

외부전자파와 전송선로 결합해석 연구

明聖鎭 李起植

한국전기연구소 전력전자연구부

A study on the coupling of electromagnetic field to transmission lines

Sung-Ho Myung Ki-chul Lee

Korea Electrotechnology Research Institute

ABSTRACT

In this paper, the coupling of external electromagnetic fields to transmission lines is studied. The emphasis is on the practical solution of Problems involving the excitation of currents on the wires by natural and man-made sources of electromagnetic fields. First, this study develops the theory of excitation of a two-wire transmission line illuminated by electromagnetic field the coupling equations are solutions of differential equations which include the source terms due to the incident fields. And equations in this paper reduce to simple forms when the incident field is a plane wave.

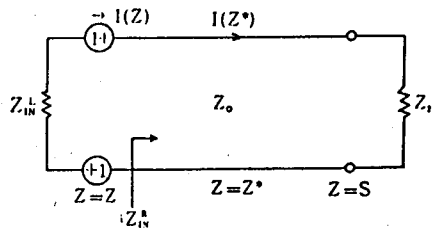
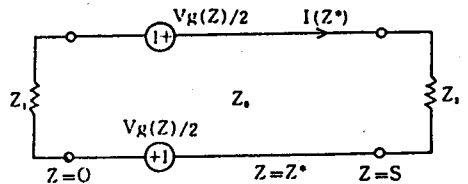
1. 서 론

자연적이나 인공적인 전자파 잡음에 의하여 인근 전송선로에 전류가 유기되는데 이런 유기 전류는 통신선로에 잡음을 일으키거나 디지털 회로에 오동작을 발생시키기도 하여 심지어 인체에 영향을 주기도 한다. 우리가 쉽게 생각할 수 없는 전자파 잡음원은 각종 뇌를 비롯하여 AM, FM, TV 방송국, 레이더 설비, ISM 장치, 자동차 점화장치, 정전기방전, 전자기기의 전원장치, 스위칭 과도 현상등으로 여기의 전자에너지 결합으로 CATV 및 전화선과 같은 긴 전송선로로부터 전자기계의 연결선이나 PCB 보드와 같은 짧은 선로에 이르기까지 다양하다. 그러나 잡음원이나 결합 전송선로와 관계없이 이것을 분석하고 해결하는 것은 동일하다. 즉, 전자계를 구하고 이것에 의한 결합 유기전류를 구하는 것이다.

따라서 본 연구에서는 일반전송선로이론으로부터 Incident Fields 에 의해 발생된 잡음원이 전송선로에 따라 그 후 분포되어 있다는 가정을하여 결합전류를 해석하였으며 이로부터 Terminations 및 선로임피던스 특성에 따른 결합특성 패턴을 고찰하였다.

II. 전송선로 이론

전송선로에 전압원이 있는 등가회로는 그림/와 같이 전압원 쪽에서 본 왼쪽과 오른쪽 임피던스는 다음과 같다.



그림/ z>2인 경우 전송선로 전압원에 의한 등가회로

$$Z_{ks} = Z_0 \frac{Z_1 + Z_0 \tanh \gamma z}{Z_0 + Z_1 \tanh \gamma z}$$

$$Z_{ks}^* = Z_0 \frac{Z_2 + Z_0 \tanh \gamma(s-z)}{Z_0 + Z_2 \tanh \gamma(s-z)} \dots\dots\dots (1)$$

z지점에 흐르는 전류는

$$I(z) = \frac{V_g(z)}{Z_{ks} + Z_{ks}^*} \dots\dots\dots (2) \text{ 이므로}$$

z^* 에서 $I(z^*)$ 는

$$I(z^*) = I(z) [\cosh \gamma (z^* - z) - \frac{Z_0^*}{Z_0} \sinh \gamma (z^* - z)] \dots (3')$$

이 된다. 식(3)과 (2)를 이용하여 $I(z^*)$ 를 정리하면 식(4)과 같이 되고 $z^* < z$ 인 경우에는 z 와 z^* 를 바꾸면 되므로 식(5)와 같이 된다.

$$I(z^*) = \frac{V_R(z)}{Z_0 D} [Z_0 \cosh \gamma Z + Z_1 \sinh \gamma Z] \times [Z_0 \cosh \gamma (s - z^*) + Z_2 \sinh \gamma (s - z^*)] z^* \dots (4)$$

$$I(z^*) = \frac{V_R(z)}{Z_0 D} [Z_0 \cosh \gamma z^* + Z_1 \sinh \gamma z^*] \times [Z_0 \cosh \gamma (s - z) + Z_2 \sinh \gamma (s - z)] z^* \dots (5)$$

$$D = (Z_0 Z_1 + Z_0 Z_2) \cosh \gamma s + (Z_0^2 + Z_1 Z_2) \sinh \gamma s$$

실제로는 전송 선로를 따라 전압원이 분포되어 있어 이에 대한 등가회로는 그림2와 같이 나타 낼 수 있다.

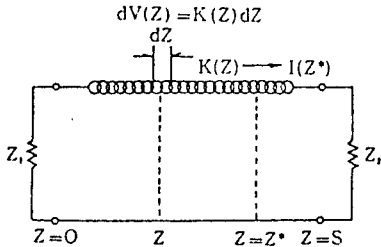


그림2 전압원이 선로에 분포되어 있는 등가회로

여기에서 $K(z)$ 는 전송선로에 따른 위치 함수이며 $dV = K \Delta z$ 이다.

즉, $dV(z) = K(z) dz$

$$V(z) = \int K(z) dz \dots (6)$$

앞에서 구한 $V_1(z)$ 대신에 $dV(z)$ 의 합을 구하면 되므로 $z^* < z$ 인 경우 $I(z)$ 를 구하면 다음식(7)와 같이 된다.

$$I(z^*) = \frac{Z_0 \cosh \gamma (s - z^*) + Z_2 \sinh \gamma (s - z^*)}{Z_0 D} \times \int_0^z K(z) [Z_0 \cosh \gamma z + Z_1 \sinh \gamma z] dz + \frac{Z_0 \cosh \gamma z^* + Z_1 \sinh \gamma z^*}{Z_0 D} \times \int_z^s K(z) [Z_0 \cosh \gamma (s - z) + Z_2 \sinh \gamma (s - z)] dz \dots (7)$$

III. 차동 모드 전류

외부 전자기계 $E(x, y, z)$ 에 의하여 유기되는 전류를 다음과 같은 전송 선로 모델에서 고찰하여 본다.

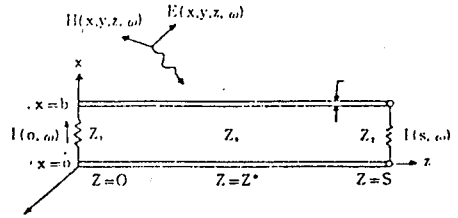


그림3 외부 전자기계에 의한 전송선로 결합모델

외부 전자기계에 의한 전류를 일으키는 전압원에 대하여 분포도 등가회로는 다음 그림4와 같이 나타 낼 수 있으며 이것을 대칭 및 비대칭 성분인 차동 모드(DM)와 동상 모드(CM) 성분으로 나누면 그림5와 같다.

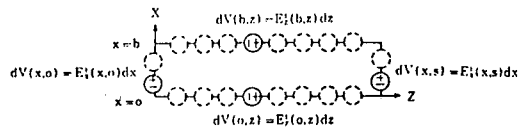
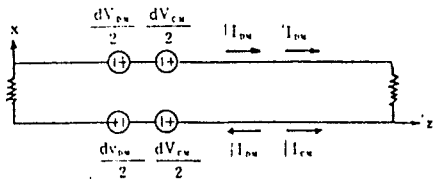


그림4 전압원 분포도



$$dV_{DM}(z) = dV(b, z) - dV(0, z) = [E_1(b, z) - E_1(0, z)] dz$$

$$dV_{CM}(z) = dV(b, z) + dV(0, z) = [E_1(b, z) + E_1(0, z)] dz$$

그림5 차동모드와 동상모드 분포도

그림5에서 차동모드 전류는 앞에서 구한 전송 선로 이론에서 알 수 있는 바와 같이 다음식(8)와 같이 구해진다.

$$I(z^*, \omega) = \frac{Z_0 \cosh \gamma (s - z^*) + Z_2 \sinh \gamma (s - z^*)}{Z_0 D} \times \int_0^z K(z, \omega) [Z_0 \cosh \gamma z + Z_1 \sinh \gamma z] dz + \frac{Z_0 \cosh \gamma z^* + Z_1 \sinh \gamma z^*}{Z_0 D} \times \int_z^s [K(z, \omega) [Z_0 \cosh \gamma (s - z) + Z_2 \sinh \gamma (s - z)] dz + \frac{1}{D} [Z_0 \cosh \gamma z^* + Z_1 \sinh \gamma z^*] \int_0^s E_1(x, s, \omega) dx + \frac{1}{D} [Z_0 \cosh \gamma (s - z^*) + Z_2 \sinh \gamma (s - z^*)] \int_0^s E_1(x, z, \omega) dx \dots (8)$$

Z_0 : 특성 임피던스

$$K(z, \omega) = E_1(b, z, \omega) - E_1(0, z, \omega)$$

$$D = (Z_0 Z_1 + Z_0 Z_2) \cosh \gamma s + (Z_0^2 + Z_1 Z_2) \sinh \gamma s$$

$\gamma = \alpha + j\beta$: 전파 정수

α : 감쇠 정수

$\beta = 2\pi/\lambda$: 위상 정수

(g)식에 $z^* = 0, z^* = s$ 를 대입하여 양단의 부하 전류를 구하고 또한

무손실 전송 선로에서는 $\alpha = 0, \gamma = j\beta$ 이므로 부하 전류는 다음식 (9), (10)와 같이 표현된다.

$$I(0, \omega) = \frac{1}{D} \int_0^a K(z, \omega) [Z_1 \cos \beta(s-z) + jZ_2 \sin \beta(s-z)] dz + \frac{1}{D} [Z_1 \cos \beta s + jZ_2 \sin \beta s] \int_0^a E'(x, 0, \omega) dx - \frac{Z_1}{D} \int_0^a E'(x, s, \omega) dx \dots (9)$$

$$I(s, \omega) = \frac{1}{D} \int_0^a K(z, \omega) [Z_1 \cos \beta z + jZ_2 \sin \beta z] dz + \frac{Z_1}{D} \int_0^a E'(x, 0, \omega) dx - \frac{1}{D} [Z_1 \cos \beta s + jZ_2 \sin \beta s] \int_0^a E'(x, s, \omega) dx \dots (10)$$

$$D = (Z_1 Z_1 + Z_1 Z_2) \cos \beta s + j(Z_1^2 + Z_1 Z_2) \sin \beta s$$

$$Z_1 = 120 \ln (2b/a)$$

IV. 양단 평행 전계에 의하여 유기되는 전송선로 전류

다음 그림6는 양단에 평행한 전계를 가진 평면파가 y축과 가 한도 입사하는 것을 나타낸 것이다.

$E_z = 0$ 이므로 $K(z) = 0$, 또는 양단 길이에 대하여 E_z 가 일정하므로

$$\int_0^a E_z dx = bE_z \dots (11)$$

앞에서 구한(10)식에서

$$I(s, \omega) = \frac{bZ_1 E_z(0, \omega) - bE_z(s, \omega) [Z_1 \cos \beta s + jZ_2 \sin \beta s]}{D} \dots (12)$$

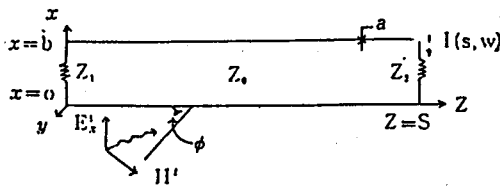


그림6 양단 평행 전계의 전송선로 결합모델

입사파 위상 기준을 $Z=0$ 으로 하면

$$E_z(0, \omega) = E_z$$

$$E_z(s, \omega) = E_z e^{-j\beta s}$$

이것을 앞의 식(12)에 대입하면 다음 식(13)과 같이 된다.

$$I(s, \omega) = \frac{bE_z(\omega)}{2D} [2Z_1 - (Z_1 - Z_2) \cos[\beta s(1 + \sin \phi)] - (Z_1 + Z_2) \cos[\beta s(1 - \sin \phi)] + j(Z_1 - Z_2) \sin[\beta s(1 + \sin \phi)] - j(Z_1 + Z_2) \sin[\beta s(1 - \sin \phi)]] \dots (13)$$

이제에서 보낸을 간단화시키기 위해 z방향을 따라 전생하는 평면파의 경우: $\phi = (x)^\circ$ 이므로 식(13)은 식(14)과 같이 된다.

$$I(s, \omega) = \frac{bE_z(\omega)}{2D} (Z_1 - Z_2) [(1 - \cos 2\beta s) + j \sin 2\beta s] \dots (14)$$

따라서, 외부 전계에 대한 부하 전류 Spectrum은 다음과 같다.

$$\frac{I(s, \omega)}{E_z(\omega)} = \frac{b(Z_1 - Z_2)}{2D} [(1 - \cos 2\beta s) + j \sin 2\beta s] \dots (15)$$

식(15)을 decibels로 나타내면

$$20 \log_{10} \left| \frac{I(s, \omega)}{E_z(\omega)} \right| \text{가 된다.}$$

이것을 전자장치의 배선이나 케이블 등과 같이 짧은 경우에 대하여 다음과 같은 조건에 의해 Simulation 하면 그림 7, 8, 9 와 같다.

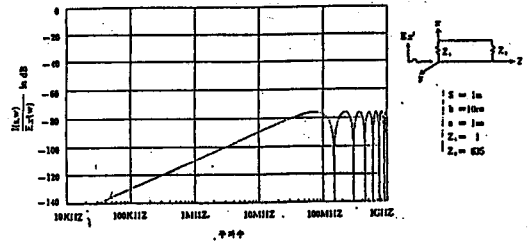


그림7 E(z)와 결합하는 1m 전송선로의 부하전류

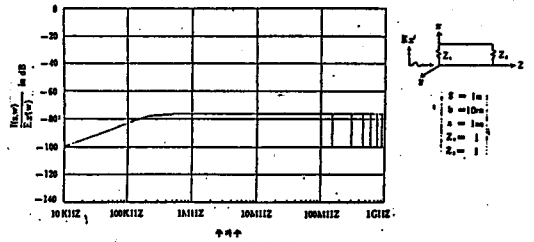


그림8 E(z)와 결합하는 1m 전송선로의 부하전류

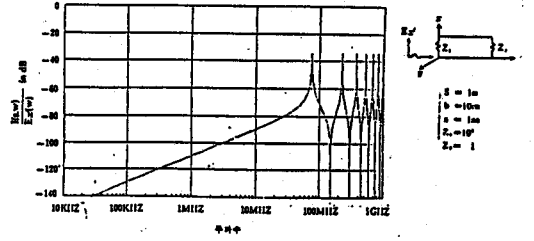


그림9 E(z)와 결합하는 1m 전송선로의 부하전류

또한 본연구에서는 실제 적용에 유용한 임피던스 Parameter에 따른 결합 특성 곡선을 구하였다 다음 그림 10, 11, 은 이에 대한 것으로 Z_0 를 고정시키고 선로길이 s와 Termination 임피던스 Z_1, Z_2 에 따른 결합 특성곡선을 그린것이다

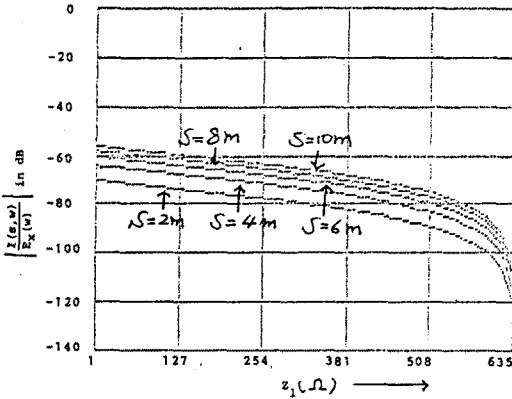


그림 10 s, z₁, 변화에 따른 최대 결합 특성 곡선 (z=635, s, B, A 는 일정 증가)

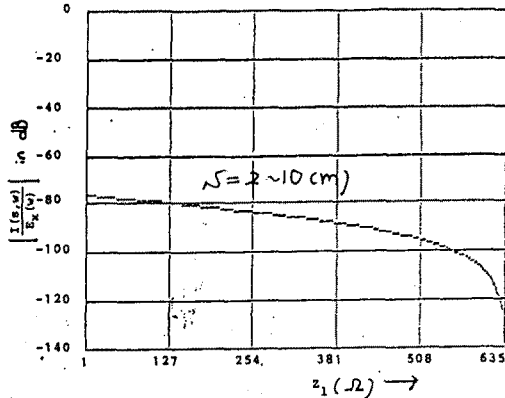


그림 11 s, z₁, 변화에 따른 최대 결합 특성 곡선 (z=635, s 만 증가)

V. 결 론

본연구에서 해석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 전자파와 전송선로의 결합해석을 incident field 에 의한 전압원이 전송선로에 고루분포되어 있다고 가정한 위치함수 K(z) 를 적분한 미분방정식을 이용하여 해석하였다.
- (2) 부하전류 envelop 패턴은 termination 임피던스에 따라 결정되며 f=80s(MHz)인 주파수까지는 선형적으로 결합이 증가하다가 f < 80. s에서는 일정하였다.
- (3) termination 임피던스 z₁과 z₂ 값이 작고 z₁=z₂ 이면 f < 80. S (MHz)에서 임계점이 형성되었다.
- (4) z₂ 를 고정시키고 선로길이 s 에 따라 도선 간격 및 직경 B 와 A 를 일정하게 증가시킨 경우에는 결합율이 1-500(Ω) 사이에서는 선형적으로 20 dB 정도 감소하다가 500-635(Ω)에서는 지수함수적으로 감소하여 이구간에서 50dB 정도 감소량을 보였다.

(5) 위 (4)번의 경우에서 s 에 따라 B 와 A 를 일정하게 고정시킨 경우에는 f < 80. s 인 최대결합특성곡선은 s 값에 따라 변동되지 않았다.

이 연구에서는 외부 전자파를 평면파로 간주하였는데 실제로 적용시에는 non uniform field도 고려해야하고 또 선로를 전파할 때 전파정수 γ도 생각해야하므로 앞으로 연구에서는 이 부분에 대한 factor 를 고려한 분석이 필요하다고 여겨진다. 또한 실제 전기 및 전자설비 내에서는 양단이 여러 형태의 R.L.C 소자 및 active 소자로 이루어져 있으므로 이에 대한 조건도 생각해 분석을 해야 할 것이다.

〈 参 考 文 献 〉

- 1) C. D. Taylor, R. S. Satterwhite, and C. W. Harrison, "The Response of a Terminated TWO-Wire Transmission Line Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-13, No. 6, pp. 987~989, November, 1965.
- 2) A. A. Smith, Jr., "A More Convenient Form of the Equations for the Response of a Transmission Line Excited by Nonuniform Fields", IEEE Trans. on EMC, Vol. EMC-15, No. 3, pp. 151~152, August 1973.
- 3) C. Whitscarver, "Transient Electromagnetic Field Coupling with Two-Wire Uniform Transmission Lines", Ph. D. dissertation, University of Florida, Gainesville, March, 1969.
- 4) C. R. Paul, "Frequency Response of Multiconductor Transmission Lines Illuminated by an Electromagnetic Field", IEEE Trans. on EMC, Vol. EMC-18, No. 4, pp. 183~190, November, 1976.
- 5) A. S. Agrawal, H. J. Price and S. H. Gurbaxani, "Transient Response of Multiconductor Transmission Lines Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field", IEEE Trans. on EMC, Vol. EMC-22, No. 2, pp. 119~129, May, 1980.
- 6) C. R. Paul and R. T. Abraham, "Coupling of Electromagnetic Fields to Transmission Lines", 1981 IEEE International Symposium on EMC, August 18-20, Boulder, Colorado, 81CHI675-8, pp. 164~170.
- 7) R. W. P. King and C. W. Harrison, Jr., "Transmission Line Coupled to a Cylinder in an Incident Field", IEEE Trans. on EMC, Vol. EMC-14, No. 3 pp. 97~105, August, 1972.
- 8) C. W. Harrison, Jr., "The Response of a Terminated Two-Wire Line Suspended in Air above a Semi-Infinite Dissipative Medium and Excited by a plane-Wave RF Field Generated in Free Space", IEEE Trans on EMC, Vol. EMC-11, No. 4, pp. 144~148, November, 1969.