

논문 2012-50-4-4

# 전력선 유도 환경에서의 지면 반사계 영향 분석

## ( Earth Reflection Effect Analysis in the Environment of Line Source Induction )

이 상 무\*

( Sangmu Lee )

### 요 약

전력선에 의한 전자유도 환경에서 가장 보편적 영향 요인이라 할 수 있는 대지의 유도전압 감쇠 효과에 대하여 분석하였다. 전력선은 원통좌표계의 라인소스로 표현되고 계의 분석은 베셀함수와 웨이브 트랜스포메이션에 의한 이의 변형 적용을 통하여 해석된다. 라인소스로부터 방사된 전자계는 지표면에서 반사되어 관측점의 피유도원 매체에 합성되는데 이것의 영향을 알기 위하여 본 논문에서는 베셀함수에 의한 지면 반사계수를 직접 구하여 산출하도록 적용하였다. 본 논문에서 설계된 통상의 유도 환경의 배치 관계에 따르면 지면반사에 의한 원천 유도원 전압과의 합성 효율은 유도전압을 감쇠시키는 차폐효과로서 60~70%정도의 범위를 나타내었다.

### Abstract

The earth reflection effect on the induced voltage by line source such as power line occurring induction interference is analyzed to scrutinize how much it would reduce the induced voltage. Using hankel transformation including bessel function, directly calculation formulae for extracting a reflection coefficient is a most important technical application in this paper since the reflection coefficient on the earth cannot be deduced by a general coefficient calculation formulae according to a plain wave. The electric field is utilized to transform the electromagnetic field into an induced voltage. The composed efficiency to a source induction voltage by an earth reflection is about a range of 60~70% for the axis constellation of each object like observation point, source position and other material parameters.

**Keywords** : electromagnetic field, induced voltage, reflection coefficient, hankel transformation, earth reflection

## I. 서 론

전력선에 의한 전자유도 장애의 환경에서 대지는 무한 반평면의 위치를 가지고 통성적 영향을 미치고 있다. 대지의 토양도 반도체적 도전율을 가지고 있어서 전자

파 유도 환경에서는 일종의 도체원으로서 작용한다.

J. R. Carson은 1900년대 초반에 그가 발표한 논문에서 상호인덕턴스의 개념을 도입하여 대지도전율에 의한 지면의 반사 특성이 고려되도록 유도전압 평가 방법을 제시하였다<sup>[1-2]</sup>.

본 논문에서는 칼슨이 적용하였던 개념과는 달리 전력선으로서의 무한 라인소스에 의한 전자계에 대하여 직접 지면으로부터의 반사계수를 계산하고 통신선이 위치할 목적점에서 소스에 의한 전계와 지면 반사에 의한 전계를 합성하여 소스만의 효과에 대한 영향력을 분석

\* 정회원, 한국전자통신연구원 (ETRI)

※ 본 연구는 방송통신위원회의 지원을 받는 방송통신 표준기술력향상사업의 연구결과로 수행되었음.  
접수일자: 2012년8월13일, 수정완료일: 2013년3월22일

하였다.

이를 위하여 베셀함수를 이용한 원통 좌표계에서 지면 반사계수를 직접 구한다. 이 반사계수를 통하여 설계된 좌표 평면에서의 지면 반사 기본 계수치를 산출하고 대지저항률의 변화에 따른 유도된 원천이 되는 전계의 영향력이 어떻게 변화하는가를 알아보고, 소스에 대한 목적점의 위치 관계에 따른 영향 특성 변화를 시뮬레이션하였으며 같은 방식에 의한 결과 특성과 비교하였다.

## II. 전력선에 의한 전자계 표현식

### 1. 베셀함수에 의한 라인소스의 표현

전력선은 계의 해석에서 라인소스(line source)로 묘사될 수 있다. 여기서는 무한대 길이의 가는 전선인 필라멘트로서 적용한다. 라인소스는 원형의 'z' 길이 방향에 대한 원통형 좌표계에 의하여 다루어지므로 전계는 식(1-a)로, 자계는 식(1-b)로 표현되어질 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$E_z = -I_s \frac{\beta^2}{4\omega\epsilon} H_0^{(2)}(\beta R) = E_0 B_i^e \quad (1-a)$$

$$H_\phi = -jI_s \frac{\beta}{4} H_1^{(2)}(\beta R) = H_0 B_i^h \quad (1-b)$$

이 식과 연관된 좌표 형상은 아래의 그림 1과 같다.

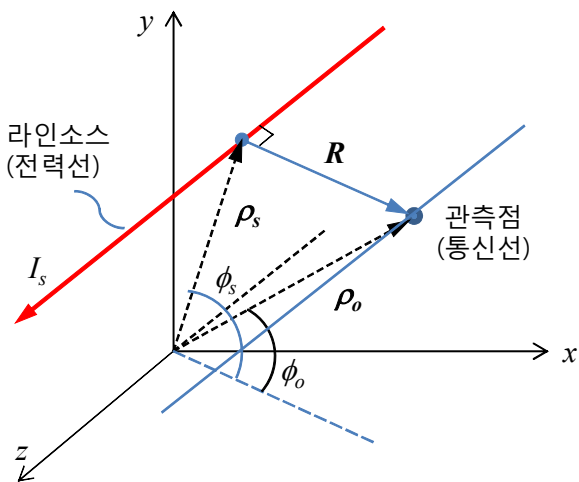


그림 1. 라인소스와 관측점의 원통 위치 좌표  
Fig. 1. Circular axis of line source and observation.

소스 함수에 쓰이는 벡터 방향 성분은 식(2)와 같다.

$$R = |\vec{\rho}_o - \vec{\rho}_s| \quad (2)$$

$$\vec{\rho}_s = \vec{a}_\rho \rho_s + \vec{a}_\phi \phi_s; \quad \vec{\rho}_o = \vec{a}_\rho \rho_o + \vec{a}_\phi \phi_o$$

### 2. Hankel Wave Transformation의 적용

식(1)의  $H_x^{(2)}$ 는 실제로는 원점 중심의 발산적 헨켈함수이어서 좌표 변화에 따라  $\rho_s$ 와  $\rho_o$ 의 대소 관계에 따른 원베셀함수( $J_n$ )을 활용한 급수 계수 함수로 변환하여 사용하여야 한다.

E-field에 대한 급수계수함수로의 변환은 다음 식(3)과 같다.

$$B_i^e = \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta\rho_o) H_n^{(2)}(\beta\rho_s) e^{jn(\phi_o-\phi_s)} & (\rho_o \leq \rho_s) \\ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta\rho_s) H_n^{(2)}(\beta\rho_o) e^{jn(\phi_o-\phi_s)} & (\rho_o \geq \rho_s) \end{cases} \quad (3)$$

자계에 대한 변환은  $B_i^e$ 를 미분한 것으로서 다음 식(4)와 같이 된다.

$$B_i^h = -\frac{1}{\beta} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H_n^{(2)}(\beta\rho_s) e^{jn(\phi_o-\phi_s)} \left[ \frac{n}{\rho_o} J_n(\beta\rho_o) - \beta J_{n+1}(\beta\rho_o) \right] \right\} \quad (\rho_o \leq \rho_s) \quad (4-a)$$

$$B_i^h = -\frac{1}{\beta} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta\rho_s) e^{jn(\phi_o-\phi_s)} \left[ \frac{n}{\rho_o} H_n^{(2)}(\beta\rho_o) - \beta H_{n+1}^{(2)}(\beta\rho_o) \right] \right\} \quad (\rho_o \geq \rho_s) \quad (4-b)$$

## III. 라인소스에 의한 지면 반사계수 산출식

평면파에 의한 일반적 계수 산출 방식으로는 라인소스의 특성이 반영되지 못하므로 베셀함수에 의한 직접적 방향성이 부여된 반사계수를 산출할 수 있는 정형식을 식(1)~(4)를 근간으로 하여 다음에 설명하는 과정에 따라 지면 위치를 경계조건으로 대입하여 풀어서 도출하였다.

지면 경계를 중심으로 반사된 계의 합성은 다음 식(5)와 같은 관계를 갖는다<sup>[4]</sup>.

$$\vec{E}_s + \vec{E}_r = \vec{E}_t \quad (5-a)$$

$$\vec{H}_s + \vec{H}_r = \vec{H}_t \quad (5-b)$$

위의 식(5)에서 첨자 ‘s’는 소스 필드를, ‘i’은 반사된 필드를, ‘t’는 반대편 매질, 즉 여기서는 대지쪽으로 투과된 필드를 각각 의미한다.

이것을 식(1)에서 베셀함수 표현을 이용한 약식의 형태 조합으로 다시 나타내면 식(6)과 같이 된다.

$$E_0 B_i^e + E_{0r} B_r^e = E_{0t} B_t^e \quad (6-a)$$

$$\frac{\eta_g}{\eta_a} (E_0 B_i^h + E_{0r} B_r^h) = E_{0t} B_t^h \quad (6-b)$$

$$\text{(㉞)} \quad \eta_a : \text{대지의 특성임피던스} (\eta_a = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}})$$

$\eta_g$  : 대지의 특성임피던스

여기서  $B_r^e$ 은 반사된 방향으로의 전계에 대한 헨켈 함수 표현식을 의미하고  $B_i^e$ 은 투과된 방향으로의 전계에 대한 헨켈함수 표현식을 의미하며, 마찬가지로 방향에 대하여 ‘h’첨자가 붙은 것은 자계에 대한 표현식을 의미한다. 또한,  $E_{0r}$ 은 원천 전계강도  $E_0$ 에 대하여 반사된 결과에 의한 전계의 세기를 의미하고  $E_{0t}$ 은 원천 전계강도  $E_0$ 에 대하여 투과된 결과에 의한 전계의 세기를 의미하는 것으로서 각각에는 다음의 식(7)과 같이 (7-a)에서는 반사계수  $\Gamma^b$ , (7-b)에서는 투과계수  $T^b$ 가 곱하여진 것이다.

$$E_{0r} = E_0 \Gamma^b \quad (7-a)$$

$$E_{0t} = E_0 T^b \quad (7-b)$$

여기에서 알고자 하는 것은 반사계수  $\Gamma^b$ 이므로 식(6)에서  $E_{0t}$ 을 소거하도록 연립방정식을 풀고 매질 인터페이스인 대지 표면에서 전계와 자계가 0으로 같아지는 경계조건을 적용하면 반사계수는 다음의 식(8)과 같이 도출된다.

$$-\Gamma^b = -\frac{\eta_a B_i^e B_t^h - \eta_g B_t^e B_i^h}{\eta_a B_r^e B_t^h - \eta_g B_t^e B_r^h} \quad (8)$$

지표면 경계에서는  $B_i^e$ 를 제외하고 나머지 헨켈 함수에 의한 방향성 성분인  $R$ 의 원천점과 목적점에 대한  $\rho$  벡터 성분들은 모두 동일해져서  $R$ 은 ‘0’이 되지만 앞의 파동 변형식 (4)와 (5)의 급수 전개식에 적용되어 경계조건의 값으로서 계산되어질 수 있다.

대지의 특성임피던스  $\eta_g$ 는 다음의 식(9)로 계산 적용되었다.

$$\eta_g = \sqrt{\frac{j\omega_0 \mu_g}{\sigma_e + j\omega_0 \epsilon_g}} \quad (9)$$

$\sigma_e$  : 대지도전율[S/m]

$\epsilon_g$  : 대지의 유전율[F/m]

$\mu_g$  : 대지의 투자율

$\omega_0$  : 상용전력주파수(60Hz)에서의 각주파수[rad/sec]

### III. 반사 합성 필드를 위한 좌표 설정

#### 1. 소스와 관측점의 좌표배치와 합성 관계

원천 유도에 대하여 지면 반사계의 영향력이 합성된 필드의 변화를 알아보기 위하여 그림 2와 같은 좌표 배치를 활용한다.

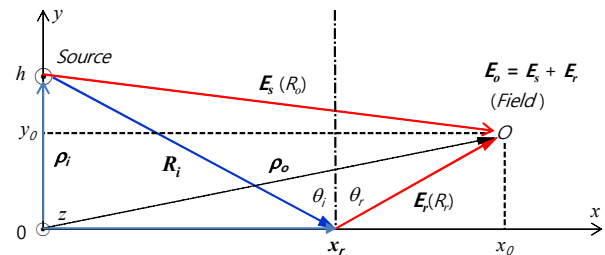


그림 2. 라인소스와 지면반사의 합성관계 좌표  
Fig. 2. Composition axis of line source and reflection

소스 좌표는 x축을 원점으로 하여 y축상의 높이  $h$ 에 놓여 있고 관측점(Observation Field)의 좌표는  $P_o(x_0, y_0)$ 로 하고 있다.

관측점에서의 합성 필드  $E_o$ 는 소스에 의한 필드  $E_s$ 와 지면반사에 의한 필드  $E_r$ 을 합한 것이다. 이후에 있어서 계의 유형은 최종적으로 통신선의 길이 방향으로 작용하는 유도전압을 직접 산출하는 것은  $E_z$  성분 전계에 의한 것이므로 E-field만을 다루도록 한다.

#### 3. 반사점의 계산

그림 2에서 반사점 ‘ $x_r$ ’은 다음과 같은 관계식으로부터 구해될 수 있다.

스넬의 반사법칙에 의하여 입사각  $\theta$ 와 반사각  $\theta_r$ 은 동일하므로 다음의 식(10), (11)의 관계가 성립한다.

$$\frac{x_r}{\rho_i} = \frac{x_o - x_r}{\rho_r} \quad (10)$$

$$\frac{x_r}{\sqrt{x_r^2 + h^2}} = \frac{x_o - x_r}{\sqrt{(x_o - x_r)^2 + y_o^2}} \quad (11)$$

이것을 풀면  $x_r$ 은 다음의 식(12)와 같이 구해진다.

$$x_r = \frac{x_o h}{h + y_o} = \frac{x_o}{1 + \frac{y_o}{h}} \quad (12)$$

#### IV. 합성계의 시뮬레이션과 변수 분석

##### 1. 유도전압의 접근에 대한 근사적 사용

관측점에 라인소스와 병행하여 놓여있는 도체선에 길이 방향(z축)으로 작용하는 전계에 의한 전압에 대하여 입사 전자파에 의하여 유도되는 전류밀도의 관점에서 이를 적분 방법을 취하여 전체 도선 길이에 유기되는 전압을 계산하도록 할 수 있으나 본 논문에서는 단지 지면 반사에 의한 상대적 영향력을 알고자 하는 것이므로 복잡한 해석 방법을 사용하지는 않고 단순한 조건하에 전계를 일정한 길이 만큼 적분한 형태의 값으로 식(13)과 같이 가름하여 유도전압을 사용하도록 하였다<sup>[5-9]</sup>. 이는 식(14)의 상호인덕턴스가 포함된 칼슨에 의한 유도전압의 계산식의 원인적 근사라 할 수 있다<sup>[10~11]</sup>.

$$V = - \int_0^L \vec{E} \cdot d\vec{l} = EL \quad [V] \quad (13)$$

$$V = j\omega MLIK \quad (14)$$

$M$  : 통신선과 전력선의 상호인덕턴스[H/km]

$L$  : 통신선과 전력선의 병행거리[km]

$I$  : 기유도전류[A]

$K$  : 차폐계수

$\vec{E}$  : 통신선에 작용하는 길이 방향의 전계[V/km]

기유도전류 'I'가 곧 상호인덕턴스 M에 의하여 통신선에 유기된 전류밀도의 적분 성분이라 할 수 있고 식(13)은 단지 전계에 대하여 상대적 값으로서의 의미를 갖도록 한 것이다.

##### 2. 지면반사 영향에 관한 주요 변수별 시뮬레이션 분석

##### 가. 합성전계에 관한 식과 파라미터 적용값

##### (1) 합성전계식

라인소스에 의한 전계와 지면반사에 의한 전계의 합성식은 다음의 식(15)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} E_s^r &= E_s + E_r \\ &= E_o B_i + E_o^r B_r = E_o B_i + \Gamma^b E_o B_r \\ &= E_o B_i (1 + \Gamma^b \frac{B_r}{B_i}) = E_s (1 + \Gamma^b h_r) \\ &= E_s (1 + \Gamma^h) = C_r E_s \end{aligned} \quad (15)$$

$$h_r = B_r / B_i; \quad \Gamma^h = h_r \Gamma^b; \quad C_r = 1 + \Gamma^h$$

##### (2) 고정 파라미터 사용값

각 파라미터에 대한 변수값은 소스의 좌표 위치는  $P_s(x_s, h)=(0, 25)$ 이고, 관측점  $P_o(x_o, y_o)$ 은 (30, 10), 대지의 투자율은 공기와 같은  $\mu_0$ , 유전율( $\epsilon_g$ )을 위한 비유전율은 10을\*, 기본 대지저항률  $\rho$  은 250[ $\Omega \cdot m$ ]를, 소스 전류  $I_s$  는 상기 식(13)에 의한 환산 전압이 10V가 되는 값으로 약 37.7A를 사용하였다.

##### 나. 지면반사 차폐계수성

차폐계수(K)의 정의는 식(16)과 같다<sup>[14]</sup>. 그러므로 지면반사에 의한 차폐성은 전계에 의한 감쇠적 합성 요율로서 다음 식(17)로써 계산되어질 수 있다. 또는 이것은 유도전압으로 표현하여도 마찬가지로 관계이다.

$$K = \frac{V_o}{V_s} \quad (16)$$

$V_o$  : 지면반사가 합성된 유도전압[V]

$V_s$  : 소스 독립 영향에 의한 유도전압[V]

\*Balanis'의 「Advanced Engineering Electromagnetics」에서는 'Dry soil'만을 '3'으로 명시하고 있지만(p.50, Table 2-1), 'Zoya'의 역서-전자기학(Introductory Electromagnetics)의 부록4(p.598)의 표에서는 '젖은 땅'은 5~15, '마른 땅'은 2~6까지 분류 명시하고 있음[12]. 또한, 국가기관의 전자파 영향 평가 관련 고시에서는 최대 15를 제시하고 있음[13]. 우리나라의 주된 내면 토양 특성이 젖은 땅으로 간주하고 대략의 중간값으로서 '10'을 사용하도록 함.

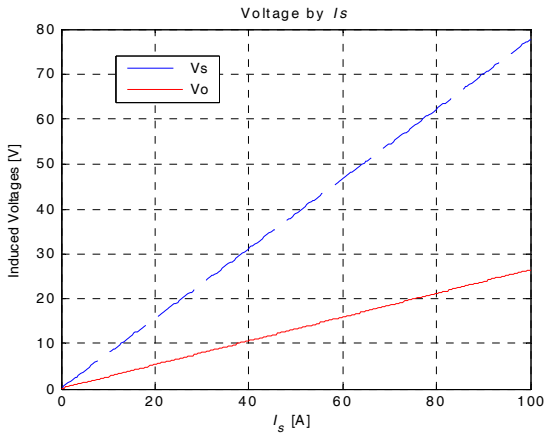


그림 4. 소스전류( $I_s$ )에 따른 원천전압( $V_s$ )과 합성전압( $V_o$ )  
 Fig. 4. Induced voltage by source current.

$$K_E = \frac{E_s^r}{E_s} = \frac{E_s + E_r}{E_s} = 1 + \frac{E_r}{E_s} \quad (17)$$

앞의 고정 파라미터값을 사용하여 이 계수값을 계산하여보면:  $\Gamma^b = -0.665 - j0.173$ ,  $|\Gamma^b| = 0.688$ 이고 소스만에 의한 전압  $V_s = 29.3V$ , 관측점에서의 합성된 전압  $V_o = 10V$ 에 대하여 계수효과  $K = 0.341$ 이 나온다. 이 수치 조건의 일례에서 지면반사가 원소스의 전계 영향에 대하여 약 66%의 감쇠 효과가 있음을 보여주고 있다. 소스 전류량에 따른  $V_s$ 와  $V_o$ 의 비교 그래프는 그림 4와 같다.

다. 대지저항률에 따른 유도전압의 변화  
 상기의 고정된 파라미터 변수상에서 대지저항률만을

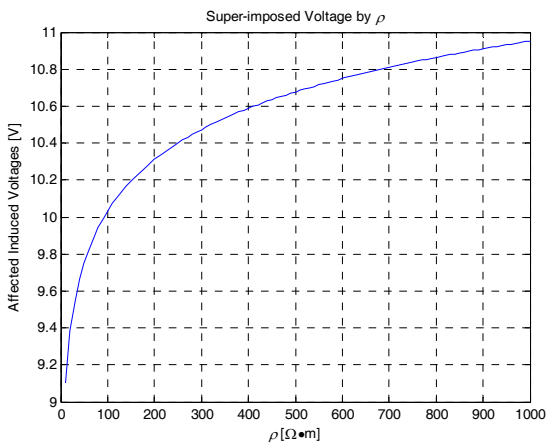


그림 5. 대지저항률에 따른 유도전압의 변화  
 Fig. 5. Induced voltage by earth resistivity.

10~1000[ $\Omega \cdot m$ ]까지의 범위로 변화될 때의 유도전압의 변화는 그림 5와 같이 나타난다.

라. 관측점 좌표(이격거리)에 따른 전압 및 계수효과  
 관측점의  $x$  좌표 및  $y$  좌표의 위치 변화에 따른 유도전압의 변화( $V_{ox}$ ,  $V_{oy}$ )와 그에 대한 지면 반사가 합성된 전압의 계수효과( $K$ :  $K_x$ ,  $K_y$ )를 그림 6에 표시하였다.

우선 그림을 살펴보면  $x$ 축 방향의 이격거리 변화에 대하여는 200m까지 자연스럽게 감소하는 것으로 나타나고 있으며 관측점의 소스 위치에 대한 상대적 높이를 의미하는  $y$ 축으로의 이격거리 변화에 대하여는 대략 소스의 높이에 해당하는 위치까지는 유도전압이 올라가지만 그 이후로는 점차 감소하는 것으로 나타나므로 지면 반사의 영향력이 지면에서 높아질수록 약화됨을 알 수 있다.

지면반사의 계수 영향력에 있어서는 양축 방향에 있어서 각 이격거리의 변화 양상에 부합되고 있다.  $x$ 축 방향에 있어서는 0.3 정도 범위의 낮은 계수값을 갖고 있으나 높이 변화에 따른 영향에 있어서는 0.4 정도의 레벨로 근접하여 높은 양상을 나타내었다.

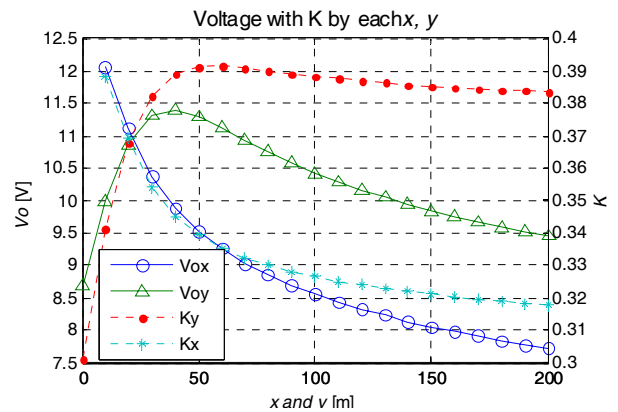


그림 6. 좌표 방향 이격거리에 따른 계수/전압 변화  
 Fig. 6. Voltage and K by observative axis change.

마. 칼슨에 의한 식과의 비교 관점

칼슨식에 의하여 좀더 정확하게 계산된 유도전압의 계산 결과에 대하여 지표면 반사의 영향력 관점의 주가 되는  $y$ 축 방향의 이격거리를  $x_0 = 1$ 로 고정된 상태에서 비교하여 살펴보면 그림 7과 같이 된다. 실선이 직접 지면 반사계수를 대입하여 계산된 변화이고 파선이 식

(18)에 의한 칼슨 상호인덕턴스 계산식을 적용하여 나온 변화 그래프이다.

$$M = \left[ 4.61 \log_{10} \frac{2}{kd} - 0.1544 + \frac{2\sqrt{2}}{3} k(h+y) \right] \times 10^{-4} \\ - j \left[ \frac{\pi}{2} - \frac{2\sqrt{2}}{3} k(h+y) \right] \quad [H/km]$$

$h$  : 소스의 높이[cm]

$y$  : 관측점의 높이[cm]

$d$  : 소스로부터 관측점의 이격거리[cm]

$M$  : 소스와 관측점 객체의 상호인덕턴스[H/km]

$k$  :  $2\pi\sqrt{2f\sigma}$  ( $\sigma$  : 대지도전율[CGSemu])

유도전압에 이격거리 높이 100m까지에서 칼슨에 의한 값과 5V정도 차이가 있기는 하나 반사계수에 의한 지면 높이로부터의 유도전압 영향력 변화가 칼슨식에 의한 변화를 따르고 있음을 알 수 있다.

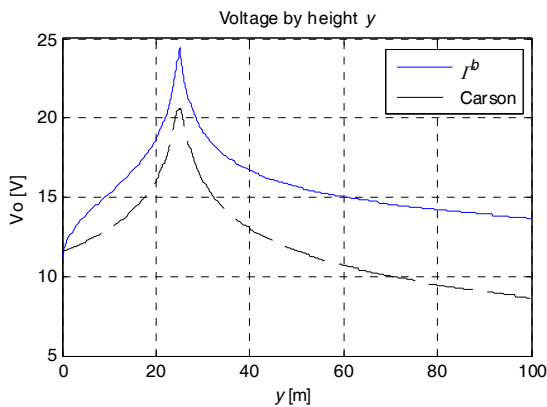


그림 7. 칼슨식과의 높이 변화 비교

Fig. 7. Comparison with Carson Inducance application.

## V. 결 론

본 논문은 전력선에 의한 전자유도 장애의 환경에서 보편적 배경 요소로서 작용하는 대지에 의한 계의 영향력에 대하여 전계식으로 가름한 유도전압을 모사하여 분석하여 본 것이다. 그 안에는 전계량이 내포되어 있는 것으로서 유도전압은 단지 상대적 모형의 의미를 가지고 있고 원소스에 의한 전자계에 대하여 지면반사에 의한 합성전계의 요율이 어떻게 작용하는지를 보여주고 있는 것이다.

본 논문에서 주요한 적용 기술은 이러한 지면 반사의 영향력에 대하여 전력선과 같은 라인소스의 원통좌표계

를 활용한 베셀함수의 변형 모델에 의한 반사계수를 직접 산출하도록 지표면 매질의 경계조건 적용을 통하여 정형식을 도출하고 계산하도록 수립하였다는 점이다.

이에 의한 정량 분석에 의하면 지면반사에 의한 감쇠효율은 본 논문에서 정한 시뮬레이션 기본 좌표배치의 관계\*에서 거의 70%에 달하는 것으로 나타나며 소스의 위치에 대한 관측점의 좌표의 높이와 수평 위치의 변화에 따라 60% 까지 변화를 보이기도 한다. 다만 지면반사의 영향력은 지면으로부터 높이가 올라갈수록 감소하기 때문에 소스의 위치가 아주 높은 위치(100m)에 있다면 계수효과는 50%까지 떨어질수도 있다.

유도전압 자체에 있어서는 대지저항률의 변화에 따른 지면반사의 영상 깊이를 고려하도록 구사된 칼슨의 상호인덕턴스식을 사용하는 것이 통례이다. 이러한 칼슨식의 적용에 의한 유도전압의 계산 범위에 대한 비교 결과 반사계수를 직접 적용한 영향의 변화가 유사하게 나타남을 확인하였다.

본 논문에 의한 지면 반사 영향의 정량적 판단 근거를 통하여 전력유도 대책을 수행함에 있어서 거대 환경요인으로 작용하는 대지의 차폐성을 인식하고 설계할 수 있는 효과를 기대한다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. R. Carson, "Wave propagation in overhead wires with ground return," Bell System Tech. Jour., Vol.5, pp.539-554, 1926.
- [2] J. R. Carson, "Wave propagation in overhead wires with ground return," NAPS, University of Waterloo, Canada, pp.65-80, 2000.
- [3] Constantine A. Balanis, ADVANCED ENGINEERING ELECTROMAGNETICS, John Wiley & Sons, pp. 571-573, 1989.
- [4] David K. Cheng, Fundamentals of Engineering Electromagnetics, Addison-Wesley Publish, pp. 351-365, 1993.
- [5] James R. Wait, "Theory of wave propagation along a thin wire parallel to an interface", Radio Science, Vol.7, No.6, Jun. 1966, pp. 675-679
- [6] Robert G. Olsen, David C. Chang, "Current Induced by a Thin Infinite Wire Near the Earth," IEEE Transactions on Antennas and

\* 이러한 좌표배치는 통상적 전력선과 통신선의 상대적 배치 관계를 의미한다.

- Propagation, July 1974, pp.586-589
- [7] Robert G. Olsen, "Electromagnetic Coupling from PowerLines and Magnetic Field Safety Analysis," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.12, pp.3595-3607, December 1984.
- [8] Robert G. Olsen, et al., "Electromagnetic Wave Propagation on a Thin Wire above Earth," IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol.48, No.9, pp.1413-1419, September 2000.
- [9] 이상무, 은창수, "전력선 유도전압 기초 산출을 위한 전자계 해석", 전자공학회논문지, TC-Vol.47, No.5, pp.60-67, 2010. 5.
- [10] 김진승 역, David J. Griffiths, Introduction to Electrodynamics, Pearson-Prentice Hall/Jinsaem, pp.81-82, 2006.
- [11] 전기통신협회 동해지부, 유도 상, 1978. 12. 20.
- [12] 박동철외 역, Zoya Popovic', Branko D. Popovic', INTRODUCTORY ELECTROMAGNETICS, Prentice Hall/대웅, p.598, 2002.
- [13] 방송통신위원회, 방송구역전계강도의 기준·작성요령 및 표시방법, 방송통신위원회고시 제2008-17호, p.1005, 2008. 5. 19.

---

 저 자 소 개
 

---



이 상 무(정회원)  
 1989년 단국대학교 전자공학과  
 학사 졸업.  
 2000년 한국정보통신대학원  
 대학교 (현 KAIST)  
 정보공학과 석사 졸업.  
 2013년 충남대학교 정보통신  
 공학과 박사 졸업.

<주관심분야 : 전자유도, 전자파, 전자계 해석>