

전기다이폴에 의해 유기되는 전송선로의 노이즈 예측

Prediction of Noise in a Transmission Line Excited by an Electric Dipole

김 은 하 · 이 재 현*

Eunha Kim · Jae-Hyun Lee*

요 약

최근 기술의 증가로 인하여 전 분야의 전자제품은 더욱 경량화, 집적화되어가고 있으며, 안테나 역시 출력의 향상으로 전송선로 단에서의 EMC(Electromagnetic Compatibility) 해석이 중요해지고 있다. 본 논문에서는 외부의 안테나로부터 전송선로에 유기되는 노이즈를 예측하기 위하여 이론적 해석을 하였으며, 이를 전자기 시뮬레이션 해석과 비교, 검증하였다. 외부 안테나의 대표적인 예로서 본 논문에서는 전기 다이폴을 상정하였고, 이로부터 발생하는 전자기파에 의해 전송선로에 유기되는 전압, 전류를 얻어내기 위하여 수정된 전송선 방정식(modified telegrapher's equations)을 이용하여 수식을 유도하였다. 유도된 이론식은 전송선로에 대하여 전기 다이폴이 임의의 지점에 위치할 수 있도록 유도하여, 전송선로에 대하여 다양한 위치에 있는 전기다이폴에 의한 노이즈를 조사하였다.

Abstract

At present the general trend of modern electronics is toward smaller packages and high performance. As an antenna requires high powers, the EMC(Electromagnetic Compatibility) problems of the transmission line stage is becoming crucial day by day. In this paper, a transmission line excited by the electromagnetic fields from an infinitesimal electric dipole antenna is analyzed using the modified telegrapher's equations. The analytical equations are derived for arbitrarily positioned electric dipole with reference to a transmission line. To verify our approach, the induced voltage and current at the terminal were computed by the proposed approach and compared with those obtained by the electromagnetic simulation solver. Furthermore, the induced currents at the terminal of a transmission line excited by the electric dipoles at various positions were investigated using our approach.

Key words : Electric Dipole, Modified Telegrapher's Equations, Radio Frequency Interference, Transmission Line, Noise

I. 서 론

최근 기술이 증가함에 따라 전 분야의 전자제품은 더욱 경량화, 집적화되어 가고 있으며, 이에 따라 전송선로 단의 EMC(Electromagnetic Compatibility) 해석이 더욱더 중요해지고 있다. 특히 안테나와 같이 노이즈원이 외부에

있는 경우, 가해자(aggessor) 역할을 하는 노이즈원으로 인하여 피해자(victim) 역할이 되는 전송선로단에서 EMI (Electromagnetic Interference) 현상이 나타나고 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위하여 이미 많은 연구가 진행되고 있다^{[1]~[5]}. 특히 다가오는 5G 통신을 사용하는 모바일 기기, 자율 주행차 기술과 V2X(vehicle to everything) 통

자동차부품연구원(Korea Automotive Technology Institute)

*충남대학교 전파정보통신공학과(Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University)

· Manuscript received February 27, 2016 ; Revised April 5, 2017 ; Accepted April 27, 2017. (ID No. 20170227-018)

· Corresponding Author: Eunha Kim (e-mail: ehkim@katech.re.kr)

신, 사물 인터넷을 넘어선 만물 인터넷 등 최근 주목받고 있는 기술들이 도래함에 따라 이들 기술이 외부의 불필요한 노이즈로 인하여 고유의 기능이 방해받지 않도록 해야할 것이다. 특히, 휴대전화의 경우 안테나와 인쇄 회로기판위의 전송선로가 상당히 가까이에 위치하고 있어, 이로 인해 발생하는 RFI(Radio Frequency Interference)는 심각한 문제다^{[6],[7]}. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 인근 안테나로부터 전송선로에 유기되는 전자기적 결합 현상을 해석할 필요가 있다. 기존의 연구는 수치해석으로 안테나와 전송선로 간의 전자기 결합에 대한 해석을 실시하였지만, 직관적으로 현상을 이해하고 수치해석에 비해 빠른 결과를 도출하기 위해서는 이론적 모델을 수립할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 외부의 안테나로부터 전송선로로 인가되는 노이즈를 예측하기 위하여, 대표적인 안테나로서 전기다이폴을 상정하였고, 이 전기다이폴에서 발생하는 전자기파가 전송선로에 유기하는 분포 전압과 분포 전류 소스(distributed voltage and current sources)를 해석하기 위하여 수정된 전송선방정식(modified telegrapher's equations)을 이용하였고 경계 조건을 이용하여 양단의 전압, 전류를 얻었다. 또한, 안테나와 전송선로간의 상대적 위치에 따른 노이즈 변화를 예측하기 위하여, 전송선로에 대하여 임의의 지점에 전기 다이폴이 위치하도록 수식이 유도되었으며, 이는 전자기 시뮬레이션 툴을 이용하여 그 결과를 비교 검증하였다.

II. 전기 다이폴에 의해 전송선로에 유기되는 노이즈 해석

2-1 외부 입사장을 고려한 전송선로 방정식

그림 1처럼 외부 전자기장이 전송선로 위로 유기될 때 외부의 입사에 의해 발생하는 강제항(forcing term)은 기존의 전송선로 방정식에 추가되며, y축 위에 높이가 h 이고, 길이가 L인 전송선로가 놓여져 있을 때 수정된 전송선 방정식의 해는 식 (1)처럼 표현된다^[8].

$$\begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} = F(L) \begin{bmatrix} V(L) \\ I(L) \end{bmatrix} + \int_0^L F(y') \begin{bmatrix} V_f(y') \\ I_f(y') \end{bmatrix} dy' \quad (1)$$

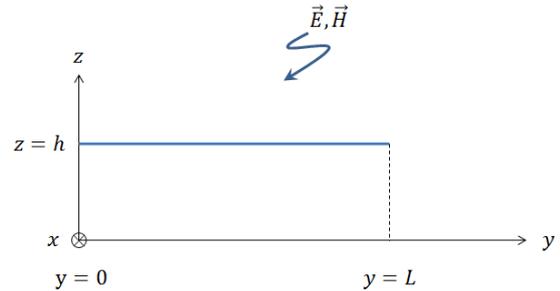


그림 1. y축 위에 놓여져 있는 길이 L의 전송선로
Fig. 1. Transmission line with length L on the y-axis.

식 (1)의 맨 우측 항을 제외하면 기존의 전송선로 방정식의 해이다. 다시 말해, 위 식에서 새롭게 추가된 우변의 항은 외부 전자기장에 의해서 발생된 항으로서, V_f 는 외부의 입사 자기장에 의해서 전송선로로 유기되는 분포 전압을 의미하며, I_f 는 외부의 입사 전기장에 의해서 전송선로로 유기되는 분포 전류를 의미한다. 또한 전송선로 위의 전압과 전류는 전달 파라미터(chain matrix) F 에 의해 특성지어 진다. 각각의 구체적인 식은 식 (2)와 식 (3)처럼 표현된다.

$$F(y') = \begin{bmatrix} \cos\beta y' & jZ_0 \sin\beta y' \\ j \sin\beta y' / Z_0 & \cos\beta y' \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_f(y') \\ I_f(y') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -jw \int_0^h B_x(x', y', z') dz' \\ jwC \int_0^h E_z(x', y', z') dz' \end{bmatrix} \quad (3)$$

$\beta=2\pi/\lambda$: 위상상수 $\omega=2\pi f$: 각속도
 Z_0 : 특성 임피던스 C : 정전용량

2-2 전기 다이폴

그림 2는 일반적인 전기 다이폴이다. 구좌표계에서의 전기 다이폴로부터 발생하는 전기장과 자기장은 각각 식 (4) 및 식 (5)와 같다^[9]. 이 식을 직각 좌표계로 표현하면 각각 식 (6) 및 식 (7)과 같이 표현된다.

$$H_r = H_\theta = 0 \quad (4a)$$

$$H_\phi = j \frac{kI_0 l \sin\theta}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \quad (4b)$$

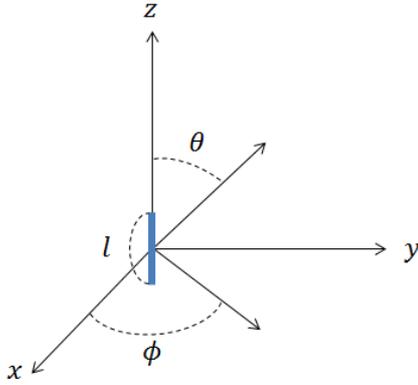


그림 2. 전기 다이폴
Fig. 2. Electric dipole antenna.

$$E_r = \eta \frac{I_0 l \cos \theta}{2\pi r^2} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \quad (5a)$$

$$E_\theta = j\eta \frac{k I_0 \sin \theta}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} + \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr} \quad (5b)$$

$$E_\phi = 0 \quad (5c)$$

k : 전파상수 I_0 : 안테나에 흐르는 전류

l : 안테나의 총 길이 $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$: 고유 임피던스

$$H_x = -\frac{y}{\rho} H_\phi \quad (6a)$$

$$H_y = \frac{x}{\rho} H_\phi \quad (6b)$$

$$H_z = 0 \quad (6c)$$

$$E_x = \frac{x}{r} E_r + \frac{xz}{r\rho} E_\theta \quad (7a)$$

$$E_y = \frac{y}{r} E_r + \frac{yz}{r\rho} E_\theta \quad (7b)$$

$$E_z = \frac{z}{r} E_r - \frac{\rho}{r} E_\theta \quad (7c)$$

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}, r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (8)$$

2-3 전기 다이폴에 의한 전송선로의 전자기 결합 해석

전송선로에 대하여 임의의 지점에 전기 다이폴이 놓여 있다고 가정하였을 때, 전송선로 상으로 유기되는 분포 전압과 분포 전류를 구하기 위하여 그림 3과 같이 좌표계 1(x_1, y_1, z_1)에는 전송선로, 좌표계 2(x_2, y_2, z_2)에는 전기 다이폴을 위치시켰다. 2-1 절에서 설명한 것처럼 좌표계 1에서의 수정된 전송선 방정식의 해는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_1(0) \\ I_1(0) \end{bmatrix} = F_1(L) \begin{bmatrix} V_1(L) \\ I_1(L) \end{bmatrix} + \int_0^L F_1(y_1') \begin{bmatrix} V_f(y_1') \\ I_f(y_1') \end{bmatrix} dy_1' \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} V_f(y_1') \\ I_f(y_1') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -jw \int_0^h B_{x_1}(x_1', y_1', z_1') dz_1' \\ jwC \int_0^h E_{z_1}(x_1', y_1', z_1') dz_1' \end{bmatrix} \quad (10)$$

이 전송선로 위에 유기되는 분포 전압과 분포 전류를 식 (10)으로부터 구할 수 있다. 이 외부 입사장은 좌표계 2에 놓여져 있는 전기 다이폴로부터 발생하는 전기장과 자기장이다. 따라서 두 좌표계 사이의 좌표 변환을 식 (11)을 이용하여 얻어낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_{x_1} \\ A_{y_1} \\ A_{z_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta' & -\sin \theta' & 0 \\ \sin \theta' & \cos \theta' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{x_2} \\ A_{y_2} \\ A_{z_2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

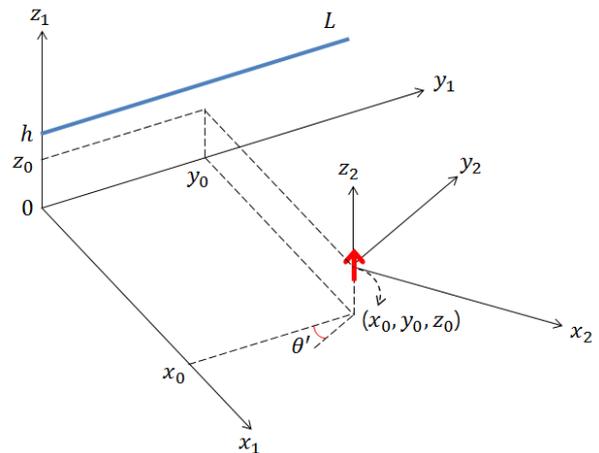


그림 3. 전송선로와 전기 다이폴의 좌표축
Fig. 3. Axes of coordinates of the transmission line and the electric dipole antenna.

식 (11)을 통하여 2-2절에 기술한 전기 다이폴로부터 발생하는 전기장과 자기장의 직각 좌표계의 식을 좌표계 2로부터 좌표계 1로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 B_{x_1}(x_1', y_1', z_1') &= \cos\theta' B_{x_2} - \sin\theta' B_{y_2} \\
 &= \cos\theta' \mu_0 H_{\phi 2} \frac{-y_2}{\rho_2} - \sin\theta' \mu_0 H_{\phi 2} \frac{x_2}{\rho_2} \\
 &= -\mu_0 \frac{\{\cos\theta' y_2 + \sin\theta' x_2\}}{\rho_2} \\
 &\quad \times \frac{jkI_0 l (\rho_2/r_2)}{4\pi r_2} \left[1 + \frac{1}{jkr_2} \right] e^{-jkr_2} \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{z_1}(x_1', y_1', z_1') &= E_{z_2} = \frac{Z_2}{r_2} E_{r_2} - \frac{\rho_2}{r_2} E_{\theta 2} \\
 &= \frac{Z_2}{r_2} \frac{\eta I_0 l (Z_2/\rho_2)}{2\pi r^2} \left[1 + \frac{1}{jkr_2} \right] e^{-jkr_2} \\
 &\quad + \frac{\rho_2}{r_2} \frac{j\eta k I_0 (\rho_2/r_2)}{4\pi r_2} \left[1 + \frac{1}{jkr_2} - \frac{1}{(kr_2)^2} \right] e^{-jkr_2} \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_2 &= \cos\theta' (x_1 - x_0) + \sin\theta' (y_1 - y_0) \\
 y_2 &= -\sin\theta' (x_1 - x_0) + \cos\theta' (y_1 - y_0) \\
 z_2 &= z_1 - z_0 \quad (14)
 \end{aligned}$$

이렇게 얻어진 식 (12)와 식 (13)을 식 (10)에 대입하여 적분하면 강제항은 상수로 표현되어 식 (15)와 같이 간단히 정리된다.

$$\begin{bmatrix} V_1(0) \\ I_1(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}(L) & F_{12}(L) \\ F_{21}(L) & F_{22}(L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(L) \\ I_1(L) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_F \\ I_F \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서

$$\begin{bmatrix} F_{11}(L) & F_{12}(L) \\ F_{21}(L) & F_{22}(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta L & jZ_0 \sin\beta L \\ j\sin\beta L/Z_0 & \cos\beta L \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} V_F \\ I_F \end{bmatrix} = \int F(y') \begin{bmatrix} V_f(y') \\ I_f(y') \end{bmatrix} dy'.$$

최종적으로 외부 전기 다이폴에 의해 발생하는 전기장과 자기장으로부터 전송선로 상에 유기되는 총 전압과 전류는 식 (15)의 우변 V_F 와 I_F 로 표현할 수 있다.

각 양단의 전압과 전류를 구하기 위해서 그림 4와 같은 경계조건을 가정하면, 식 (16)처럼 표현된다.

$$\begin{aligned}
 V_1(0) &= V_s - R_s I_1(0) \\
 V_1(L) &= V_L + R_L I_1(L) \quad (16)
 \end{aligned}$$

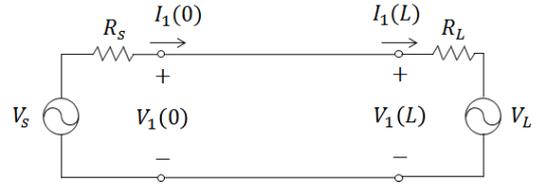


그림 4. 외부 에너지가 유기되었을 때의 전송선로
Fig. 4. Transmission line when the external field is transferred.

식 (16)을 식 (15)에 대입하면 식 (17)로 정리된다.

$$\begin{bmatrix} V_s - R_s I_1(0) - V_F \\ I_1(0) - I_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}(L) & F_{12}(L) \\ F_{21}(L) & F_{22}(L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L + R_L I_1(L) \\ I_1(L) \end{bmatrix} \quad (17)$$

전송선로 양단에 흐르는 전류는 식 (18)처럼 정리할 수 있으며, 전송선로 양단 전압은 식 (16)으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_1(L) &= \frac{(V_s - V_F) - R_s I_F - F_{11}(L) V_L}{R_s \{F_{21}(L) + F_{22}(L)\} + \{F_{11}(L) R_L + F_{12}(L)\}} \\
 I_1(0) &= \{F_{21}(L) + F_{22}(L)\} I_1(L) + I_F \quad (18)
 \end{aligned}$$

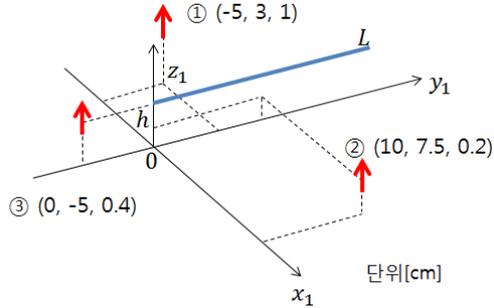
III. 결과 및 논의

본 절에서는 이론해석과 시뮬레이션을 통하여 얻어진 결과의 비교를 통하여 검증한다. 또한, 검증된 이론식을 이용하여 전송선로에 대하여 전기 다이폴이 다양하게 위치한 경우에 대하여 조사한다. 시뮬레이션은 라인 구조인 경우 빠르게 해석할 수 있는 모멘트법(method of moment: MOM) 기반의 전자기해석 상용 프로그램인 FEKO를 이용하였다. 본 논문에서 계산하는 모든 전송선의 길이는 15 cm이며, 높이는 0.4 cm이다. 또한 전기 다이폴에 의해서 유기되는 전류는 y가 L인 지점에 대해서만 그 결과를 보이도록 한다.

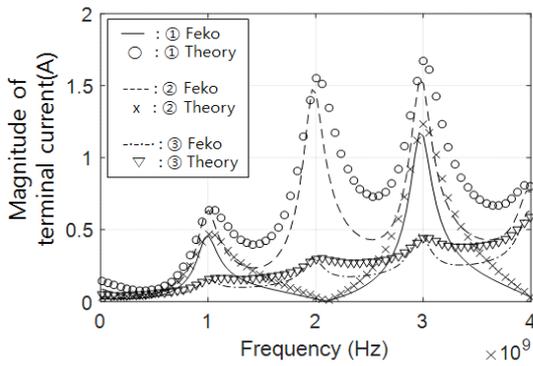
3-1 수치해석 시뮬레이션과 비교 검증

시뮬레이션과의 비교는 그림 5(a)에서 보이듯이 3가지 경우에 대하여 실시하였다. 전기 다이폴의 위치는 각각 (-5 cm, 3 cm, 1 cm), (10 cm, 7.5 cm, 0.2 cm), (0 cm, -5 cm, 0.4 cm)이다. 이 3개 지점에 전기 다이폴이 각각 위치하고 있을 때, 전송선로에 유도된 전류와 전압을 본 논문

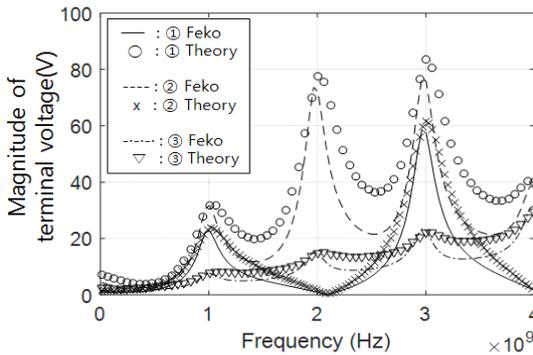
이 제안한 이론식과 FEKO를 통하여 구하였고, 그 결과를 그림 5(b)와 그림 5(c)에 나타내었다. 전기다이폴은 z방향으로 분극화되어 있으며, L/h 은 1이다. 이론식과 FEKO의



(a) 전송선에 대한 3개 전기다이폴의 위치
(a) Positions of 3 electric dipoles with respect to the transmission line



(b) 주파수에 따른 종단 전류의 크기
(b) Magnitudes of termination currents with frequency



(c) 주파수에 따른 종단 전압의 크기
(c) Magnitudes of terminal voltages with frequency

그림 5. 이론과 시뮬레이션과의 비교
Fig. 5. Comparison between theory and simulation.

표 1. 상대 오차 (%), $[(Theory-Feko)/Theory] \times 100$
Table 1. Relative error (%) $[(Theory-Feko)/Theory] \times 100$.

전기 다이폴 위치	최대	최소	평균
①	51.88 %	0.11 %	32.16 %
②	45.02 %	0.19 %	33.92 %
③	45.58 %	0.57 %	26.84 %

결과가 비교적 유사함을 볼 수 있으므로, 본 논문이 제안한 이론 해석이 타당함을 확인할 수 있다. 이론과 시뮬레이션의 상대오차를 표 1에 나타내었다.

3-2 x축에 따른 전기 다이폴의 영향

그림 6과 같이 전기 다이폴의 위치를 x축을 따라 움직여 가면서 전송선로로 유기되는 전류를 확인하였다. 첫 번째 전기 다이폴은 $(10 \text{ cm}, L/2, h/2)$ 에 위치시키고, x축을 상에서 $L/4$ 간격만큼 앞뒤로 두 개를 더 위치시켜 계산하였다.

전기 다이폴 소스가 멀어지면 그 전자기 결합이 약해지는 것을 예측할 수 있듯이, 그 결과 또한 그림 7에서 볼 수 있듯이, 거리가 멀어질수록 전송선로로 유기되는 전류의 값이 줄어들고 있음을 확인할 수 있었다.

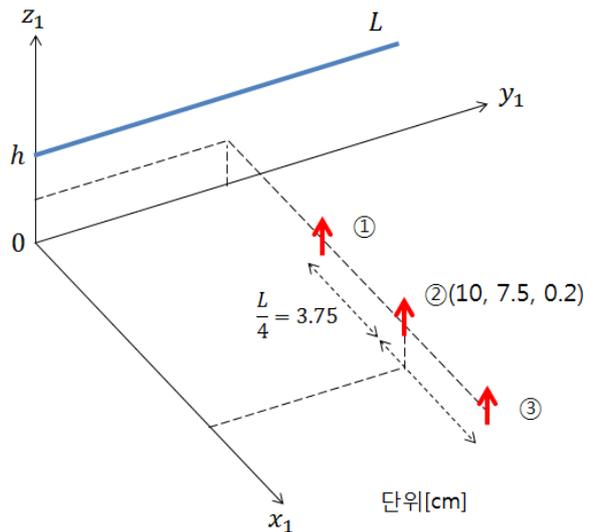


그림 6. 다이폴의 x축 위치를 변경시키는 경우
Fig. 6. Case of change of the location of the dipole antenna along the x-axis.

3-3 z축에 따른 전기 다이폴의 영향

그림 8에서 보이듯이 첫 번째 전기 다이폴 (10 cm, $L/2$, $h/2$)에 대해 z축 방향으로 $L/4$ 만큼 간격을 두고, 두 번째와 세 번째 다이폴의 위치를 변경하였다. 이 경우에도 앞선 결과와 마찬가지로 그림 9에서 알 수 있듯이 거리가 점점 멀어짐에 따라 전송선로에 유기되는 전류 값이 작

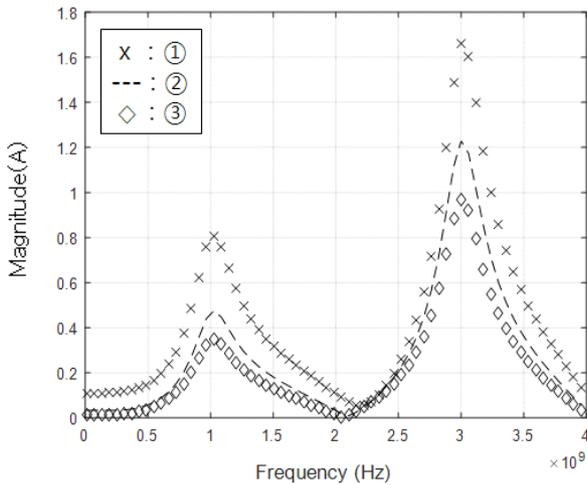


그림 7. x축 거리를 변경시켰을 때의 전송선로에 유도된 전류

Fig. 7. Induced current to transmission line when the location of the dipole antenna is changed along the x-axis.

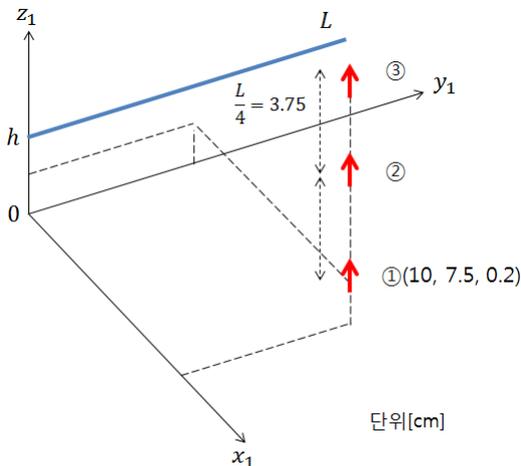


그림 8. 다이폴의 z축 위치를 변경시키는 경우
Fig. 8. Case of change of the location of the dipole antenna along the z-axis.

아지고 있음이 확인이 가능하다.

3-4 y축에 따른 전기 다이폴의 영향

다음으로는 그림 10과 같이 첫 번째 전기 다이폴 지점 (10 cm, $L/2$, $h/2$)으로부터 -y 방향으로 $L/2$ 간격으로 전기 다이폴의 위치를 변경하였다. 결과는 그림 11에서 확

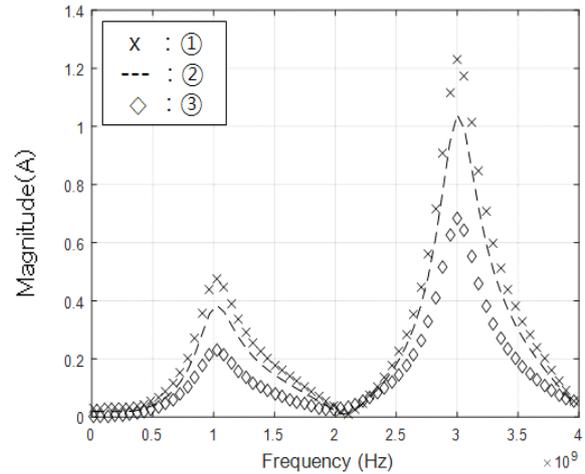


그림 9. z축 거리를 변경시켰을 때의 전송선로에 유도된 전류

Fig. 9. Induced current to transmission line when the location of the dipole antenna is changed along the z-axis.

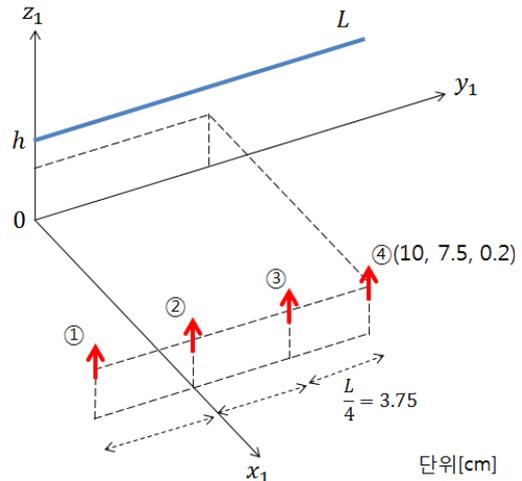


그림 10. 다이폴의 y축 위치를 변경시키는 경우
Fig. 10. Case of change of the location of the dipole antenna along the y-axis.

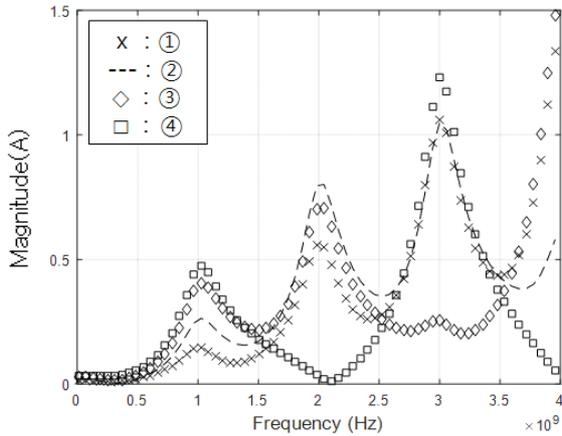


그림 11. y축 거리를 변경시켰을 때의 전송선로로 유도된 전류

Fig. 11. Induced current to transmission line when the location of the dipole antenna is changed along the y-axis.

인할 수 있다. 일반적으로 전송선 길이의 $\lambda/2$ 에 해당되는 기본 주파수인 1 GHz에서 공진하며, 그에 배가 되는 주파수에서 또한 공진하고 있음을 확인할 수 있다. 단, 앞선 두 절에서처럼 전송선의 길이 L 에 정확히 반에 위치하고 있는 경우에는 짝수 배에 해당되는 주파수에서는 공진하고 있지 않음을 확인할 수 있었다. 또한, 3 GHz에서는 3번 위치에서 다른 위치의 전기 다이폴에 비해 공진이 약함을 확인할 수 있었다. 이러한 현상들은 전송선에 전기장 혹은 자기장에 의해서 유기되는 전압 및 전류에 방향과 크기에 의해서 결정되는데, 특히 자기장의 경우에는 전기 다이폴이 위치한 y 지점을 중심으로 전송선로에 입사되는 자기장의 벡터 방향이 다르기 때문에 서로 다른 벡터 방향을 갖는 자기장으로부터 유기된 전압은 그 부호가 서로 반대가 되어 상쇄되는 경우도 발생하기 때문에 앞선 결과에서처럼 단순한 결과를 보이지는 않았다.

3.5 전기 다이폴과 전송선로가 이루는 각도에 따른 영향

다음으로는 그림 12와 같이 전송선로를 회전시켰을 때의 모습이다. 전송선로를 회전시킬 때, 각도에 따라 전송선로의 영향을 확인하였다. 전기 다이폴을 기준으로 두었

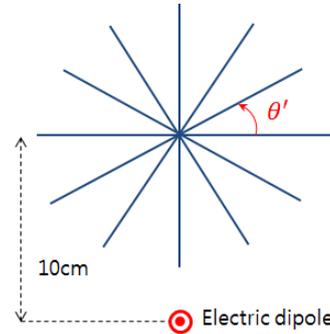


그림 12. 전송선로를 회전시키는 경우
Fig. 12. Case of rotation of the transmission line.

을 때 전송선로와의 각도가 각각 0° , 30° , 60° , 90° 일 때 전송선로로 유기되는 전류를 조사하였다. 그 결과는 그림 13에서 확인할 수 있다. 각도에 따른 전송선로에 유기되는 전류 또한 이전 절에서 설명하였듯이 전송선로에 입사되는 전기장과 자기장의 방향과 각도에 따라 유도 전압과 유도 전류가 달라질 것이다. 전체적으로는 전송선로와 전기다이폴 사이의 각도가 90° 인 경우에 전기 다이폴 소스와 거리가 상대적으로 가까워 가장 크게 유도 전류가 유기되고 있음을 확인할 수 있었으며, 반대로 30° , 60° , 90° 는 전기적 다이폴과의 상대적 위치에 따른 유도 전류 및 유도 전압에 의한 차이가 존재하며, 전체적인 경향은 비슷함을 확인할 수 있었다.

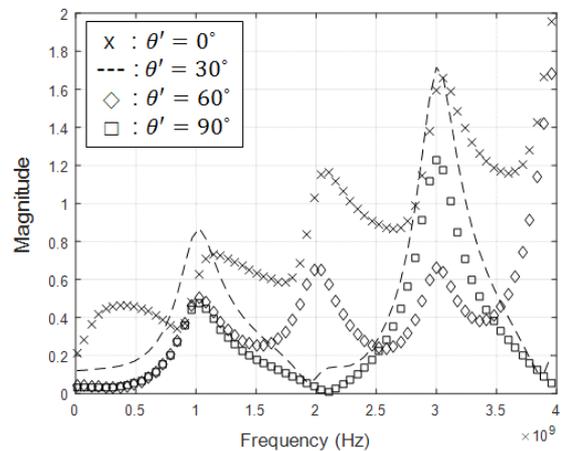


그림 13. 전송선로를 회전시켰을 때 유도되는 전류
Fig. 13. Induced current to the transmission line when that is rotated.

IV. 결 론

본 논문에서는 노이즈원인 안테나에서의 불요 전자파가 전송선로에 유기되었을 때 유도되는 전류와 전압을 구하기 위하여 이론 해석을 실시하였으며, 검증을 위하여 상용 전자기 해석 툴을 이용하여 그 결과를 비교하였다. 이론식은 전기 다이폴과 전송선로의 전자기 결합 현상을 잘 예측하고 있음을 확인하였으며, 이 검증된 이론식을 이용하여 전송선로에 대하여 전기 다이폴을 다양한 곳에 위치하여 전송선로에 유기되는 전자기 결합을 조사하였다. 이론식을 바탕으로 하여 다양하게 조사된 전자기 결합 결과에 대하여 분석하였으며, 그 결과들을 제시하였다. 본 논문에서 사용된 이론 해석은 안테나에서 발생하는 전자파에 의한 전송 선로위의 노이즈 해석에 응용될 수 있을 것이며, 긴 시뮬레이션 시간을 요구하는 수치해석 기법에 비하여 빠르게 그 결과를 예측하는데 도움이 될 것이다. 향후에 다중전송선로에 대한 전기 다이폴의 결합 현상에 대해서도 그 이론을 확장할 것이다.

References

- [1] Qingxi Yang, Qingguo Wang, Xing Zhou, Min Zhao, and Erwei Cheng, "Equivalent circuit of external electromagnetic fields coupling to a transmission line above a lossy ground", *IEICE Electronics Express*, pp. 1-7, Jun. 2015.
- [2] Piero Triverio, Stefano Grivet-Talocia, Michelangelo Bandinu, and Flavio G. Canavero, "Geometrically parameterized circuit models of printed circuit board traces inclusive of antenna coupling", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 52, no. 2, pp. 471-478, May 2010.
- [3] Martin A. Uman, D. Kenneth Mclain, and E. Philip Krider, "The electromagnetic radiation from a finite antenna", *American Journal of Physics*, vol. 43, no. 1, pp. 33-38, Jan. 1975.
- [4] Mahmoud Omid, Yoshio Kami, and Masashi Hayakawa, "Field coupling to nonuniform and uniform transmission lines", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 39, no. 3, pp. 201-211, Aug. 1997.
- [5] Albert A. Smith, Jr, "A more convenient form of the equations for the response of a transmission line excited by nonuniform fields", *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, vol. 3, EMC-15, pp. 151-152, Aug. 1973.
- [6] Soojung Ryu, Jiwoon Jeon, Kwangho Kim, Jeongmin Jo, Seungbae Lee, So-young Kim, and Wansoo Nah, "Modeling of noise power disturbance from antenna to transmission line system", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 11, pp. 1172-1182, Nov. 2014.
- [7] Heekwon Lee, Soojung Ryu, Seungbae Lee, SoYoung Kim, and Wansoo Nah, "Electromagnetic field interference on transmission line due to on-board antenna", *International Journal of Antenna and Propagation*, Apr. 2015.
- [8] C. D. Talyor, R. S. Satterwhite, and C. W. Harrison, "The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. AP-13, no. 6, pp. 987-989, Nov. 1967.
- [9] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory : Analysis and Design*, Wiley, 2005.

김 은 하



1993년 2월: 서울과학기술대학교 전자공학과 (공학사)

2004년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)

1990년 2월~1993년 7월: 국립공업기술원 연구원

1994년 2월~1996년 4월: (주)마마 연구원

1996년 6월~현재: 자동차부품연구원 전자기파연구센터 센터장

1997년 2월~현재: CISPR D 자동차 분과, ISO TC22 WG3 전문위원

[주 관심분야] 초고주파 회로설계, EMI/EMC

이 재 현



1978년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)

1985년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)

1993년 2월~2001년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)

1991년 2월~2001년 2월: 한국전자통신연구원 책임연구원

2001년 2월~현재: 충남대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] PCB에서의 EMI/EMC, 위성통신시스템 및 RF 부품, Magnetostatic Wave Device