

特別高壓 電線路에 대한 人體接近限界의 理論的研究

A Study on the Theoretical Analysis of Human Body Approximation to Special High Voltage Electric Lines

김 상 렬* 김 찬 오** 이 재 인***
Kim Sang Ryull Kim Chan O Lee Jae In

ABSTRACT

This study is conducted to examine the theoretical background of characteristics for electric shock encountered in special high-voltage electric lines among the accidents of electric shock, and to calculate applied current to human body and field strength over the head by means of numerical analysis through FEM(Finite Element Method), and to make clear the hazard level to the human body, and to establish the approach limit distance of human body to the electric lines, which could be applied to the safety standard while working in the vicinity of special high-voltage electric lines.

第 1 章 序 論

電氣災害는 크게 나누어 感電事故로 인한 電擊災害와 電氣의原因으로 인한 火災 및 爆發 그리고 최근에 등장한 電磁波 障害에 의해 自動化 機器, 設備 등이 誤動作하여 발생하는 災害 등이 있는데, 그 중 感電事故로 인한 電擊災害는 死亡率이 매우 높을 뿐만 아니라 해마다 그 發生率이 증가하는 추세에 있기 때문에 심각한 사회적 문제로 대두되고 있다.

본 研究는 感電死故로 인한 電擊災害 중, 人體가 特別高壓 電線路에 가깝게 접근할 때 발생하는 電

擊災害를 研究對象으로 하여 接近距離에 따른 特性을 해석하고, 그 결과에 의해 人體가 접근할 수 있는 限界距離를 제시하여, 特別高壓 電線路에 대한 近接作業에 있어 安全基準이 될 수 있도록 하고자 하는 것이다.

特別高壓 電線路에 대한 接近限界距離는 우리나라의 경우에는 1990년 7월 23일 개정된 産業安全基準에 관한 規則 第350條의 特別高壓活線作業 規定에서 그 距離를 명시하고 있으며, 외국의 경우에도 여러 規定을 통해 이와 비슷하게 接近限界距離를 제시하고 있다. 그러나 法上에서 제시하고 있는 接近限界距離는 電壓 區分의 間隔이 너무 크며, 또한 그 距離도 接近限界의 範圍만을 규정하는 의미를 갖고 있기 때문에 실제로 人體가 特別高壓 電線路에 접근하였을 경우에 어느 정도의 거리에서 얼마 만 큼의 危險이 존재하는지, 또한 어떤 종류의 災害가

* 正會員 : 국립서울산업대학

** 正會員 : 국립서울산업대학

*** 正會員 : 한양대학교

발생할 가능성이 있는지를 파악하는 것은 불가능하다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는人體와 特別高壓電線路간의 接近距離에 따른 感電事故의 發生危險性에 대해 定量的인 解析을 시도하였으며, 이를 위하여 事故狀況에 가까운 Model을 설정하고, 실제로 많이 사용하고 있는 電壓인 345KV, 154KV, 66KV, 22.9KV-y의 전압을 가지는 電線路에 대해 각각의 接近距離를 주어 FEM(Finite Element Method; 有限要素法)에 의한 數值解析을 통해 人體의 通電電流 및 머리부분에서의 電界의 세기를 계산하여 感電의 危險程度와 Flash over의 可能性을 검토하였다.

第 2 章 感電事故의 特性

2-1 通電電流와 人體反應¹⁻⁷⁾

感電事故가 발생한 경우 人體가 받게되는 電擊의 정도는 通電電流의 크기, 通電時間, 通電經路, 電源의 種類, 周波數 및 波形 등에 의해 影響을 받게 되는데, 그 중 가장 큰 影響을 주는 것이 通電電流이며 이것을 결정하는 間接적인 因子는 人體低抗과 電壓의 크기이다.

人體를 통해 電流가 흐르게 되면 그 電流의 크기에 따라 人體는 각각 다른 生理的 反應을 나타내게 되는데, 60(Hz)의 交流電源에 대해서 실험한 여러 가지 결과를 요약해 보면 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 最小感知電流: 人體에 電流가 흐르고 있다는 것을 感知할 수 있는 정도의 電流로서 成人男子를 기준으로 대략 1(mA)정도이다.

(2) 苦痛限界電流: 電流가 이 값을 넘어서면 人體가 苦痛을 느끼게 되는 電流값으로서 대략 7-8(mA)정도이다. 이 값을 넘는 범위의 電流를 離脫電流 또는 可隨電流라고 하는데, 이것은 人體가 비록 苦痛은 받지만 자신의 意志에 따라 離脫이 가능하기 때문에 붙여진 이름이다.

(3) 痲痺限界電流: 電流가 可隨電流의 범위를 넘어서면 人體의 筋肉이 마비되면서 자신의 意志에 따른 離脫이 불가능해 지는데, 이 限界電流값을 痲

痺限界電流라하며 대략 10-15(mA)정도이다. 외부적인 措置에 의해 電流가 이값 이하로 되도록 하는 것이 感電事故 防止對策에서의 基本的인 接近方法이다.

(4) 心室細動電流: 電流가 더욱 큰 값으로 되면 心臟이 痲痺을 일으켜 血液을 循環시키는 搏動機能을 잃어 버리게 되는데, 이 電流를 心室細動電流라하며 通電時間을 T(sec)라 할때 그 값은 대략 $165/\sqrt{T}$ (mA)로 주어 진다.

2-2 人體의 電氣抵抗⁸⁾

電擊의 程度를 직접적으로 결정하는 중요한 因子는 感電時 人體에 흐르는 通電電流의 값이지만, 이것은 電壓과 人體의 電氣抵抗에 의해 間接적으로 주어지기 때문에 일정한 電壓이 걸려 있는 電線路에 대해서는 人體가 얼마 만큼의 電氣抵抗을 갖는가 하는 것이 중요한 變數로 작용한다.

人體의 電氣抵抗은 電源의 種類, 電壓의 크기, 接觸部位, 接觸壓力, 接觸面의 濕度, 皮膚溫度, 接觸時間 등에 의해 복잡하게 변화하며 그 밖에도 個人差, 心理的 影響, 睡眠前後 등에 의한 差異도 있다.

일반적으로 人體의 電氣抵抗은 60(Hz)의 交流電源에 대해서는 成人男子의 보통상태에서 약 5000(Ω)정도라고 보고 있는데, 이것은 人體 内部組織의 抵抗이 300(Ω), 皮膚의 抵抗이 2500(Ω), 발과 신발 사이의 抵抗이 1500(Ω), 신발과 大地사이의 抵抗이 700(Ω)정도라고 보아서 결정된 값이다.

2-3 特別高壓 電氣設備에 대한 接近限界⁹⁾

特別高壓의 電線路에서는 人體가 充電部分에 접촉하면 직접 電擊을 받게 되어 위험해 지는 것은 물론이며, 또한 高, 低壓의 경우와는 달리 充電部分에 가깝게 접근하는 경우에도 Flash Over(閃絡) 現象에 의해 電擊과 火傷을 받을 수 있다.

Flash Over는 電壓의 크기와 接近距離에 주로 관계하기 때문에 電壓의 크기에 대해 어느 정도의 距離까지 접근해도 安全한가 하는 것이 종종 문제 시된다.

法規上으로 규정하고 있는 電線路에 대한 接近限界距離는 作業者의 身體活動에 따른 직접적인

接觸뿐만 아니라 Flash over의 가능성도 고려하여 접근할 수 있는 安電限界距離를 정해 놓은 것으로서, 특히 이것은 正常狀態에서의 電壓이 아니라 電路에 발생하는 異常電壓 등의 最大電壓을 假定하여 충분한 安全距離를 확보해 놓은 것이다.

우리나라의 경우에는 産業安全基準에 關한 規則 第350條 特別高壓活線作業의 規定에서 그 距離를 명시하고 있으며, 그 값은 표2-1에 나타난 바와 같다.

표2-1 充電電路에 대한 接近限界距離

충전전로의 사용전압(KV)	충전전로에 대한 접근한계거리(Cm)
22 이하	20
22를 넘고 33 이하	30
33을 넘고 66 이하	50
66을 넘고 77 이하	60
77을 넘고 110이하	90
110을 넘고 154 이하	120
154를 넘고 187 이하	140
187을 넘고 220 이하	160
220을 초과하는 경우	220

第3章 FEM에 의한 解析

3-1 解析 Model⁷⁻¹⁰⁾

特別高壓 電線路에 대한 人體接近限界距離를 FEM에 의해 數值解析하기 위하여 그림3-1과 같은 Model을 선정하였다.

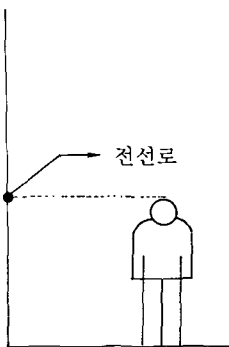


그림3-1 해석 Model

- 인체의 저항 : 5000(Ω)
- 인체의 고유저항 : 333.33(Ω-m)
- 인체의 정전용량 : 200(μF)
- 인체의 비유전율 : 338.83
- 인체의 신장 : 1.8(m)
- 인체의 단면적 : 0.3×0.4=0.12(m²)
- 전선로의 전압 : 345,154,66, 22.9KV

이 Model에서 電線路의 地表上 높이는 感電事故의 발생이 가능한 경우를 가정하여 人體의 身長과 같은 값인 1.8(m)를 주었다.

3-2 解析상의 假定¹¹⁾

3-1절에서 설명한 解析 Model을 FEM에 의해서 2次元의으로 해석하기 위해 다음과 같은 假定을 두었다.

- 1) 電線路는 Z축 方向으로 무한히 延長되어 있다.
- 2) 人體는 각 軸方向에 대해 동일 한 斷面을 가지며, 比誘電率은 일정하다.
- 3) 모든 媒質의 誘電率은 等方性이다.
- 4) 電界는 靜電界로서 空間電荷密度는 존재하지 않는다.
- 5) 距離가 3000(m)를 넘는 領域에서는 電界의 影響이 없는 것으로 본다.

3-3 基本方程式¹⁰⁾

電界를 解析하기 위한 基本方程式은 다음과 같은 Laplace方程式으로 된다.

$$\epsilon \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3-1)$$

여기에서 ϵ 은 媒質의 誘電率이며, V는 Electric Scalar Potential(이하 Potential 이라 한다)이다.

3-4 有限要素法の 適用¹²⁾

3-4-1 要素分割

식(3-1)과 같은 Potential V에 대한 偏微分方程式을 FEM으로 풀기 위해서는 우선 解析 對象領域을 要素分割해야 하는데, 본 研究에서는 FEM에서 많이 사용하고 있는 1次 3角要素를 사용하여 그림 3-2와 같이 要素分割하였다.

3-4-2 解析函數의 近似化

그림3-3과 같이 분할된 3角要素(e)의 内部에서는 Potential V가 線形的으로 변한다고 가정하여 試驗函數 (Trial function)를 1次로 하면 한 要素내의 任意의 點에 대한 Potential치 $V^e(x,y)$ 는 다음과 같이

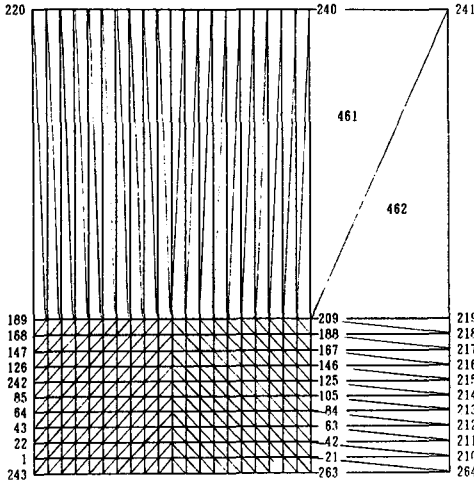


그림3-2 要素分割圖

근사화된다.

$$V^e(x,y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad (3-2)$$

이 근사화된 Scalar Potential치 $V^e(x,y)$ 를 3角要素에서의 節點의 Potential $V_p(p=i,j,k)$ 로 나타내면

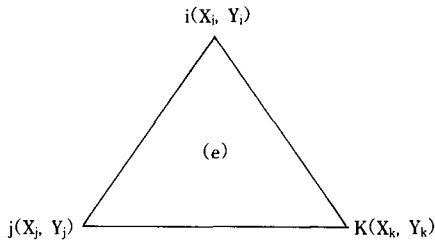


그림3-3 三角要素

$$V^e(x,y) = \sum_{p=i}^k N_p(x,y) V_p = N_i(x,y) V_i + N_j(x,y) V_j + N_k(x,y) V_k \quad (3-3)$$

가 되며, 여기에서 $N_p(x,y)$ 는 補間函數(Interpolation Function) 또는 形狀函數(Shape function)이다.

3-4-3 要素Matrix式的 誘導

FEM에 의해 식(3-1)과 같은 偏微分方程式을 해석하고자 할 때에는 界變數를 근사화시켜 偏微分

方程式에 대입하고, 이 方程式을 각 要素에 대해 만족하는 要素 Matrix式으로 변화시켜 解析을 간편하게 한다.

要素Matrix式을 유도하는 방법은 몇가지가 있으나 보통은 變分理論(Variational Calculus)이나 加重殘差法(Method of Weighted Residual)을 사용한다. 본 研究에서는 加重殘差法중 식(3-3)과 같이 정의되는 補間函數를 荷重函數(Weighting Function)로 하는 Galerkin理論을 사용하여 要素Matrix式을 유도하였다.

이것을 行列形態로 표시하면

$$[N^e] \{V_p^e\} = \{0\} \quad (3-4)$$

와 같이 되며, 行列 $[N^e]$ 의 係數 n_{pq} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} n_{pq} &= \epsilon \iint_{\Delta} \left(\frac{\partial N_p}{\partial x} \frac{\partial N_q}{\partial x} + \frac{\partial N_p}{\partial y} \frac{\partial N_q}{\partial y} \right) dx dy \\ &= \epsilon \iint_{\Delta} \left(\frac{b_p}{2\Delta} \frac{b_q}{2\Delta} + \frac{c_p}{2\Delta} \frac{c_q}{2\Delta} \right) dx dy \\ &= \epsilon \left(b_p b_q + C_p C_q \right) / 4 \Delta \quad (3-5) \end{aligned}$$

여기에서 Δ 는 삼각요소(e)의 면적을 나타내며, b_p , c_p 는 각 節點의 좌표값(X_p , Y_p)으로 결정되는 상수이다.

3-4-4 界方程式과 그 解

식(3-4)는 각 3角要素에 대한 要素Matrix式으로 이 식을 解析領域내의 모든 要素에 대해 계산하고, 전 領域에 대하여 組合하면 다음과 같은 行列形態의 界方程式을 얻을 수가 있다.

$$[S] \{V\} = \{0\} \quad (3-6)$$

여기서 行列 $[S]$ 는 보통 對稱(Symmetric)이고, 非正則(Singular)으로 된다. 그러므로 식(3-6)로 주어지는 界方程式의 解를 구하기 위해서는 非正則인 $[S]$ 行列을 正則(Nonsingular)行列로 修正해야 한다. 이를 위해 解析Model에서 주어지는 境界條件

(Boundary Condition)을 적용하여 未知 節點 Potential 值 $\{V_i\}$ 에 대한 方程式으로 변형하면

$$[S_{11}]\{V_i\} = \{F\} \quad (3-7)$$

를 구할 수 있고 이 식으로부터 구하고자 하는 未知 節點 Potential 值 $\{V_i\}$ 를 구할 수 있게 된다.

3-4-3 各 要素에서의 電界의 세기

各 要素에서의 節點 Potential 值가 구해지면,

$$E_x^e = - \sum_{P=i}^k \frac{1}{2\Delta} b_p V_p^e$$

$$E_y^e = - \sum_{P=i}^k \frac{1}{2\Delta} c_p V_p^e$$

$$|E^e| = \sqrt{(E_x^e)^2 + (E_y^e)^2} \quad (3-8)$$

의 식에서 電界強度의 x成分 E_x^e 및 y成分 E_y^e 그리고 各 要素에서 電界의 세기 $|E^e|$ 를 구할 수 있다. 空氣가 絶緣破壞되는 電界의 세기는 일반적인 경우에 있어서 대략 30(KV/cm)정도 라는 것이 實驗的으로 밝혀져 있으므로¹³⁾ 人體의 周邊에 이 값 이상의 電界가 형성되면 空氣가 絶緣破壞되어 Arc가 발생되는 것으로 解析할 수 있다.

3-4-6 人體 通電電流의 計算

電流密度 J, 固有抵抗 ρ 電界의 세기 E의 사이에는

$$J = E / \rho \quad (3-9)$$

의 관계가 있다.¹⁰⁾ 따라서 앞에서 구한 電界의 세기중에서 人體内部에 해당하는 電界의 세기를 人體의 固有抵抗으로 나누어 人體의 内部에 흐르는 電流密度를 계산하고, 여기에 斷面積을 곱하여 人體의 通電電流를 구한 후, 이 電流값을 제2장에서 언급한 通電電流값과 비교해 보면 人體가 危險에 處하는 정도를 고려할 수가 있게 된다.

第 4 章 解析結果

앞 章에서 언급한 FEM解析方法에 의해 계산된

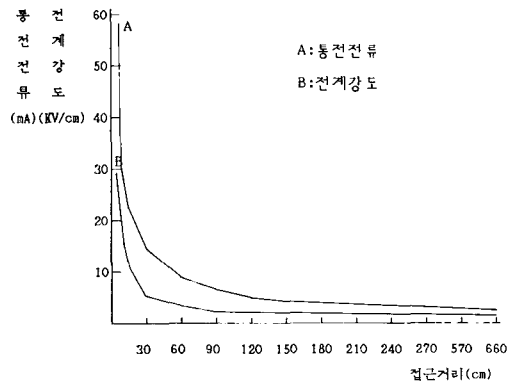


그림4-1 接近距離에 따른 電流 및 電界의 變化 (345KV)

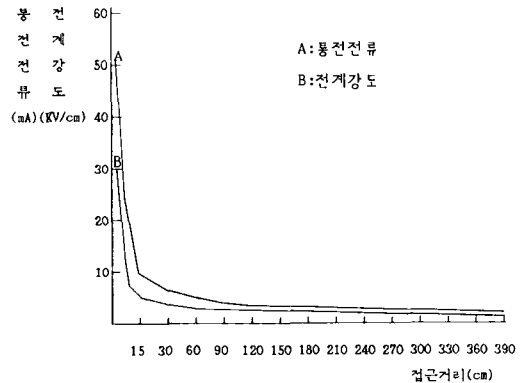


그림4-2 接近距離에 따른 電流 및 電界의 變化 (154KV)

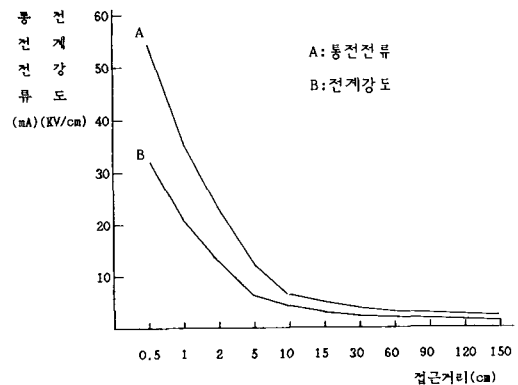


그림4-3 接近距離에 따른 電流 및 電界의 變化 (66KV)

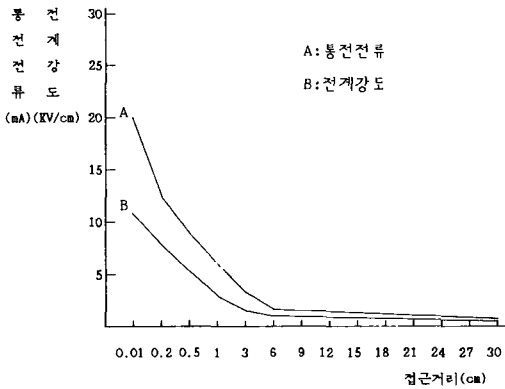


그림4-4 接近距離에 따른 電流 및 電界의 變化 (22.9KV)

결과를 圖式的으로 검토하기 위해 接近距離에 대한 通電電流의 크기와 머리부분에서의 電界強度를 Graph로 나타내면 그림 4-1, 그림 4-2, 그림4-3 및 그림 4-4와 같이 된다.

第 5 章 結 論

본 研究에서는 感電事故로 인한 災害 중에서 人體가 高電壓 電線路에 접근하여 발생하는 電擊災害의 特性에 대해 理論的인 고찰을 하고, FEM에 의한 數值解析을 통해 人體의 通電電流와 머리위 부분의 電界強度를 계산하여 人體에 대한 危險程度를 고려함으로써, 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

(1) 電線路의 電壓이 345(KV)의 경우에는, 接近距離 660(cm)에서 電界의 影響을 느낄 수 있게 되고, 接近距離 100(cm)에서는 苦痛을 수반하는 電擊을 느낄 수 있으며, 接近距離 60(cm)에서는 사람에 따라 麻痺現象이 발생할 수도 있다.

(2) 電線路의 電壓이 154(KV)의 경우에는, 接近距離 360(cm)에서 電界의 影響을 느낄 수 있게 되고, 接近距離 30(cm)에서는 苦痛을 수반하는 電擊을 느낄 수 있으며, 接近距離 15(cm)에서는 사람에 따라 麻痺現象이 발생할 수도 있다.

(3) 電線路의 電壓이 66(KV)의 경우에는, 接近距離 140(cm)에서 電界의 影響을 느낄 수 있게 되고, 接近距離 9(cm)에서는 苦痛을 수반하는 電擊을 느

낄 수 있으며, 接近距離 5(cm)에서는 사람에 따라 麻痺現象이 발생할 수도 있다.

(4) 電線路의 電壓 22.9(KV), 對地電壓 13.2(KV)인 경우에는, 接近距離 12(cm)에서 電界의 影響을 느낄 수 있게 되고, 接近距離 1(cm)에서 苦痛을 수반하는 電擊을 느낄 수 있으며, 接近距離 0.5(cm)에서 사람에 따라 麻痺現象이 발생할 수도 있다.

(5) 電線路의 電壓이 345(KV)인 경우에는 接近距離 5(cm)에서, 電線路의 電壓이 154(KV)인 경우에는 接近距離 2(cm)에서, 電線路의 電壓이 66(KV)인 경우에는 接近距離 0.5(cm)에서 Arc가 발생할 가능성이 있다.

(6) 電線路의 電壓이 22.9(KV)인 경우에는 人體가 電線路에 직접 접촉할 때까지도 Arc는 발생하지 않는다.

이상에서 얻은 結論은 人體가 정상적인 보통의 상태이고 空氣가 乾燥한 일반적인 상태를 가정하여 얻은 결과인데, 실제로 感電事故가 발생하는 조건은 人體나 空氣의 狀態가 이러한 경우에만 국한되지는 않는다. 따라서 비가 오거나 濕氣가 많은 경우의 空氣狀態와 線路의 內部 異常電壓이나 外部 異常電壓 또는 絶緣用 保護具 등을 착용한 경우의 人體狀態를 고려하여 보다 더 광범위한 연구를 계속해야 할 것으로 생각한다.

참고문헌

- 1) 金燦五, “建設現場 假設電氣 災害豫防”, 23回 産業安全保健大會 技術 Seminar 發表集, pp. 99-113, 韓國産業安全公團, 1990.7
- 2) 日本勞動省産業安全研究所, “産業安全研究報告 技術資料指針”, 産業安全研究協會, Vol. 6, pp.1-50, 1970.
- 3) C. F. Dalziel, “B. R. A. M/1961/D. 2, ILO”, Geneva, 1961.
- 4) W. R. Lee, “Deaths from Electric Shock”, Proc. IEEE, Vol. 113, No.1, Jan. 1966.
- 5) W. B. Kouwenhoven, C. J. Miller, Jr., H. C. Barnes, J. W. Simpson, H. L. Rorden, & T. J. Burgess,

- “Body Current in Live Working.” IEEE Trans., Vol. PAS-85, No. 4, pp. 403-412, 1966.
- 6) “感電災害와 防止對策”, 大韓電氣協會, 1987.
 - 7) 内藤勝次, “電氣安全入門”, 電氣技術文化社, 1986.
 - 8) 金燦五, “電氣安全基準의 改善에 관한 研究”, 서울 産業大學 論文輯 第31輯, pp. 169-176, 서울 産業大學, 1990.7
 - 9) 李載仁, “電氣設備 設計, 施工上の 安全對策”, 電氣安全豫防對策 Seminar 資料, 89-電氣-03 pp.3-23 韓國産業安全公團, 1989.10
 - 10) W. H. Hayt, Jr., “Engineering Electromagnetics”, McGraw-Hill, Inc., 1981.
 - 11) 任達鎬, 金燦五, “重電機設計에 따른 電界, 磁界分布待性解析을 위한 基本理論의 適用方法”, 調查研究論文, Vol. 6, pp. 1-73, 大韓電氣協會, 1983.
 - 12) 任達鎬, “電氣系の 有限要素法”, 東明社, 1987.
 - 13) 田春生, “放電·高電壓工學”, 東明社, 1980.