

# 765 kV 교류 2회선 송전선 하의 인체 및 자동차에 유도되는 전압, 전류 계산

論文  
45~2~18

## Calculation of the Induced Voltage and Current for a Human and a Car Close to 765 kV AC Double Circuit Transmission Line

閔錫源\* · 金應植\*\* · 明聖鎬\*\*\* · 李秉潤<sup>§</sup> · 朴鍾根<sup>§§</sup>

(Suk-Won Min · Eung-Sik Kim · Sung-Ho Myoung · Byoung-Yoon Lee · Jong-Keun Park)

**Abstract** - This paper estimates the electric field effect near 765[kV] AC double transmission line with numerical data. The induced voltage and current of a human and car under two kinds of phase arrangement are calculated when each of two objects is insulated or grounded. When the calculated results of the low-reactance and superposition phase arrangement are compared, it is proved that the induced voltage and current of the former are about 30[%] smaller than that of the latter. The induced currents of a human and car are less than 0.5[mA] which is about 10[%] less than that of the American National Standard Code. Also the induced voltage and current of dead lines by other live lines are calculated. Finally the effective number and position of shield wires to reduce the field in ground level are considered. charge simulation method and surface charge method are used to simulate the 2 or 3 dimensional transmission line model respectively.

**Key Words** : Induced Voltage, Induced Current, Transmission Line, Charge Simulation Method

### 1. 서론

한국전력은 765[kV] 2회선 송전 시스템을 세계 최초로 도입할 것을 결정하였다. 송전전압 격상과 관련하여 송전선 설계에 고려해야 할 문제는 크게 도체방식 선정, 절연물 및 지지물 형상 설계등이 있다. 이들은 모두 송전전압이 초고압화 함에 따라 인근 주민에 영향을 미치는 전기환경 장애와 밀접한 관계를 갖는다. 전기환경 장애는 크게 두 가지로 나눌 수 있다.

첫째는 송전 도체표면에 발생하는 코로나에 의한 가청소음, 라디오 및 텔레비전 잡음으로 도체방식 선정에 주된 영향을 미친다. 한전 기술연구원에서는 1984년부터 관련 연구를 진행하였으며 이를 바탕으로 6 × Rail 모델을 제안하였다. 또한 이를 실증하기 위한 765 [kV] 실규모 실증 시험선로를 1992년 건설하였으며 1993년 부터 송전선 코로나 잡음에 관한 시험 연구를 수행하고 있다[1~5].

두번째는 문제는 송전선 주위 및 지상에 발생하는 전자계의 영향 평가 문제로 지지물 형상 및 선로의 지상고 선정과 밀접한 관계를 갖는다[6~9]. 본 연구는 두번째 문제의 해결을 위해 송전선 아래 여러가지 위치에서의 인체 및 물체에 유도되는 전압, 전류의 크기를 예측할 수 있는 수치계산 프로그램을 개발하고, 경제적으로 전자계 영향을 감소시킬 수 있는 대책을 제안하였으며 연구내용은 다음과 같다.

(1) 전하중첩법(charge simulation method 이하 CSM)[10~12]을 이용하여 765[kV] 2회선 송전선 하의 인체 및 자동차를 2차원으로 모의한 경우, 이들 물체의 유도 전압, 전류를 송전선 상배열 변화와 인체 및 자동차를 각각 접지시와 절연시로 분류하여 계산하였다. 또한 표면전하법(surface charge method 이하 SCM)[12]을 이용하여 자동차와 인체를 일반 3차원으로 모의하여 같은 계산을 반복하여 두가지의 결과를 비교 검토하였다.

(2) 수직 2회선 지지물의 경우, 한 회선만 운전되고 다른 회선은 정지되어 있을 때 정지된 회선에 유도되는 전압과 전류를 정지 회선 상도체가 절연된 경우와 접지된 경우의 8가지로 분류하여 계산하였다.

(3) 765[kV] 수직 2회선 송전선 지표면 전계강도를, 송전선 상배열을 정상과 역상 배열로 나누어 검토하였으며 이를 감소시키기 위한 대책의 일환으로 차폐선을 1개, 2개, 4개, 6개 설치한 경우를 비교, 검토하였다.

### 2. 계산 방법 및 결과

#### 2.1 정전용량 계산

유도 전압과 전류를 계산하기 위해서는 정전용량 계산이 선행되어야 한다. 전계 분포가 수치계산으로 밖에 구해지지 않는 배치에서는 정전용량도 수치적으로 계산해야한다. 예로 m개의 도체에서 대지간 전압을  $V_1, V_2, \dots, V_m$ 이라고 하고 각 도체가 갖고 있는 전하를  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ 이라 하면  $Q_i$ 와  $V_i$  사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= C_{10} V_1 + C_{12}(V_1 - V_2) + \dots + C_{1m}(V_1 - V_m) \\
 Q_2 &= C_{20} V_2 + C_{21}(V_2 - V_1) + \dots + C_{2m}(V_2 - V_m) \\
 &\dots \dots \dots \\
 Q_m &= C_{m0} V_m + C_{m1}(V_m - V_1) + \dots + C_{m,m-1}(V_m - V_{m-1})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

\* 正 會 員 : 順天郷大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 湖西大 工大 安全工學係列 助教授 · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 電氣研究所 電氣電磁環境研究室 · 工博

<sup>§</sup> 正 會 員 : 서울大 大學院 電氣工學科 博士課程

<sup>§§</sup> 正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1995年 3月 10日

1次 修正 : 1995年 5月 4日

2次 修正 : 1995年 8月 4日

3次 修正 : 1995年 12月 1日

여기에서  $C_{i0}$ 는 도체  $i$ 의 자기 정전용량 또는 대지 정전용량 이고  $C_{ij}$ 와  $C_{ji}$ 는 도체  $i$ 와  $j$ 간의 상호 정전용량으로 같은 값을 가진다. 식(1)을  $V_i$ 에 대하여 정리하면 용량계수  $D_{ii}$ 와 정전유도계수  $D_{ij}(i \neq j)$ 로 표현된 식(2)로 나타내어 지고, 이때  $C_{ij}$ 와  $D_{ij}$  사이에는 관계식(3)이 성립하게 된다. 따라서  $D_{ij}$ 를 구하면 정전용량은 이로부터 구할 수 있게 된다.

$$Q_1 = D_{11} V_1 + D_{12} V_2 + \dots + D_{1m} V_m$$

$$Q_2 = D_{21} V_1 + D_{22} V_2 + \dots + D_{2m} V_m$$

.....

$$Q_m = D_{m1} V_1 + D_{m2} V_2 + \dots + D_{mm} V_m$$

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \dots & D_{1i} & \dots & D_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ D_{n1} & D_{n2} & \dots & D_{ni} & \dots & D_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} = [D] \times [V] \quad (2)$$

$$C_{i0} = D_{i1} + D_{i2} + D_{i3} + \dots + D_{im} \quad (3)$$

$$C_{ij} = -D_{ij} \quad (i \neq j, \quad j=0)$$

전하중첩법을 이용해 정전용량을 구할 경우에는 앞서 말한 바와 같이  $D_{ij}$ 를 구한 후 식(3)에서  $C_{i0}$ 를 구하게 되는데 그 이유는 다음과 같다. 통상 전하중첩법의 기본식은 식(4)의 형태로 주어진다.

$$[V] = [P] \times [Q] \quad (4)$$

경계조건  $[V]$ 는 계에서 주어지고  $[P]$ 는 모의전하의 형태와 위치가 주어지면 결정되는 전위계수행렬이다. 여기서 미지전하  $[Q]$ 를 구하고 이를 사용해 임의의 점에서의 전위를 구하게 된다. (본 논문에서 사용된 대표적인 전하의 전위계수식은 부록에 추가 기술하였다.) 식(4)의 양변에  $[P]^{-1}$ 를 곱하면 쉽게 식(5)의 형태를 얻을 수 있다.

$$[Q] = [P]^{-1} \times [V] \quad (5)$$

이때 식(2)와 (5)의  $[D]$ 와  $[P]^{-1}$ 는 동일한 행렬이 된다. 이때 식(2)에  $[V] = [v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_m]^T = [0, 0, \dots, 1, \dots, 0]^T$ 를  $[P]^{-1}$ 에 곱하면 바로  $[D_{1i}, D_{2i}, \dots, D_{ni}, \dots, D_{mi}]$ 를 구할 수 있다[12]. 이와 같이 경계요소법인 전하중첩법이나 표면전하법으로 기본식을 표현하면 정전용량 계산이 영역분할법보다 편리해진다.

그림 1은 상도체로 6 x Rail (소도체 직경 : 2.956 cm, 소도체 간격 : 40cm)를 사용한 765 [kV] 2회선 송전선로 하의 인체와 자동차 모델로 송전선로와 인체간의 정전용량 및 송전선 상호 정전용량을 구하는데 쓰인 모델이다. 그림 1의 場(field)을 2차

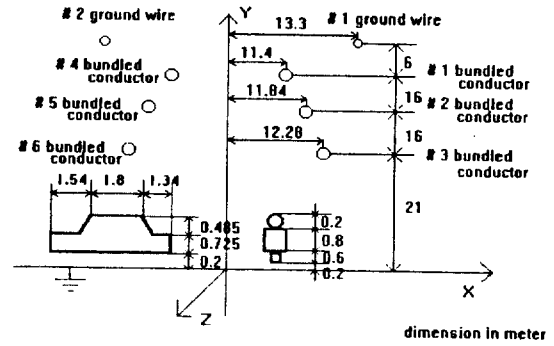


그림 1 765[kV] 2회선 송전선로 아래의 인체와 자동차 모델링  
Fig. 1 Modelling of a human and car under 765[kV] AC double transmission line

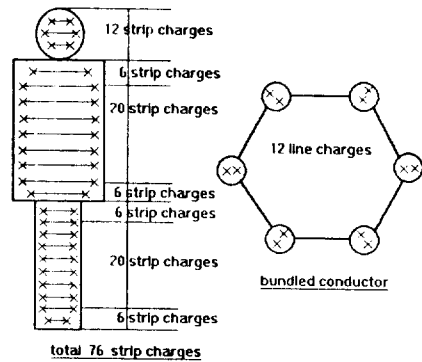


그림 2 2차원장에서의 송전선과 인체를 모의한 가상전하 배치도  
Fig. 2 Modelling of a human and bundle in 2 dimensional analysis

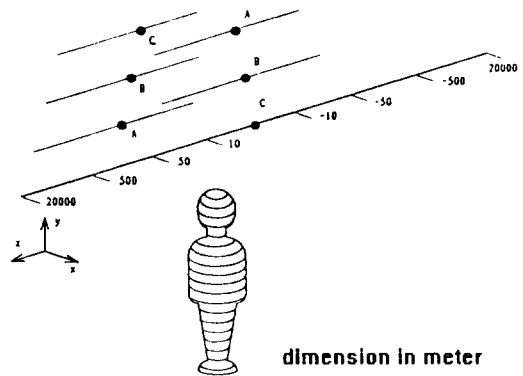


그림 3 3차원장에서의 송전선과 인체를 모의한 가상전하 배치도  
Fig. 3 Modelling of a human and transmission lines in 3 dimensional analysis

원장 및 3차원장으로 각각 가정하여 계산하였다. 인체 표면은 도체로 간주하였다. 상용 주파수의 경우 생체표면은 주위 공기 매질에 비해 유전율이 매우 높기 때문에 생체에 도전율이 높은 알루미늄작업복을 입고 유도 전계량을 측정할 결과와 생체

그대로를 측정한 결과가 같은 것으로 발표되어 인체의 표면을 도체로 가정하였다[13]. 또한 접지시와 절연시로 나누어 계산하게 되는데 이는 우중이나 아주 건조한 경우의 양 극한을 모델링하기 위한 것으로 평상시에는 유도되는 수치가 이들 양극치 사이에 존재하게된다. 2차원의 경우 송전선 및 인체를 모의하는 가상전하는 그림 2와 같이 z축에 평행한 무한장 선전하로 모의하여 계산하였다. 3차원 계산시에는 그림 3에 나타난 것과 같이 송전선은 z축을 따라 7개의 유한 선전하로 모의하였다. 앞서 2차원의 무한장 선전하는 수치계산시 z축을 따라 가상전하의 전하밀도가 변하지 않으나, 3차원의 경우 z축을 따라 전하밀도가 변하므로 이를 위해 각각 다른 밀도를 갖는 유한선전하가 사용된다. 인체의 경우 띠전하로 모의하여 윤탁선을 B-Spline곡선으로 표현하였다. 띠전하로 모의전하를 선택한 것은 그림 3에서와 같이 띠전하가 인체의 경계형상을 잘 모의할 수 있기 때문이다. 6개의 장소에서의 인체와 도체간의 정전용량을 표 1과 같이 구하였다.

그림 4는 송전선로 하의 2차원 및 3차원 자동차 모델이다. 2차원 및 3차원 모델에서의 송전선로와 자동차간의 정전용량은 표 2와 같다. 자동차 표면은 도체로 가정하였으며 4개의 장소에서의 자동차와 도체간의 정전용량을 구하였다.

### 2.2 유도전압 계산

절연된 도체는 다른 도체의 작용에 의하여 유도전압이 발생한다. 유도전압은 절연된 도체상의 소전하의 합이 0이 되는 조건과 도체 표면의 전위는 어디서나 동일한 전압이 되는 것을

표 1 송전선과 인체간의 정전용량 계산결과

Table 1 Electrostatic capacitances between transmission lines and a human body

정전용량 2D[pF/m] 3D[pF]	인 체 위 치					
	(0.0, 0.0)	(11.84, 0.0)	(12.84, 0.0)	(27.84, 0.0)	(0.0, 21.0)	(12.28, 18.00)
C <sub>10</sub> (2D)	48.07	46.59	45.81	47.87	5.46	6.44
C <sub>10</sub> (3D)	51.26	51.23	51.15	51.73	19.52	11.6
C <sub>12</sub> (2D)	0.06	0.06	0.06	0.1	0.48	0.38
C <sub>12</sub> (3D)	0.06	0.07	0.07	0.09	1.47	0.22
C <sub>13</sub> (2D)	0.16	0.19	0.17	0.19	1.55	1.27
C <sub>13</sub> (3D)	0.19	0.23	0.23	0.24	5	0.7
C <sub>14</sub> (2D)	0.56	0.75	0.72	0.46	2.84	17.67
C <sub>14</sub> (3D)	0.57	0.89	0.89	0.56	9.63	47.4

C<sub>10</sub> : 인체와 대지간의 정전용량 (capacitance between body and ground)

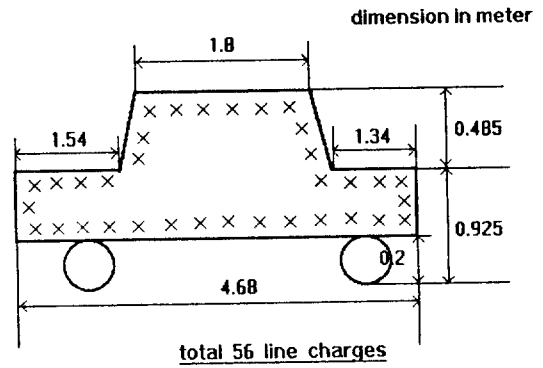
C<sub>12</sub> : 인체와 #1 다중도체간의 정전용량 (capacitance between body and #1 line)

C<sub>13</sub> : 인체와 #2 다중도체간의 정전용량 (capacitance between body and #2 line)

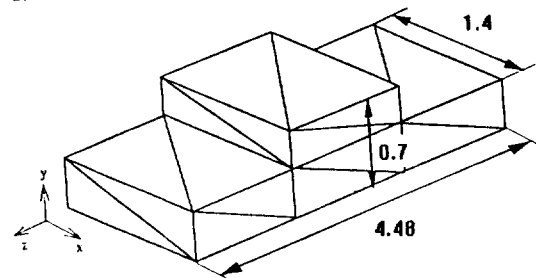
C<sub>14</sub> : 인체와 #3 다중도체간의 정전용량 (capacitance between body and #3 line)

2D : CSM으로 계산 (calculation by 2 dimensional CSM)

3D : SCM으로 계산 (calculation by 3 dimensional SCM)



dimension in meter



36 triangular surface charges

그림 4 송전선로 하의 2차원 및 3차원 자동차 모델

Fig. 4 Modellings of a car under transmission lines in 2 and 3 dimensional analysis

표 2 송전선과 자동차간의 정전용량 계산결과

Table 2 Electrostatic capacitances between transmission lines and a car

정전용량 2D[pF/m] 3D[pF]	자 동 차 위 치			
	(0.0, 0.0)	(11.84, 0.0)	(12.84, 0.0)	(27.28, 0.0)
C <sub>10</sub> (3D)	237	237	237	239
C <sub>10</sub> (2D)	99	99	99	100
C <sub>12</sub> (3D)	0.2	0.25	0.26	0.35
C <sub>12</sub> (2D)	0.07	0.09	0.09	0.14
C <sub>13</sub> (3D)	0.65	0.77	0.78	0.85
C <sub>13</sub> (2D)	0.22	0.27	0.27	0.3
C <sub>14</sub> (3D)	2.32	3.64	3.64	2.12
C <sub>14</sub> (2D)	0.75	1.14	1.14	0.73

C<sub>10</sub> : 자동차와 대지간의 정전용량 (capacitance between car and ground)

C<sub>12</sub> : 자동차와 #1 다중도체간의 정전용량 (capacitance between car and #1 line)

C<sub>13</sub> : 자동차와 #2 다중도체간의 정전용량 (capacitance between car and #2 line)

C<sub>14</sub> : 자동차와 #3 다중도체간의 정전용량 (capacitance between car and #3 line)

2D : CSM으로 계산 (calculation by 2 dimensional CSM)

3D : SCM으로 계산 (calculation by 3 dimensional SCM)

이용하여 구한다. 구체적인 내용은 부록에 추가 기술하였다. 765[kV] 송전선로 하의 인체와 자동차의 유도전압은 2회선의 상도체 배열이 정상과 역상인 경우와 각각 2차원과 3차원에 대하여 나누어 계산하였다.

송전선로는 양쪽 회선의 상배열이 서로 대칭인 배열이다. 표 3는 각각 송전도체의 인가된 정상 및 역상배열의 전압이다. 그림 5와 6은 각각 인체와 자동차의 유도전압 계산결과이다.

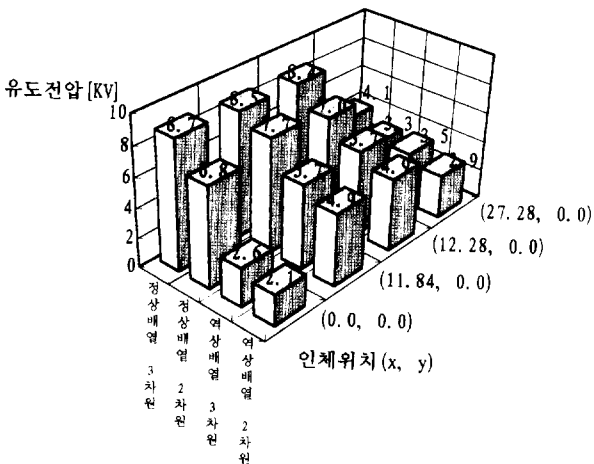
**표 3** 정상 및 역상 배열 송전도체 인가전압  
**Table 3** Applied voltage at lines in low-reactance and superposition phase arrangement

인가 전압(KV)	송전 도체명
441.67∠0	#1 다중 도체 #6 다중 도체
441.67∠-120	#2 다중 도체 #5 다중 도체
441.67∠120	#3 다중 도체 #4 다중 도체
0.∠0	#7 가공 지선
0.∠0	#8 가공 지선

(a) 정상배열

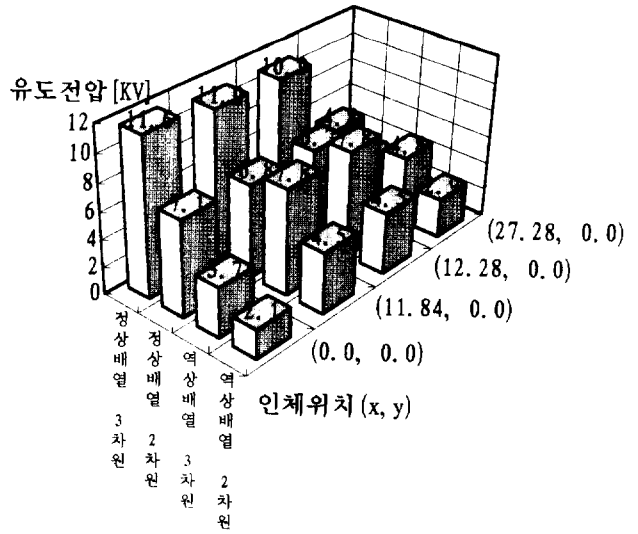
인가 전압(KV)	송전 도체명
441.67∠0	#1 다중 도체 #4 다중 도체
441.67∠-120	#2 다중 도체 #5 다중 도체
441.67∠120	#3 다중 도체 #6 다중 도체
0.∠0	#7 가공 지선
0.∠0	#8 가공 지선

(b) 역상배열



2차원(CSM계산), 3차원(SCM계산)

**그림 5** 송전선로 정상 및 역상 배열시 인체 유도전압  
**Fig. 5** Induced voltages of a human in low-reactance and superposition phase arrangement



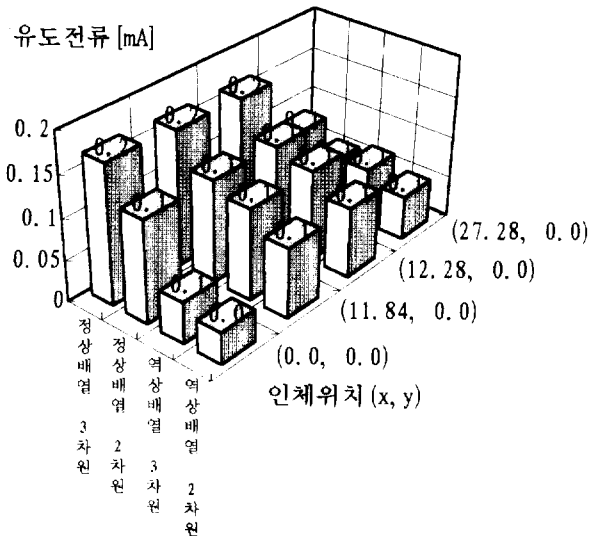
2차원(CSM계산), 3차원(SCM계산)

**그림 6** 송전선로 정상 및 역상 배열시 자동차 유도전압  
**Fig. 6** Induced voltages of a car in low-reactance and superposition phase arrangement

계산 결과를 비교하여 보면 역상 배열의 경우가 정상 배열의 경우보다 유도 전압이 훨씬 작음을 알 수 있다. 따라서 765 [kV]의 초고압 송전 선로의 배열은 역상 배열로 하는 것이 유리할 것으로 생각된다. 특히 환선 작업시 전공이 접근하는 위치인 (0.0m, 21.0m)에서의 역상배열하의 인체 유도전압은 7.2 [kV]인 반면 정상배열의 경우 116.8[kV] 정도로 높게 나온다.

2.3 유도전류 계산

유도 전류 계산은 두 종류로 나눌 수 있다. 하나는 도체가 정해진 전위 (통상은 접지)를 갖고 있는 경우로 유도전류만이

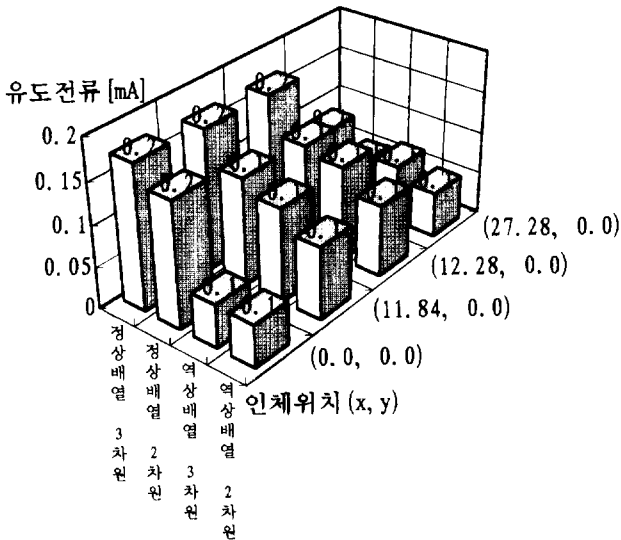


2차원(CSM계산), 3차원(SCM계산)

**그림 7** 인체 접지시 정상, 역상 배열하에서 흐르는 인체 유도전류  
**Fig. 7** Induced currents of a grounded human body in low-reactance and superposition phase arrangement

문제가 된다. 이 전류는 도체가 움직이지 않는 경우는 인가전압이 시간적으로 변할 때만 흐르므로 직류에서는 흐르지 않는다. 다른 하나는 도체가 절연된 경우로 절연된 도체에는 유도전압이 발생하고 도체를 통하여 유도 전류가 흐른다. 따라서 유도전류 계산을 두 종류로 나누어 계산하였다.

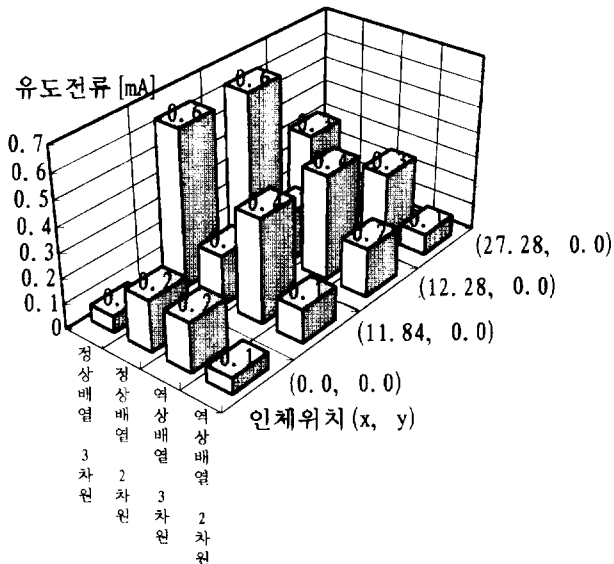
접지된 경우 정전용량 계산에서 설명한 바와 같이 도체  $i$ 의 대지간 정전용량을  $C_{i0}$ , 도체  $j$ 에 대한 상호 정전 용량을  $C_{ij}$  ( $i \neq j$ )라 하면 도체  $i$ 의 전하량  $Q$ 는 각 도체의 전위에 의해 식 (6)로 주어진다. 도체  $i$ 가 접지된 경우는  $V_i = 0$ 으로 식 (7)이 되고



2차원(CSM계산), 3차원(SCM계산)

그림 8 인체 절연시 정상, 역상 배열하에서 흐르는 인체 유도전류

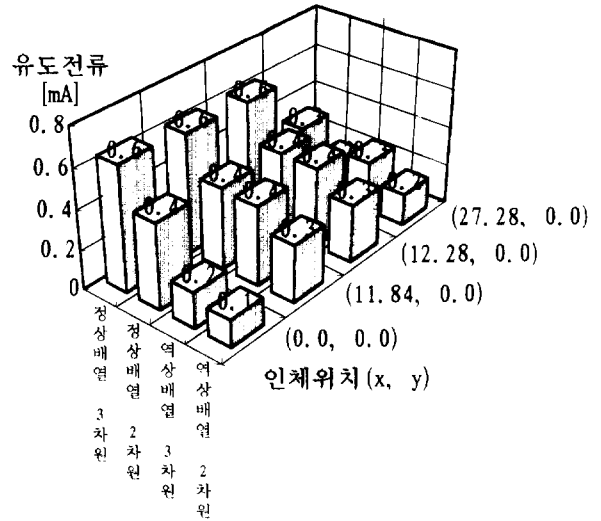
Fig. 8 Induced currents of a insulated human body in low-reactance and superposition phase arrangement



2차원(CSM계산), 3차원(SCM계산)

그림 9 자동차 접지시 정상, 역상 배열하에서 흐르는 자동차 유도전류

Fig. 9 Induced currents of a grounded car low-reactance and superposition phase arrangement



2차원(CSM계산), 3차원(SCM계산)

그림 10 자동차 절연시 정상, 역상 배열하에서 흐르는 자동차 유도전류

Fig. 10 Induced currents of a insulated car in low-reactance and superposition phase arrangement

유도 전류는 식 (8)이 된다.

$$Q = C_{i0} V_i + C_{i1}(V_i - V_1) + C_{i2}(V_i - V_2) + \dots + C_{im}(V_i - V_m) \quad (6)$$

$$Q = -C_{i1} V_1 - C_{i2} V_2 - C_{i3} V_3 - \dots - C_{im} V_m \quad (7)$$

$$I = j\omega Q \quad (8)$$

절연된 경우는 절연된 도체의 대지간 정전 용량  $C_{i0}$ 와 유도 전압  $V_i$ 로 전하량  $Q$ 를 구하여 유도 전류 ( $I = j\omega C_{i0} V_i$ )를 계산할 수 있다. 위와 같이 765 [kV] 송전선로 아래의 접지된 인체와 자동차의 유도 전류는 2회선의 상도체 배열이 정상과 역상인 경우와 각각 2차원과 3차원에 대하여 나누어 계산하였다. 그림 7, 8, 9와 10은 이들의 계산결과이다.

## 2.4 지표면 전계강도 감소 대책

### 2.4.1 정상 배열 및 역상 배열의 지표면 전계강도 분포 계산

그림 1와 같은 765 [kV] 송전선로 아래에서 지표면으로 부터 1[m] 높이의 지점의 전계강도를 전하중첩법을 이용하여 계산하였다. 이 경우 선로하의 물체는 없으므로 2차원 모델만으로 계산이 가능하다. 각 소도체는 무한 선전하 1개로 모의 하였으며 상배열은 정상 배열과 역상 배열로 나누어 검토하였다.

계산 결과는 그림 11과 같이 정상 배열의 경우는 선로 중심으로부터 6[m] 지점에서 약 8.09[kV/m]의 값이 최대치를 보였으며 역상 배열의 경우는 중심으로부터 14[m] 지점에서 약 5.43[kV/m]의 값이 최대치였다. 따라서 지표면 전계 강도를 줄이기 위해서는 역상이 정상 배열보다 훨씬 유리함을 알 수 있다.

### 2.4.2 차폐선을 이용한 지표면 전계강도 감소 대책

지표면 전계강도를 줄이기 위한 방법으로 차폐선을 이용하였

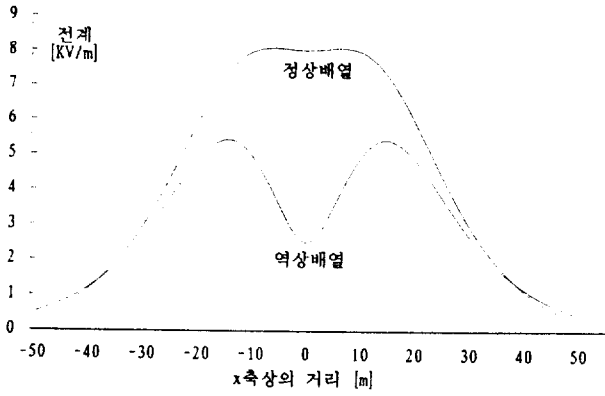
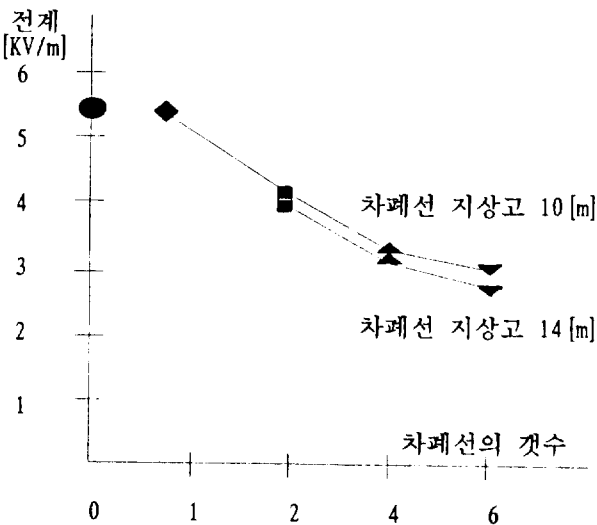


그림 11 765[KV] 2회선 정상, 역상 배열 지표면 전계강도 분포

Fig. 11 Field distribution on the ground level in low-reactance and superposition phase arrangement under 765[kV] AC double transmission line



- : 차폐선이 없는 경우 전계 최대치(maximum field with no shield wire)
- ◆ : X의 위치 14.0 [m] 에 차폐선 1개 설치 (maximum field with one shield wire at 14.0 [m])
- : X의 위치 -14.0 및 14.0 [m] 에 차폐선 2개 설치 (maximum field with two shield wires at -14.0 and 14.0 [m])
- ▲ : X의 위치 -14.0 -11.40 11.40 및 14.0 [m] 에 차폐선 4개 설치 (maximum field with four shield wires at -14.0, -11.4, 11.4 and 14.0[m])
- ▼ : X의 위치 -14.0, -11.84, -11.40, 11.40, 11.84 및 14.0 [m]에 차폐선 6개 설치 (maximum field with six shield wires at -14.0, -11.84, -11.4, 11.4, 11.84 and 14.0[m])

그림 12 차폐선 설치 후의 최대전계치

Fig. 12 Maximum values of electric field under shield wires

다. 차폐선은 그림 1과 같은 765 [kV] 송전선로 아래에 직경 1.85[cm]의 AW선을 1개, 2개, 4개, 6개 사용하는 것으로 나누어 검토하였다. 차폐선의 위치로 X좌표는 선로 중심, 각 상선 직하 및 역상 배열시 지표면 전계강도 값이 최대로 나타나는 중심으로부터 14[m] 지점으로 하였으며 Y좌표는 선로로부터의 섬락 거리를 고려하여 지표면으로부터 14[m]와 10[m] 떨어진 지점을 선정하여 계산하였다.

그림 12는 그 결과이다. 차폐선을 하나 사용한 경우의 계산 결과로 차폐선을 선로 중심에 배치하면 지표면 전계강도를 거의 감소시키지 못함을 알 수 있다. 또한 차폐선을 각 상 선로 직하에 배치한 경우는 지표면 전계강도를 감소시키기는 하나 설치된 쪽만 감소시키는 단점을 보이고 있으며 지표면으로부터 14[m] 떨어진 곳에 설치한 경우가 10[m]보다 약간 전계강도를 더 감소를 시켰다.

차폐선을 2개 설치한 경우로 양쪽 모두의 전계강도를 감소시키고 있으며 전계강도를 가장 감소시키는 차폐선의 X좌표는 선로 중심으로부터 14[m] 떨어진 지점이고 Y좌표는 차폐선 하나를 설치한 경우와 마찬가지로 지표로 부터 14[m] 떨어진 곳이 유리하였다.

차폐선을 6개 설치한 경우로 지표면 전계강도를 가장 감소시키는 위치는 (11.40, 14.00), (14.00, 14.00), (-11.40, 14.00), (-14.00, 14.00)이었다.

차폐선을 6개 설치한 경우로 지표면 전계강도를 가장 감소시키는 위치는 (11.40, 14.00), (11.84, 14.00), (14.00, 14.00), (-11.40, 14.00), (-14.00, 14.00), (-11.84, 14.00)이었다.

이상의 결과와 같이 차폐선을 많이 설치하면 할수록 지표면 전계강도를 감소시킬 수 있으나 경제성이 없어지므로 문제가 되는 특정지역만을 차폐선을 이용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

### 2.5 정지된 회선의 유도전압, 전류 계산

그림 1 765 [kV] 송전선에서 1회선이 정지된 경우에 다른 회선에 의해 유도되는 전압, 전류 크기를 계산하였다. 중첩법을 이용하여 송전선로는 무한장 2차원 선전하로 모의하여 정전용량과 정전유도량을 계산하였다. 표 4은 정전용량 계산 결과이다.

정전 유도량은 정지 회선인 4 ~ 6 도체가 접지되어 있는가 절연되어 있는가에 따라 8가지 경우로 나눌 수 있다. 이 경우의  $I_{ei}$  (접지시 유도전류 A/km),  $V_{ei}$  (절연시 유도전압 [kV]),  $I_{fi}$  (절연시 대지간 전류 A/km)를 계산한 결과는 표 5)와 같다. 이 결과를 참고로 송전선 길이를 200 km로 하면 도체 4, 6의  $V_f$ 는 20 ~ 35 [kV]로 다른 회선으로부터의 유도가 3상평형임에도 불구하고 꽤 큼을 할 수 있다. 따라서 이 선로 고장시 작

표 4 765[KV] 2회선 각 도체 간 정전용량  
Table 4 Electrostatic capacitances between transmission lines

도체 i \ 도체 j	$C_{0i}$	$C_{ij}$					
		대 지	1	2	3	4	5
4	7.1160	0.3197	0.7139	0.9945	-	2.2668	0.6195
5	3.9041	0.8383	1.1730	0.7139	2.2668	-	2.3283
6	3.3170	1.3989	0.8384	0.3198	0.6196	2.3285	-

표 5 유도전압, 전류 계산 결과

Table 5 Results of induced voltages and currents

조 건	유도 전압, 전류 계산 결과
도체 4, 5, 6 모두 접지	$I_{e4} = 0.098$ [A/km], $I_{e5} = 0.685$ [A/km] $I_{e6} = 0.156$ [A/km]
도체 4 절연, 5, 6 접지	$V_{f4} = 20.951$ [kV], $I_{f4} = 0.056$ [A/km] $I_{f5} = 0.066$ [A/km], $I_{f6} = 0.160$ [A/km]
도체 4 접지, 5 절연, 6 접지	$V_{f5} = 14.877$ [kV], $I_{e4} = 0.086$ [A/km] $I_{f5} = 0.022$ [A/km], $I_{e6} = 0.167$ [A/km]
도체 4, 5 접지, 6 절연	$V_{f6} = 32.736$ [kV], $I_{e4} = 0.091$ [A/km] $I_{e5} = 0.057$ [A/km], $I_{f6} = 0.041$ [A/km]
도체 4 접지, 5, 6 절연	$V_{f5} = 18.100$ [kV], $V_{f6} = 34.725$ [kV] $I_{f4} = 0.077$ [A/km], $I_{f5} = 0.027$ [A/km] $I_{f6} = 0.043$ [A/km]
도체 4 절연, 5 접지, 6 절연	$V_{f4} = 19.364$ [kV], $V_{f6} = 31.788$ [kV] $I_{f4} = 0.052$ [A/km], $I_{e5} = 0.071$ [A/km] $I_{f6} = 0.040$ [A/km]
도체 4, 5 절연, 6 접지	$V_{f4} = 21.397$ [kV], $V_{f5} = 15.252$ [kV] $I_{f4} = 0.057$ [A/km], $I_{f5} = 0.022$ [A/km] $I_{e6} = 0.172$ [A/km]
도체 4, 5, 6 모두 절연	$V_{f4} = 18.626$ [kV], $V_{f5} = 17.192$ [kV] $V_{f6} = 33.207$ [kV], $I_{f4} = 0.050$ [A/km] $I_{f5} = 0.025$ [A/km], $I_{f6} = 0.042$ [A/km]

업용 장비는 최소한 이상의 전압, 전류 특성에 견딜 수 있도록 설계되어야 할 것이다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 전하 증첩법과 표면 전하법을 이용하여 765 [kV] 2회선 송전선 아래의 인체 및 자동차의 유도 전압, 전류를 계산한 결과를 기술하였다. 이들은 각각 2 차원 및 3 차원 모델로 나누어져 계산되었으며 그외에도 송전선 상배열 변화와 인체 및 자동차가 접지시와 절연시로 분류하여 계산하였다.

유도 전압은 정상 배열의 경우는 인체나 자동차나 모두 지표면의 송전 선로중심점, 각 상의 직하점에서 거의 유사한 값을 보였다. 반면 역상 배열의 경우는 지표면의 송전 선로 중심점에서 최저값을 각 상의 직하점에서 최대값을 보였다. 이 값은 정상 배열 최대값의 약 70%에 해당하는 것이고 특히 활선 작업시 전공이 접근하는 위치인 (0.0m, 21.0m)에서의 역상 배열 유도 전압은 정상 배열의 6%정도로 크게 줄어, 인체의 유도 전압을 감소시키기 위해서는 역상 배열로 하는 것이 유리함을 알 수 있다. 그러나 송전선 코로나 장애에 관한 연구 결과는 역상 배열이 송전선 도체표면 전계 강도를 증가시키는 단점이 있으므로 송전 선로 설계시에는 송전선 도체의 직경을 증가시키는 것이 경제적인가 또는 송전선 지상고를 증가시키는 것이 경제적인가를 상호 비교하여 설계하는 것이 바람직하다고 생각한다.

유도 전류는 상배열 변화시 유도 전압과 유사한 결과로 역상 배열이 정상 배열보다 낮은 값을 보였다. 역상 배열시 인체와 자동차에 흐르는 유도전류는 지표상에서는 최대값이 0.5[mA] 이하로 미국 안전 규격치 5[mA] 보다 훨씬 낮은 값으로 거의 문제가 없을 것으로 생각된다. 또한 2차원으로 모의한 인체 접지시의 유도 전류는 절연시와 거의 유사한 값을 나타냈으나 자동차의 경우는 절연시가 접지시의 약 2배 값을 보였다. 반면 3차원으로 모의한 경우는 유도전류가 인체와 자동차 모두 절연시가 접지시보다 작거나 거의 같은 실제 물리현상을 보여 주었다. 이것으로 3차원의 2회선 송전선 아래의 인체 및 자동차를

2차원으로 모의 계산하는 것이 실제의 물리적 현상과 약간의 차이가 있음을 알았으며 정밀한 해를 요구하는 계산에는 3차원으로 모의해야 함을 알 수 있었다.

765 [kV] 수직 2회선 지표면 전계강도 분포 계산결과는 정상배열의 경우는 약 8.09[kV/m]의 값이 최대치를 보였으며, 역상 배열의 경우에는 약 5.43[kV/m]의 값이 최대치였다. 따라서 지표면 전계강도를 줄이기 위해서는 역상 배열이 정상 배열보다 훨씬 유리함을 알 수 있었고, 지표면 전계강도를 줄이기 위한 방법으로 차폐선을 많이 설치하면 할수록 지표면 전계강도를 감소시킬 수 있으나 경제성이 없어지므로 문제가 되는 문제가 되는 특정 지역만을 차폐선을 이용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

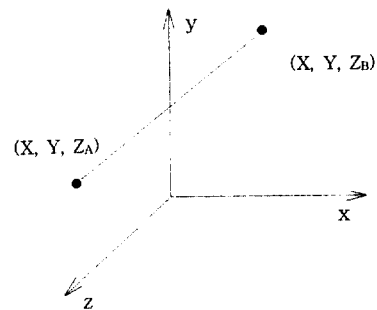
또한 한 회선만 운전되고 다른 회선은 정지되어 있는 765 [kV] 수직 2회선의 정지된 회선에 유도되는 전압, 전류의 크기는 정지된 회선이 접지되어 있는가 절연되어 있는가로 분류하여 계산하였다. 이때 송전선 길이를 200[Km]로 하면 정지된 도체의 접지시 유도전류는 20~35[A], 절연시 유도전압은 15~35[kV]로 이 선로의 고장시 작업용 장비는 최소한 이값 이상의 전압, 전류 특성에 견딜 수 있도록 설계되어야 할 것이다.

### 부 록

(1) 송전선과 인체의 모델링에 사용된 유한장 선전하와 띠전하에 의한 전위계수 유도식은 다음과 같다.

#### 1) 유한장 선전하

아래 그림과 같이 (X,Y,Z<sub>A</sub>)에서 (X,Y,Z<sub>B</sub>)까지 일정한 길이를 갖는 선전하가 임의의 점 p(x,y,z)에 미치는 전위는 아래와 같은 식이 된다. 여기서 λ를 제외한 식이 전위계수가 된다.

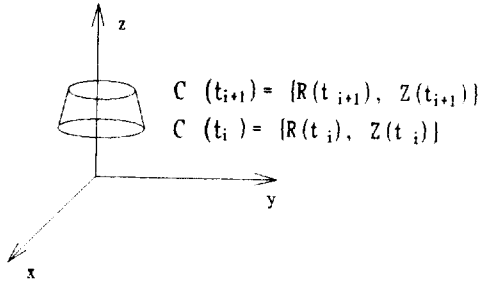


$$\phi = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \ln \left\{ \frac{Z_B - Z + \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z_B - z)^2}}{Z_A - Z + \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z_A - z)^2}} \right\} - \ln \left\{ \frac{Z_B - Z + \sqrt{(X-x)^2 + (Y+y)^2 + (Z_B - z)^2}}{Z_A - Z + \sqrt{(X-x)^2 + (Y+y)^2 + (Z_A - z)^2}} \right\} \right\}$$

#### 2) 띠전하

아래 그림과 같이 t를 매개변수로 곡선 C(t) (t<sub>1</sub> ≤ t ≤ t<sub>2</sub>)를 회전시켜서 얻는 띠전하가 임의의 점 P(x,y,z)에 미치는 전위는 아래와 같은 식이된다. 여기서 σ를 제외한 식이 전위계수가 된다.

$$\phi = \frac{1}{\pi\epsilon_0} \int_{t_1}^{t_2} \sigma R(t) \left\{ \frac{K(k_1)}{\sqrt{(r+R(t))^2 + (z-Z(t))^2}} - \frac{K(k_2)}{\sqrt{(r+R(t))^2 + (z-Z(t))^2}} \right\} \sqrt{R(t)+z(t)} \cdot dt$$



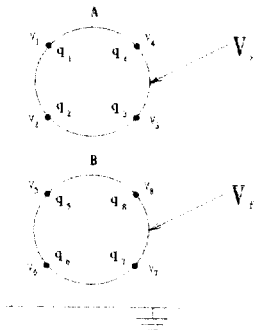
여기서  $k_1, k_2$ 는 다음과 같다.

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

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

(2) 절연된 도체의 유도전압 계산

아래 그림과 같이 도체A는  $V_k$ 의 전압이 인가되고 도체B는 절연된 상태로 존재한다고 하자 이러한 계를 해석하기 위해 전하중첩법에서 도체 A와 B에 모의 전하와 유과점을 각각 4개씩 배치하였다.



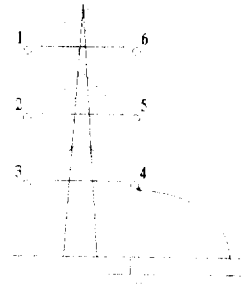
이때 도체B의 유도되는 전압  $V_f$ 를 다음과 같이 두가지 조건을 이용하여 구한다. 첫째는 도체B의 유도전압은 도체표면 어디에서나 일정하다는 조건이고, 둘째는 도체B가 가지고 있는 총 전하량의 합은 0이라는 조건이다. 전자에 의해  $V_5=V_6=V_7=V_8=V_f$ 의 식이 성립하고 후자에 의해  $q_5+q_6+q_7+q_8=0$ 의 식이 성립한다. 이때 한 예로  $V_5=V_6$ 의 식을 풀어쓰면 아래와 같이 나타나 전체식은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{18} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{28} \\ P_{31} & \cdot & \dots & \cdot \\ P_{41} & \cdot & \dots & \cdot \\ P_{51}-P_{61} & P_{52}-P_{62} & \dots & P_{58}-P_{68} \\ P_{61}-P_{71} & P_{62}-P_{72} & \dots & P_{68}-P_{78} \\ P_{71}-P_{81} & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \\ q_7 \\ q_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_k \\ V_k \\ V_k \\ V_k \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$P_{51} \cdot q_1 + P_{52} \cdot q_2 + \dots + P_{58} \cdot q_8 = P_{61} \cdot q_1 + P_{62} \cdot q_2 + \dots + P_{68} \cdot q_8$   
여기서  $q$ 를 구하고 이를 이용하면 본 논문 식(4)에서 유도전압  $V_f$ 를 구한다.

(3) 765[Kv] 2회선 송전선에 있어서 상호 회선간의 유도전류 유도

아래그림과 같은 2회선 송전선로에서 1, 2, 3의 송전선이 활성이 되고 4번선이 접지, 5, 6번선이 절연된 경우의 4, 5번선에 흐르는 유도전류를 계산하고자 한다. 4번 접지선에 유도되는 전류는 아래와 같다.



$$I_4 = j\omega \sum_{i=1}^6 C_{i4} V_i$$

( $C_{i4}$ 는 도체 i와 4번 도체사이의 정전용량,  $V_i$ 는 각 도체의 전압) 5,번선에 흐르는 전류는

$$I_5 = j\omega C_{05} V_5$$

( $C_{05}$ 는 5번 도체와 대지간의 정전용량,  $V_5$ 는 5번 도체의 전압)로 주어지고, 6번 도체에 흐르는 전류는 5번 도체와 같은 방법으로 구한다.

참 고 문 헌

[1] 민석원, 김정부, "코로나 케이지를 이용한 765 kV 초고압 송전선 다중 도체방식 선정," 대한전기학회 논문지 제42권 7호, pp. 84~94, 1993.  
[2] 민석원, 박종근, "코로나 잡음 특성을 고려한 초고압 송전선의 다중 도체 배열 방식 연구," 대한전기학회 논문지 제 39권 5호, pp. 508~515, 1990.  
[3] Min. S. W., Kim. J. B., Lee. D. I., "A Study on Corona Characteristics of Symmetric and Asymmetric Conductor Bundle for 765 kV Double Circuit Transmission Line by the Use of Corona Cage," Proc. of 8th ISH. vol. 3, pp. 457~460-, 1993.  
[4] Min. S. W., Park. J. K., Kim. J. B. "Conductor Bundle Geometry Optimization in view of Conductor Surface Gradient." IEE Japan, 111-B, pp. 1065~1072. 1991.  
[5] Min. S. W., Park. J. K., Kim. J. B., Chung. S. J., "Audible Noise Level in Future 765 kV Double Circuit Transmission Line of Korea Electric Power Corporation," Proc. of the 1988 U. S. Japan Seminar on Electromagnetic Interference in Highly advanced Social Systems(Modeling, Character-



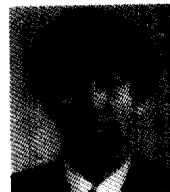
- ization, Evaluation and Protection), pp. 5.12~5.23. 1988.
- [6] Chiba. A., Isaka. K., Yokoi. Y., "Strengths of Fields Induced Inside Human models Under AC Transmission Line," IEE Japan, 103-11, pp. 56~64, 1983.
- [7] Baraton. P., Cahouet. J., Hutzier. B., "Three Dimensional Computation of Electric Fields Induced in a Human Body by Magnetic Fields." Proc. of 8th ISH. Vol. 3. pp. 517~520, 1993.
- [8] Isaka. K. Kushiro. T., Okamoto. M., Hayashi. N., Yokoi. Y., "Electromagnetic Environments in the Vicinity of Ground under EHV Power Lines," Proc. of 8th ISH. Vol., 3, pp. 531~534.
- [9] Chiba. a., Isaka. Km., Onogi. Y., "A Method for Numerical Determination of induced Current Density in Human Model Exposed to Power Frequency Electric Field," Proc. of 8th ISH. Vol. 3, pp. 535~538.
- [10] Singer. H., Steinbigler. H., Weiβ. P., "A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Field," IEEE Trans. on PAS. 93, pp. 1660~1667. 1974.
- [11] 村島定行, 代用電荷法とその應用, 森北出版社, 東京. 1983.
- [12] 河野照哉, 宅間, 數値電界計算法, コロナ社, 東京, pp. 126~144, 1980.
- [13] G, Matsumoto, K, Shimizu, "Evauiation of ELF Electric Field Exposed on Biological Body Surface," Proc. of the 1988 U.S. Japan Seminar on Electromagnetic Interference in Highly Advanced Social Systems, pp. 7-11~7-20, August, 1988

## 저 자 소 개



### 민석원 (閔錫源)

1968년 1월 3일생. 1981년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1984년~1991년 한전 기술연구원 계통연구실 근무. 현재 순천향대 공대 전기공학과 조교수



### 이병운 (李秉潤)

1967년 11월 9일생. 1990년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 서울대 대학원 전기공학과 박사과정



### 김응식 (金應植)

1961년 12월 26일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 호서대학교 안전공학계열 조교수



### 박종근 (朴鍾根)

1952년 10월 21일생. 1973년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1979년 일본 동경대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 서울대 공대 전기공학과 교수, 당학회 총무이사



### 명성호 (明聖鎬)

1959년 3월 20일생. 1981년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1985년~현재 한국전기연구소 전기전자환경 연구실 근무