

# 접지면 위 도선에 대한 고고도 전자기 펄스 신호의 결합 특성 분석

## Analysis of Characteristics of the HEMP Coupling Signal for a Line Over Ground

이진호\*  
Jin-Ho Lee

권준혁\*  
Joon-Hyuck Kwon

신규범\*  
Guy-Beom Shin

강래충\*  
Rae-Choong Kang

### Abstract

Since HEMP has the very short rising time and propagates widely with several tens of kV/m, it threatens most of systems in its cover range. Therefore, it is important to research coupling mechanism into systems and establish countermeasures for the HEMP to protect systems effectively. This paper analyzed characteristics and trends of currents to be induced at the load of a line which is located over ground with different conditions such as polarization, incidence angle, line length and height etc. We applied double exponential waveform as the HEMP shape and used BLT method to analyze the coupling route into the line. Also, we compared the simulation data of chain matrix modeling to verify reliability of BLT modeling. In the result, two data is almost agreed.

Keywords : High-altitude ElectroMagnetic Pulse(HEMP, 전자기펄스), Baum-Liu-Tesche(BLT, 전송선 이론의 일종)

### 1. 서론

고고도 핵 폭발, 낙뢰, 전자 폭탄 등에서 발생하는 전자기 펄스(EMP)는 매우 짧은 상승시간과 수십 kV/m의 침투치를 가지고 있기 때문에 이에 대한 방호장치가 미리 준비되지 않은 대상 무기체계는 치명적인 손상을 피할 수 없다. 무기체계의 전자기 펄스 방호를 위해서는 방호장치의 설계 이전에 방호하고자 하는 전자기 펄스의 특성과 침투 경로의 결합 메커니즘이 우

선 분석되어야 한다. 대상 무기체계에 대한 EMP 영향성은 전자기 펄스의 파형 형태, 상승 시간, 최고치, 펄스폭, 하강 시간, 펄스 반복율 등에 따라 달라지지만<sup>[1]</sup>, 분석 메커니즘은 그 해석 알고리즘이 동일하기 때문에 대상 무기체계에 대한 결합 특성 분석이 한번 이루어지면, 임의 EMP 파형의 결합 신호 특성은 쉽게 예측할 수 있다.

결합 메커니즘 분석은 시간영역과 주파수 영역에서 수행할 수 있다. 시간 영역 분석인 경우 시간 영역에서 직접 분석할 수 있다는 장점이 있으나 일부 구조물에 대한 해석은 계산식이 주파수 영역에 비해 복잡해져서 계산시간이 오래 걸릴 수도 있다. 또한, 케이블에 대한 결합 메커니즘 분석은 수치해석 방법과 전송선

† 2010년 8월 6일 접수~2010년 11월 19일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 이진호(jhlee75@add.re.kr)

이론 해석 방법으로 나눌 수 있다. 수치해석 방법의 경우에는 케이블 굴곡과 같은 복잡한 구조형태에 대해 분석이 가능하다는 장점이 있으나, 계산시간이 전송선에 비해 상당히 느리고 유전율이 있는 경우 해석 방정식이 복잡해진다. 하지만, 전송선 이론 분석방법은 굴곡, 꺾임 등과 같은 형이상학적인 케이블의 분석은 어려우나 계산 시간이 빠르고 모델링도 간단히 작업 가능하다는 장점이 있다. 본 논문에서는 이중지수 함수(Double Exponential) 형태를 가진 고고도 전자기 펄스(HEMP)가 접지면 위에 위치하고 있는 도선에 입사할 때 입사각, 도선의 높이, 도전율 등의 조건이 변화됨에 따라 도선의 부하단에서 결합되는 신호의 특성을 분석하였다. 해석 이론으로는 주파수 영역에서의 전송선 이론인 BLT 방정식을 적용하였다<sup>[2]</sup>. BLT 모델링 검증은 ABCD 파라미터를 이용한 Chain matrix 결과<sup>[2,3]</sup>와 비교하였고 그 결과 두 분석결과들은 거의 일치함을 확인하였다.

## 2. 고고도 전자기 펄스 표현(HEMP)

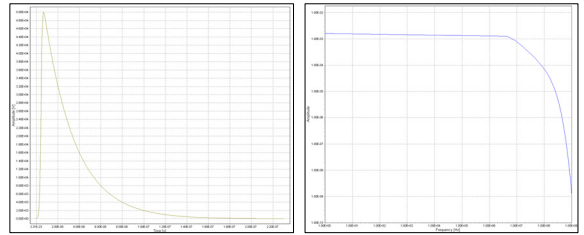
미 군사규격 MIL-STD-464A 및 국제 전자기술위원회 규격 IEC-61000-2-9에서는 고고도(지상 약 30km 이상의 고도) 핵 폭발 시 지상에서 관측되는 전자기 펄스를 초기, 중기, 말기로 구분하고 있으며, 그 중 상승시간이 가장 빠르고 전계 세기가 가장 큰 초기 HEMP 파형을 이중지수함수로 정형화하였다.

$$E_i(t) = E_0 \times (e^{-at} - e^{-bt}) \quad [V/m] \quad (1)$$

여기서,  $E_0 = E_{01} \times k_{01} [V/m]$ ,  $E_{01} = 5,000$ ,  $k_{01} = 1.3$ ,  
 $a = 4 \times 10^7 [s^{-1}]$ ,  $b = 6 \times 10^8 [s^{-1}]$

식 (1)의 Fourier Transform 변형식은 (2)와 같이 표현된다. Fig. 1은 식 (1)과 (2)에 대한 파형을 그래프로 나타낸 것이며, 시간영역(a)에서는 침두치 50kV/m, 상승시간 2.47ns, 펄스폭 23ns을 가지는 단 펄스 형태로 나타나며, 주파수 영역(b)에서는 DC 성분을 포함하고 100MHz 이상에서는 펄스 크기가 급격히 감소함을 확인할 수 있었다.

$$E_i(\omega) = \int_0^{\infty} E_i(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$



(a) 시간 영역 (b) 주파수 영역

Fig. 1. HEMP 펄스 표현

## 3. 접지면 위 도선의 HEMP 결합신호 분석 이론

본 논문에서는 주파수 영역에서 BLT 알고리즘을 적용한 후 시간 영역에서의 해석을 위해 Inverse Fourier Transform을 통해 HEMP에 의한 도선 내 결합신호를 분석하였다. Fig. 2는 xy 평면에 수직인 HEMP 입사면에 대한 전계 성분을  $\alpha$ 의 각도로 표현하고 있고,  $\alpha = 0^\circ$ 일 때는 수직편파,  $\alpha = 90^\circ$ 일 때는 수평편파라고 정의하였다. Fig. 3은 접지면 위의 도선에 입사되는 HEMP 파형을 도시하고 있다. 반지름 a, 길이 L, 접지면으로부터 높이 d를 가지는 도선은 x축상에 위치하고 있으며, HEMP은 -x 축을 기준으로  $\phi_i$ 의 각도와 xy 평면을 기준으로  $\theta_i$ 의 각도로 입사한다고 가정하였다.

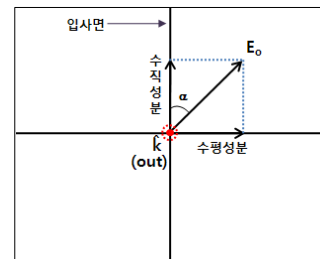


Fig. 2. HEMP의 전계성분

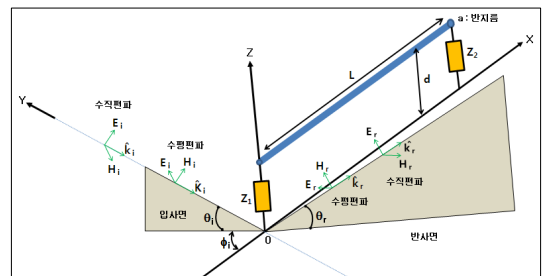


Fig. 3. HEMP 및 도선에 대한 표현

가. 입사 및 반사파에 대한 HEMP 표현식

도선에 전달되는 HEMP 신호는 자유공간에서의 입사파와 접지면에서의 반사파의 합으로 나타나며 그에 대한 전계를 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\vec{E}_i(\omega, \vec{r}) = \vec{E}_i(\omega, \vec{r}) + \vec{E}_r(\omega, \vec{r}) \quad (3)$$

식 (3)에 대한 입사파는 식 (4)와 같다.

$$\vec{E}_i(\omega, \vec{r}) = E(\omega) \vec{P}_i e^{-jk_i \cdot \vec{r}} \quad (4)$$

여기서,  $E(\omega)$ 는 전계크기,  $\vec{P}$ 는 편파벡터,  $\vec{k}$ 는 전파벡터,  $\vec{r}$ 은 위치벡터이다

또한, 입사파는 수직편파와 수평편파의 합으로 이루어지며, 수평편파에 대한 전계크기와 편파벡터는 식 (5), (6)으로 표현되고

$$E_H(\omega) = E_0 \sin \alpha \quad (5)$$

$$\vec{P}_{iH} = (\hat{x} \sin \phi_i, \hat{y} \cos \phi_i, 0) \quad (6)$$

수직편파에 대해서는 식 (7), (8)로 표현된다.

$$E_V(\omega) = E_0 \cos \alpha \quad (7)$$

$$\vec{P}_{iV} = (\hat{x} \sin \theta_i \cos \phi_i, -\hat{y} \sin \theta_i \sin \phi_i, \hat{z} \cos \theta_i) \quad (8)$$

입사파의 전파벡터  $\vec{k}_i$ 는  $k_0 \hat{k}_i$ 로 표시되며, 그 성분들은 식 (8), (9)로 나타난다.

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (9)$$

$$\hat{k}_i = (\hat{x} \cos \theta_i \cos \phi_i, -\hat{y} \cos \theta_i \sin \phi_i, -\hat{z} \sin \theta_i) \quad (10)$$

위치 벡터  $\vec{r}$ 은 식 (11)과 같다.

$$\vec{r} = (\hat{x}x, \hat{y}y, \hat{z}z) \quad (11)$$

반사파에 대한 표현식은 식 (12)로 정의된다.

$$\vec{E}_r(\omega, \vec{r}) = E(\omega) \Gamma \vec{P}_r e^{-jk_r \cdot \vec{r}} \quad (12)$$

$\Gamma$ 는 반사 계수이며, 수평 및 수직 편파에 대한 식은 다음과 같다.

$$\Gamma_H = \frac{\sin \theta_r - [\epsilon_r (1 + \sigma_g / j\omega \epsilon_r \epsilon_0) - \cos^2 \theta_r]^{1/2}}{\sin \theta_r + [\epsilon_r (1 + \sigma_g / j\omega \epsilon_r \epsilon_0) - \cos^2 \theta_r]^{1/2}} \quad (13)$$

$$\Gamma_V = \frac{\epsilon_r (1 + \sigma_g / j\omega \epsilon_r \epsilon_0) \sin \theta_r - [\epsilon_r (1 + \sigma_g / j\omega \epsilon_r \epsilon_0) - \cos^2 \theta_r]^{1/2}}{\epsilon_r (1 + \sigma_g / j\omega \epsilon_r \epsilon_0) \sin \theta_r + [\epsilon_r (1 + \sigma_g / j\omega \epsilon_r \epsilon_0) - \cos^2 \theta_r]^{1/2}} \quad (14)$$

여기서, Snell의 법칙에 의해  $\theta_r = \theta_i$ 이고,  $\sigma_g$ 는 접지면의 도전율이다.

편파벡터  $P_r$ 은 식 (15), (16)처럼 나타낼 수 있다.

$$\vec{P}_{rH} = (\hat{x} \sin \phi_r, \hat{y} \cos \phi_r, 0) \quad (15)$$

$$\vec{P}_{rV} = (-\hat{x} \sin \theta_r \cos \phi_r, \hat{y} \sin \theta_r \sin \phi_r, \hat{z} \cos \theta_r) \quad (16)$$

전파벡터  $\vec{k}_r = k_0 \hat{k}_r$ 이고,  $\hat{k}_r$ 은 식 (16)과 같다.

$$\hat{k}_r = (\hat{x} \cos \theta_r \cos \phi_r, -\hat{y} \cos \theta_r \sin \phi_r, \hat{z} \sin \theta_r) \quad (17)$$

자유공간상의 HEMP 신호에 대한 자계는 식 (18)의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\vec{H}_i(\omega, \vec{r}) = \frac{(\hat{k}_i \times \vec{E}_i(\omega, \vec{r})) + (\hat{k}_r \times \vec{E}_r(\omega, \vec{r}))}{\eta_0} \quad (18)$$

여기서,  $\eta_0$ 는 377 $\Omega$ 이다.

나. 접지면 위 도선에 대한 전송선 이론

접지면과 도선 사이의 전자파 결합 현상은 전송선으로 등가모델을 설계함으로써 해석할 수 있다. 다양한 전송선 이론 중 본 논문에서는 BLT 해석법을 적용하여 케이블에 결합되는 신호를 분석하였고, 분석 결과의 검증을 위하여 Chain Matrix의 분석결과와 비교하였다.

1) BLT 이론

Fig. 3에 대해 BLT 이론을 이용하면 Fig. 4와 같이 모델링을 할 수 있다. 전송선 내부에는 HEMP 입사파와 반사파에 의해 전자계 현상이 발생하게 되고, Z 성

분의 전계와  $-Y$  성분의 자계가 존재하며, 이것들은 단위길이( $\Delta x$ )에 대한 분산된 전류원( $I_s$ )과 전압원( $V_s$ )을 만들어 낸다<sup>[2]</sup>.

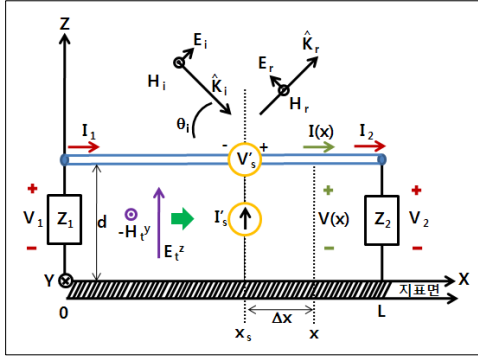


Fig. 4. 접지면 위 도선에 대한 BLT 모델

$$V'_s = -j\omega\mu_0 \int_0^d H_t^y(x, 0, z) dz \quad (19)$$

$$I'_s = -j\omega C' \int_0^d E_t^z(x, 0, z) dz \quad (20)$$

전송선의 특성임피던스( $Z_c$ )는 단위길이당 인덕턴스( $L'$ )와 커패시턴스( $C'$ )의 비로 표현된다.

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (21)$$

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{d}{a} \quad (22)$$

$$C' = \frac{\pi\epsilon}{\ln(d/a)} \quad (a \ll d) \quad (23)$$

임의의 위치  $x$  에서 해석하고자 하는 전압, 전류는 분산 전압원, 전류원과의 상대적 위치에 따라 구분하여 식 (24)~식 (27)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x > x_s \text{ 일 때,}$$

$$V(x) = \frac{e^{-\gamma x} + \rho_{L2} e^{\gamma(x-2L)}}{2(1 - \rho_{L1}\rho_{L2} e^{-2\gamma L})} [(e^{\gamma x_s} - \rho_{L1} e^{-\gamma x_s}) V'_s + (e^{\gamma x_s} + \rho_{L1} e^{-\gamma x_s}) Z_c I'_s] \quad (24)$$

$$I(x) = \frac{e^{-\gamma x} - \rho_{L2} e^{\gamma(x-2L)}}{2Z_c(1 - \rho_{L1}\rho_{L2} e^{-2\gamma L})} [(e^{\gamma x_s} - \rho_{L1} e^{-\gamma x_s}) V'_s + (e^{\gamma x_s} + \rho_{L1} e^{-\gamma x_s}) Z_c I'_s] \quad (25)$$

$x < x_s$  일 때,

$$V(x) = \frac{e^{\gamma(x-L)} + \rho_{L1} e^{-\gamma(x+L)}}{2(1 - \rho_{L1}\rho_{L2} e^{-2\gamma L})} [-e^{\gamma(L-x_s)} - \rho_{L2} e^{-\gamma(L-x_s)}] V'_s + (e^{\gamma(L-x_s)} + \rho_{L2} e^{-\gamma(L-x_s)}) Z_c I'_s \quad (26)$$

$$I(x) = \frac{e^{\gamma(x-L)} - \rho_{L1} e^{-\gamma(x+L)}}{2Z_c(1 - \rho_{L1}\rho_{L2} e^{-2\gamma L})} [-e^{\gamma(L-x_s)} - \rho_{L2} e^{-\gamma(L-x_s)}] V'_s + (e^{\gamma(L-x_s)} + \rho_{L2} e^{-\gamma(L-x_s)}) Z_c I'_s \quad (27)$$

$\rho_{L1}$ ,  $\rho_{L2}$ 는 해석하고자 하는  $V(x)$ ,  $I(x)$  위치에 있는 부하에 대한 반사계수이다.

$$\rho_{L1} = \frac{Z_{L1} - Z_c}{Z_{L1} + Z_c}, \quad \rho_{L2} = \frac{Z_{L2} - Z_c}{Z_{L2} + Z_c} \quad (28)$$

$Z_1$ ,  $Z_2$ 에 유기되는 전압, 전류 응답은 식 (26), (27)에는  $x=0$ , 식 (24), (25)에는  $x=L$ 을 대입함으로써 해석할 수 있다. 이 때의  $\rho_{L1}$ ,  $\rho_{L2}$ 는 식 (28)과 같다.

$$\rho_{L1} = \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c}, \quad \rho_{L2} = \frac{Z_2 - Z_c}{Z_2 + Z_c} \quad (29)$$

## 2) Chain Matrix 이론

Fig. 3에 대해 Chain Matrix 이론을 적용하면 Fig. 5와 같이 모델링 할 수 있고,  $\Delta x$  길이의 전송선에 대해서는 Chain Matrix  $[C]$ 로 표현할 수 있다. Chain Matrix 해석법에서는  $N+1$ 개의 ABCD 파라미터, 양 부하단에 선의 전압, 전류 그리고  $\Delta x$  마다 위치하는  $N$ 개의 분산 전압원, 전류원들로 모델을 설계할 수 있고, 그 관계식은 식 (30)처럼 나타난다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = [C_1][C_2] \cdots [C_{N+1}] \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} + [C_1][C_2] \cdots [C_N] \begin{bmatrix} -V'_{sN} \\ -I'_{sN} \end{bmatrix} + \cdots + [C_1] \begin{bmatrix} -V'_{s1} \\ -I'_{s1} \end{bmatrix} \quad (30)$$

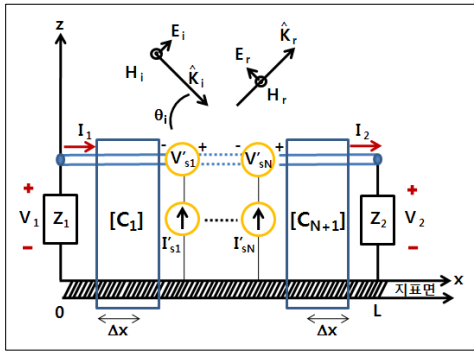


Fig. 5. 접지면 위 도선에 대한 Chain Matrix 모델

$\Delta x$  길이의 단일 전송선에 대한 ABCD 파라미터는 식 (31)과 같다.

$$[C] = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta\Delta x & jZ_c\sin\beta\Delta x \\ j\frac{1}{Z_c}\sin\beta\Delta x & \cos\beta\Delta x \end{bmatrix} \quad (31)$$

만약  $\Delta x$  마다 표현되는 전송선이 동일한 구조(유전율, 높이 등)라면  $\Delta x$  각 길이마다  $\beta, Z_c$ 가 같으므로  $[C_1] = [C_2] = \dots = [C_{N+1}]$ 을 알 수 있다.

식 (30), (31)은 식 (32), (33)으로 정의하면,

$$[C_1][C_2] \dots [C_{N+1}] = [C]_{N+1} = \begin{bmatrix} A^T & B^T \\ C^T & D^T \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$[C]_N \begin{bmatrix} -V'_{sN} \\ -I'_{sN} \end{bmatrix} + \dots + [C]_1 \begin{bmatrix} -V'_{s1} \\ -I'_{s1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_s \\ I'_s \end{bmatrix} \quad (33)$$

식 (30)은 식 (34)처럼 간단히 정리된다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T & B^T \\ C^T & D^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V'_s \\ I'_s \end{bmatrix} \quad (34)$$

$Z_1, Z_2$ 에서의 전압, 전류 관계식은 다음과 같이 표현되고

$$\frac{V_1}{I_1} = -Z_1, \quad \frac{V_2}{I_2} = Z_2 \quad (35)$$

식 (35)를 식 (34)에 적용하면 식 (36)으로 유도할 수

있다.

$$I_2 = \frac{(-V'_s)^T + Z_1(-I'_s)^T}{A^T Z_2 + B^T + C^T Z_1 Z_2 + D^T Z_1} \quad (36)$$

식 (36)으로부터 유도된  $I_2$ 를 식 (35)에 대입하면  $V_2$ 를 구할 수 있고,  $V_2$ 와  $I_2$ 를 식 (34)에 대입하면  $V_1$ 과  $I_1$ 을 구할 수 있다.

#### 4. 도선의 HEMP 결합 신호 특성 분석

가. BLT 및 Chain matrix 결과 비교

Fig. 3에서 수직편파( $\alpha = 0^\circ$ )를 갖는 HEMP가  $\phi_i = 0^\circ, \theta_i = 60^\circ$ 의 각도로 반지름( $a$ ) 0.15 cm, 길이( $L$ ) 30 m, 접지면(완전도체)으로부터 높이( $d$ ) 1m이고  $Z_1, Z_2$ 의 값이 100Ω인 도선에 입사할 때 부하단  $Z_2$ 에서 결합되는 전류 특성을 Fig. 6에 도시하였고 모델링의 검증을 위해 Inverse Fourier Transformation을 적용한 BLT와 Chain Matrix 결과를 비교하였다. 두 분석결과는 거의 일치하였으며 최고 약 180(A)의 전류가 생성되었다.

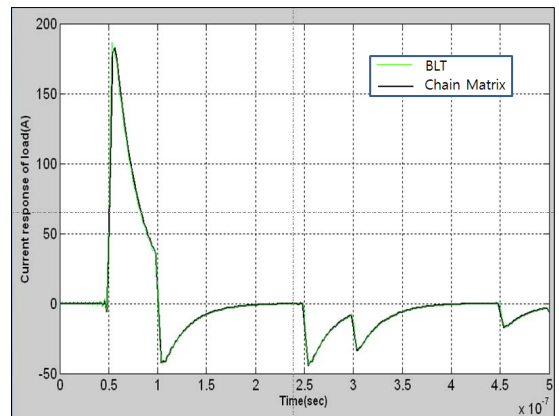
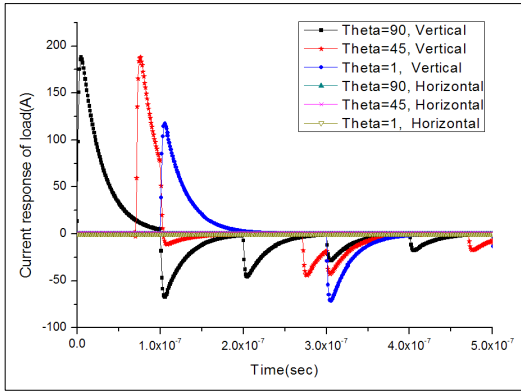


Fig. 6.  $Z_2$ 에서의 BLT 및 Chain matrix 전류 응답

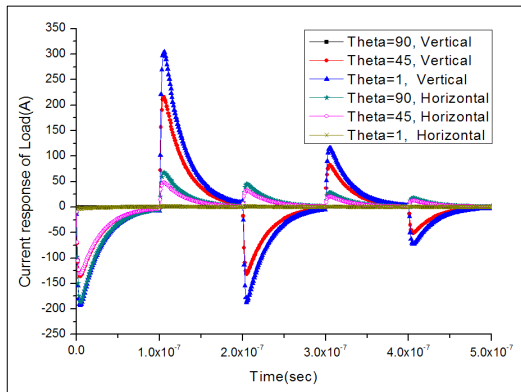
나. 금속면 위 도선의 결합신호 분석

도선이 무기체계나 시설물에 내부에 위치해 있는 경우 접지면은 금속면과 지표면으로 구분할 수 있으며 본 논문에서는 위의 두가지 경우를 모두 고려하였다. 금속면 위의 도선에 대한 해석을 위해 금속면을 PEC로 가정하였다. Fig. 7은 HEMP 입사각 변화에 따른 부

하단( $Z_2$ )에서의 결합 전류 특성을 비교하고 있다. 이때,  $-x$ 축을 기준으로 한 HEMP 입사각  $\phi_i$ 는  $0^\circ$ 와  $90^\circ$ 로 두었다.



(a)  $\phi_i = 0^\circ$



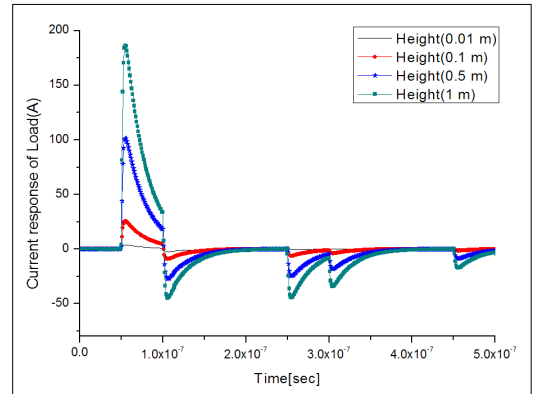
(b)  $\phi_i = 90^\circ$

Fig. 7. 입사각( $\phi_i$ ) 변화에 따른  $Z_2$ 에서의 결합 전류 특성

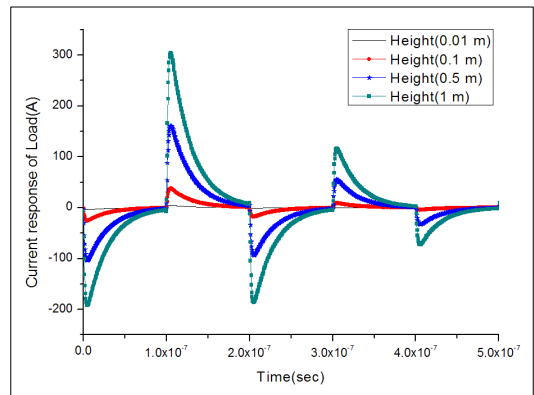
Fig. 7의 (a)는 수직 편파가 케이블에 평행하게 입사할 때( $\theta_i = 90^\circ$ ) 가장 큰 전류가 생성되었고, 일정한 입사 각도 이하에서는 급격하게 전류가 감소됨을 보여주었다. Fig. 7의 (b)는 HEMP 전계 성분이 전송선 내부의 전계성분과 일치할수록( $\theta_i = 1^\circ$ , Vertical) HEMP 자계성분이 전송선 내부의 자계성분이 일치할수록( $\theta_i = 90^\circ$ , Horizontal) 더 큰 전류가 생성됨을 보여주고 있으며, HEMP 전계 성분이 자계 성분보다 도선 내부에 더 큰 결합신호를 발생시킴을 알 수 있었다. 이것은 접지면이 PEC이고 접지면에 수직인 방향으로 전송선

의 전계 성분이 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, Fig. 7 (a), (b)로부터 수직편파를 갖는 HEMP가  $\phi_i = 90^\circ$ ,  $\theta_i = 1^\circ$ 의 각도에서 도선에 입사될 때  $Z_2$ 에 가장 큰 전류가 결합시킴을 확인 할 수 있었다.

도선의 높이 및 길이 변화에 따른 부하단( $Z_2$ )에서의 결합 신호 특성은 Fig. 8과 Fig. 9에 도시하였다.



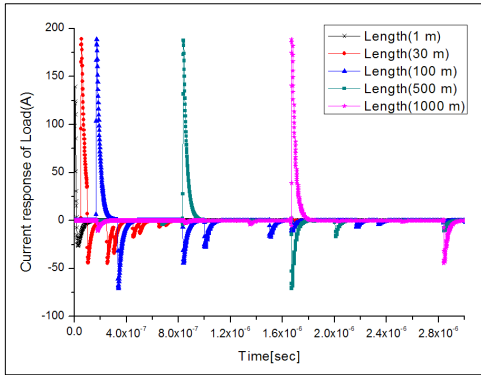
(a) 수직편파( $\phi_i = 0^\circ$ ,  $\theta_i = 60^\circ$ )



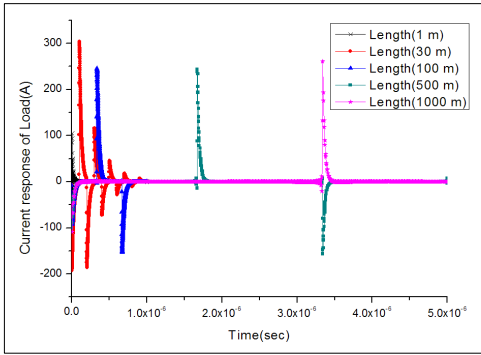
(b) 수평편파( $\phi_i = 90^\circ$ ,  $\theta_i = 1^\circ$ )

Fig. 8. 도선 높이 변화에 따른  $Z_2$ 에서의 결합 전류 특성

도선의 높이나 길이를 변화에 대해서는 수직편파와 수평편파에 모두 유사한 결합 신호 특성을 나타내었다. 금속면으로부터 도선 높이가 높을수록 큰 신호가 결합이 되었으며(Fig. 8), 도선의 길이 변화에 대해서는 약 30m 이상부터는 길이 변화와 관계없이 단 펄스 HEMP 신호(Fig. 1)는 일정한 크기로 결합되는 것으로 분석되었다(Fig. 9).



(a) 수직편파( $\phi_i = 0^\circ, \theta_i = 60^\circ$ )



(b) 수평편파( $\phi_i = 90^\circ, \theta_i = 1^\circ$ )

Fig. 9. 도선 길이 변화에 따른  $Z_2$ 에서의 결합 전류 특성

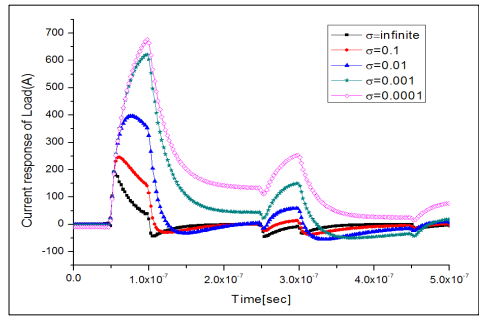
다. 지표면 위 도선의 결합신호 분석

시설물 내부나 쉘터 외부에 노출되어 있는 전원선 및 신호선에 대한 HEMP 결합신호를 분석하기 위해서는 접지면을 지표면으로 설정하고 지표면 매질의 종류마다 알맞은 특성 정보가 있어야만 한다. Table 1은 지표면의 매질에 따른 일반적인 저항값을 표기하고 있다<sup>[5]</sup>. 여기서, 유전율( $\epsilon_r$ )은 10, 투자율( $\mu_r$ )은 1로 두었다.

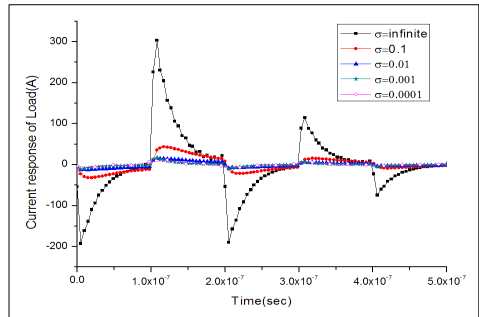
Table 1. 지표면 매질 및 저항

접지면 재질	저항(ohm/m)
Wet Organic soil	10
Moist soil	$10^2$
Dry Soil	$10^3$
Bed Rock	$10^4$

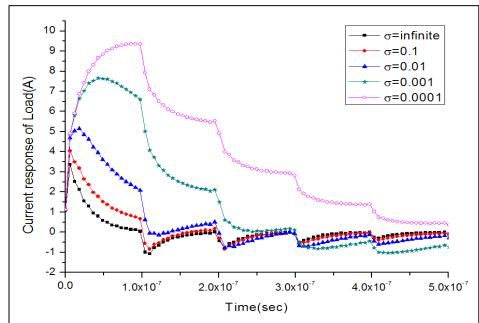
Table 1은 지표면에 습기가 없고 단단할수록 저항 값이 크게 나타남을 보여주고 있다. 저항과 도전율은 서로 반비례 하므로 본 논문에서는 저항 변화에 따른 도선 끝 부하단( $Z_2$ )에서의 HEMP 결합신호 특성을 분석하기 위해 도전율( $\sigma$ )을 변화시키면서 결합 신호 특성을 확인하였다. Fig. 10은 수직 및 수평편파의 HEMP 신호에 대하여 도전율 변화에 따른 결합 신호 특성을 도시하고 있다.



(a) 수직편파( $\phi_i = 0^\circ, \theta_i = 60^\circ$ )



(b) 수직편파( $\phi_i = 90^\circ, \theta_i = 1^\circ$ )

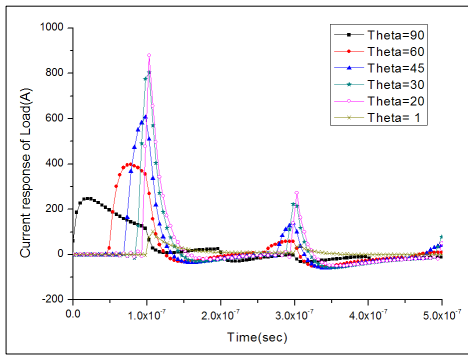


(c) 수평편파( $\phi_i = 90^\circ, \theta_i = 1^\circ$ )

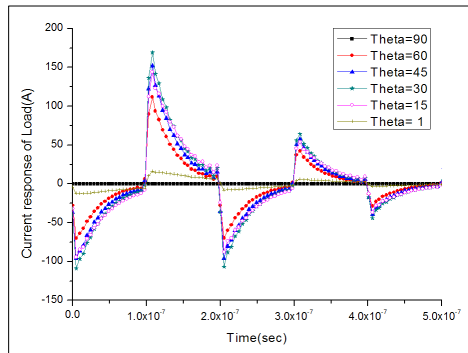
Fig. 10. 도전율( $\sigma$ ) 변화에 따른  $Z_2$ 에서의 결합 전류 특성

Fig. 10은 접지면이 금속이 아닌 지표면일 경우 도선율이 작아질수록, 즉 지표면이 Bed Rock에 가까워질수록 접지면에 대해 수직인 전계 성분의 크기는 작아지고(b) 수평인 전계 성분의 크기는 커지는 특성(c)을 보여주고 있고, 도선에 나란히 입사하는 HEMP 신호(a)가 도선에 수직으로 입사하는 HEMP 신호(b)보다 훨씬 크게 결합됨을 나타내고 있다.

HEMP 입사각도에 따른 결합 신호 특성을 분석하기 위해 Fig. 11은 지표면을 Moist Soil로 가정하였고 큰 결합신호를 생성하는 것으로 분석된 수직편파만을 적용하였다. Fig. 11에 따르면  $\phi_i = 0^\circ$ 에 대해서는  $\theta_i$ 가 약  $20^\circ$  부근에서,  $\phi_i = 90^\circ$ 에 대해서는  $\theta_i$ 가 약  $30^\circ$  부근에서 가장 큰 신호가 결합되는 것으로 분석되었다.



(a)  $\phi_i = 0^\circ$ (수직편파),  $\sigma = 0.01$



(a)  $\phi_i = 90^\circ$ (수직편파),  $\sigma = 0.01$

Fig. 11. 입사각( $\theta_i$ )에 대한  $Z_2$ 에서의 결합신호 특성

## 5. 결론

본 논문은 금속면 및 지표면상에 놓여있는 도선에 대한 HEMP 결합 특성을 분석하였다. 분석 모델로는 BLT 모델을 이용하였고 검증을 위해 Chain Matrix 모델과 비교하였으며, 두 모델에 대한 분석 결과는 거의 일치하였다. 그리고, 검증된 BLT 모델로부터 다양한 환경 조건에 따른 접지면 위 도선에 대한 HEMP 결합 신호를 분석하였다. HEMP 편파 변화에 대해서는 수직 편파가 수평편파보다 더 크게 결합되었고 접지면 변화에 따른 결합 신호 분석에 있어서는 금속면일 경우에는 입사각이  $\phi_i = 90^\circ$ ,  $\theta_i = 1^\circ$ 인 수직편파 HEMP 신호가 가장 큰 신호 특성을 보였으며, 지표면( $\sigma = 0.01$ )일 경우에는 입사각이  $\phi_i = 0^\circ$ ,  $\theta_i = 20^\circ$ 에서 가장 많이 결합되었다. 도선의 위치 변화와 관련해서는 접지면으로부터 도선의 높이가 높을수록 HEMP 결합 영향이 큰 것으로 분석되었으나 도선의 길이 변화에 대해서는 30m까지는 도선의 길이에 따라 결합 신호가 증가하나 30m 이상 길이면 경우에는 길이에 관계없이 일정한 크기의 신호가 결합되었다.

## References

- [1] Colin R. Miller, "Electromagnetic Pulse Threats to U.S Expeditionary Opreations in 2010", Maxwell Airforce Base, Alblma, 2005.
- [2] Frederick M. Tesche, Michel V. Ianoz, Torbjorn Karlsson, "EMC Analysis Methods and Computational Models", Wiley & Sons, 1997.
- [3] David M. Pozar, "Microwave Engineering", Wiley & Sons, 1998.
- [4] MIL-STD-464A, "Electromagnetic Environmental Effects, Requirements for System", Department of Defense, 2002.
- [5] MIL-HDBK-419A, "Grounding, Bonding, and Shielding for Electronic Equipments and Facilities", Department of Defense, 1987.