

Laguerre 다항식을 이용한 전송 선로의 시간 영역 BLT 방정식 해석

Solution of Transmission Lines Using Laguerre Polynomials in Time Domain BLT Equations

이윤주 · 정용식 · 소준호* · 신진우* · 천창을** · 이병제

Younju Lee · Young-Seek Chung · Joonho So* · Jinwo Shin* · Changyul Cheon** · Byungje Lee

요 약

본 논문은 Laguerre 다항식을 이용하여 BLT 방정식을 시간 영역에서 해석하는 방법을 제안한다. 본 논문은 Laguerre 다항식의 재귀적 성질과 미분 및 적분 등의 특성을 이용하여 시간 영역에서의 전송 선로의 BLT 방정식 해를 구하였다. 위의 해석 방법을 저항과 커패시터가 부하로 있는 2선 전송 선로에 적용하여, 외부에서 평면파 펄스가 인가되었을 때의 각 전송 선로 종단에서의 전압의 파형을 주파수 영역의 BLT 결과를 IFFT한 값과 비교함으로써 정확성을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose the method to solve the BLT equations using Laguerre polynomials in time domain. The solution of BLT equations is obtained by recursive, differential and integral properties of Laguerre polynomials. The verification of the proposed method is tested by applying it to the two-wired transmission line with resistors and capacitors, which is illuminated by the electromagnetic plane wave pulse. And the result is compared with the corresponding transient responses obtained from inverse fast Fourier transform(IFFT) of the frequency domain solutions of BLT equations.

Key words : Time Domain, Laguerre Polynomial, BLT Equation

I. 서 론

우리 주위의 많은 부분들을 전자 기기 시스템이 차지하고 있고, 그 역할이 갈수록 중요해지고 있다. 또한, 이 전자 기기 시스템들이 갈수록 고집적화·소형화됨에 따라 전자 기기 시스템의 오작동을 유발시키는 전파 간섭(EMI: Electromagnetic Interference)의 문제 역시 심각해지고 있다. 최근에는 고출력 전자파를 이용한 의도적인 전자파 공격 문제가 큰 관

심을 끌고 있다. 따라서 주요 전자 기기들의 정상적인 동작을 위하여 외부에서 인가된 전자파로 인해 발생될 수 있는 손상을 미리 예측하고, 그 피해를 줄이는 노력이 필요하다.

특히, 시간 영역에서의 전자파 해석이 더 중요시되고 있는데, 이는 고출력의 전자파에 의한 전자 폭탄이 펄스 형태의 전자파를 방출하고 있고, 주요 전자 기기에 트랜지스터와 같은 비선형 소자들이 사용되기 때문이다. 시간 영역 전자파 해석법에는 시간

광운대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Kwangwoon University)

*국방과학연구소 기술본부2팀(TRC 2nd Division, Agency for Defense Development)

**서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부(School of Electronic and Computer Engineering, University of Seoul)

· 논문 번호 : 20070418-046

· 수정완료일자 : 2007년 9월 3일

영역 적분 방정식, 시간 영역 유한 차분법 등이 사용되었지만, 이는 긴 해석 시간과 대용량의 컴퓨터를 요하며, 복잡한 실제 시스템의 전자파 해석은 어려운 단점을 갖고 있다. 따라서 본 논문에서는 BLT 방정식을 이용하여 위와 같은 문제점을 보완하고, 효율적인 시간 영역 전자파 해석법을 제안한다.

BLT 방정식은 1970년대 Baum과 미국 공군연구소에 의해 고안된 방법으로, 대상 모델의 general scattering matrix 해석을 통하여 시스템 내부로 침투된 전자파의 양을 계산하기 위하여 제안된 방법이다^[1]. Carl. Baum 등은 위의 방법을 이용하여 항공기와 자동차의 intended EMI(IEMI)에 의한 특성 해석을 실시하여 그 정확도와 효율성을 밝혔다. 하지만 이 해석 방법은 주파수 영역 상에서 이루어진 것으로, 광대역 해석의 어려움과 순간 방전을 통한 전자파 펄스를 해석하는데 있어 어려움을 갖고 있다. 따라서 이를 해결하기 위해 시간 영역에서의 BLT 방정식이 필요로 하게 되었고, Baum은 참고문헌 [2]에서 시간 영역 상에서 BLT 방정식의 해를 구하는 방법을 제안하였다. "BLT3 방정식"이라고 불리는 이 방정식은 시간 영역을 두 개로 분리하여 해석을 한다. 그 중 하나인 빠른 시간대(early-time)에서는 기존의 BLT 방정식을 급수(series) 형태로 만들어 해석을 실시하고, 늦은 시간대(late-time)에서는 singularity expansion method(SEM)을 이용하여 해를 구하였다. 최근에도 시간 영역 상의 BLT 방정식을 해결하고자 하는 노력을 계속되고 있다^[3]. 하지만, 이 해결 방법 또한 circuit solver를 필요로 하는 번거로움을 갖고 있다.

이 논문에서 제안하는 방법은 Laguerre 다항식을 시간 기저 함수(temporal basis function)로 사용하여 BLT 방정식을 시간 영역에서 해석하였다. 기존의 MOT 방법을 이용한 시간 영역 해석 방법은 시간이 지남에 따라 안정성이 결여되나, Laguerre 다항식을 이용하면 시간이 지나도 안정됨을 보이는 특성을 갖고 있다^[4]. Laguerre 다항식을 이용한 해석 방법은 시간대에 따라 다른 방법을 이용하여 해석할 필요가 없으며, circuit solver와 같은 추가적 요소도 필요로 하지 않는다. 제안된 해석 방법의 정확성을 확인하기 위하여 저항과 커패시터가 달린 2선 전송 선로에 전압과 펄스가 가해졌을 때의 결과를 주파수 영역에

서의 BLT 방정식의 결과 값을 FFT한 결과와 비교하였다.

II. BLT 방정식 풀이

2-1 BLT 방정식

실제 존재하는 시스템들은 대부분이 크고 복잡하기 때문에 이를 좀 더 해석 가능한 형태로 변형하기 위한 모델링 과정이 필요한데, 이때 사용되는 것이 topology이다. Topology는 전체 시스템을 junction과 tube로 표현하게 된다. Junction은 시스템에 존재하는 공간이나 표면들을 표현하며, 이 junction들은 시스템의 구조에 따라 tube로 연결된다. 이를 이용하여 전체 해석하고자 하는 시스템을 topology 네트워크로 표현하게 되고, 이 네트워크에 존재하는 wave들의 관계식을 이용하여 네트워크 전체를 하나의 행렬 형태로 표현하여 각 junction에 존재하는 전압 또는 전류의 값을 알아낼 수 있는 것이 BLT 방정식이다^[1].

BLT 방정식을 유도하기에 앞서 두 가지 wave에 대한 정의를 하도록 하겠다. 한 junction에 대하여 tube상에서는 wave의 방향에 따라 2가지의 wave가 존재한다.

그림 1에서 보는 바와 같이 junction으로 입사되는 wave를 $W_i(0)$ 으로, junction에서 반사되는 wave를 $W_r(L)$ 로 정의할 수 있으며, 이 두 wave의 합과 차가 각각 j 번째 junction에서의 전압 또는 전류가 된다.

2-1-1 Propagation 공식

Propagation 공식은 tube 끝에 존재하는 wave들 즉, $W_i(0)$ 와 $W_r(L)$ 사이의 관계를 표현하는 식으로, "propagation" 행렬 Γ_{ij} 를 이용하여 식 (1)과 같은 수식을 얻을 수 있다.

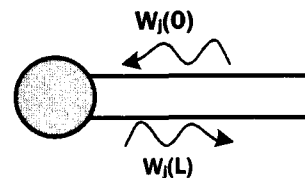


그림 1. Wave 정의
Fig. 1. Wave definition.

$$W_j(0) = \Gamma_{ij} W_j(L) + W_{S_i}, \quad (1)$$

여기에서 W_{S_i} 는 tube상에 전원, 즉, tube에 존재하는 전압원이나 전류원뿐만 아니라 외부에서 가해진 전자파에 의해 커플링 되는 것을 표현한 것이다.

2-1-2 Scattering 공식

Scattering 공식은 각 junction의 scattering 특성을 표현한다. 이는 전달 함수(transfer function)라고 할 수 있는 "scattering" 행렬, S_j 를 이용하여 $W_j(0)$ 와 $W_j(L)$ 사이의 관계를 나타내며, 이는 junction의 물리적 특성과 관계가 있다. 이에 따라 junction의 scattering 관계는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$W_j(L) = S_j W_j(0) \quad (2)$$

2-1-3 일반적인 BLT 공식

앞에서 구한 propagation 공식과 scattering 공식을 전체 네트워크에 관하여 정의하면 전체 네트워크의 BLT 방정식은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\{[1] - [S][\Gamma]\} [W(0)] = [S] [W_s] \quad (3)$$

여기에서 $[1]$ 은 단위행렬을 의미하고, $[W(0)]$ 와 $[W_s]$ 는 wave를 나타내는 벡터이며, $[S]$ 와 $[\Gamma]$ 는 시스템의 특성을 나타내는 행렬들이다. 식 (3)은 BLT1 방정식이라고 정의되었으며, "일반화된 BLT 방정식"이라고 부른다.

다음절에서는 Laguerre 다항식을 이용한 시간 영역 BLT 방정식의 유도 과정을 설명한다.

2-2 Laguerre 다항식에 의한 시간 영역 기저함수

Laguerre 다항식은 다음과 같이 정의된다.

$$L_i(t) = \frac{e^{-t}}{i!} \frac{d^i}{dt^i} (t^i e^{-t}), \text{ for } i \geq 0, t \geq 0 \quad (4)$$

여기서 i 는 정수를 의미한다. 또한, Laguerre 다항식은 다음과 같은 재귀적 특성을 갖고 있다.

$$L_0(t) = 1,$$

$$L_1(t) = 1 - t,$$

$$iL_i(t) = (2i - 1 - t)L_{i-1}(t)$$

$$-(i-1)L_{i-2}(t),$$

$$\text{for } i \geq 2, t \geq 0 \quad (5)$$

직교 특성을 갖는 Laguerre 방정식은 가중 함수 (weighting function) e^{-t} 와 함께 다음과 같은 특성을 갖는다^[5].

$$\int_0^\infty e^{-t} L_i(t) L_j(t) dt = \delta_{ij} \quad (6)$$

여기에서 δ_{ij} 는 Kronecker delta이다. 식 (6)으로부터 직교 특성을 갖는 기저 함수(basis function) 집합 $\{\phi_0, \phi_1, \phi_2, \dots\}$ 을 얻을 수 있으며, ϕ_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_i(s, t) = e^{-\frac{s \cdot t}{2}} L_i(s \cdot t) \equiv \phi_i(\bar{t}) \quad (7)$$

여기에서 s 는 time scale factor이고, \bar{t} 는 scaled time이다. 이러한 time scale factor는 Laguerre 함수의 범위와 실제 시스템의 동작 시간의 범위가 다르기 때문에 이를 조정하기 위하여 도입된 계수이다.

임의의 미분 가능하고 연속인 함수 $f(t)$ 는 식 (8)과 같이 기저 함수 $\phi_i(\bar{t})$ 로 전개할 수 있다.

$$f(t) = \sum_{i=0}^{\infty} f_i \phi_i(\bar{t}) \quad (8)$$

또한, BLT 방정식 내에 존재하는 변수의 미적분 함수를 처리하기 위해서는 기저함수를 이용한 함수의 미적분관계식을 유도하여야 한다. 이때, 이 함수의 미분과 적분관계식은 식 (9), (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{f}(t) = s \sum_{i=0}^{\infty} (0.5f_i + \sum_{k=0}^{i-1} f_k) \phi_i(\bar{t}) \quad (9)$$

$$\int_0^t f(\tau) d\tau = \frac{2}{s} \sum_{i=0}^{\infty} (f_i + 2 \sum_{k=0}^{i-1} (-1)^{k+i} f_k) \phi_i(\bar{t}) \quad (10)$$

2-3 R-C 회로의 시간 영역 BLT 방정식

그림 2는 길이가 L 이고, 커패시터와 저항 부하를 갖는 무손실 전송 선로이다. 위의 모델을 topology로 표현하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

그림 3에서 각 junction으로 입사되는 wave를 V^{inc} 로, 반사되는 wave를 V^{ref} 로 정의하였다. 또한, tube상의 임의의 위치 x_s 에 존재하는 전원으로부

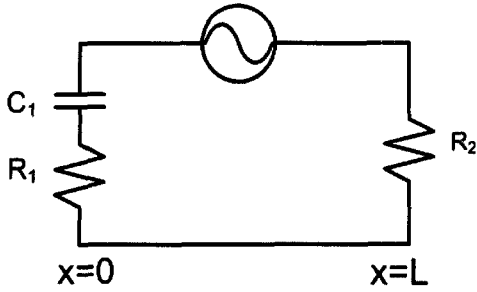


그림 2. R-C 부하를 갖는 전송 선로
Fig. 2. Transmission line with R-C loads.

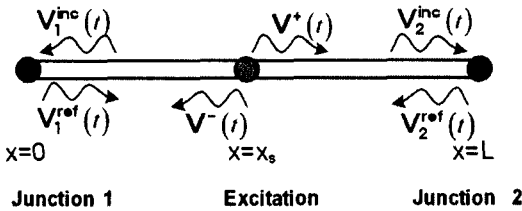


그림 3. R-C를 갖는 전송 선로의 topology
Fig. 3. Topology of transmission line with R-C loads.

터 양쪽 방향으로 진행하는 wave를 각각 V^- , V^+ 로 표현하였다.

Junction 1과 2로 입사되는 각각의 wave를 반대편 junction에서 반사되는 wave와 소스의 wave로 표현하면 식 (11), (12)와 같다.

$$V_1^{inc}(t) = V_2^{ref}\left(t - \frac{L}{v}\right) + V_s^-\left(t - \frac{x_s}{v}\right) \quad (11)$$

$$V_2^{inc}(t) = V_1^{ref}\left(t - \frac{L}{v}\right) + V_s^+\left(t - \frac{L-x_s}{v}\right) \quad (12)$$

여기에서 v 는 전송 선로 상에서 wave의 전파 속도이다. Laguerre 다항식을 시간 기저 함수로 사용하면 $V_1^{inc}(t)$ 는 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_1^{inc}(t) \cong \sum_{i=0}^N V_i^{1inc} \phi_i(\bar{t}) \quad (13)$$

식 (13)의 관계를 이용하면, 식 (11)과 (12)는 식 (14), (15)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^N V_i^{1inc} \phi_i(\bar{t}) &= \sum_{i=0}^N V_i^{2ref} \phi_i\left(\bar{t} - \frac{\bar{L}}{v}\right) \\ &+ \sum_{i=0}^N V_i^{s-} \phi_i\left(\bar{t} - \frac{x_s}{v}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^N V_i^{2inc} \phi_i(\bar{t}) &= \sum_{i=0}^N V_i^{1ref} \phi_i\left(\bar{t} - \frac{\bar{L}}{v}\right) \\ &+ \sum_{i=0}^N V_i^{s+} \phi_i\left(\bar{t} - \frac{L-x_s}{v}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

Junction 1과 2에 걸린 전압은 식 (16), (17)과 같이 입사되는 wave와 반사되는 wave를 이용해 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_1(t) &= \frac{1}{c_1} \int_0^t I_1(\tau) d\tau + R_1 I_1(t) \\ &= \frac{1}{c_1} \int_0^t \frac{V_1^{inc}(\tau) - V_1^{ref}(\tau)}{Z_0} d\tau \\ &+ R_1 \frac{V_1^{inc}(t) - V_1^{ref}(t)}{Z_0} \end{aligned} \quad (16)$$

$$V_2(t) = R_2 \frac{V_2^{inc}(t) - V_2^{ref}(t)}{Z_0} \quad (17)$$

여기에서 Z_0 는 전송 선로의 특성 임피던스이고, V_1 과 V_2 는 각각 junction 1과 2에 걸리는 전압을 의미하며, I_1 은 junction 1에 흐르는 전류를 의미한다. 위의 식 (16), (17)도 마찬가지로 Laguerre 다항식을 이용하여 나타낼 수 있으며, 특히 식 (16)의 적분 구간은 Laguerre 다항식의 적분 특성을 이용하여 시간 기저 함수로 표현하면 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다^[6].

$$\int_0^t I_i(\tau) d\tau = \frac{2}{s} \sum_{k=0}^{\infty} \left(I_i + 2 \sum_{k=0}^{i-1} (-1)^{k+i} I_k \right) \phi_i(\bar{t}) \quad (18)$$

지금까지 구한 식에 $\phi_j(\bar{t})$ 로 testing을 하면, 식 (14)와 (15)는 식 (19), (20)과 같이 된다.

$$V_j^{1inc} = V_j^{2ref} \phi_0\left(\frac{\bar{L}}{v}\right) + S_j^2 \quad (19)$$

$$V_j^{2inc} = V_j^{1ref} \phi_0\left(\frac{\bar{L}}{v}\right) + S_j^1 \quad (20)$$

여기에서

$$\begin{aligned} S_j^1 &= \sum_{i=0}^{j-1} V_i^{1ref} \left[\phi_{j-i}\left(\frac{\bar{L}}{v}\right) - \phi_{j-i-1}\left(\frac{\bar{L}}{v}\right) \right] \\ &+ \sum_{i=0}^j V_i^{s+} \left[\phi_{j-i}\left(\frac{L-x_s}{v}\right) - \phi_{j-i-1}\left(\frac{L-x_s}{v}\right) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

$$S_j^2 = \sum_{i=0}^{j-1} V_i^{2ref} \left[\phi_{j-i}\left(\frac{\bar{L}}{v}\right) - \phi_{j-i-1}\left(\frac{\bar{L}}{v}\right) \right]$$

$$+ \sum_{i=0}^j V_i^{s-} \left[\phi_{j-i} \left(\frac{\overline{L-x_s}}{v} \right) - \phi_{j-i-1} \left(\frac{\overline{L-x_s}}{v} \right) \right] \quad (22)$$

이다. 이는 Laguerre 다항식의 다음과 같은 특성을 이용하였다.

$$I_{ij}(t) = \int_0^{\infty} \phi_i(\bar{\tau}) \phi_j(\bar{\tau} - \bar{t}) d\bar{\tau} = \begin{cases} \phi_{i-j}(\bar{t}) - \phi_{i-j-1}(\bar{t}), & j \leq i \\ 0, & j > i \end{cases} \quad (23)$$

식 (19), (20)을 식 (16)과 (17)에 대입하면 junction 1과 2의 전압을 다음 식 (24)와 (25)로 나타낼 수 있다.

$$-\left(\frac{2}{c_1 s} + R_1 + Z_0 \right) V_j^{1ref} + \left(\frac{2}{c_1 s} + R_1 - Z_0 \right) V_j^{2ref} \phi_0 \left(\frac{\overline{L}}{v} \right) = A \quad (24)$$

$$(Z_0 - R_2) V_j^{1ref} \phi_0 \left(\frac{\overline{L}}{v} \right) + (Z_0 + R_2) V_j^{2ref} = B \quad (25)$$

여기에서 A, B는 다음과 같다.

$$A = -\frac{4}{c_1 s} \left(\sum_{i=0}^{j-1} V_i^{1inc} - \sum_{i=0}^{j-1} V_i^{1ref} \right) - \left(\frac{2}{c_1 s} + R_1 - Z_0 \right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{j-1} V_i^{2ref} \left(\phi_{j-i} \left(\frac{\overline{L}}{v} \right) - \phi_{j-i-1} \left(\frac{\overline{L}}{v} \right) \right) + \sum_{i=0}^j V_i^{s+} \left(\phi_{j-i} \left(\frac{\overline{x_s}}{v} \right) - \phi_{j-i-1} \left(\frac{\overline{x_s}}{v} \right) \right) \right) \quad (26)$$

$$B = -(R_2 - Z_0)$$

$$\left(\sum_{i=0}^{j-1} V_i^{1ref} \left(\phi_{j-i} \left(\frac{\overline{L}}{v} \right) - \phi_{j-i-1} \left(\frac{\overline{L}}{v} \right) \right) + (R_2 - Z_0) \cdot \left(\sum_{i=0}^j V_i^{s-} \left(\phi_{j-i} \left(\frac{\overline{L-x_s}}{v} \right) - \phi_{j-i-1} \left(\frac{\overline{L-x_s}}{v} \right) \right) \right) \right) \quad (27)$$

이를 하나의 행렬로 표현하면 식 (28)과 같다.

$$\begin{bmatrix} -\left(\frac{2}{c_1 s} + R_1 + Z_0 \right) & \left(\frac{2}{c_1 s} + R_1 - Z_0 \right) \phi_0 \left(\frac{\overline{L}}{v} \right) \\ (Z_0 - R_2) \phi_0 \left(\frac{\overline{L}}{v} \right) & (Z_0 + R_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_j^{1ref} \\ V_j^{2ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \quad (28)$$

식 (28)의 결과 값과 이를 식 (19), (20)에 대입하여 얻은 결과 값을 통하여, 각 junction에서의 전압을 구할 수 있다.

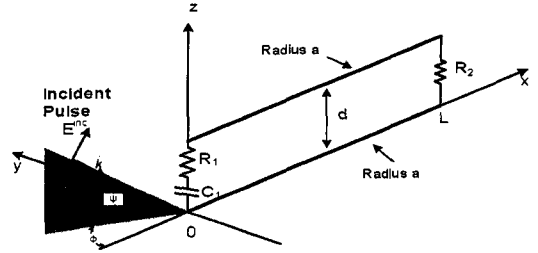


그림 4. 펄스가 가해지는 2선 전송 선로
Fig. 4. 2 wire transmission line illuminated by pulse.

III. 적용 및 검증

본 논문에서 제안한 시간 영역 BLT 방정식의 유효성을 검증하기 위하여 그림 4와 같은 2선 무손실 전송 선로 해석에 적용하였다.

여기에 사용한 도선은 반지름이 $a=1$ mm, 길이가 $L=10$ m, 두 선 사이의 간격이 $d=5$ cm이고, 특성 임피던스는 $Z_0=240$ Ω이다. 종단에서의 부하의 소자들은 $R_1=R_2=240$ Ω, 커패시터 $C_1=100$ pF의 값을 갖는다고 가정하였다. 또한, 입사된 평면파 펄스는 $\phi=0^\circ$ 와 $\phi=30^\circ$ 로 인가되며, 사용된 평면파 전계의 펄스함수는

$$E(t) = \sin(7.5 \times 10^8 t) \exp \left(- \left(\frac{t - 2 \times 10^{-8}}{5 \times 10^{-9}} \right)^2 \right) \quad (29)$$

로 삼각함수로 modulation된 가우스 함수이다. 이는 참고문헌 [7]을 통하여 전압으로 변환할 수 있다.

그림 5와 6은 junction 1과 2에서의 전압 파형을 나

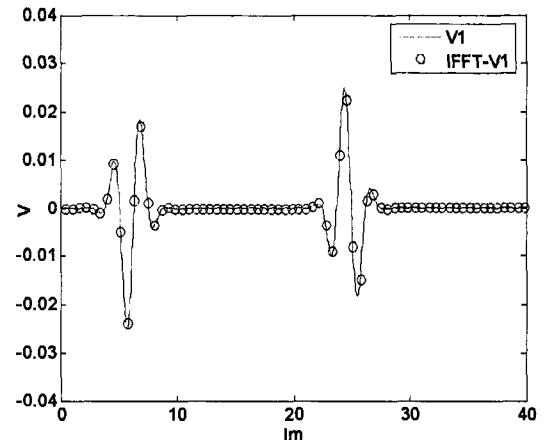


그림 5. 입력 펄스에 의해 junction 1에 걸리는 전압
Fig. 5. Voltages at junction 1 by the incidence pulse.

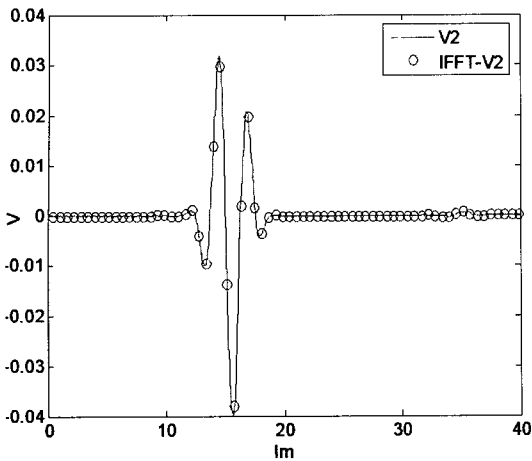


그림 6. 입력 펄스에 의해 junction 2에 걸리는 전압
Fig. 6. Voltages at junction 2 by the incidence pulse.

타낸 것이다. 이 그림에서 'lm'은 'light-meter'의 약자로, 빛의 속도로 1 m를 진행하는데 소요되는 시간을 의미하는데, 대략 3.336 ns 정도이다.

그림 5에서 junction 1에서의 전압 파형은 입사된 펄스에 의한 성분과 junction 2에서 유기된 파형이 전송 선로를 통해 전파된 성분으로 구성되었음을 알 수 있다. 두 파형의 시간적 차이는 대략 20 lm 정도이다. 이와 달리 junction 2에서의 전압 파형은 그림 6과 같이 junction 1에서 유기된 파형이 전송 선로를 통해 입사된 성분과 junction 2에 유기된 파형이 비슷한 시각에 생성되어 중첩이 되었음을 알 수 있다. 또한, junction 2의 전압 파형은 junction 1의 전압 파형에 비하여 시간적으로 지연이 있는데, 이것은 펄스의 입사각과 전송 선로의 길이 등에 따라 달라진다.

본 논문의 결과를 검증하기 위하여 주파수 영역의 BLT 방정식을 이용하여 구한 값을 IFFT한 결과를 이용하여 비교하였다. 그림 5와 6으로부터 본 논문이 제안한 결과와 주파수 영역의 BLT의 결과가 정확히 일치함을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

최근 고출력을 갖는 전자파에 의한 의도적인

EMI/EMC에 관한 문제가 대두되고 있으며, 그에 대한 관심도도 높아지고 있다. 특히, 펄스 형태의 전원과 비선형 소자들로 인하여 시간 영역 상에서의 해석을 이용한 시스템 해석의 중요성이 커지고 있다. 이에 따라, 본 논문은 BLT 방정식을 이용한 시간 영역에서 시스템 전자파 해석을 제안하였다. 이는 복잡한 구조까지 근사적으로 모델링 할 수 있는 BLT 방정식에 기초를 두고, Laguerre 다항식을 시간 기저 함수로 이용하여 해석하였다. 이를 실제 외부에서 인가된 펄스의 영향에 의해 전송 선로에 있는 소자에 걸린 전압을 구함으로써 그 효율성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] C. E. Baum, T. K. Liu, and F. M. Tesche, "On the analysis of general multiconductor transmission line networks", *IN 350, AFSRL*, 1978.
- [2] C. E. Baum, "Extension of the BLT equation into time domain", *IN 553, AFSRL*, 1999.
- [3] H. Bağcı, A. E. Yılmaz, and E. Michielssen, "FFT-accelerated MOT-based solution of time-domain BLT equations", in *Proc. IEEE Antennas Propagat. Soc. Int. Symp.*, pp.1175-1178, Jul. 2006.
- [4] Y. S. Chung, T. K. Sarkar, B. H. Jung, M. S. Palma, Z. Ji, S. Jang, and K. Kim, "Solution of time domain electric field integral equation using the laguerre polynomials", *IEEE Trans. AP*, vol. 52, pp. 2319-2328, 2004.
- [5] I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, New York: Academic Press, 1980.
- [6] A. D. Poularikas, *The Transforms and Applications Handbook*, Piscataway, NJ:IEEE Press, 1996.
- [7] F. M. Tesche, C. M. Butler, "On the addition of EM field propagation and coupling effects in the BLT equation", *IN 588*, 2004.

이 윤 주



2005년 2월: 명지대학교 전자공학과 (공학사)
2005년 8월~2006년 8월: 명지대학교 통신공학과
2006년 8월~2007년 8월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
[주 관심분야] EMI/EMC

신 진 우



1995년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학석사)
1997년 2월~현재: 국방과학연구소 [주 관심분야] EMI/EMC, 전자파해석

정 용 식



1989년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
2000년 8월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
2001년 9월~2003년 2월: 미국 Syracuse 대학교 (Post Doctor)

2003년 3월~2006년 2월: 명지대학교 통신공학과 조교수
2006년 3월~현재: 광운대학교 전자공학과 조교수
[주 관심분야] 전자파 수치해석, 안테나, EMI/EMC

천 창 울



1983년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1992년: 미국 University of Michigan, Ann arbor (공학박사)
1992년~1995년: 강원대학교 전기공학과 조교수

1995년~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
[주 관심분야] RF, RF Power Amplifier, EMC 등

소 준 호



1988년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학석사)
2006년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학박사)
1990년 2월~현재: 국방과학연구소

선임연구원
[주 관심분야] 능동 위상배열 안테나 시스템 및 전자파 수치해석

이 병 제



1988년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1993년 12월: 미국 Southern Illinois University 전자공학과 (공학석사)
1993년 12월: 미국 Southern Illinois University 전자공학과 (공학박사)
1998년 3월~현재: 광운대학교 전자공학과 부교수

[주 관심분야] 초고주파 안테나 해석 및 설계, 전기자기파 해석, 레이더 및 위성통신, 초고주파 응용, RF 능동 및 수동소자