

765kV 교류 2회선 송전선 인근의 생체 및 물체 유도 전압, 전류 계산

민석원¹⁾, 김응식²⁾, 명성호³⁾, 이병윤⁴⁾, 박종근⁵⁾
 (순천향대학교¹⁾, 호서대학교²⁾, 서울대학교³⁾)

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

Suk Won Min¹⁾, Eung Sik Kim²⁾, Sung Ho Myeong³⁾, Byeong Yoon Lee⁴⁾, Jong Keun Park⁵⁾
 Soonchunhyang Univ.¹⁾, Hoseo Univ.²⁾, Seoul National Univ.³⁾

Abstract - This paper calculates the induced voltage and current for a human and a car under 765 kV AC double circuit transmission line. A human and a car is simulated as two dimension by the use of charge simulation method and as three dimension by using surface charge method. The phase arrangement of transmission line is varied to calculate the induced voltage and current. In two cases a human and a car is grounded or floated, the induced voltage and current is also compared.

1. 서론

우리나라는 가까운 장래에 765 kV 2회선 송전 시스템을 세계 최초로 도입할 것을 결정하였다. 이미 선진국의 예에서 알 수 있듯이 송전선압 격상과 관련하여 송전선 설계에 고려해야 할 요소로는 도체방식 선정, 지지물 형상 설계, 절연물 설계의 분야로 분류할 수 있다. 이중 도체방식 선정과 지지물 형상 설계는 송전선압이 초고압화 함에 따라 송전선 인근 주민에 영향을 미치는 전기 환경장해와 밀접한 관계를 갖는다.

전기환경장해는 크게 두 부류로 나눌 수 있다. 첫번째 부류는 송전 도체표면에 발생하는 코로나에 의한 가정 소음, 라디오 및 텔레비전 잡음 등의 코로나 잡음으로 송전 도체방식 선정에 주된 영향을 미친다.[1~5] 두번째 부류는 송전선 주위에 발생하는 전자기에 의한 영향으로 지지물 형상 및 송전선 지상고 선정과 밀접한 관계를 갖는다. 예로 송전선 지상고를 무한히 높게하면 지표면 전계강도를 줄일 수는 있지만 이는 비경제적인 방법이다. 본 논문에서는 765 kV 교류 2회선 송전선 아래에 있는 인체 및 자동차에 유도되는 전압, 전류 크기를 예측할 수 있는 수치 계산 프로그램을 개발하였다. 첫번째 방법은 전하 중첩법을[6~8] 이용한 것으로 765 kV 2회선 송전선 아래의 인체 및 자동차를 2차원으로 모의하였다. 두번째 방법은 표면 전하법을[8] 이용하여 송전선 아래의 인체 및 자동차 유도 전압, 전류를 송전선 상배열 변화(정상 배열과 역상배열)와 인체 및 자동차 접지시와 절연시로 분류하여 계산한 결과를 비교, 분석하였다.

2. 정전 용량 계산

유도 전압과 전류를 계산하기 위해서는 정전 용량 계산이 선행되어야 한다. 간단한 전극계의 정전 용량은 해석적으로 주어지지만 전계 분포가 수치계산으로 밖에 구해지지 않는 배치에서는 정전 용량값도 수치적으로 계산할 필요가 있다. 그림 1은 상도체로 6 X Rail (소도체 직경: 2.956 cm, 소도체 간격: 40 cm)를 사용한 765 kV 2회선 송전선로 아래의 인체의 2차원 모델로 전하 중첩법을 이용하여 대지와 절연된 인체에 1 V를 인가하고 그 외의 송전도체의 전위를 0 V로 하여 구한 송전선로와 인체간의 정전 용량값은 표 1과 같다. 이 때 인체 표면은 도체로 가정하였으며 가상 전하는 그림 2의 a)와 같이 배치하여 계산하였다. 또한 인체의 위치는 인체 위치 변화에 따른 유도 전류 변화를 계산하기 위해 표 1과 같이 6 가지로 변화시켜 계산하였다. 그림 2의 b)는 표면 전하법을 이용하여 송전선로와 인체를 3차원으로 모델링한 경우의 가상 전하이며 계산 결과는 표 2와 같다.

그림 3은 765 kV 2회선 송전선로 아래의 2차원 자동차 모델로 전하 중첩법을 이용하여 대지와 절연된 자동차에 1 V를 인가하고 그 외의 송전도체의 전위를 0 V로 하여 구한 송전선로와 자동차간의 정전 용량값은 표 3과 같다. 이 때 자동차 표면은 도체로 가정하였으며 가상 전하는 그림 4의 a)와 같이 배치하여 계산하

였다. 또한 자동차의 위치는 자동차 위치 변화에 따른 유도 전류 변화를 계산하기 위해 표 3과 같이 4 가지로 변화시켜 계산하였다. 그림 4의 b)는 표면 전하법을 이용한 3차원 계산 가상 전하 배치이며 표 4는 계산 결과이다.

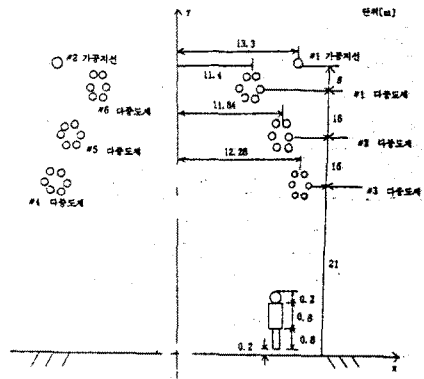


Fig. 1. A human model under 765 kV AC double circuit transmission line.

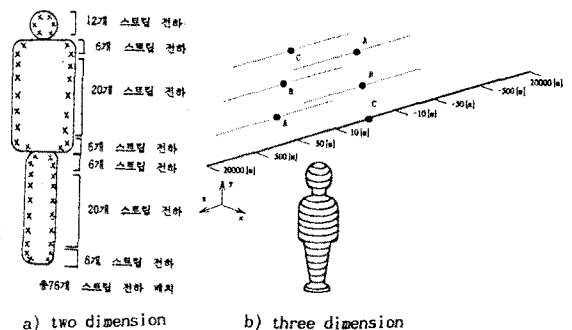


Fig. 2. Arrangement of fictitious charge in a human model

3. 유도 전압 계산

절연된 도체에는 다른 도체의 작용에 의하여 유도전압이 발생한다. 765 kV 2회선 송전선로 아래의 인체와 자동차의 유도 전압을 765 kV 2회선의 상도체 배열이 정상인 경우와 역상인 경우로 나누어 절연된 도체상의 전전하량이 영이 되는 것과 도체 표면의 모든 지점의 전위는 미지의 유도 전압 V_i 가 되는 것을 이용하여 계산하였다.

Table 1. Capacitance between transmission line and human by two dimensional simulation.

인체위치	정전용량 단위 : pF/m					
정전용량	1	2	3	4	5	6
C ₁₀	48.07	46.59	45.81	47.87	5.459	6.442
C ₁₂	0.061	0.059	0.060	0.092	0.480	0.378
C ₁₃	0.157	0.185	0.171	0.194	1.546	1.274
C ₁₄	0.556	0.748	0.722	0.463	2.844	17.67
C ₁₅	0.556	0.193	0.172	0.053	2.844	0.749
C ₁₆	0.157	0.085	0.075	0.040	1.546	0.466
C ₁₇	0.061	0.034	0.032	0.040	0.479	0.198
C ₁₈	0.021	0.030	0.024	0.051	0.154	0.142
C ₁₉	0.021	0.020	0.014	0.035	0.155	0.075

여기서 인체 위치
 1 : 송전 선로 중심 (0.0, 0.0)
 2 : #2 디응 도체 권하의 지표면 (11.84, 0.0)
 3 : #3 디응 도체 권하의 지표면 (12.84, 0.0)
 4 : 최외상 선로위로부터 15m 떨어진 지표면 (27.28, 0.0)
 5 : 송전 선로 중심 지표면으로부터 18m 떨어진 최상 지점 (0.0, 21.0)
 6 : 최외상 선로위로부터 18m 떨어진 최상 지점 (12.28, 18.00)
 정전용량값 C₁₀ : 인체의 대지간 정전용량
 C₁₁ : 인체의 #1 디응 도체간 정전용량
 C₁₂ : 인체의 #2 디응 도체간 정전용량
 C₁₃ : 인체의 #3 디응 도체간 정전용량
 C₁₄ : 인체의 #4 디응 도체간 정전용량
 C₁₅ : 인체의 #5 디응 도체간 정전용량
 C₁₆ : 인체의 #6 디응 도체간 정전용량
 C₁₇ : 인체의 #1 가용차선간 정전용량
 C₁₈ : 인체의 #1 가용차선간 정전용량
 C₁₉ : 인체의 #2 가용차선간 정전용량

Table 2. Capacitance between transmission line and human by three dimensional simulation.

인체위치	정전용량 단위 : pF					
정전용량	1	2	3	4	5	6
C ₁₀	51.16	51.23	51.15	51.73	19.52	11.60
C ₁₂	0.058	0.070	0.071	0.091	1.470	0.224
C ₁₃	0.190	0.227	0.229	0.236	4.990	0.699
C ₁₄	0.571	0.885	0.889	0.564	9.630	47.39
C ₁₅	0.556	0.234	0.215	0.070	9.630	0.700
C ₁₆	0.157	0.112	0.106	0.052	4.990	0.359
C ₁₇	0.061	0.040	0.039	0.029	1.470	0.145
C ₁₈	0.038	0.051	0.052	0.080	0.860	0.168
C ₁₉	0.021	0.028	0.027	0.026	0.860	0.111

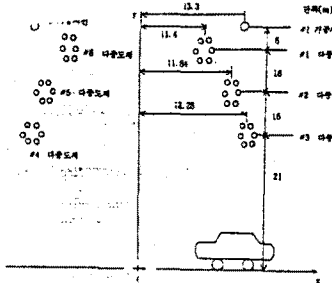
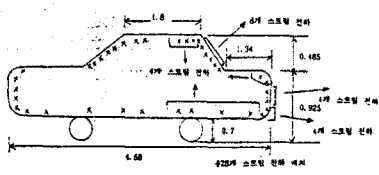
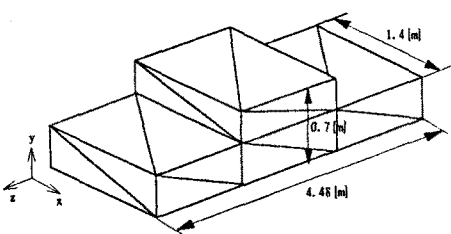


Fig. 3. A car model under 765 kV AC double circuit transmission line by two dimensional simulation.



a) two dimension



b) three dimension

Fig. 4. Arrangement of fictitious charge in a car model

Table 3. Capacitance between transmission line and car by two dimensional simulation.

자동차 위치	정전용량 단위 : pF/m			
정전용량	1	2	3	4
C ₂₀	99.57	99.65	99.68	100.0
C ₂₂	0.073	0.093	0.094	0.136
C ₂₃	0.222	0.271	0.273	0.296
C ₂₄	0.747	1.139	1.141	0.726
C ₂₅	0.747	0.301	0.289	0.086
C ₂₆	0.222	0.133	0.129	0.065
C ₂₇	0.073	0.054	0.053	0.046
C ₂₈	0.026	0.037	0.038	0.063
C ₂₉	0.026	0.020	0.020	0.021

여기서 자동차 위치
 1 : 송전 선로 중심 (0.0, 0.0)
 2 : #2 디응 도체 권하의 지표면 (11.84, 0.0)
 3 : #3 디응 도체 권하의 지표면 (12.84, 0.0)
 4 : 최외상 선로위로부터 15m 떨어진 지표면 (27.28, 0.0)
 정전용량값 C₂₀ : 자동차의 대지간 정전용량
 C₂₁ : 자동차의 #1 디응 도체간 정전용량
 C₂₂ : 자동차의 #2 디응 도체간 정전용량
 C₂₃ : 자동차의 #3 디응 도체간 정전용량
 C₂₄ : 자동차의 #4 디응 도체간 정전용량
 C₂₅ : 자동차의 #5 디응 도체간 정전용량
 C₂₆ : 자동차의 #6 디응 도체간 정전용량
 C₂₇ : 자동차의 #1 가용차선간 정전용량
 C₂₈ : 자동차의 #1 가용차선간 정전용량
 C₂₉ : 자동차의 #2 가용차선간 정전용량

Table 4. Capacitance between transmission line and car by three dimensional simulation.

자동차 위치	정전용량 단위 : pF			
정전용량	1	2	3	4
C ₂₀	237	237	237	239
C ₂₂	0.200	0.250	0.260	0.350
C ₂₃	0.650	0.770	0.780	0.850
C ₂₄	2.320	3.640	3.640	2.120
C ₂₅	2.320	0.890	0.810	0.270
C ₂₆	0.650	0.400	0.380	0.200
C ₂₇	0.200	0.140	0.140	0.120
C ₂₈	0.138	0.180	0.190	0.310
C ₂₉	0.138	0.100	0.102	0.110

3.1 정상 배열

정상 배열은 송전 선로의 양쪽 회선의 상배열이 서로 대칭인 배열이며 표 5와 6은 인체와 자동차를 2차원 및 3차원으로 모의한 경우의 유도 전압 계산 결과이다.

Table 5. Induced voltage in a human body under transmission line of the type of superbundle phase arrangement.

인체위치(m)	2차원 모의유도 전압(kV)	3차원 모의 유도전압(kV)
(0.0, 0.0)	6.815	8.738
(11.84, 0.0)	7.705	8.477
(12.28, 0.0)	7.011	8.415
(27.28, 0.0)	3.315	4.092
(0.0, 21.00)	116.817	119.448
(12.28, 18.0)	276.485	262.237

Table 6. Induced voltage in a car under transmission line of the type of superbundle phase arrangement.

자동차 위치(m)	2차원 모의유도 전압(kV)	3차원 모의 유도전압(kV)
(0.0, 0.0)	11.569	7.069
(11.84, 0.0)	10.956	6.794
(12.28, 0.0)	10.850	6.744
(27.28, 0.0)	4.775	3.333

3.2 역상 배열

역상 배열은 송전 선로의 양쪽 회선의 상배열이 서로 역순인 배열이며 표 7과 8은 인체와 자동차를 2차원 및 3차원으로 모의한 경우의 유도 전압 계산 결과이다.

Table 7. Induced voltage in a human body under transmission line of the type of low-reactance phase arrangement.

인체위치(m)	2차원 모의유도 전압(kV)	3차원 모의 유도전압(kV)
(0.0, 0.0)	2.104	2.612
(11.84, 0.0)	4.853	5.676
(12.28, 0.0)	4.865	5.727
(27.28, 0.0)	2.911	3.491
(0.0, 21.00)	7.220	6.612
(12.28, 18.0)	263.353	246.965

Table 8. Induced voltage in a car under transmission line of the type of low-reactance phase arrangement.

자동차 위치(m)	2차원 유도 전압(kV)	3차원 유도 전압(kV)
(0.0, 0.0)	3.669	2.125
(11.84, 0.0)	7.756	4.484
(12.28, 0.0)	7.791	4.529
(27.28, 0.0)	4.832	2.868

4. 유도 전류 계산

유도 전류 계산은 두 종류로 나눌 수 있다. 하나는 도체가 정해진 전위 (종상은 접지)를 갖고 있는 경우로 유도 전류만이 문제가 된다. 이 전류는 도체가 움직이지 않는 경우는 인가 전압이 시간적으로 변할 때만 흐르므로 직류에서는 흐르지 않는다. 다른 하나는 도체가 절연된 경우로 절연된 도체에는 유도 전압이 발생하고 도체를 통하여 유도 전류가 흐른다.

따라서 여기에서는 유도 전류 계산을 두 종류로 나누어 계산하였다.

4.1 접지된 경우

정전 용량 계산에서 설명한 바와 같이 도체 i의 대지간 정전 용량을 C_0 , 도체 j에 대한 상호 정전 용량을 $C_j (i \neq j)$ 라 하면 도체 i의 전하량 Q는 각 도체의 전위에 의해

$$Q = C_0 V_i + C_1 (V_1 - V_i) + C_2 (V_2 - V_i) + \dots + C_n (V_n - V_i)$$

$$Q = -C_0 V_i - C_1 V_1 - C_2 V_2 - C_3 V_3 - \dots - C_n V_n$$

$$I = j\omega Q \text{가 된다.}$$

위와 같이 765 kV 2회선 송전 선로 아래의 인체와 자동차의 유도 전류도 송전 선로의 상배열에 영향을 받으므로 정상 배열과 역상 배열의 두 경우로 나누어 계산하였다.

4.1.1 정상 배열

765 kV 정상 배열 2회선 송전 선로 아래의 접지된 인체와 자동차의 유도 전류 계산 결과는 표 9와 10과 같다.

Table 9. Induced current in a grounded human body under transmission line of the type of superbundle phase arrangement.

인체위치(m)	2차원 모의 유도 전류 [mA]	3차원 모의 유도 전류 [mA]
(0.0, 0.0)	0.151	0.174
(11.84, 0.0)	0.129	0.164
(12.28, 0.0)	0.123	0.168
(27.28, 0.0)	0.057	0.082
(0.0, 21.00)	0.683	2.405

Table 10. Induced current in a grounded car under transmission line of the type of superbundle phase arrangement.

자동차 위치(m)	2차원 모의 유도 전류 [mA]	3차원 모의 유도 전류 [mA]
(0.0, 0.0)	0.204	0.650
(11.84, 0.0)	0.197	0.624
(12.28, 0.0)	0.196	0.620
(27.28, 0.0)	0.094	0.306

4.1.2 역상 배열

765 kV 역상 배열 2회선 송전 선로 아래의 접지된 인체와 자동차의 유도 전류 계산 결과는 표 11과 12와 같다.

Table 11. Induced current in a grounded human body under transmission line of the type of low-reactance phase arrangement.

인체위치(m)	2차원 모의 유도 전류 [mA]	3차원 모의 유도 전류 [mA]
(0.0, 0.0)	0.051	0.052
(11.84, 0.0)	0.087	0.113
(12.28, 0.0)	0.086	0.114
(27.28, 0.0)	0.054	0.070
(0.0, 21.00)	0.039	0.130

Table 12. Induced current in a grounded car under transmission line of the type of low-reactance phase arrangement.

자동차 위치(m)	2차원 모의 유도 전류 [mA]	3차원 모의 유도 전류 [mA]
(0.0, 0.0)	0.063	0.195
(11.84, 0.0)	0.132	0.412
(12.28, 0.0)	0.193	0.416
(27.28, 0.0)	0.082	0.264

4.2 절연된 경우

절연된 경우는 절연된 도체의 대지간 정전 용량 C_0 와 유도 전압 V_i 로 전하량 Q를 구하여 유도 전류 ($I = C_0 V_i$)를 계산할 수 있다.

이 경우도 송전선로의 상배열에 영향을 받으므로 정상 배열과 역상 배열로 나누어 계산하였다.

4.2.1 정상 배열

765 kV 정상 배열 2회선 송전 선로 아래의 절연된 인체와 자동차의 유도 전류 계산 결과는 표 13과 14와 같다.

4.2.2 역상 배열

765 kV 역상 배열 2회선 송전 선로 아래의 절연된 인체와 자동차의 유도 전류 계산 결과는 표 15와 16과 같다.

Table 13. Induced current in a floated human body under transmission line of the type of superbundle phase arrangement.

인체위치(m)	2차원 모의 유도 전류 [mA]	3차원 모의 유도 전류 [mA]
(0.0, 0.0)	0.124	0.168
(11.84, 0.0)	0.124	0.164
(12.28, 0.0)	0.121	0.162
(27.28, 0.0)	0.059	0.080
(0.0, 21.00)	0.240	0.880
(12.28, 18.0)	0.671	1.147

Table 15. Induced current in a floated human body under transmission line of the type of low-reactance phase arrangement.

인체위치(m)	2차원 모의 유도 전류 [mA]	3차원 모의 유도 전류 [mA]
(0.0, 0.0)	0.038	0.050
(11.84, 0.0)	0.085	0.110
(12.28, 0.0)	0.084	0.110
(27.28, 0.0)	0.053	0.068
(0.0, 21.00)	0.015	0.049
(12.28, 18.0)	0.640	1.078

Table 14. Induced current in a floated car under transmission line of the type of superbundle phase arrangement.

자동차 위치(m)	2차원 모의 유도 전류 [mA]	3차원 모의 유도 전류 [mA]
(0.0, 0.0)	0.434	0.632
(11.84, 0.0)	0.412	0.607
(12.28, 0.0)	0.408	0.603
(27.28, 0.0)	0.180	0.300

Table 16. Induced current in a floated car under transmission line of the type of low-reactance phase arrangement.

자동차 위치(m)	2차원 모의 유도 전류 [mA]	3차원 모의 유도 전류 [mA]
(0.0, 0.0)	0.138	0.182
(11.84, 0.0)	0.291	0.400
(12.28, 0.0)	0.293	0.404
(27.28, 0.0)	0.161	0.255

5. 결론

본 논문에서는 진하 중첩법과 표면 전하법을 이용하여 765 kV 2회선 송전선 아래의 인체 및 자동차를 2차원 및 3차원으로 모의한 경우의 인체 및 자동차 유도 전압, 전류를 송전선 상배열 변화와 인체 및 자동차 접지시와 절연시로 분류하여 계산한 결과를 기술하였다.

유도 전압은 정상 배열의 경우는 인체나 자동차나 모두 지표면의 송전선로 중심점, 각 상의 직하점에서 거의 유사한 값을 보였다. 반면 역상 배열의 경우는 지표면의 송전선로 중심점에서 최저값을 각 상의 직하점에서 최대값을 보였다. 이 값은 정상 배열 최대값의 약 70%에 해당하는 것이고 특히 활선 작업시 송전선공이 접근하는 위치인 (0.0 m, 21.0 m)에서의 역상 배열 유도 전압은 정상 배열의 6% 정도로 유도 전압을 감소시키기 위해서는 역상 배열로 하는 것이 유리함을 알 수 있었다. 그러나 송전선 코어나 장해에 관한 연구 결과는 역상 배열이 송전선 도체표면 전계 강도를 증가시키는 단점이 있으므로 송전선로 설계에는 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. 이들 값은 역상 배열시 지표면에서는 최대값이 0.5 mA 이하로 미국 안전 규격치 20 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 2 배 값을 보였다. 3차원으로 모의한 경우는 인체와 자동차 모두 절연시가 접지시보다 작거나 거의 같았다. 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.

참고문헌

- 1) 민석연, 김정부, "코로나 케이지를 이용한 765 kV 초고압 송전선 다중 도체 방식 선정," 대한 전기 학회 논문지 제42권 7호, pp. 84 ~ 94, 1993.
- 2) 민석연, 박종근, "코로나 잡음 특성을 고려한 초고압 송전선의 다중 도체 배열 방식 연구," 대한 전기 학회 논문지 제39권 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, Characterization, Evaluation and Protection), pp. 5.12 ~ 5.23, 1988.
- 6) Singer, H., Steinbigler, H., Weiß, P., "A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Field," IEEE Trans. on PAS, 93, pp. 1660 ~ 1667, 1974.
- 7) 村島定行, 代用電荷法とその應用, 森北出版社, 東京, 1983.
- 8) 河野照哉, 宅間, 數値電界計算法, コロナ社, 東京, 1980.