

765 kV 초고압 송전선 주변의 인체 유도전류 계산

Calculation of Induced Current in the Human Body around 765 kV Transmission Lines

명성호* · 이재복* · 허창수**

Sung-Ho Myung* · Jae-Bok Lee* · Chang-Soo Huh**

요 약

고전압 발, 변전소의 근무자나 송전선 작업자 및 주변거주자가 전계 노출에 안전해야 함은 중요한 일이다. 본 논문에서는 복잡하고 계산시간이 많이 소요되는 인체의 3차원 유도전류를 계산하기 위해 전압원(송전선로)의 효과적인 모델링 기법을 사용하여 전압원과 피유도체를 분리하지 않고 직접 3차원 정전용량을 구함으로써 불평등 전계하의 임의의 3차원 공간상에서도 인체에 미치는 유도전류 해석이 가능한 장점을 갖도록 하였다. 사례연구로 본 연구에서 제안한 알고리즘을 765 kV급 초고압 송전선로에 적용하여 인체 유도 안전성을 평가한 결과 765 kV 송전선에서 인체의 단락전류는 인체의 위치에 따라 0.3 mA에서 6.8 mA로 분포되었다. 특히, 송전선로에서 활선 작업시 단락전류 I_{sc} 의 크기는 ANSI 허용기준인 5 mA를 넘을 수 있어 활선 작업시 작업자의 전계의 방호 대책을 위해서는 도전물질로 구성된 보호복이 필요함을 알 수 있었다.

Abstract

Safety related to electric field exposure for the personnel of high voltage power plant and substation is of importance. To analyze the induced current influencing on human body in this paper, we calculate directly capacitance in three dimension which is complex and time consuming, as not to separate the voltage source and the induced object using a effective modelling technique.

The proposed algorithm in this paper has been applied to 765 kV high voltage transmission line to evaluate human hazard for the induced current through the case study. As the results, the short circuit current of human body has been identified in the range of 0.3 mA to 6.8 mA. Closing to transmission line, this range of short current can exceed 5 mA that ANSI recommended let-go current. Therefore, it is necessary to countermeasure such as putting on conductive clothing in live-line maintenance of transmission line.

*한국전기연구소(Korea Electrotechnology Research Institute)

**인하대학교 전기공학과(Dept. of Electrical Engineering, Inha University)

· 논문번호 : 980829-079

· 수정완료일자 : 1998년 10월 24일

I. 서 론

전력 및 통신기술의 발달과 더불어 산업사회 시스템이 고도화되고 전력수요가 급증함에 따라 전력계통의 고안정도, 송전효율의 극대화를 위한 초고압 장거리 대용량 송전에 대한 연구가 각국에서 진행되고 있으며, 한국전력공사도 765 kV 수직 2회선 송전시스템을 도입할 것을 결정하였다. 이미 선진 각국에서 알 수 있듯이 송전전압의 격상과 더불어 인근 주민에 영향을 미치는 전기환경문제가 급격히 대두되고 있으며 전기환경문제는 앞으로 765 kV 격상과 더불어 더욱 사회적 문제로 대두될 전망으로 크게 두 부류로 분류할 수 있다. 첫 번째는 원방계(Far field) 잡음으로 송전선 도체표면의 코로나잡음이나 애자류 및 금구류에서 발생하는 방전잡음이 주로 Radio, TV, 무선 핸드폰과 같은 통신기기의 수신 품질에 미치는 영향에 관한 문제이다. 두 번째는 근접계(Near field) 잡음으로 극저주파(60 Hz)의 전자계 성분이 전자장비의 오동작과 인체나 생물체의 안전에 관한 문제이다^[1]. 본 연구는 인체의 안전과 관련하여 전계를 연구 대상으로 하고자 한다.

송전선에서 발생하는 전계에 노출된 지역에 있는 사람의 신체내부에는 상용 주파수 전류가 유도될 수 있다^[2]. 전력설비 주변에 생체나 물체가 존재하는 경우의 정전유도 전압, 전류의 해석은 1980년대 중반까지는 미국, 일본 등의 선진국의 경우도 컴퓨터를 이용한 모의계산은 거의 하지 못하고 마네킹을 이용한 실험 정도였다. 1980년대 후반에 들어서면서 급격히 진전한 컴퓨터 기술을 바탕으로 이를 계산하고자 하는 시도가 있었으며 Chiba와 Spiegel은 이 분야의 연구에 많은 기여를 하였다. 그러나 이들 연구는 전계를 발생하는 전압원과 인체 등의 피유도체를 각각 분리하여 취급하기 때문에 평등 전계분포를 가정해야 하므로 유도전류 해석이 근사적으로만 가능해 훨씬 작업시 안전영역

해석 등 불평등 전계분포하에서의 해석은 어려운 단점을 가지고 있었다^{[3]-[5]}.

이와 같은 문제를 극복하기 위하여 본 연구에서는 전압원(송전선로)의 효과적인 모델링기법을 사용하여 전압원과 피유도체를 분리하지 않고 직접 3차원 정전용량을 구함으로써 불평등 전계하의 임의의 3차원 공간상에서도 인체에 미치는 정전유도 및 전류 해석이 가능한 장점을 갖도록 하였다. 사례연구로 본 연구에서 제안한 방법을 765 kV급 초고압 송전선로에 적용하여 3차원 전계 분포 계산 및 인체의 유도전압, 전류를 해석하여 송전선로하의 인체 유도 안전성을 평가하고자 한다.

II. 송전선로 모델링

송전선에서 3차원 전계를 해석하기 위해서 선로는 불균일 전하 분포를 갖는 유한장 선로로 표현되어야 한다^[6]. 선로의 불균일 전하 분포를 보다 정확히 표현하기 위해서는 유한 선형함수로 세분하여야 한다. 그림 1에 나타난 바와 같이 한 축에 평행한 유한 선전하가 도체의 한 요소내에 배치되었다고 가정하면, 이 요소의 전하밀도 분포는 식 (1)과 같이 일차함수로 표현될 수 있다.

$$\sigma^e = aX + b \quad (1)$$

여기서 σ_1^e 과 σ_2^e 를 x 좌표가 각각 점 X_1^e 과 X_2^e 에서의 전하밀도라고 가정하면, 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma^e(X) = \sum_{i=1}^2 N_i(X) \sigma_i^e \quad (2)$$

여기서

$$N_1(X) = \frac{X_2^e - X}{X_2^e - X_1^e}$$

$$N_2(X) = \frac{X - X_1^e}{X_2^e - X_1^e}$$

분할요소로 인해 발생되는 점 (x, y, z) 에서의 전위 ϕ_e 는 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{X_1^e}^{X_2^e} \frac{\sigma^e(X) dX}{l^e} \quad (3)$$

여기서 l^e 는 분할요소상의 한 점과 임의의 계산점 P 사이의 거리이다.

$$l^e = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}$$

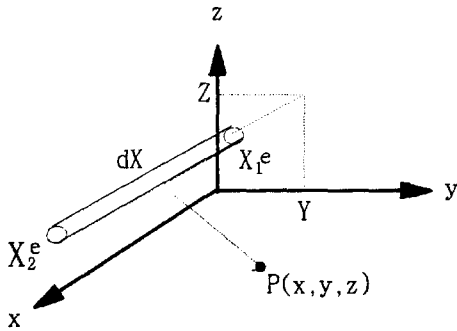


그림 1. 유한장 선로의 요소

Fig. 1. An element of a finite line.

일반적으로 주어진 선로의 경계조건을 만족하기 위해서는 많은 전하가 배치되어야 한다. 이 경우 선전하 밀도 함수에 대한 연속조건을 적용하면 미지수를 상당히 줄일 수 있다. 그러므로 다음 그림 2와 같이 n 개의 분할요소를 가진 유한선로는 $n+1$ 개의 변수가 필요하고, n 개의 분할요소를

가진 선로 전체로부터 전위를 중첩하여 표현하면 다음 식 (4)와 같이 주어진다^{[5],[7]}.

$$\phi_i = \sum_{j=1}^{n+1} P_{ij} q_j, \quad (i=1, 2, \dots, n+1) \quad (4)$$

여기서,

$$P_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 (X_2^{j-1} - X_1^{j-1})} \cdot \left[-\{\sqrt{b^2 + (X_2^{j-1} - x_i)^2} - \sqrt{b^2 + (X_1^{j-1} - x_i)^2}\} - (X_1^{j+1} - x_i) \right. \\ \cdot \log_e \left. \left| \frac{\sqrt{b^2 + (X_2^{j-1} - x_i)^2} + X_2^{j-1} - x_i}{\sqrt{b^2 + (X_1^{j-1} - x_i)^2} + X_1^{j-1} - x_i} \right| \right] \\ + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 (X_2^j - x_i^j)} \cdot \left[-\{\sqrt{b^2 + (X_2^j - x_i)^2} - \sqrt{b^2 + (X_1^j - x_i)^2}\} - (X_1^j - x_i) \right. \\ \cdot \log_e \left. \left| \frac{\sqrt{b^2 + (X_2^j - x_i)^2} + X_2^j - x_i}{\sqrt{b^2 + (X_1^j - x_i)^2} + X_1^j - x_i} \right| \right]$$

$$b = \sqrt{(f-y_i)^2 + (d-z_i)^2}$$

f : X축 방향으로 평행한 선로 중심의 Y 좌표
 d : X축 방향으로 평행한 선로 중심의 Z 좌표
 x_i, y_i, z_i : 전위를 구하고자 하는 임의의 계산점 좌표

X_1^j : j 번째 요소의 시작점

X_2^j : j 번째 요소의 종료점

q_j : j 번째 지점의 전하

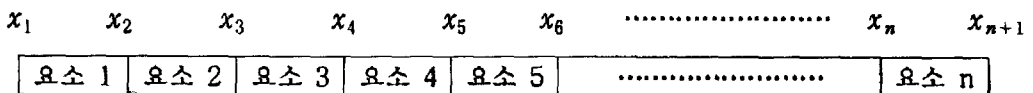


그림 2. 선로의 분할요소와 변수

Fig. 2. An element and variables of a finite line.

CSM(Charge Simulation Method)에서 가상전하의 배치는 직접적으로 전계계산의 정확도에 영향을 미치기 때문에 매우 중요하다. 그럼에도 불구하고 가상전하는 주로 전문가의 경험에 의해 배치되어 왔었다. 저자는 빠르고 정확하게 경계조건을 만족할 수 있는 가상 선전하의 배치방법을 경험적인 법이 아닌 전위오차 해석법을 통해 이미 발표하였다.^{[8]-[10]}.

III. 인체 모델링

인체내부에 흐르는 전류의 양을 계산하기 위해 인체 모델의 표면은 그림 3와 같이 도체로 둘러싸인 표면을 사용하였다. 인체의 윤곽선은 spline 곡선으로 나타내고, 표면은 SCM(Surface Charge Method)의 띠전하(strip charge)로 모의하였다. 인체의 표면전하를 좀더 정확하게 계산하기 위해, 20개의 축대칭 띠전하를 각각 4등분하여 $\pi/2$ 의 내각을 갖는 80개의 분할된 요소 띠전하로 모의하였다. 그림 3에서 한 개의 띠전하에 의한 임의의 점 P 에서의 전위는 다음과 같이 주어진다^[11].

$$\phi = \frac{1}{\pi\epsilon_0} \int_{t_{i-1}}^{t_i} R(t) \cdot \frac{K(k_1) - K(k_2)}{\sqrt{(r+R(t))^2 + (z-Z(t))^2}} \cdot \sqrt{R(t)+Z(t)} \cdot dt \quad (5)$$

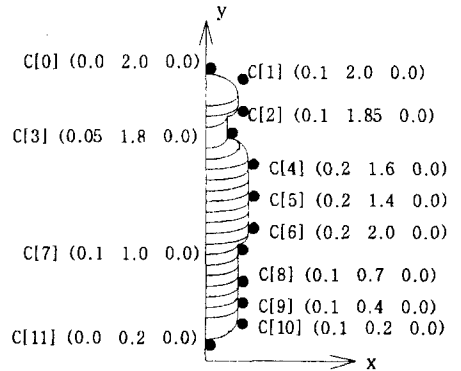
여기서 $K(k)$: 1차 타원적분

$$k_1 = \sqrt{\frac{4rR(t)}{(r+R(t))^2 + (z-Z(t))^2}}$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{4rR(t)}{(r+R(t))^2 + (z+Z(t))^2}}$$

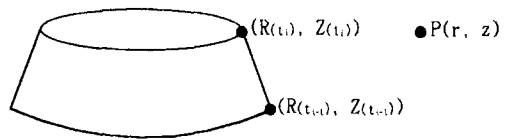
t : spline 곡선의 매개변수

IV. 정전용량 계산



C[i] : Spline 곡선을 생성하기 위한 제어점

(a) Spline 곡선으로 나타낸 인체 모델
(a) Human body represented by strip charges.



직각 좌표계를 실린더 좌표계로 변환식:

$$R(t) = \sqrt{X(t)^2 + Y(t)^2}$$

$$r(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}$$

(b) 띠전하 (b) strip charges

그림 3. 띠전하로 나타낸 인체

Fig. 3. Human body represented by strip charges.

4-1 2차원장 모델

인체 유도 전압, 전류를 계산하기 위해서는 인체와 대지간 정전용량 계산이 선행되어야 한다. 정전용량 계산에는 경계분할법의 방정식이 전압과 전하의 관계식으로 표현되는 경계분할법이 영역분할법보다 적합하다. 그러므로 본 논문에서는 경계분할법의 일종인 전하중첩법을 이용하여 정전용량을 계산하고자 한다. 전하중첩법의 방정식 식 (4)를 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \cdots & P_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, P_{ij} : 전위 계수, q_i : 전하, V_i : 전위

식 (6)에서 도체 1의 전압을 $V_1=1$ 로 하고 다른 모든 도체의 전압을 0으로 하여 방정식을 풀어 가상전하량을 구한다. 이때 각 도체 내의 가상전하의 수를 m_1, m_2, \dots, m_m 이라 하면, 각 도체내의 총 전하량 Q 는 다음과 같다.

$$Q_1 = \sum_{j=1}^{m_1} q_j, \quad Q_2 = \sum_{j=m_1+1}^{m_1+m_2} q_j, \dots, \\ Q_m = \sum_{j=n-m_m}^n q_j \quad (7)$$

이것으로부터 도체 1의 대지간 정전용량 C_{10} 및 각 도체간 상호정전용량 C_{ij} 는 다음과 같이 계산된다.

$$C_{10} = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad C_{ij} = -Q_i \quad (8)$$

4-2 3차원 모델

3차원의 경우도 2차원 모델에서와 같은 원리를 적용하여 정전용량을 구하며, 3차원 모델에서 정전용량을 계산할 경우 2차원 모델과 다른 점을 설명하면 다음과 같다.

첫째, 정전용량의 단위가 변한다. 2차원의 경우, 무한장 선로가 지나가고 그 아래로 전계의 영향을 받는 물체가 존재하는 경우이다. 이때 송전선 하부의 물체도 Z축을 따라 무한장으로 나열한 것과 같은 형상을 이루게 한다. 그러나 실제로는 초고압 송전선이나 전력선 모선 하부의 물체는 Z축을 따라 무한장으로 연결되지 않는 3차원의 모델이다. 따라서 구한 정전용량이 2차원일 경우 [C/m]의 단위를 갖게 되지만 3차원의 경우는 [C]의 단위를 갖

는다. 둘째, 3차원을 계산하기 위해 인체 모의에 사용한 표면전하법은 전하중첩법과 같은 원리를 갖고 있지만, 전하중첩법과는 달리 미지수가 전하 밀도가 된다. 따라서 Q_1, Q_2, \dots, Q_m 이 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$ 이 되고 수치적분을 한번 거치면 표면 전하법인 경우에는 전하량 Q_i 가 얻어진다. Q_i 를 식 (8)에 대입하여 각각의 정전용량을 구한다.

V. 유도전류 계산

인체에서 전압원에 의해 발생하는 인체내의 유도전류 계산은 평등 전계를 만족하면 매우 단순화될 수 있으나 송전선로에서 가까운 주변의 유도전류를 계산할 때는 불평등 전계를 형성하므로 이러한 근사는 부정확하게 된다.

전하중첩법을 이용한 컴퓨터 모의 방법에서는 다음과 같은 맥스웰 시스템 방정식을 이용하여 선로내의 전하 [Q]를 구한다.

$$[P][Q] = [\Phi], \quad [Q] = [P]^{-1}[\Phi] = [D][\Phi] \quad (9)$$

여기서 D_{ij} 는 전위계수행렬으로 [P]의 역행렬로부터 구해지며, [D]를 알면 $Q=CV$ 관계에서 [D]가 [C]에 대응하므로 3차원 정전용량은 바로 구해진다. 지면에 대해 전위 V로 충전된 하나의 전극과 전위 v_i (v_i 는 미지)로 절연된 인체를 고려한다. 충전된 전극에 n개의 모의전하를 두고, 절연된 인체에 m개의 모의 전하를 배치하여 시스템 방정식 (6)을 풀어 전하량 Q를 구하기 위해서는 충전된 전극에 경계조건에 해당하는 n개의 윤곽점과 절연된 인체에 m개의 윤곽점이 주어져야 한다. 이때 임의의 계산점에서의 전위는 중첩의 원리에 의해 구한 모든 전하의 합으로 얻어지며, 윤곽점 i에서 충전된 전극의 전위 V_i 와 절연된 인체상의 전위 v_i 는 다음과 같다.

표 1. 위상차를 갖는 765 kV 송전선의 상대지 전압

Table 1. Transmission line voltage with phase difference.

상대지 전압 [kV ∠ deg.]	번들 수
441.67 ∠ 0	#1, #4
441.67 ∠ -120	#2, #5
441.67 ∠ 120	#3, #6
0.0	#7
0.0	#8

은 그림 6과 같다.

한편, 전하중첩법에서 계산의 정밀도는 검사점에서의 전위오차 분석을 통해 평가하는데 검사점이란 경계 조건을 준 지점(윤곽점)을 제외한 점으로 경계 조건을 만족해야 하는 지점을 일컫는다^[5]. 송전선로주변의 전계나 유도전류를 계산하기 위해서 맥스웰 시스템 방정식 (9)를 풀어 선로내의 전하 Q를 구하는 것이므로 결국 해의 정밀도는 Q에 의해 결정된다. 그림 2에서 보듯이 n개의 분할요소를 가진 유한선로는 n+1개의 변수(전하)가 필요하고 n+1 개의 변수를 구하기 위해서는 n+1 개의 경계조건이 요구된다. 즉, 선로상의 무수히 많은 점들 중에서 전하 Q를 구하는데 n+1개의 윤곽점만 사용하므로 윤곽점을 제외한 많은 점(검사점)들이 윤곽점이 갖는 경계조건(선로전압)을 만족하는지의 여부를 전위오차 분석을 통해 판단한다. 이러한 평균전위오차를 표현하면 다음 식 (18)과 같다. 본 연구에서는 검사점의 개수를 500개로 하여 해의 정밀도를 분석하였다.

$$Error = \frac{\sum_{i=1}^N |\phi_{ca}(i) - \phi_{ref}|}{\phi_{ref} \cdot N} \times 100[\%] \quad (18)$$

Error : 평균 전위 오차[%]

$\phi_{ca}(i)$: i 번째 검사점 (x_i, y_i, z_i) 에서의 전위[V]

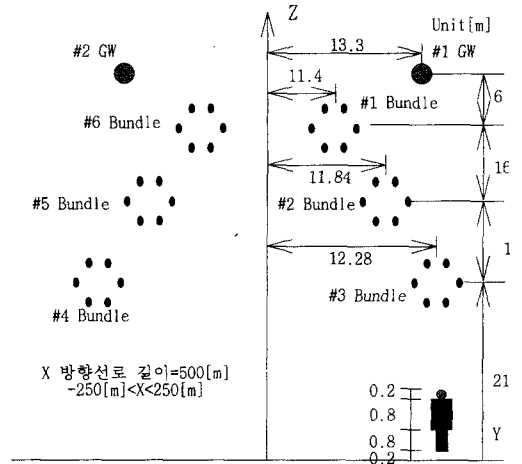


그림 5. 765 kV 송전선의 전선배치 구조

Fig. 5. The configuration of 765 kV transmission line.

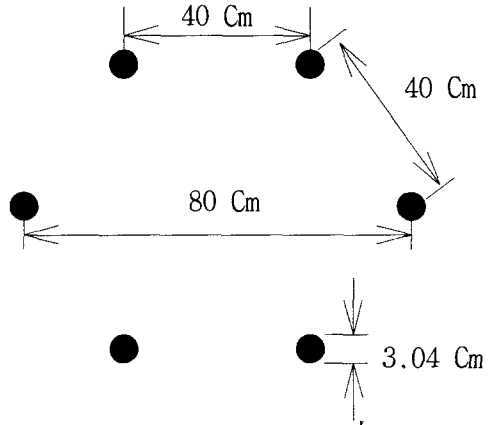


그림 6. 각 번들의 형상

Fig. 6. The configuration of each bundle.

ϕ_{ref} : 윤곽점에서의 기준 전위[V]

N : 검사점의 갯수

그림 5의 모델에서 송전선로의 분할요소에 따라 평균전위오차를 분석한 결과를 표 2에 나타내었다. 전하중첩법에서 요구되는 전위오차가 0.1 %~0.5 % 임을 감안하여^{[5],[11]} 본 연구에서는 표 2의 계산 결과에 따라 송전선로를 12개의 분할요소로 모델

표 2. 송전선로의 분할요소 따른 평균전위오차(단위 : %, 선로 길이=500 m)

Table 2. Average potential error in transmission line for the number of segment.

(Unit : %, length of transmission line=500[m])

분할요소	1	2	4	6	8	10	12
평균 전위 오차	7.687	4.507	1.484	0.727	0.292	0.139	0.076

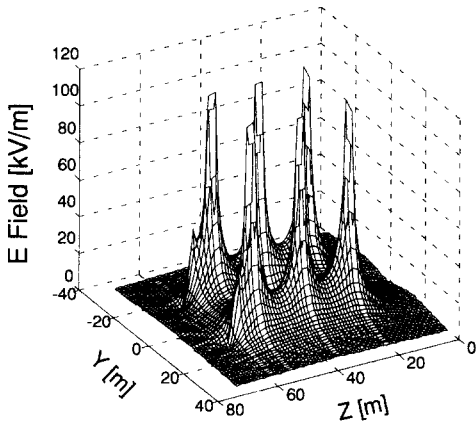


그림 7. 765 kV 송전선로(Y-Z 평면) 주변에서 계산한 전계 분포

Fig. 7. The computed electric field distribution around 765 kV transmission line(Y-Z plane).

링하여 전계 분포와 유도 전류를 해석하였다.

이와 같은 모델링을 통해 3차원 전계 분포와 Y-Z 평면에서 계산된 전계의 윤곽선도를 그림 7과 8에 나타내었다.

이 결과는 작업자가 선로의 유지보수작업을 수행할 때 765 kV 송전선로의 전계강도가 인체의 허용값(15 kV/m) 내에 있는지를 입증하기 위한 것이다^[12]. 그림 8에서와 같이 허용된 전계강도보다 높은 위험한 지역은 송전선로로부터 5 m 주변이 된다.

접지된 경우의 인체에 유도되는 단락전류(I_{sc})의 계산결과는 그림 9에 나타내었다.

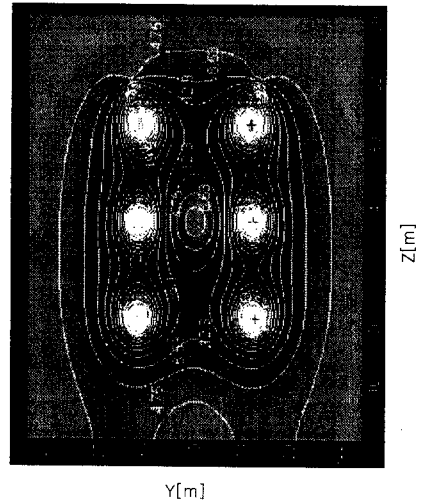
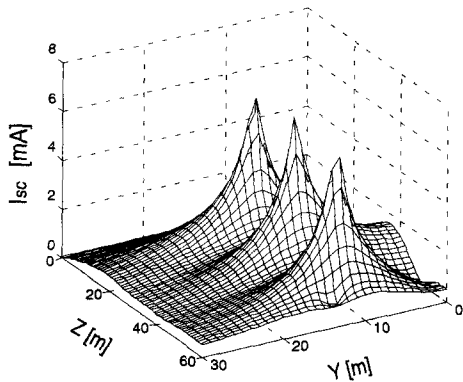


그림 내부 윤곽선단위 : [kV/m]

그림 8. 765 kV 송전선로(Y-Z 평면) 주변의 전계 분포 윤곽선도

Fig. 8. The contour map of electric field around 765 kV transmission line(Y-Z plane).

단락전류는 인체가 위치하는 곳에 따라 0.3 mA에서 6.8 mA까지 분포되었다. 지금까지의 연구에의하면, 여성의 경우, 인체가 느낄 수 있는 감지전류(perception current)가 0.73 mA이다. 반면에 인체에 전기적인 쇼크를 일으킬 수 있는 자극전류(startle current)는 2.2 mA로 보고되고 있다. 또한 도체를 잡은 손이 도체를 놓을 수 없는 상태를 나타내는 통전전류(let-go current) 레벨은 아동의 경우 4.5 mA로 보고되어 있다. ANSI에 나타난 통전전류 허용값은 5 mA이다. 따라서 계산 결과에 따르면 활선 작업을 하는 작업자의 경우 도전물질로 만들어진 보호복을 착용할 필요가 있음을 알 수 있었다.



(a) 3차원 분포

(a) Three dimensional distribution

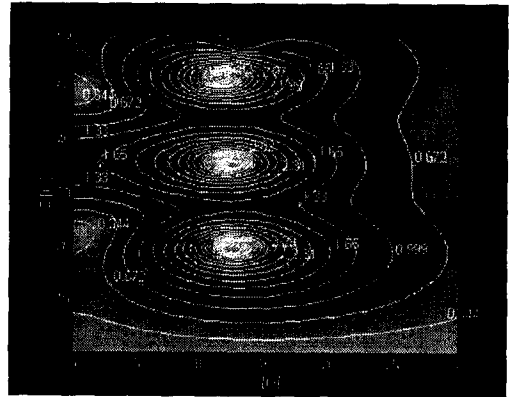


그림 내부 윤곽선 단위 : [mA]

(b)윤곽선도

(b) Contour map

그림 9. 인체의 전체 유도 단락전류

Fig. 9. Total induced short circuit current on human body.

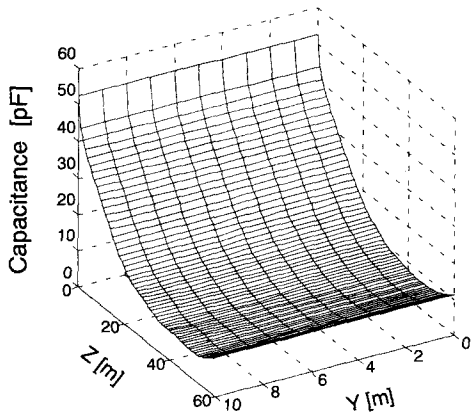


그림 10. 지면에 대한 인체의 정전용량

Fig. 10. Capacitance of human body to ground.

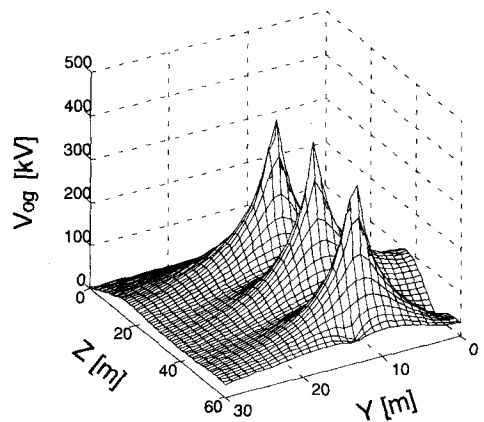


그림 11. 절연시 인체 유도 전압

Fig. 11. Induced voltage on human body in the insulated case.

인체와 지면사이의 간격이 0.2 m일 때 지면에 대한 인체의 정전용량(C_{og})은 약 50 pF 정도가 되며, 이러한 값은 측정된 값과 유사하다^[2]. 또한 높이가 60 m가 되면 지면 위의 인체의 정전용량은 약 10 pF 정도가 된다. 그림 8에는 상세하게 이러한 결과를 나타내었다.

절연된 경우 지면에 대한 인체의 유도전압(V_{og})과 인체의 유도전류(I_{og})는 그림 11과 12와 같이 계산되었다. 작업자가 송전선로($Y=0$ m, $Z=21$ m)에 가까이 있을 때 유도전압은 7.2 kV정도이다. 또한 인체가 절연된 경우에서는 인체의 유도전류는 인체의 위치에 따라 자극전류의 범위인

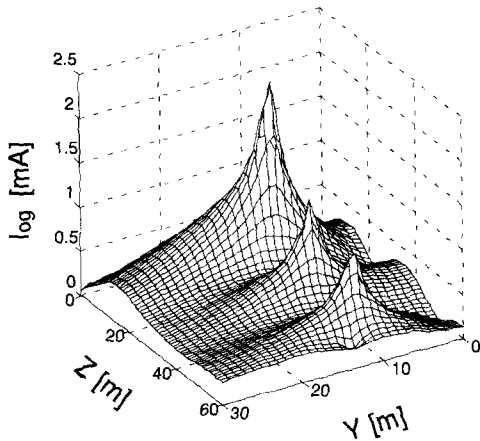


그림 12. 절연시 인체 유도 전류

Fig. 12. Total induced current on a human body in the insulated case.

0.3 mA에서 2.36 mA까지 분포되었다.

VII. 결 론

본 논문은 수치적으로 전계에 의한 유도전류 계산법을 제안했다. 본 연구에서는 송전선로 하에서 인체에 미치는 유도 전압 및 전류를 해석하기 위해 3차원 인체 모델을 표면전하법을 적용하여 80개의 $\pi/2$ 의 내각을 갖는 분할된 요소 띠전하를 사용하여 스플라인 곡선으로 표현하였다. 전압원(송전선로)에는 전하중첩법, 피유도체에는 표면전하법을 이용하여 하이브리드방식의 경계분할법을 본 연구에 적용하였으며, 전압원과 피유도체의 직접 3차원 정전용량을 구함으로써 불평등 전계분포하에서도 인체 유도 전류를 해석할 수 있도록 하였다. 전계는 송전선에 근접할수록 불균등하게 된다. 이러한 송전선하 불평등 전계내에서 인체가 접지되거나 혹은 절연되어 있는 상태 및 인체의 위치에 따른 계산 등과 같은 다양한 조건하에서 유도전류를 계산하였다. 해석 결과에 의하면 765 kV 송전선에서 인체의 단락전류는 인체의 위치에 따라 0.3 mA

에서 6.8 mA까지 분포되었다. 특히, 송전선로에서 활선 작업시 I_{sc} 의 크기는 ANSI 허용기준인 5 mA를 넘을 수 있어 활선 작업시 작업자의 전계 방호 대책을 위해서는 도전물질로 구성된 보호복이 필요함을 알 수 있었다. 또한 인체가 절연된 경우에는 인체의 유도전류는 인체의 위치에 따라 자극 전류의 범위인 0.3 mA에서 2.36 mA까지 분포되었다. 그리고 계산의 정밀도를 위해 송전선로를 12개의 요소로 비균등 분할하여 평균전위오차를 0.1 % 이내로 하였다.

참 고 문 헌

- [1] D. W. Deno, "Electrostatic and electromagnetic effects ultra high-voltage transmission Lines," EPRI Report EL-802, June 1978.
- [2] Z. Yan, B. L. Qin, X. Lin, R. Y. Weng, G. Gela "Calculation and measurement of field parameters during live-line maintenance," IEEE Trans. on PWRD, vol. 6, no. 3, pp. 1187-1191, July 1991.
- [3] Electric Power Research Institute, *Transmission Line Reference Book 345 kV and Above*, 2nd Ed. chap. 8, 1982.
- [4] CRIEPI, *Electrical Design Handbook of 187kV-1,100kV Transmission Lines*, 1987
- [5] Nazar H. Malik, "A review of the charge simulation and its applications," IEEE, Trans. on Electrical Insulation, vol. 24, no. 1, pp. 3-20, 1989.
- [6] T. Takuma, C. Honda, T. Akashi, "Electric field calculation of electrode corners using charge simulation method with arc charges," Trans. of the Institute of Electrical Engineers of Japan, vol. 113-A, no. 5, pp. 382-389, 1993.
- [7] H. Singer, H. Steinbigler, P. Weiss, "A charge simulation method for the calculation of high

- voltage fields," *IEEE. Trans. on PAS*, vol. 93, pp. 1660-1668, 1974.
- [8] S. H. Myung, B. Y. Lee, J. K. Park, S. W. Min, E. S. Kim, "Three dimensional electric field analysis of substation using nonuniform optimal charge simulation." *Ninth International Symposium on High Voltage Engineering*, Austria, Europe, pp. 8363-1~8363-4, 1995.
- [9] S. H. Myung, B. Y. Lee, J. K. Park, S. W. Min, E. S. Kim, "Calculation of electric-field induction on people in nonuniform electric field of substation." *International WROCLAW Symposium on EMC*, Poland, Europe, pp. 179~183, 1996.
- [10] B. Y. Lee, J. K. Park, S. H. Myung, S. W. Min, E. S. Kim, "An effective modelling method to analyze electric field around transmission lines and substation using a generalized finite line charge." *IEEE Trans. on PWRD*, vol. 12, no. 3, pp. 1143-1150, July 1997.
- [11] T. Takuma, *數值電界 計算法*, 1980, Corona.
- [12] O. Biro, I. Bardi, K. Preis, W. Renhart, K. R. Richter, "Finite element techniques applied to HV Problems," *Ninth International Symposium on High Voltage Engineering*, Austria, Europe, pp. 8392-1~8392-4, 1995.

명 성 호



1981년 2월 : 서울대학교 전기공학과(공학사)
 1983년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
 1996년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
 1985년~현재 : 한국전기연구소 전

력계통연구부 책임연구원, 전기환경연구팀장
 [주 관심분야] 전자계 해석 및 인체 영향 평가, 전기, 전자, 통신회로의 EMI/EMC 설계 및 대책

이 재 복

1985년 2월 : 인하대학교 전기공학과(공학사)
 1987년 2월 : 인하대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
 1987년 2월~현재 : 한국전기연구소 전력계통연구부 전기환경연구팀 선임연구원, 인하대학교 대학원 박사학위과정

[주 관심분야] 뇌 surge 해석 및 대책설계, 전기, 전자, 통신회로의 EMI/EMC 설계 및 대책

허 창 수

1981년 2월 : 인하대학교 전기공학과(공학사)
 1983년 2월 : 인하대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
 1987년 2월 : 인하대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
 1988년 : 한국전기연구소 기능재료연구실장
 1988년 ~ 현재 : 인하대학교 전기공학과 부교수
 [주 관심분야] 유도대전, 반도체 보호막, 도전성고분자