BLT 방정식과 수치해석 기법을 이용한 전송 선로의 커플링 효과 분석

논 문
61-1-17

Analysis of Coupling Effects in Transmission Lines Using the BLT Equation and Numerical Methods

두 진 경* · 안 재 운** · 황 선 묵*** · 육 종 관†
(Jin-Kyoung Du · Jae-Woon Ahn · Sun-Mook Hwang · Jong-Gwan Yook)

Abstract - The electromagnetic topology and the BLT equation has been used as useful techniques to analyze coupling effects of huge devices. But in the case of systems including complex parts, applying the BLT equation can be difficult to manifest the complex parts with analytic solutions. To resolve this problem, a numerical method can be used to parts of the whole system in advance. In this paper, a microstrip line filter is analyzed using the BLT equation combined with numerical solutions. Consequently, achieved graphs from the BLT equation show good agreements with graphs obtained using a numerical method only.

Key Words : BLT equation, Coupling effects, Electromagnetic topology, Numerical analysis

1. 서 론

IT 기술이 발달함에 따라 전자 기기의 속도는 점차 빨라지고 기능은 더욱 복잡해지고 있으나, 이러한 고성능의 전자기기일수록 외부로부터 침투해 들어온 신호에 의해 치명적인 영향을 받을 수 있다. 외부로부터의 커플링 현상은 전자기기 내부의 서로 다른 시스템 사이에서도 발생할 수 있으며, 주변의 전자 기기로부터 방사되는 전자기파에 의해서도 발생한다. 이러한 커플링은 본래 신호의 흐름을 방해하거나 정보를 왜곡함으로써 시스템이 제대로 동작할 수 없도록 하는데, 특히 이러한 현상을 무기에 적용한 고출력 전자파 무기는 주변의 수많은 전자 기기를 순식간에 무력화시킬 수 있기 때문에 최근에는 전자파 무기에 의해 주요 시설에 발생하는 커플링 효과를 분석하는 연구가 많이 진행되고 있다[1-2]. 이로부터, 송배전선로 등 외부로 노출되어 있는 사회 간접 자본 시설은 그 영향에 더욱 취약함을 알 수 있다.

커플링 효과의 분석에는 유한요소법(Finite Element Method: FEM) 또는 유한차분시간영역법(Finite-Difference Time-Domain: FDTD)과 같은 수치해석 기법이 많이 사용되고 있으나 비행기나 자동차, 군함 같이 파장에 비해 거대한 크기를 가지는 물체를 해석하기에는 시간과 메모리 등의 자원이 대량으로 요구되는 단점이 있다. 이에 대한 해결책으로서 전자기 위상기하학(Electromagnetic Topology: EMT)과 Baum-Liu-Tesche(BLT) 방정식[3-4]을 이용한 연구가 수행되어 왔는데, 이는 커다란 시스템을 여러 개의 하위 구조로 나누어 각 단위 구조 사이에 발생하는 커플링을 분석한 후에 이들을 다시 하나로 통합하여 해석하는 방법이다. 수치해석 기법으로 전체 시스템을 해석하는 경우와 비교했을 때, 구조물 형태의 세밀함을 해석에 반영하는 정도는 감소하지만 해석에 필요한 시간과 메모리 자원의 양을 줄일 수 있으므로 비행체와 같이 전체 구조물의 형태를 간략화하여 해석해도 무방한 경우에는 BLT 방정식을 효과적으로 사용할 수 있다. BLT 방정식을 사용하여 파장에 비해 거대한 물체에 대한 커플링 효과를 분석한 연구가 해외 연구 기관[5-7]뿐만 아니라 최근에는 국내에서도 다양하게 수행[8-10]되고 있으며, 거대 구조 이외에 소단위 규모의 전송선로 해석에도 BLT 방정식을 유용하게 적용한 연구 결과[11-12]가 보고되었다.

이와 같이 BLT 방정식을 사용하여 해석할 때에는 단위 구조 사이의 커플링을 수식적으로 표현해야 하는데, 각각의 형태에 따라 포클링턴(Pocklington) 방정식 또는 그린(Green) 함수 등이 관계식으로서 사용된다[10]. 그러나 실제 커플링 효과의 분석이 요구되는 비행기나 미사일, 자동차 등의 내부는 단순한 구조가 아닌 여러 복잡한 구조들로 이루어져 있으므로 BLT 방정식을 이용한 분석을 보다 실용적으로 수행하기 위해서는 복잡한 내부 구조에도 적용 가능하도록 개선하여야 하며, 이에 대한 방안으로 부분 구조에 대한 수치해석 결과를 기존의 BLT 방정식에 적용하여 전체 시스템을 분석하는 방법이 제안되었다[13]. 본 논문에서는 이러한 분석 방법을 간단한 마이크로스트립 라인(microstrip line) 형태의 필터(filter)에 적용해봄으로써 수식의 활용성을 검증하고자 한다. 이러한 방법이 제안된 이유는 미사일이나 비행기와 같은 거대 구조의 커플링 효과를 분석하기 위함이므로 마이크로스트립 라인처럼 단순한 전송 선로 구조보다는 원형 도파관과 같은 실제 비행체에 가까운 예제가 필요

* 정 회 원 : 연세대 공대 전기전자공학과 박사과정
** 비 회 원 : (주)한화 전문위원
*** 정 회 원 : (주)한화
† 교신저자, 정회원 : 연세대 공대 전기전자공학과 교수
E-mail : jgyook@yonsei.ac.kr
접수일자 : 2011년 11월 4일
최종완료 : 2011년 12월 23일

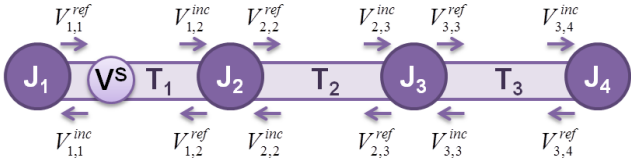

그림 1 BLT 방정식 구성을 위한 신호 흐름도

Fig. 1 A signal flow graph for generating the BLT equation

할 것이나, 본 논문에서는 복잡하고 큰 구조물에 대한 적용 가능성을 검증하는 사전 단계로서 비교적 간단한 전송 선로 구조를 선택하였으며, 향후에는 적용 범위를 확장하여 원형 도파관과 같이 실제 비행체와 유사한 형태에 대한 커플링 효과를 분석할 것이다. 다음의 본론에서는 BLT 방정식에 수치해석 결과를 적용하는 방법을 보다 상세히 다룬 후에, 마이크로스트립 라인 형태의 필터에 적용하여 분석한 결과에 대해 설명하였다.

2. 수치해석 기법이 적용된 BLT 방정식의 구성

본 장에서는 부분 구조에 대해 수치해석 기법을 사용해 얻은 S-파라미터를 BLT 방정식에 적용하는 방법에 대하여 수식적으로 설명한다. BLT 방정식을 사용하기 위해서는 해석하고자 하는 전체 시스템을 작은 단위의 하위 구조로 나누고, 이를 하나의 튜브(tube)로 정의한다. 그리고 각 튜브의 양단에는 정션(junction)이 존재하여 서로 다른 튜브를 연결한다. 이러한 여러 개의 튜브들, 즉 하위 구조들 중 수식적으로 표현하기 어려운 구조에 대해서 수치해석 기법으로 분석하고 그 결과 값을 S-파라미터의 형태로 얻는다면 BLT 방정식의 해당 튜브에 대한 관계식으로 대체하여 사용할 수 있다.

2.1 기존의 BLT 방정식

앞서 간략히 언급한 바와 같이 BLT 방정식은 전체 구조를 여러 개의 튜브와 정션을 이용하여 표현한다. 그림 1은 3개의 튜브와 4개의 정션으로 구성된 시스템의 신호 흐름도(signal flow)를 나타낸 것이다. 여기에서 $V_{A,B}$는 튜브 T_A와 정션 J_B에 존재하는 전압 신호를 의미하며, V^{inc}는 튜브로부터 정션으로 입사하는 전압 신호를, V^{ref}는 정션으로부터 튜브로 들어가는 전압 신호를 각각 나타낸다. 그리고 V^S는 외부로부터 유입된 전자기 신호에 의하여 커플링 된 전압 소스를 의미하며, 그림 1의 경우에는 이러한 외부 소스가 튜브 T_1로 유입되어 정션 J_1과 J_2에 전달된다.

시스템의 신호 흐름도를 구성한 후에는 각 튜브와 정션의 전압 신호 관계식을 이용하여 전파 행렬(propagation matrix) P와 산란 행렬(scattering matrix) S를 각각 구성하며[3-4], 이를 이용하여 얻은 (1)과 (2)를 조합한 (3)이 바로 BLT 방정식이다. [3]의 BLT 방정식에서 전파 행렬로 사용한 Γ와 본 논문의 P는 $\Gamma = P^{-1}$의 관계식이 성립한다. 각각의 전압 벡터 V와 V^{inc}, V^{ref}, V^S 그리고 행렬 P와 S는 분석하고자 하는 주파수에 대하여 각기 다른 값을 가지므로 여러 주파수에 대한 값을 하나로 묶어 표현하는 슈퍼 벡터와 슈퍼 행렬을 사용하는데, 이를 기호 [ ]와 { }로 각각 표현한다.

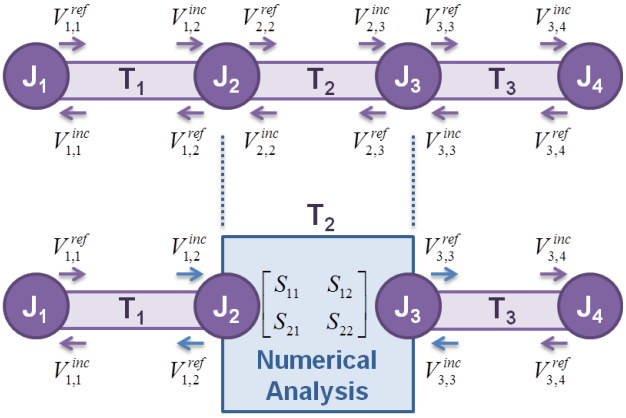

그림 2 튜브 T_2에 수치해석 기법을 적용하는 경우

Fig. 2 Analysis of tube T_2 using a numerical method

$$[V^{inc}] = (\{U\} - \{P\}\cdot\{S\})^{-1}\cdot[V^S] \tag{1}$$

$$[V^{ref}] = \{S\}\cdot(\{U\} - \{P\}\cdot\{S\})^{-1}\cdot[V^S] \tag{2}$$

$$\begin{aligned}[V] &= [V^{inc}] + [V^{ref}] \\ &= (\{U\} + \{S\})\cdot(\{U\} - \{P\}\cdot\{S\})^{-1}\cdot[V^S]\end{aligned} \tag{3}$$

2.2 수치해석으로 얻은 결과 적용 방법

2.1절에서 보인 바와 같이 BLT 방정식을 구성하기 위해서는 전압 신호 사이의 관계를 모두 수식으로 표현하여야 하는데, 단위 구조의 형태가 복잡하다면 이러한 수식 표현이 어려워진다. 따라서 이에 대한 해결 방법으로, 부분 구조에 대해 수치해석 기법을 사용하고 이로부터 얻은 S-파라미터를 BLT 방정식에 적용하는 방법이 제안되었다[13].

그림 2는 그림 1의 시스템에 대하여 튜브 T_2만을 수치해석 기법으로 해석하는 경우이며, V^S는 생략하여 표현하였다. 이 때 튜브 T_2가 튜브 T_1과 T_3에 연결되는 부분, 즉 정션 J_2와 J_3이 각각 연속적인 구조라고 가정한다면 아래의 (4)가 성립한다. 이와 같은 가정 하에 정션 J_2와 J_3을 각각 port 1, port 2로 설정하고 수치해석 기법으로 얻은 S-파라미터를 S_{11}과 S_{12}, S_{21}, S_{22}라고 한다면 (5)와 (6)을 얻는다. 그리고 이러한 관계식을 행렬 P와 S에 적용하면 결과적으로 (7)과 (8)을 얻는다.

$$\begin{aligned}V_{1,2}^{ref} &= V_{2,2}^{inc}, \\ V_{2,2}^{ref} &= V_{1,2}^{inc}, \\ V_{2,3}^{ref} &= V_{3,3}^{inc}, \\ V_{3,3}^{ref} &= V_{2,3}^{inc}\end{aligned} \tag{4}$$

$$
\begin{aligned}
V_{2,2}^{inc} &= V_{1,2}^{ref} \\
&= S_{11} \cdot V_{1,2}^{inc} + S_{12} \cdot V_{3,3}^{inc} \\
&= S_{11} \cdot V_{2,2}^{ref} + S_{12} \cdot V_{2,3}^{ref}
\end{aligned} \tag{5}
$$

$$
\begin{aligned}
V_{2,3}^{inc} &= V_{3,3}^{ref} \\
&= S_{22} \cdot V_{3,3}^{inc} + S_{21} \cdot V_{1,2}^{inc} \\
&= S_{22} \cdot V_{2,3}^{ref} + S_{21} \cdot V_{2,2}^{ref}
\end{aligned} \tag{6}
$$

$$
P = \begin{bmatrix}
0 & e^{-\gamma L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
e^{-\gamma L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 \\
0 & 0 & S_{21} & S_{22} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\gamma L_3} \\
0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\gamma L_3} & 0
\end{bmatrix} \tag{7}
$$

$$
S = \begin{bmatrix}
\rho^{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho^{4}
\end{bmatrix} \tag{8}
$$

이처럼 부분적으로 수치해석 기법을 사용하여 얻은 결과값을 BLT 방정식에 적용할 수 있으며, 다음 절에서는 간단한 마이크로스트립 라인 필터에 대해 이를 적용해봄으로써 수식을 검증하였다.

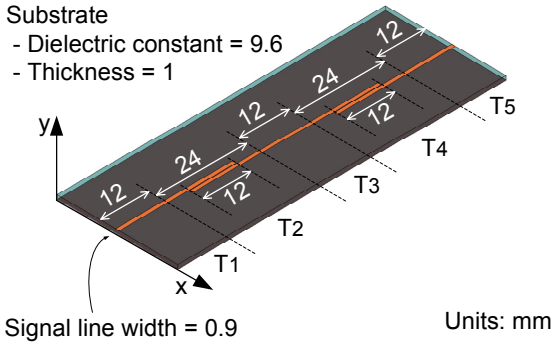

그림 3 마이크로스트립 라인 필터의 전체 구조
Fig. 3 The entire structure of a microstrip line filter

3. BLT 방정식을 이용한 마이크로스트립 라인 필터 해석

3.1 해석 구조 설명

BLT 방정식을 사용하여 해석하려는 마이크로스트립 라인 필터를 그림 3에 나타내었다. 총 3개의 신호선 중간에 두 번의 필터링이 발생하도록 설계하였다. 기판의 두께는 1 mm이고 비유전율은 9.6이며, 모든 신호선의 너비는 0.89 mm로 동일하다. 또한, 필터링이 발생하는 부분에서 두 신호

$$
P = \begin{bmatrix}
0 & e^{-\gamma L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
e^{-\gamma L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & S_{11}^2 & S_{12}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & S_{21}^2 & S_{22}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\gamma L_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\gamma L_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{11}^4 & S_{12}^4 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{21}^4 & S_{22}^4 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\gamma L_5} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\gamma L_5} & 0
\end{bmatrix} \tag{9}
$$

$$
S = \begin{bmatrix}
\rho^{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho^{6}
\end{bmatrix} \tag{10}
$$

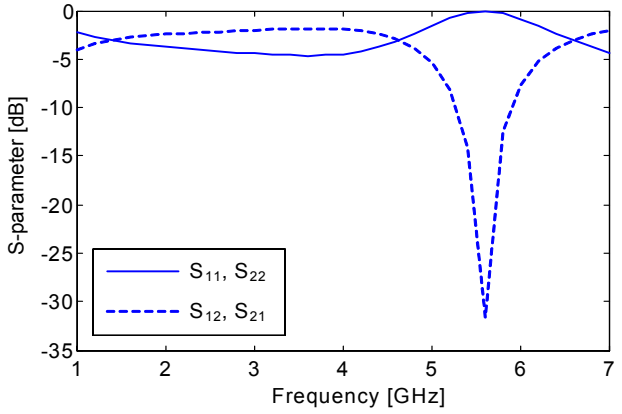

그림 4 튜브 T_2와 T_4에 대한 FEM 해석으로 얻은 S-파라미터

Fig. 4 S-parameters of tube T_2 and T_4 obtained from FEM analysis

선 사이의 간격은 0.1 mm이며, 이 부분의 길이는 12 mm이다. BLT 방정식으로 해석하기 위해 전체 구조를 5개의 하위 구조로 나누었으며, 이로 인해 5개의 튜브와 6개의 정션이 생성된다. 5개의 튜브 중 튜브 T_2와 T_4가 필터링이 발생하는 구조에 해당하며, 나머지 튜브 T_1, T_3, 그리고 T_5는 직선 구조의 전송 선로이다. 이 중에 튜브 T_2와 T_4에 대해서만 먼저 수치해석 기법 중 하나인 FEM으로 해석 하고, 이로써 얻어진 S-파라미터를 BLT 방정식에 적용한다. FEM 해석으로 얻은 S-파라미터를 그림 4에 그래프로 나타내었으며, 주파수 5.6 GHz를 중심으로 가장 많은 신호가 필터링 됨을 알 수 있다. 이 때 튜브 T_2와 T_4는 서로 동일한 구조이므로 FEM 해석으로 분석한 결과 역시 동일하다.

3.2 BLT 방정식의 구성

FEM 해석으로 얻은 S-파라미터 값을 BLT 방정식의 행렬 P와 S에 대입하면 (9)와 (10)이 된다. 총 튜브의 개수가 5개 이므로 행렬 P와 S의 크기는 10×10이 되며, 수식에서 사용된 L_1, L_3, 그리고 L_5는 모두 12 mm로 동일하다. 전체 시스템의 양단을 50 옴으로 매칭 했을 때, ρ^1과 ρ^6은 1의 값을 가진다. 이와 같이 구성한 행렬을 (3)에 대입함으로써 전압 신호 V를 계산할 수 있다.

3.3 결과 그래프의 비교

마이크로스트립 라인 필터에 대하여 BLT 방정식을 이용한 결과와 FEM 해석 방법만을 사용하여 얻은 결과를 그림 5에 그래프로 비교하였다. 주파수 5.6 GHz에서 필터링이 발생하는 단위 구조를 직렬로 연결하였으므로, 그림 4와 비교하였을 때 동일한 5.6 GHz 주파수 부근에서의 필터링 현상은 더욱 커졌으며, 전체 길이가 커짐에 따라 추가적인 공진 특성이 발생하였다. 수치해석 기법을 적용한 BLT 방정식으로 계산한 결과 그래프는 FEM 해석 방법으로 얻은 결과와 비교했을 때 매우 일치한다.

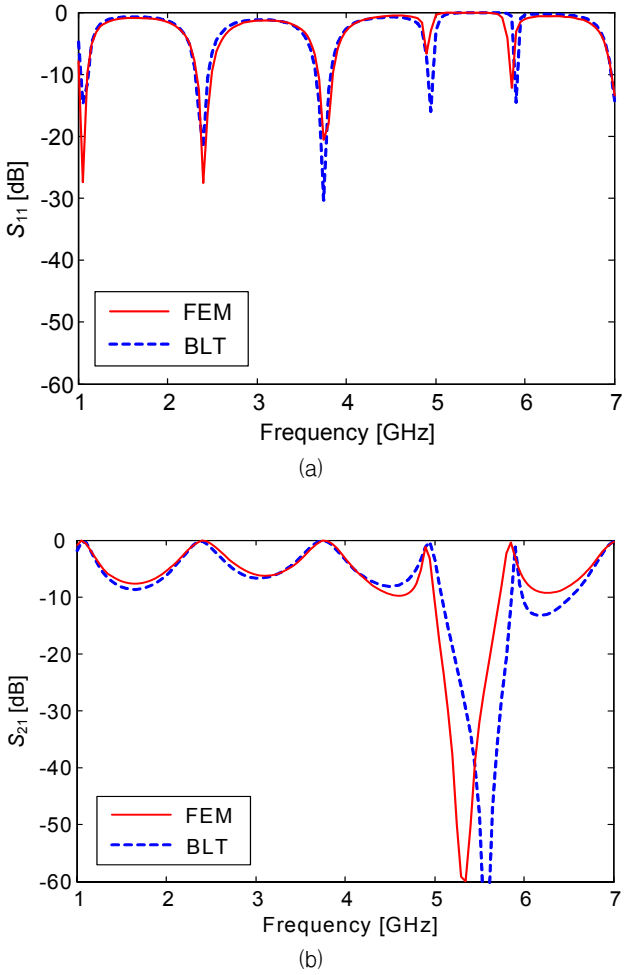

그림 5 BLT 방정식과 FEM 해석 결과 비교

Fig. 5 Comparison of results from the BLT equation and FEM analysis

4. 결 론

본 논문에서는 전체 중 일부에만 수치해석 기법으로 계산한 결과를 BLT 방정식에 적용하는 방법에 대하여 수식적으로 설명하였으며, 이를 마이크로스트립 라인 필터에 적용하였다. 이로써 얻은 결과와 수치해석 계산 결과를 비교하였을 때, 매우 유사함을 확인하였다. 이는 BLT 방정식을 사용하여 해석 가능한 구조물의 범위를 좀 더 복잡한 형태의 구조물까지 확대하였다는 점에서 의미 있는 결과라 할 수 있다. 본 논문에서는 마이크로스트립 라인 형태의 전송 선로 구조를 바탕으로 수식을 검증하였으며, 향후에는 원형 도파관과 같이 실제 비행체와 유사한 형태의 시스템에 대한 커플링 효과를 분석할 것이다.

감사의 글

본 논문은 (주)한화 지원에 의한 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

[1] M. Backstrom and J. Loren, "Microwave coupling into a generic object. Properties of measured angular receiving pattern and its significance for testing", IEEE Int. Zurich Symposium on EMC, vol. 2, pp. 1227-1232, 2001.

[2] I. Junqua, L. Guibert, and J. -P. Parmantier, "Assessment of high-frequency coupling in a generic object by the power balance method", IEEE Int. Zurich Symposium on EMC Zurich, pp. 397-400, 2007.

[3] F. M. Tesche and C. M. Butler, "On the addition of EM field propagation and coupling effects in the BLT equation," Interaction Note, no. 588, December 2003.

[4] F. M. Tesche, J. Keen and C. M. Butler, "Example of the use of the BLT equation for EM field propagation and coupling calculations," Interaction Note, no. 591, August 2004.

[5] F. M. Tesche, "Development and use of the BLT equation in the time domain as applied to a coaxial cable," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 49, no. 1, pp. 3-11, February 2007.

[6] Ying Li, Gunyan Ni, Jianshu Luo, Gaosheng Li and Zipeng Zhao, "The terminal responses of the two-wire line in cavities with multi-apertures based on topological decomposition and method of moments," IEEE Int. Symposium on Antennas Propagation and EM Theory (ISAPE), pp. 888-891, 2010.

[7] Ying Li, Jianshu Luo, Guyan Ni and Jiyuan Shi, "Electromagnetic topology analysis to coupling wires enclosed in cavities with apertures," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2010, article ID 209591, pp. 1-11, 2010.

[8] 강원준, 이비오, 문상곤, 김준호, 정용식, "BLT 방정식을 이용하여 사각 aperture 사이를 통과한 고출력 전자파가 공진기 내부에 미치는 영향에 관한 연구," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1539-1540, 2010년 7월.

[9] 강원준, 문상곤, 김준호, 천창율, 정용식, "BLT 방정식을 이용한 고출력 전자파가 고주파 회로에 미치는 영향에 관한 연구," 한국통신학회논문지, 제35권, 10호, pp. 1520-1525, 2010년 10월.

[10] 이윤주, "BLT 방정식을 이용한 고출력 전자파 펄스의 효과도 연구," 광운대학교 석사학위논문, 2007년 8월.

[11] 박윤미, 황세훈, 이정엽, 정현교, "Electromagnetic Topology(EMT) 기법을 이용한 Printed Circuit Boards(PCBs) 기판 해석," 2006년도 한국정보통신설비학회 하계학술대회 논문집, pp. 170-174, 2006년 8월.

[12] 황세훈, 박윤미, 정현교, "BLT 방정식을 이용한 RF 검파 회로 해석," 전기학회논문지, 제56권, 9호, pp. 1643-1647, 2007년 9월.

[13] 두진경, 현세영, 안재운, 황선묵, 육종관, "수치해석 기법과 BLT 방정식을 이용한 커플링 효과 분석," 한국전자파학회 종합학술발표회, vol. 21, no. 1, 2011년 11월.

저 자 소 개

두 진 경

2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사), 2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사), 2007년 2월 ~ 2010년 3월: 삼성전자 DMC 연구소, 2010년 3월 ~ 현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

안 재 운

1949년: 6월 27일 생
1974년: 서강대학교 물리학과 (학사)
1984년: 한남대학교 물리학과 (석사)
1989년: 충남대학교 물리학과 (박사)
1976년 ~ 2010년: 국방과학연구소
2010년 ~ 현재: (주)한화 전문위원

황 선 묵

1976년: 5월 2일 생
2003년: 원광대학교 전기공학과 (학사)
2005년: 인하대학교 전기공학과 (석사)
2010년: 인하대학교 전기공학과 (박사)
2010년 ~ 현재: (주)한화

육 종 관

1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사), 1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사), 1996년 12월: 미국 University of Michigan 전기전자공학과 (공학박사), 1997년 1월 ~ 1998년 9월: 미국 University of Michigan Research Fellow, 1998년 10월 ~ 1999년 2월: 미국 Qualcomm Inc. Senior Engineer, 1999년 3월 ~ 2000년 2월: 광주과학기술원 조교수, 2000년 3월 ~ 2003년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 조교수, 2003년 3월 ~ 2008년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 부교수, 2008년 9월 ~ 현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수

[주 관심분야] 수치해석, 바이오센서, 마이크로파구조 해석 및 설계, RF MEMS, 박막공진구조, EMC 등