boards Based on Electromagnetic Topology

박윤미\*, 황세훈, 이정엽, 정현교

(Yoon-Mi Park, Se-Hoon Hwang, Jung-Yub Lee and Hyun-Hyo Jung)

**Abstract :** In this paper, electromagnetic topology (EMT) is used to analyze the lumped components on printed circuit boards (PCBs). It is difficult to obtain desirable results about the electromagnetic coupling problems by using a numerical or an experimental method on complex systems. The EMT can be considered as a helpful method to the analysis of electromagnetic interference / electromagnetic compatibility (EMI/EMC) problems in the complex system. To verify the validity of this method, three types of the PCBs mounting a simple circuit are fabricated and experimented.

**Keywords:** BLT equation, Electromagnetic interference / Electromagnetic compatibility (EMI/EMC), Electromagnetic Topology (EMT), Printed Circuit Boards (PCBs)

### I. 서론

최근, 기술의 발달로 전자 통신 시스템의 규모는 점점 커지고 복잡해지고 있다. 이러한 시스템에는 많은 커플링 현상이 존재하므로 그런 복잡한 전자장 환경에서 기존의 해석 방법으로 시스템의 응답을 해석하는 것은 어렵다[1]. Electromagnetic Topology (EMT) 는 규모가 큰 네트워크에서 EMI/EMC 현상을 해석하는 시뮬레이션 방법이다.

EMT의 과정은 다음과 같다. 먼저 대상 시스템을 하위 시스템들로 나누고 그 하위 시스템의 특성을 해석한 후 전체 시스템으로 다시 재구성 한다. 네트워크를 topology를 이용하여 해석할 때 전체 시스템은 상호 독립적인 하위 시스템들로 나누어 질 수 있고 각각의 하위 시스템들은 구조적인 결합에 의한 topological diagram으로 표현될 수 있다. 복잡한 EM환경에서 일어나는 커플링 현상들은 각 하위 시스템들과의 관계로 표현될 수 있다. 다시 말해서 전체 시스템의 응답은 각 하위 시스템들을 BLT (Baum, Liu, Tesche) equation 을 이용해서 재구성하여 결정된다. 그러므로 EMT는 크고 복잡한 시스템을 해석하는데 유용한 방법이다.

본 논문에서는 간단한 회로를 포함하고 있는 세 가지 종류의 Printed Circuit Boards (PCBs) 기관이 제작되고 실험되었다. EMT를 이용한 해석 결과는 산란 파라미터로 표현되었는데, 상용 시뮬레이션을 통해 얻은 결과와 실험을 통해 얻은 결과와 비교적 일치하는 것을 확인할 수 있었다[2].

### II. 해석 방법

크고 복잡한 시스템에서 EM 커플링 현상을 해석하기 위해서 BLT equation이 사용된다. BLT equation에서는 모델을 junction, tube, source로 구성한다. 대상 모델의 각 종 소자들

나 trace의 교차 지점들은 네트워크에서 junction으로 표현된다. 각 종 소자들은 trace를 통해 연결되는데 trace는 tube로 표현된다. 입력된 source는 BLT equation에서  $W_s$ 로 표현되어 source가 인가된 tube의 양 끝 단의 junction으로 입력된다.

전체 시스템의 커플링을 나타내어 주는 BLT equation은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [W(0)] &= ([I] - [S] \times [\Gamma])^{-1} \times [S] \times [W_s] \\ [W(L)] &= [\Gamma] \times [W(0)] + [W_s] \\ [W_{total}] &= [W(L)] + [W(0)] \end{aligned} \quad (1)$$

BLT equation은 전파 매트릭스  $[\Gamma]$ , 산란 매트릭스  $[S]$ , 입력 소스 매트릭스  $[W_s]$ , junction에서의 입사파 매트릭스  $[W(L)]$ , 그리고 junction에서의 반사파 매트릭스  $[W(0)]$ 로 구성된다. 그림 1 같이 네트워크 상의 모든 junction에서의 전파 현상들은 입사파 매트릭스인  $[W(L)]$ 과 반사파 매트릭스인  $[W(0)]$ 로 나타내어 진다.

각 junction에서의 특성을 나타내기 위해 각 junction으로 입사하는 파와 junction에서 반사하는 파와의 커플링 현상은 산란 매트릭스인  $[S]$ 로 표현된다. 전파 매트릭스인  $[\Gamma]$ 는 junction사이의 tube를 따라 전파하는 신호의 손실 정도를 나타내며 입력 소스 매트릭스인  $[W_s]$ 는 각 junction으로 인가되는 소스를 나타낸다. 입력되는 소스는 각 junction에 대해서 독립적이므로, 소스가 인가되는 tube의 양 끝 단의 junction으로만 인가되고 다른 junction에는 인가되지 않는다.

이러한 방식으로 BLT equation은 전체 네트워크 상에서의 모든 구성 요소들 사이의 연결관계와 커플링 현상들을 표현하는 것이 가능하다. 각 junction과 tube에서의 특성을 해석하고 BLT equation을 이용하여 재 구성하면 전체 시스템의 해석이 가능하다. 그러므로 topology를 이용한 해석 방법은 큰 규모의 시스템을 작은 부분의 해석을 이용해서 수행하므로 효과적인 해석방법이라 할 수 있겠다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

박윤미 : 서울대학교 공과대학원 전기컴퓨터공학부  
(iamyum00@snu.ac.kr)

표 1. 마이크로 스트립 라인 모델의 파라미터들

Table 1. Parameters of the microstrip line model.

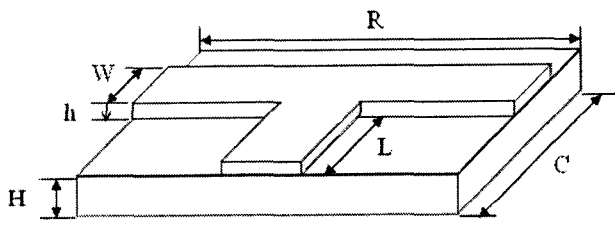
Parameters	Values	Parameters	Values
C	20 [mm]	L	9.275 [mm]
h	15 [ $\mu$ m]	R	60 [mm]
H	0.7874 [mm]	W	1.45 [mm]

III. 해석 모델

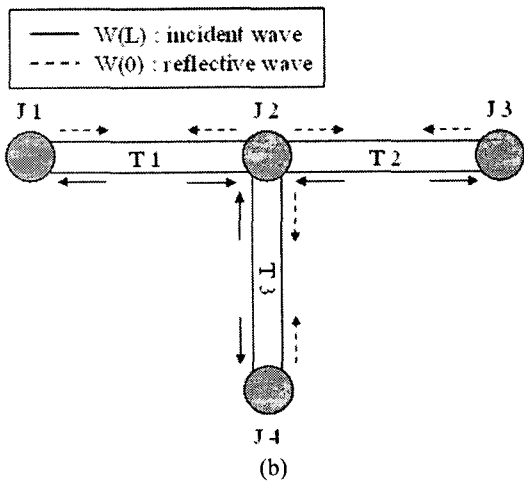
1. 소자를 포함하지 않은 마이크로 스트립 라인

이 논문에서는 마이크로 스트립 라인을 해석 모델로 선정했다. 마이크로 스트립 라인은 특성 임피던스가 50[ $\Omega$ ]이 되도록 설계되었고 설계된 파라미터들은 표 1에 나타내었다. 이번 논문에서는 3가지 타입의 마이크로 스트립 라인 모델이 해석되었다. 첫 번째로는 소자가 포함되지 않은 마이크로 스트립 라인 모델이고, 두 번째로는 50[ $\Omega$ ] 칩 저항을 포함하고 있는 마이크로 스트립 라인 모델이고 세 번째로는 1[nF] 칩 캐패시터가 포함된 마이크로 스트립 라인 모델이다.

EMT를 기초로 한 시뮬레이션에서 각 junction에서의 입사파와 반사파는 그림 1에 나타나 있다. 그림 1 (a)는 마이크로 스트립 라인 모델의 구조를 나타내고 있고 그림 1. (b)는



(a)



(b)

그림 1. (a) 마이크로 스트립 라인 모델의 구조 (b) 마이크로 스트립 라인 모델은 topological diagram으로 나타낸 모델

Fig. 1. (a) Geometry of a simple microstrip line model and (b) Topological network to represent the microstrip line model

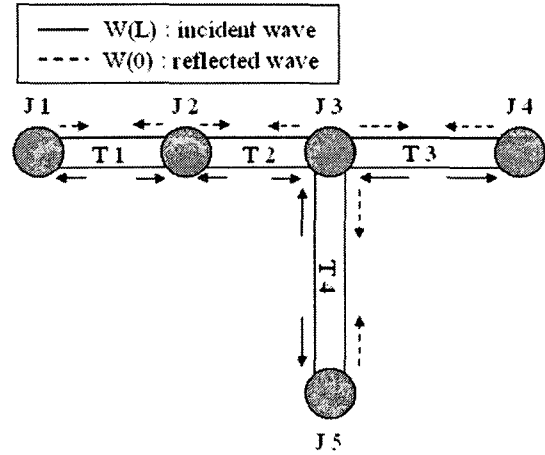


그림 2. 수동 소자를 포함하고 있는 마이크로 스트립 라인 모델의 topological diagram

Fig. 2. Topological network to represent the microstrip line model including passive component

해석 모델을 junction과 tube를 사용해서 나타낸 topological diagram을 나타내고 있다.

소자를 포함하지 않은 마이크로 스트립 라인 모델은 4개의 junction과 3개의 tube 그리고 1개의 source로 구성된다. Junction J1, J3, J4는 50[ $\Omega$ ] termination을 나타내며 junction J2는 두 trace의 교차지점을 나타낸다. 각 junction들을 연결하는 tube는 전송선로이다. Junction J1에 인가된 소스는 junction J1과 J2에 입력 소스를 공급하고 다른 junction에는 공급하지 않는다. 실제적으로, 50[ $\Omega$ ] termination은 완벽하기 이루어지지 않기 때문에 그로 인한 반사성분이 그림 1. (b)에서의 점선과 같이 나타나게 된다 [3].

2. 수동 소자를 포함한 마이크로 스트립 라인

이번 해석 모델은 50[ $\Omega$ ] 칩 저항과 1[nF] 칩 캐패시터를 포함하고 있는 마이크로 스트립 라인이다. 소자를 포함하지 않은 모델과 같은 크기의 마이크로 스트립 라인이 사용되었다. 두 번째 모델에서는 topological diagram의 tube T2의 중간에 50[ $\Omega$ ] 칩 저항이 삽입되었다. 세 번째 모델에서는 같은 위치에 1[nF]의 칩 캐패시터가 삽입되었다.

이러한 모델들은 그림 2에 나타내어진 것처럼 topological diagram에서 5개의 junction과 4개의 tube, 그리고 1개의 소스로 구성될 수 있다. Junction J1, J4, J5는 50[ $\Omega$ ] termination을 나타내며 junction J3은 T자 형태의 trace에서 교차지점을 나타내게 되며, junction J2는 이번 모델에서 새로 추가된 50[ $\Omega$ ] 칩 저항을 나타낸다. Tube T2에 수동 소자가 새로 추가됨으로써 junction J2에 새로운 입사와 반사 메커니즘이 생성되게 되었다. 입력 소스는 첫 번째 모델과 마찬가지로 junction J1에 인가되어 junction J1과 J2에 소스를 공급하게 된다.

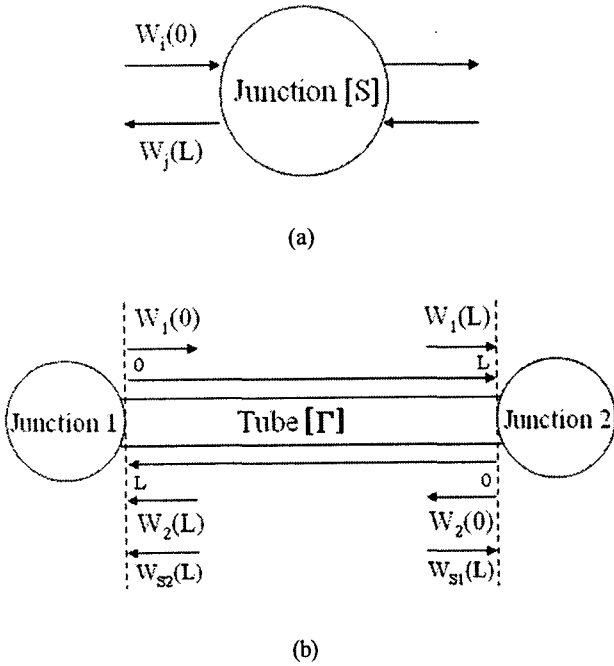


그림 3. (a) Two-port network의 구조로 나타낸 junction에서의 입사파와 반사파 (b) Two-port network의 구조로 나타낸 tube에서의 wave

Fig. 3. (a) Wave representation in terms of two-port network at the junction (b) Wave representation at the tube

#### IV. 해석 방법 및 결과

##### 1. 해석 방법

참고문헌 [4], [5]에서는 BLT equation을 EMT에서 최적 설계와 시뮬레이션 툴로 사용하고 있다. Topology를 이용해서 해석할 때 대상 시스템은 하위 시스템들로 나누어 지고 하위 시스템들은 각각 특성화된다. 그러므로 하위 시스템인 junction과 tube에서의 EM 커플링 현상에 대한 해석이 필요하다. 그림 3은 junction 에서의 산란 방정식과 tube에서의 전파 방정식을 나타내고 있다. 이러한 접근 방법에서는 산란 파라미터는 다음 식 (4)과 같이 표현할 수 있다.

$$W_i(0) = S_{ij} W_j(L) \tag{4}$$

$W_i(0)$ 는 junction에서 나가는 파이고  $W_j(L)$ 은 junction으로 들어오는 파를 나타낸다. 이러한 수식에서 산란 파라미터  $S_{ij}$ 는 junction으로 들어오는 파인  $W_j(L)$ 와 junction에서 나가는 파인  $W_i(0)$ 과의 비율을 나타낸다.

반면에 전파 방정식은 다음의 (5) 식과 같이 나타내어진다.

$$W_i(L) = \Gamma \times W_i(0) + W_{si} \tag{5}$$

(5) 식에서 junction  $i$ 로 들어오는 파  $W_i(L)$  는 전파 파라미터  $\Gamma$ 와 junction  $i$ 에서 나가는 파  $W_i(0)$ 와 입력 소스  $W_{si}$ 부분으로 표현할 수 있다. 마이크로 스트립 라인은 이상적인 경우가

아니므로 전파 파라미터는 주파수나 trace의 길이, 또는 trace의 구조에 따른 손실을 반영한다. 식 (5)에서의 입력 소스는 tube의 양 끝단과 연결된 각각의 junction에 영향을 주게 된다 [7].

이처럼 산란 파라미터와 전파 파라미터들은 전체 시스템의 구조에 따라 만들어진 산란 매트릭스와 전파 매트릭스를 구성하는 데에 쓰인다. 이러한 과정을 통해 EM 상호작용의 응답이 결정 되게 된다. 다시 말해서 EM의 현상의 응답은 전체 시스템을 하위 시스템으로 나누고 특성화시킨 후 재구성하는 과정을 통해 해석이 가능하게 된다.

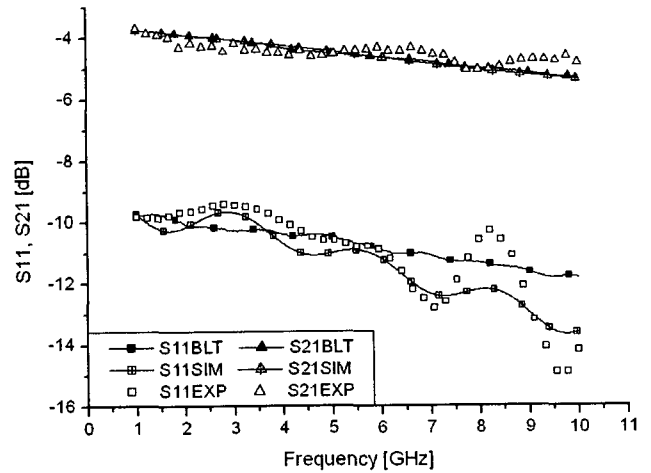


그림 4. BLT equation과 시뮬레이션과 실험을 통해 얻은 소자를 포함하지 않은 마이크로 스트립 라인 모델의 산란 파라미터

Fig. 4. Scattering parameters from the simple microstrip line model by BLT equation, the simulation and the experiment

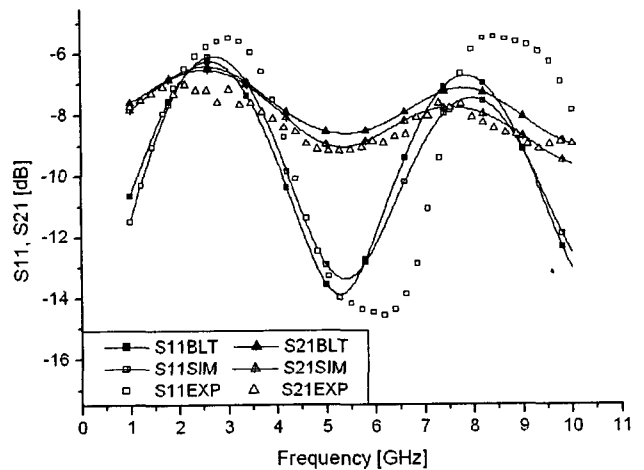


그림 5. BLT equation과 시뮬레이션과 실험을 통해 얻은 50[Ω] 칩 저항을 포함한 마이크로 스트립 라인 모델의 산란 파라미터

Fig. 5. Scattering parameters from the microstrip line model including 50[Ω] resistor by BLT equation, the simulation and the experiment

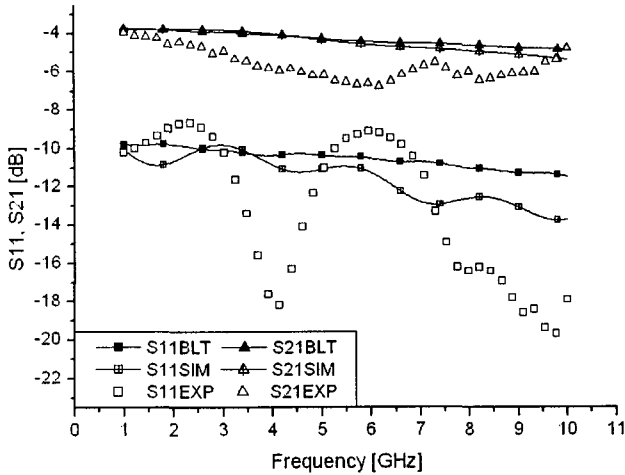


그림 5. BLT equation과 시뮬레이션과 실험을 통해 얻은 1[nF] 칩 캐패시터를 포함한 마이크로 스트립 라인 모델의 산란 파라미터

Fig. 5. Scattering parameters from the microstrip line model including 1[nF] capacitor by BLT equation, the simulation and the experiment

그러므로 이러한 과정을 통해 EMT는 복잡한 구조를 가진 시스템에 유용한 방법임을 알 수 있다.

2. 해석 결과

그림 4는 소자를 포함하지 않은 마이크로 스트립 라인의 산란 파라미터를 주파수에 따라 나타낸 것이다. BLT equation, 상용 시뮬레이션 툴과 실험을 통해 1[GHz]에서 10[GHz]의 주파수 범위 내에서 산란 파라미터를 결과 값으로 얻을 수 있었다. 주파수의 변화에 따른 해석 결과와 실험 결과는 거의 유사함을 확인할 수 있다.

그림 5와 6은 50[Ω] 칩 저항과 1[nF] 칩 캐패시터를 포함한 마이크로 스트립 라인의 산란 파라미터를 나타낸 것이다. 마찬가지로 해석 결과와 실험 결과가 유사함을 확인할 수 있다.

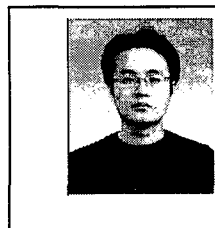
V. 결론

본 논문에서는 크고 복잡한 시스템의 EM 현상을 EMT를 이용하여 해석하였고 BLT equation을 이용하여 산란 파라미터를 추출하였다. 소자를 포함하지 않은 마이크로 스트립 라인 모델과 50[Ω] 칩 저항과, 1[nF] 칩 캐패시터를 포함한 모델에 대해 해석하였다. EMT를 이용한 해석 결과는 상용 시뮬레이션 툴을 이용한 해석결과와 실험결과와 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 지금까지는 선형시스템에 EMT를 적용시켰으나 앞으로는 비선형 시스템에 대해서도 연구할 것이다.

참고문헌

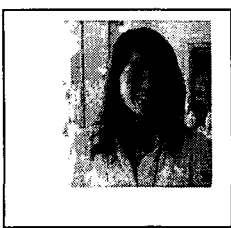
- [1] Zhou Dong-fang, Lin Jing-yu, Ren Jing-pu, Zhang De-wei, Yu Dao-jei, Niu Ahong-xia, "The Application of Electromagnetic Topology in the Analysis of HPM Effects On System," Antennas, Propagation and EM Theory, 2003. Proceedings. 2003 6th International Symposium on. 28 Oct. - 1 Nov. 2003, pp. 630-633.
- [2] Phumin Kirawanich, Rahul Gunda, Nakka Kranthi, and Naz Islam, "ELECTROMAGNETIC TOPOLOGY ANALYSIS: SMALL APERTURES AND LIGHTNING INTERACTIONS," Antennas, and Propagation Society International Symposium, 2004. IEEE, vol. 4. 20-25 June 2004, pp. 3859-3862.
- [3] Phumin Kirawanich, George Tzeremes, Christos Christodoulou, S. Joe Yakura, and N. E. Islam, "Electromagnetic Wave Penetrating Through Apertures: Comparison of Electromagnetic Topology Technique With FDTD Method," IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, vol. 4, 2005, pp. 151-154.
- [4] J. P. Parmantier and P. Degauque, "Topology Based Modelling of Very Large Systems," Modern Radio Sci., pp 151-177 1996.
- [5] F. M. Tesche, M. V. Ianoz, and T. Karlsson, EMC Analysis Methods and Computational Models. New York: Wiley, 1997.
- [6] Heiko Haase, Torsten Steinmetz, and Nitsch Fellow, "New Propagation Models for Electromagnetic Waves Along Uniform and Nonuniform Cables," IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, vol. 46, no. 3, pp 345-351, 2004.
- [7] J. P. Parmantier, EM Topology and Cable networks, 2005.
- [8] Phillippe Besnier and Pierre Degauque, "Electromagnetic Topology: Investigations of Nonuniform Transmission Line Networks," IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, vol. 37, No 2, May 1995, pp. 227-232.

황 세 훈

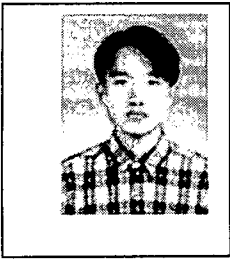


2005년 고려대학교 공과대학 전기 전자전파공학부 졸업.  
2005년~현재 서울대학교 공과대학 원 석사과정 재학중.

박 윤 미



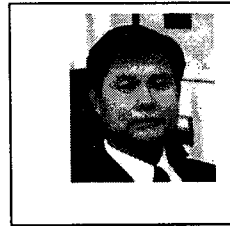
2004년 충남대학교 공과대학 정보통신공학부 졸업.  
2004년~현재 서울대학교 공과대학 원 석사과정 재학중. 관심분야는 EMI/EMC 수치해석



이 정 엽

2000년 서울대학교 전기공학부 졸업.

2000년~현재 서울대학교공과대학원 전기컴퓨터공학부 박사과정 재학중.



1979년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업.

1981년 서울대학교 공과대학원 전기공학과 석사 졸업

1984년 서울대학교 공과대학원 전기공학과 박사 졸업

1994년~현재 서울대학교 공과대학 전기컴퓨터공학부 교수 (정교수)