

## EMT 접근방법을 이용한 전자장과 전송선로의 커플링 영향에 대한 해석

김민혁\*, 박윤미\*, 정용식\*\*, 천창율\*\*\*, 정현교\*  
 서울대\*, 광운대\*\*, 서울시립대\*\*\*

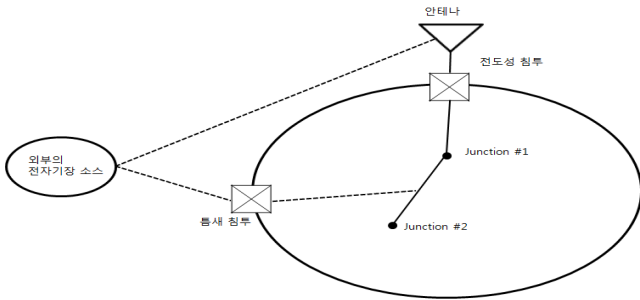
### Coupling effect between electric field and transmission line using Electro Magnetic Topology

Min-Hyuk Kim\*, Yoon-Mi Park\*, Young-seek Chung\*\*, Changyul Cheon\*\*\*, Hyun-Kyo Jung\*  
 Seoul National University\*, Kwangwoon University\*\*, University of Seoul\*\*

**Abstract** - 본 논문은 Electro Magnetic Topology(EMT)를 이용하여 전자장과 전송선로의 커플링 영향에 대해 해석한다. 본 논문은 BLT 방정식을 이용하여 외부 소스에 의해 영향을 받는 전송 선로의 해를 주파수 영역에서 구하였다. 위의 해석 방법을 양단에 저항 부하가 있는 2선 전송 선로에 적용하여, 외부에서 평면파 소스가 인가되었을 때의 각 전송 선로 종단에서의 전류의 파형을 Mode Matching(MoM), Finite Difference Time Domain(FDTD) 결과와 비교함으로써 정확성을 확인하였다.

### 1. 서 론

전자파 관련 기술의 발전에 따라 고출력전파나 초광대역 신호의 사용이 빈번해지면서 이러한 신호가 현재 디지털 환경에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지고 있다. 이와 같은 영향으로 점점 고집적화·소형화되어가는 전자기기들의 오동작을 일으키는 불요전자파문제도 커지고 있으며 최근에는 의도적인 전자파 공격문제가 큰 관심을 끌고 있다. 전자파의 침투경로에는 [그림 1]에서 볼 수 있듯이 도선을 통한 경로와 전자장 소스가 직접 전송선로에 커플링 현상을 통해 영향을 주는 경로가 있다. 본 논문에서는 전자장 소스의 전송선로에의 커플링 현상에 대해 해석을 하였다. 전자파 해석방법에는 유한요소법, 시간차분법등이 사용되었지만, 이는 대용량의 컴퓨터 메모리와 긴 해석시간을 필요로 하며 복잡한 시스템의 해석이 어려운 단점을 가지고 있기에 본 논문에서는 topology 접근 방법을 이용하여 위와 같은 문제점을 보완한 효율적인 전자파해석을 하였다. 해석의 정확성을 확인하기 위하여 양단에 저항 부하가 있는 2선 전송 선로에 평면파 소스를 가했을 때의 결과를 moment method, FDTD 결과와 비교하였다.

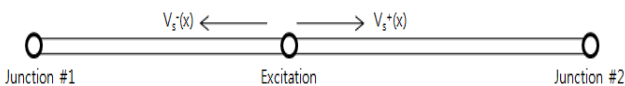


〈그림 1〉 외부 EM source의 침투 경로

### 2. 본 론

#### 2.1 BLT 방정식

실제 존재하는 대부분의 시스템은 크고 복잡하다. 기존의 해석방법은 긴 시간과 큰 메모리를 사용하는 단점 외에도 해석자체가 힘든 경우가 있어 이를 해석 가능한 형태로 변형시키는 방법이 제안되었는데 이러한 방법을 topology라 한다. Topology는 전체 시스템을 junction과 tube로 표현하는데 junction은 시스템내의 독립된 한 해석영역을 나타내며 시스템의 구조에 따라 tube로 연결된다. 이러한 방법으로 전체 시스템을 topology 네트워크로 표현하고, 이 네트워크에 존재하는 wave관계식을 이용하여 각 junction에 유기되는 전압이나 전류의 값을 알아낼 수 있는 식이 BLT 방정식이다.



#### 〈그림 2〉 x = x\_s에서 소스가 만드는 입사파와 반사파

BLT 방정식에서 각 junction에서의 wave는 입사파와 반사파로 표현되며 정의는 다음과 같다.

$$V^+(0) \equiv V_1^+ = V_1^{ref} ; V^-(0) \equiv V_1^- = V_1^{inc} \quad (\text{Junction 1}) \quad (1a)$$

$$V^+(L) \equiv V_2^+ = V_2^{inc} ; V^-(L) \equiv V_2^- = V_2^{ref} \quad (\text{Junction 2}) \quad (1b)$$

[그림 2]와 같이 x = x\_s에서 인가된 전압 혹은 전류소스가 만들어 내는 입사파와 반사파는 다음과 같이 표현된다<sup>[1]</sup>.

$$V_s^+(x) = \frac{1}{2}(V_s + Z_c I_s) e^{-\gamma(x-x_s)} ; V_s^-(x) = 0 \quad (\text{for } x > x_s) \quad (2a)$$

$$V_s^-(x) = -\frac{1}{2}(V_s - Z_c I_s) e^{+\gamma(x-x_s)} ; V_s^+(x) = 0 \quad (\text{for } x < x_s) \quad (2b)$$

따라서 junction #2에서 입사파들에 의해 유기되는 전압은 다음과 같이 표현된다.

$$V_2^+ = V_1^+ e^{-\gamma L} + \frac{1}{2}(V_s + Z_c I_s) e^{-\gamma(L-x_s)} \quad (3)$$

위와 같은 방법으로 junction #1, #2에서의 입사파와 반사파에 의해 유기되는 전압을 구하여 행렬 형태로 만들면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_1^{inc} \\ V_2^{inc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & e^{-\gamma L} \\ e^{-\gamma L} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1^{ref} \\ V_2^{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(V_s - Z_c I_s) e^{-\gamma x_s} \\ \frac{1}{2}(V_s + Z_c I_s) e^{-\gamma(L-x_s)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} V_1^{ref} \\ V_2^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & e^{\gamma L} \\ e^{\gamma L} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1^{inc} \\ V_2^{inc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(V_s + Z_c I_s) e^{\gamma x_s} \\ \frac{1}{2}(V_s - Z_c I_s) e^{-\gamma(L-x_s)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

전송선로에서 입사파와 반사파는 다음과 같은 관계로 표현되며

$$V^{ref} = \rho V^{inc} \quad (6)$$

$\rho$ 는 전압반사계수이다.

식(6)을 이용하여 입사파와 반사파의 관계를 나타내는 행렬을 만든 후 식(5)에 대입하여  $V^{inc}$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_1^{inc} \\ V_2^{inc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\rho_1 & e^{\gamma L} \\ e^{\gamma L} & -\rho_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(V_s + Z_c I_s) e^{\gamma x_s} \\ -\frac{1}{2}(V_s - Z_c I_s) e^{\gamma(L-x_s)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

한 junction에서의 전압은  $V^{inc}$ 와  $V^{ref}$ 의 합으로 구할 수 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1^{inc} \\ V_2^{inc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1^{ref} \\ V_2^{ref} \end{bmatrix} \quad (8)$$

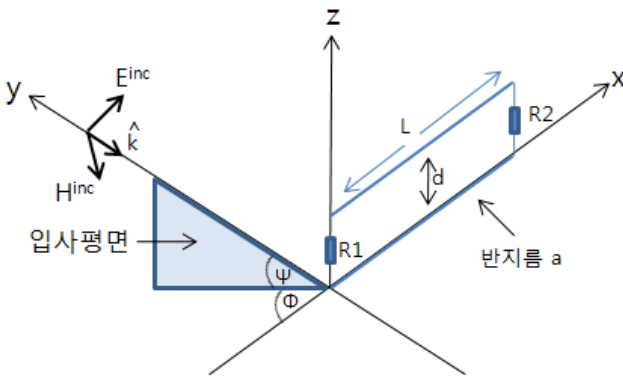
$$= \begin{bmatrix} 1+\rho_1 & 0 \\ 0 & 1+\rho_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1^{inc} \\ V_2^{inc} \end{bmatrix}$$

식(8)에 식(7)을 대입하여 정리하면 전압 BLT 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+\rho_1 & 0 \\ 0 & 1+\rho_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\rho_1 e^{\gamma L} \\ e^{\gamma L} - \rho_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

식(9)를 이용하여 전송선에서 전류와 전압의 관계에 따라 전압 BLT 방정식과 유사하게 전류 BLT방정식을 얻을 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} 1-\rho_1 & 0 \\ 0 & 1-\rho_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\rho_1 e^{\gamma L} \\ e^{\gamma L} - \rho_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$



〈그림 3〉 입사 평면파로부터 여자 되는 2선 전송선로

BLT방정식에서 전송선에 인가되는 소스는 다음과 같이 표현되며,

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \int_0^L e^{\gamma x_s} V_{s2}(x_s) dx_s - \frac{V_1}{2} + \frac{V_2}{2} e^{\gamma L} \\ -\frac{1}{2} \int_0^L e^{\gamma(L-x_s)} V_{s2}(x_s) dx_s + \frac{V_1}{2} e^{\gamma L} - \frac{V_2}{2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

[그림 3]에서의와 같은 평면파로부터 전송선로에 인가되는 소스는

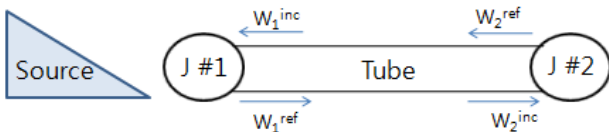
$$V_{s2}(x) = E_0 (\cos\alpha \sin\psi \cos\phi + \sin\alpha \sin\phi) jk ds \sin\psi e^{-jkx \cos\psi \cos\phi} \quad (12)$$

$$V_1 = -E_0 d \cos\psi \cos\alpha, \quad V_2 = V_1 e^{-jkL \cos\psi \cos\phi} \quad (13)$$

식 (12), (13)을 식 (11)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \left( \frac{E_0 (\cos\alpha \sin\psi \cos\phi + \sin\alpha \sin\phi) jk ds \sin\psi}{\gamma - jk \cos\psi \cos\phi} \right) \\ -E_0 d \cos\psi \cos\alpha (1 - e^{-(\gamma - jk \cos\psi \cos\phi)L}) \\ -\frac{1}{2} e^{\gamma L} \left( \frac{E_0 (\cos\alpha \sin\psi \cos\phi + \sin\alpha \sin\phi) jk ds \sin\psi}{\gamma + jk \cos\psi \cos\phi} \right) \\ + E_0 d \cos\psi \cos\alpha (1 - e^{-(\gamma + jk \cos\psi \cos\phi)L}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

## 2.2 적용 및 검증



〈그림 4〉 Topology 접근 방법을 이용한 대상 모델링

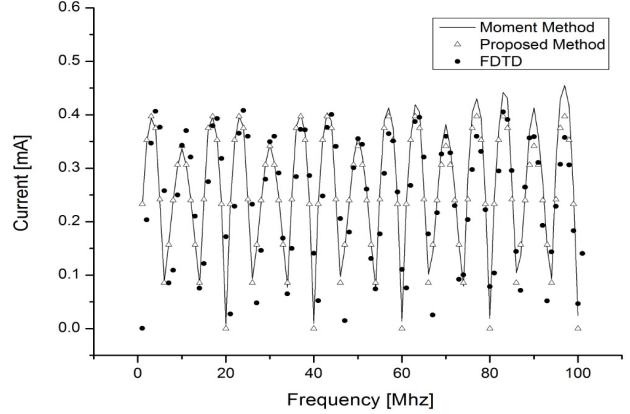
본 논문에서 검증하고자 하는 BLT 방정식을 대상 모델에 적용하기 위해 우선 [그림 4]와 같이 Topology 방법을 이용하여 해석 대상을 모델

링한 후 해를 얻었다.

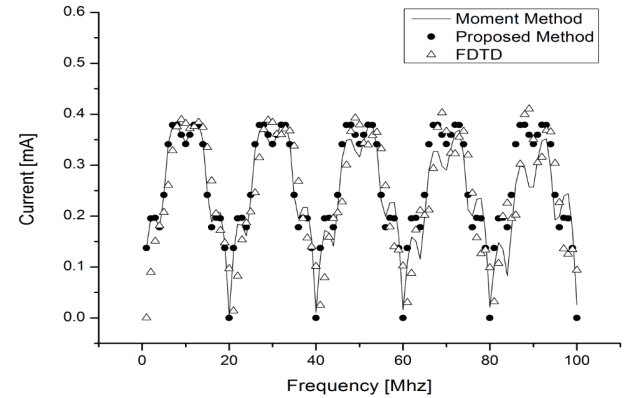
BLT 방정식해의 유효성을 검증하기 위하여 [그림 3]과 같은 2선 전송 선로를 moment method, FDTD로 해석하였다.

모델에서 사용한 평면파는  $\Phi=0^\circ$ ,  $\psi=60^\circ$ 에서 입사되며 전계  $E=E_0 e^{-jkR}$  로 도선에 인가된다.

도선의 특성임피던스는  $586\Omega$ , 반지름은  $a = 1.5\text{mm}$ , 길이는  $L = 40\text{m}$ , 두 선 사이의 간격이  $d = 20\text{cm}$ 이다. 종단에서의 부하의 저항 값은  $R1=R2=293\Omega$ 을 사용하였다.



〈그림 5〉 평면입사파에 의해 Junction #1에 흐르는 전류



〈그림 6〉 평면입사파에 의해 Junction #2에 흐르는 전류

본 논문을 검증하기 위하여 moment method를 사용하는 4NEC2 프로그램을 이용해 모델을 해석하였다. 전류의 크기와 패턴이 BLT와 FDTD, MoM이 거의 같은 결과를 나타냄을 알 수 있다. 다만 100MHz를 넘어가면서 약간의 오차가 발생하는데 이는 해석 시 BLT는 전송선로의 특성 임피던스와 로드의 저항 값을 고정시켰으나 MoM은 주파수의 영향에 따라 두 가지 요소를 변화하여 해석하였기 때문이다.

## 3. 결 론

기술 발전에 따라 고출력파워를 필요로 하는 분야의 확대와 의도적 인 전자파공격으로 인해 EMC/EMI에 대한 관심이 대두되고 있으며 이러한 문제를 해석하고 해결할 수 있는 방법에 대한 많은 연구가 이뤄지고 있다. 이에 따라, 본 논문은 전자파에 의한 영향을 해석할 수 있는 여러 가지 수치해석방법 중 해석시간이 빠르고 메모리가 적게 드는 topology 접근방법을 기초로 하여 전송선로에 외부에서 평면파가 입사되었을 때의 커플링 영향에 대해 주파수 영역에서의 BLT방법을 이용하여 해석하였다. 이를 moment method, FDTD 해석방법에서 외부에서 평면파를 입력하였을 때 2선 전송 선로의 양단에 있는 저항에 걸린 전류를 비교함으로써 그 정확성을 확인하였다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Tesche, F.M., "EMC Analysis Methods and Computational Models", John Wiley and Sons,1, pp 338-344, 1997
- [2] F.M.Tesche, C. M. Butler, "On the addition of EM field propagation and coupling effects in the BLT equation", IN 588, pp 12~15, 2004