

# 送電線의 導體 表面 및 地表面 電界 強度 計算法

김정부\*·민석원\*\*·박종근\*\*\*  
(\*한전 기술연구원 책임연구원, \*\*동 연구원,  
\*\*\*서울대 공대 전기 공학과 부교수)

## 1. 序 論

技術의 進歩와 함께 規模의 經濟性(economy of scale)을 이유로 單位 發電所 容量은 점차 大型化하고 있으며, 그러한 大規模 電源은 立地 確保의 制約 때문에 需要 中心地로 부터 차츰 먼곳에서 立地를 찾게 된다. 必然的인 結果로 電力 輸送費의 節減, 系統 供給 信賴度 向上 및 經過地를 効率的으로 利用할 수 있는 大規模 長距離 送電方式이 要求 되고 있는 趨勢이다.

送電 容量을 增大시키기 위해서는 送電 電壓을 格上시키는 것이 技術的으로나 經濟的으로나 合理的이다. 그러나 交流 送電 電壓이 500kV 以上이 되면 超高壓 送電 導體 表面에 發生하는 코로나에 의한 可聽騒音(Audible Noise), 라디오 雜音(Radio Interference), 텔레비전 雜音(Television Interference) 등의 코로나 障害와 地表面 電磁界 影響이 線路 設計에 重要的 要素로 作用한다. 이러한 交流 送電線의 코로나 障害는 맑은 날 보다는 비가 오는 경우에 送電 導體 表面에 맺히는 물방울에 電界가 集中되어 發生하는 것으로 이를 緩和시키기 위해서는 送電 導體 表面 電界 強度를 낮추는 것이 重要的 關鍵이다. 또한 地表面 電界 強度는 送電線 地上高와 相導體 配列方式에 따라 많은 影響을 받고 이들은 送電 線

路 建設費와 密接한 關係를 갖는다.

따라서 各國의 電力 會社에서는 送電 線路를 經濟的으로 建設하기 위하여 線路 建設以前에 導體 表面 電界 強度와 地表面 電界 強度를 檢討할 必要가 있다. 이러한 送電線路의 電界 強度 計算은 無限 境界值를 갖는 2次元 問題로서 Markt and Mengele法, 電荷 重疊法 등의 數值 電界 計算法이 주로 使用되고 있다. 여기서는 이들의 計算 原理 및 適用 例를 中心으로 紹介하고자 한다.

## 2. 地表面 電界 強度 計算

### 2.1 計算 方法

直流 送電 線路의 경우에는 電界 및 磁界는 완전히 停止 狀態이다. 交流 送電線의 경우에는 電界 및 磁界는 常用 周波數로 時間에 따라 변하지만 準停止 狀態로 看做된다. 다시 말하면 電界와 磁界를 완전히 獨立하여 定電界의 概念에 根據해서 計算할 수 있다. 送電 線路에 의한 地表面 電界 計算은 導體의 弛度, 鐵塔의 近接, 平平하지 못한 地表面 등으로 인해 매우 複雜하기 때문에 이를 單純히 하기 위한 다음의 假定을 한다.

가. 導體는 地表面과 相互 無限으로 平行하고 既

知的 電壓을 가진 매끄러운 圓筒의 等電位 表面으로 한다.

나. 導體의 支持物과 附近의 物體에 대한 影響은 無視한다.

다. 各 導體의 地上 높이의 平均値는  $H-2S/3$ 로 한다. 여기서  $H$ 는 支持點에서의 導體 地上 높이이고  $S$ 는 年間 平均 溫度에 해당하는 導體 弛度이다.

라. 地面은 無限한 水平面 導體이고 電位는 零이다.

마. 對稱 多量 導體 配列은 다음의 等價 導體 直徑  $d_{eq}$ 를 갖는 單一 導體로 置換한다.

$$d_{eq} = D (nd/D)^{1/n}$$

여기서  $D$ : 多量 導體 配列 直徑,  $n$ : 素導體 數,

$d$ : 素導體 直徑임.

위와 같이 假定하고 等價 單一 導體 重心( $X_j, Y_j$ )에 임의량의 無限 線電荷( $Q_j$ )를 配置하면 電荷 配置點과 等價 單一 導體 表面의 輪廓點( $x_i, y_i$ )간의 Maxwell 電位係數( $P_{ij}$ )와 印加 電壓( $V_i$ )는 다음과 같은 關係를 갖는다.

$$P_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \ln \frac{(x_i - X_j)^2 + (y_i + Y_j)^2}{(x_i - X_j)^2 + (y_i - Y_j)^2} \quad (1)$$

$$[P][Q] = [V] \quad (2)$$

2)식에서 交流 電壓이 印加될때는  $[V]$ 가 複素數로

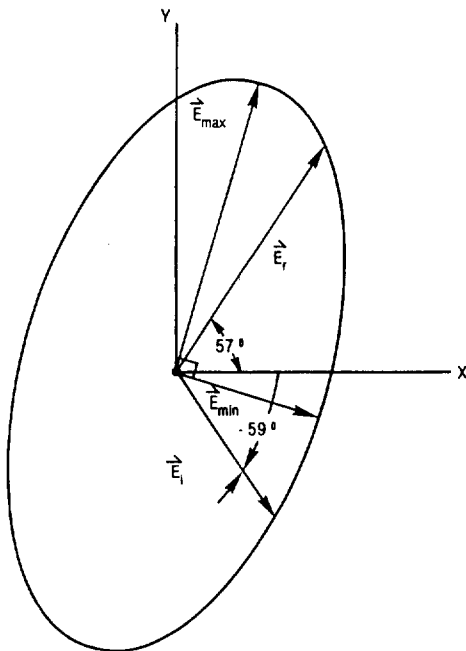


그림 1. 지표면 전계 강도의 타원형 궤적

表現되므로 未知 電荷量 $[Q]$ 도 實數部와 虛數部로 나누어 구해야 한다. 즉  $[Q] = [Q_r] + j[Q_{im}]$ 로 되어  $[Q_r]$ 과  $[Q_{im}]$ 는 3)式으로부터 구할 수 있다.

$$[Q_r] = [P]^{-1}[V_r], [Q_{im}] = [P]^{-1}[V_{im}] \quad (3)$$

$[Q]$ 가 구해지면 地表面의 임의의 地點( $x, y$ )에서의 地表面 電界 強度는 4), 5), 6)式으로부터 구할 수 있다.

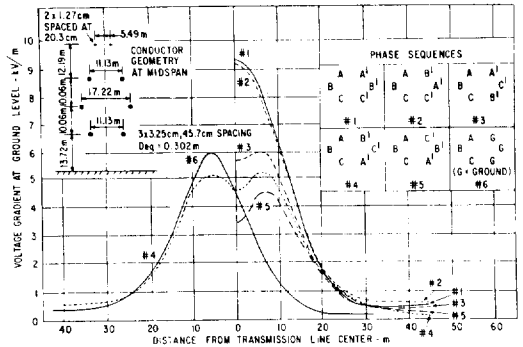
$$F = \sum_{j=1}^n (F_x \vec{X} + F_y \vec{Y}) \quad (4)$$

$$F_x = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot (Q_{rj} + jQ_{imj}) \cdot (x - X_j) \cdot$$

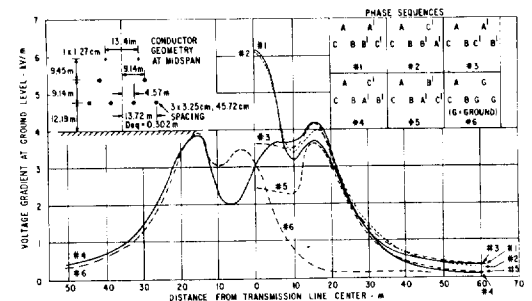
$$\left\{ \frac{1}{(x - X_j)^2 + (y - Y_j)^2} - \frac{1}{(x - X_j)^2 + (y + Y_j)^2} \right\} \quad (5)$$

$$F_y = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot (Q_{rj} + jQ_{imj}) \cdot \left\{ \frac{(y - y_j)}{(x - X_j)^2 + (y - Y_j)^2} - \frac{(y + Y_j)}{(x - X_j)^2 + (y + Y_j)^2} \right\} \quad (6)$$

이와 같이 地表面 強度는 複素數로 表現되어 時間의



a) 500kV 수직 배열 2회선 선로의 상도체 배열 변화에 따른 지표면 전계 강도



b) 345kV 수평 배열 2회선 선로의 상도체 배열 변화에 따른 지표면 전계 강도

그림 2. 지표면 전계 강도 계산 예

經過에 따라 그림 1과 같은 墮圓型 軌跡을 그리며 最大值는 墮圓型의 長半徑에 最小値는 短半徑에 나타난다.

### 2.2 計算 例

送電 線路의 相配列을 變化시킬때 地表面 電界 強度는 그림 2와 같이 變化한다. 그림 2에서 알 수 있듯이 相導體 配列을 逆相으로 할 때 地表面 電界 強度를 낮출 수 있다.

## 3. 導體 表面 電界 強度 計算

### 3.1 計算 方法

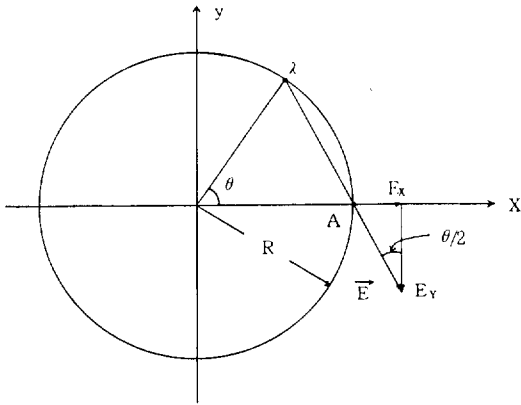


그림 3. 반경 R의 원주상의 선전하에 의한 전하

#### 3.1.1 Markt and Mengele法

Markt와 Mengele은 孤立된 多重 導體의 素導體 表面 電界 強度 分布를 誘導하였다. 多重 導體가 孤立되었기 때문에 多重 導體의 全電荷는 素導體 중에 고르게 分布된 것으로 하였다. 多重 導體의 경우에 들어가기 전에 그림 3과 같이 A點에서 半徑 R의 圓周에 놓여진 線電荷 λ에 의해서 만들어진 電界를 먼저 考慮하기로 한다. A點에서 λ에 의한 電界는 다음 式으로 주어진다.

$$\vec{E} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{2R \sin \frac{\theta}{2}} \vec{r} \quad (7)$$

여기서  $\vec{r}$ 은 그림 3과 같이 λ와 A를 연결한 線상에 있는 單位 벡터이다. 또한 電界 強度  $\vec{E}$ 의 X, Y 성분은 아래와 같다.

$$E_x = |\vec{E}| \sin \frac{\theta}{2}, \quad E_y = -|\vec{E}| \cos \frac{\theta}{2} = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{2R} \quad (8)$$

이제 n개의 素導體로 構成된 多重 導體를 考慮해 보면 各 素導體의 中心에 無限 線電荷 λ가 配置된 것으로 假定하고 素導體 表面 電界 強度를 計算할 수 있다. 例로 그림 4의 1번 素導體 表面 電界 強度는 자신의 線電荷에 의한 電界  $\vec{E}_a$ 와 다른 素導體(n-1)개의 線電荷에 의한 電界의 合으로서 다음과 같이 表現된다.

$$\vec{E}(\alpha) = \vec{E}_a + 2E_x \cos \alpha = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon r} + 2(n-1) \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{2R} \cos \alpha$$

$$\cos \alpha = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon R} \left[ 1 + (n-1) \frac{r}{R} \cos \alpha \right]$$

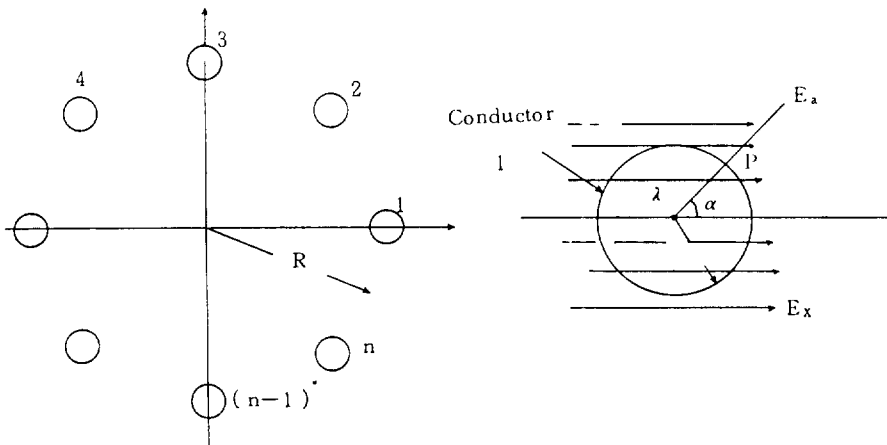


그림 4. 다중 도체의 소도체 표면전계

$$= E_a \{1 + (n-1) \frac{r}{R} \cos \alpha\} \quad (9)$$

9)式에서 알 수 있듯이 素導體 表面 電界 強度는 sin 函數로 變化하고 多重 導體의 中心과 素導體 中心을 연결하는 直線 上에서 最大 및 最小值를 갖는다.

以上은 孤立된 多重 導體의 경우이고 實際의 送電 線路의 導體 表面 強度는 다음 順序로 計算한다.

- 1) 各 相의 多重 導體는  $r_{eq}$ 의 等價 半徑을 갖는 單一 導體로 變換한다.

$$r_{eq} = [nrR^{n-1}]^{1/n}$$

여기서 n: 素導體 數, r: 素導體 半徑,

R: 多重 導體 半徑

- 2) 各 相의 等價 單一 導體 中心에 無限 線電荷를 配置하여 Maxwell 電位 係數를 決定한다. 電位 係數와 各 相導體에 印加한 電位를 利用하여 等價 單一 導體 中心에 配置한 無限 線電荷量을 決定한다.
- 3) 無限 線電荷量을 利用하여 各 素導體 表面의 平均 및 最大 電界 強度를 구한다.

### 3.1.2 電荷 重疊法

Markt and Mengele法은 多重 導體 配列의 各 素 導體에 平等한 電荷가 分布되는 것으로 假定하여 計算하기 때문에 多重 導體 配列이 非對稱으로 되면 計算 結果가 不正確해 진다. 따라서 非對稱 配列의 導體 表面 電界 強度는 電荷 重疊法을 利用하여 計算한다. 電荷 重疊法에서는 多重 導體 配列을 等價 單一 導體로 置換하지 않고 各 素導體마다 無限 線 電荷를 配置하고 各 素導體 表面에 輪廓點을 配置하여 Maxwell 電位 係數를 決定한 後, 電位 係數와 各 素導體에 印加한 電位로 부터 各 素導體 表面 電界 強度를 구하기 때문에 非對稱 配列에서는 매우 有效하다. 또한 Markt and Mengele法은 단순히 送電 線路에만 適用되나 電荷 重疊法은 計算 例에서 볼 수 있듯이 複雜한 境界를 갖고 있는 問題도 쉽게 計算할 수 있어 電力 會社에서 가장 有效하게 利用되는 數值 電界 計算法이다. 電荷 重疊法의 基本 原理는 여러 차례 紹介되었으므로 여기서는 省略한다.

### 3.2 計算 例

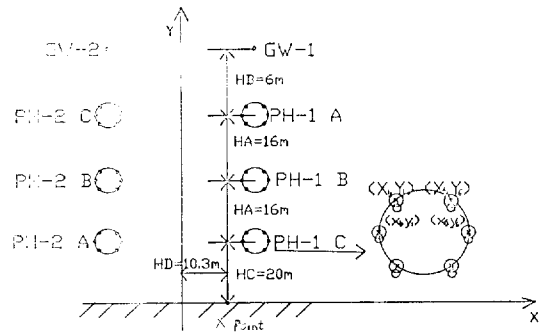
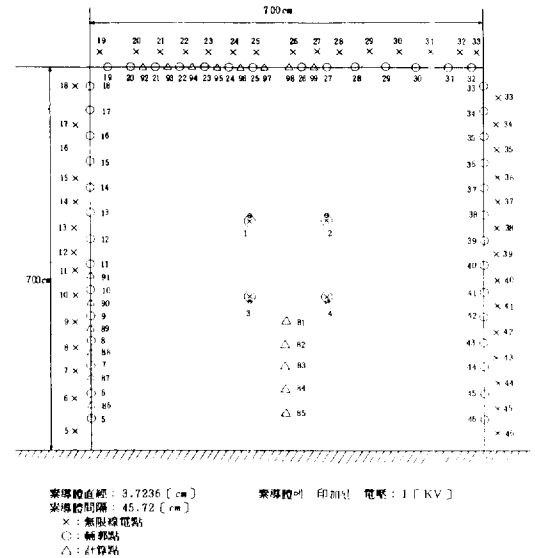
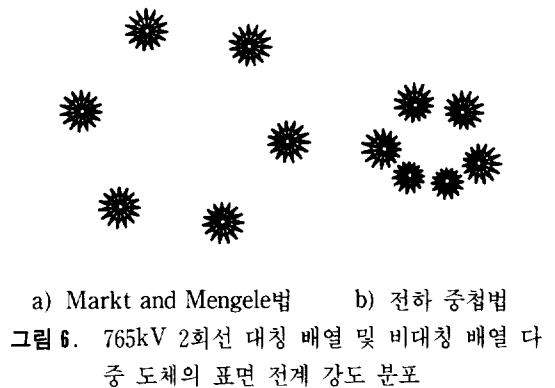
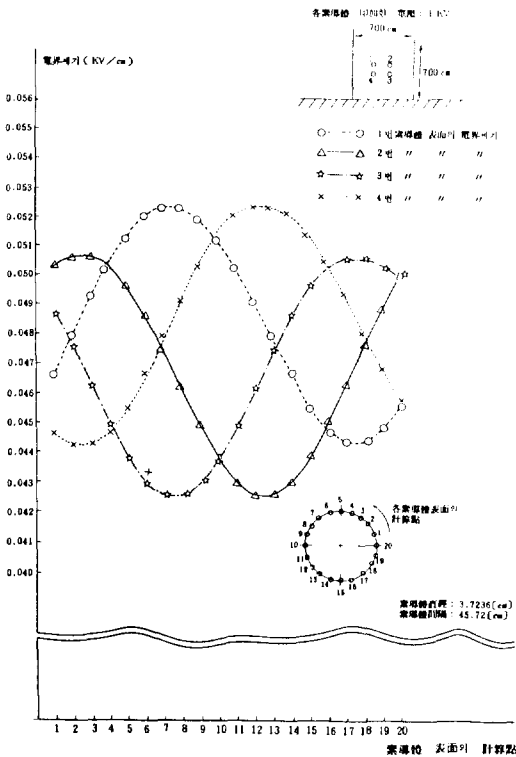


그림 5. 765kV 2회선 송전 선로



a) 코로나 케이지 내의 다중 도체 표면 전계 강도 분포 계산을 위한 입력도



b) 코로나 케이지 내의 다중 도체 표면의 전계 강도 분포

그림 7. 전하 중첩법을 이용한 코로나 케이지 내의 다중도체 표면 전계 강도 계산

그림 5와 같은 송전 선로 도체 표면 전계 강도를 Markt and Mengele法과 電荷 重疊法으로 計算한 結果는 그림6과 같다. 非對稱 配列 導體의 表面 電

界 強度는 對稱 配列과는 달리 不均一해짐을 알 수 있다. 또한 그림 7은 多重 導體의 코로나 特性을 試驗하기 위한 單相 模擬 線路에 設置된 多重 導體 配列의 表面 電界 強度 計算 例이다.

#### 4. 結 論

앞에서 既述한 바와 같이 지금까지의 送電 線路 電界 強度 計算은 無限 境界值를 갖는 2次元 問題로 簡略化하여 計算하지만 실제의 경우는 매우 複雜한 境界值를 갖는 3次元 問題이다. 例로 送電 線路 直下에 있는 動植物 및 物體에 誘導되는 電磁界의 影響을 解析하기 위해서는 3次元 數值 計算法이 要求된다. 따라서 이 分野의 研究者들은 3次元 數值 計算法과 測定 技法에 대한 研究, 開發을 계속해야 할 것으로 생각된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Transmission line Reference Book-345 kV and Above/Second Edition Electric Power Research Institute, 1982
- [2] P.S. Maruvada, "Calculation of Ground-Level Electric and Magnetic Fields," IEEE/PES Special Course -Corona and Field Effects of AC and DC High Voltage Transmission Lines, July 1981
- [3] P.S. Maruvada, "Conductor-Surface Electric Fields," IEEE/PES Special Course-Corona and Field Effects of AC and DC High Voltage Transmission Lines, July 1981
- [4] 閔錫源, "電荷 重疊法의 原理와 應用", 電力 第1卷 第3號, 韓電 技術研究院, pp. 73-102, 1984.9