

765 [kV] 교류 수직 2회선 주변의 유도 전류 및 전계해석
Calculation of the induced current and field close to 765 [kV] AC
double circuit transmission line.

민 석원 순천향대학교 전기공학과 조교수
김 응식* 호서대학교 산업안전공학과 조교수
명 성호 전기연구소
이 병윤 서울대학교 대학원 전기공학과
박 종근 서울대학교 전기공학과 교수

서론

한국전력은 765[kV] 2회선 송전 시스템을 세계 최초로 도입할 것을 결정하였다. 송전 전압 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. [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 연구 내용은 다음과 같다.

1) 전하중첩법(Charge Simulation Method, 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, SCM)[12]을 이용하여 자동차와 인체를 일반

3차원으로 모의하여 같은 계산을 반복하여 두가지의 결과를 비교 검토하였다.

2) 같은 방법으로 송전선 아래에 있는 인체 및 자동차 표면에 유도되는 전계 강도크기를 예측하였다. 첫번째는 765 [kV] 역상배열 송전선 아래의 인체 및 자동차를 2차원으로 모의한 경우의 인체 및 자동차 표면 전계강도를 인체 및 자동차 접지시와 절연시로 분류하여 계산한다. 두번째는 표면 전하법을 이용하여 송전선아래의 물체와 인체를 3차원으로 모의하여 표면 전계강도를 계산한 후 2차원 모델링의 결과와 비교, 검토하였다.

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.

계산모델

그림 1.은 상도체로 6 × Rail (소도체 직경 : 2.956 cm, 소도체 간격 : 40cm)를 사용한 765 [kV] 2회선 송전선로 하의 인체와 자동차모델로 송전선로와 인체간의 정전용량 및 송전선 상호 정전용량을 구하는데 쓰인 모델이다. 그림 1.의 場(field)을 2차원장 및 3차원장으로 각각 가정하여 계산하였다. 인체 표면은 도체로 간주하였다. 3차원 계산시에는 그림 2.에 나타난 것과 같이 송전선은 z축을 따라 7개의 유한 선전하로 모의하였다. 그림 3.는 송전선로 하의 3차원 자동차 모델이다.

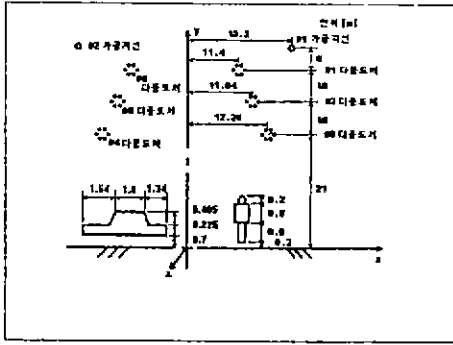


그림 1. 2차원장의 765[kV] 2회선 송전선로 아래의 인체와 자동차 모델링

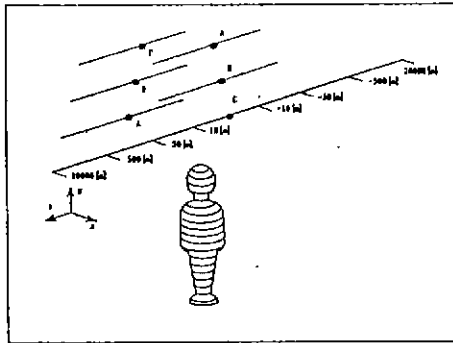


그림 2. 3차원장에서의 송전선과 인체를 모의한 가상전하 배치도

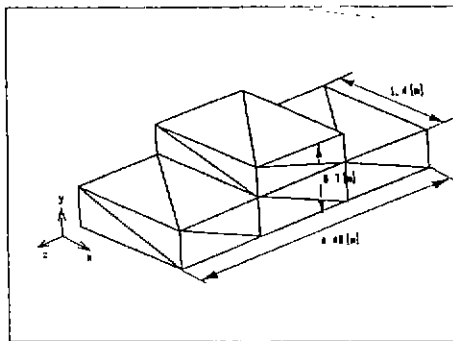


그림 3. 송전선로 하의 2차원 및 3차원 자동차 모델

정전용량 계산

유도 전압과 전류를 계산하기 위해서는 정전용량 계산이 선행되어야 한다. 전계 분포가

수치계산으로 밖에 구해지지 않는 일반 3차원 배치에서는 정전용량도 수치적으로 계산해야 한다. 2차원 및 3차원 모델에서의 송전선로와 인체간의 정전용량은 표 1.과 같다.

정전용량 2D [pF/m]	인 체 위 치				
	3D [pF]	(0.0, 0.0)	(11.84, 0.0)	(12.84, 0.0)	(27.24, 0.0)
C ₁₀ (2D)	48.07	46.59	45.81	47.87	5.46
C ₁₀ (3D)	51.26	51.23	51.15	51.73	19.52
C ₁₂ (2D)	0.06	0.06	0.06	0.1	0.48
C ₁₂ (3D)	0.06	0.07	0.07	0.09	1.47
C ₁₃ (2D)	0.16	0.19	0.17	0.19	1.55
C ₁₃ (3D)	0.19	0.23	0.23	0.24	5
C ₁₄ (2D)	0.56	0.75	0.72	0.46	2.84
C ₁₄ (3D)	0.57	0.89	0.89	0.56	9.63

C₁₃ : 인체와 #2 다중도체간의 정전용량

C₁₄ : 인체와 #3 다중도체간의 정전용량

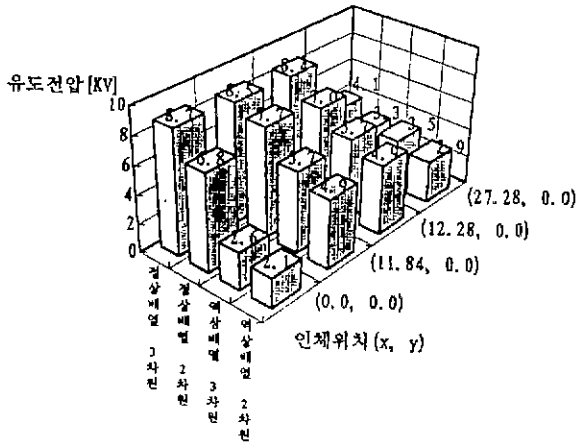
2D : CSM 계산 3D : SCM 계산

표 1. 송전선과 인체간의 정전용량 계산결과

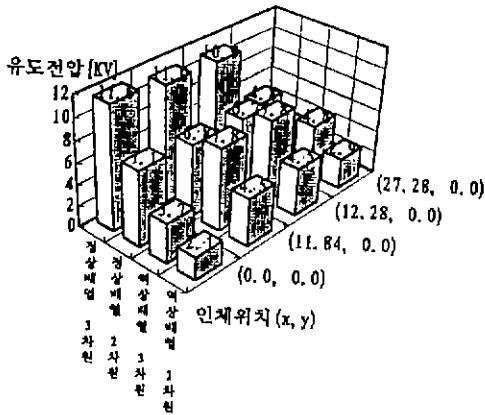
유도전압 계산

절연된 도체는 다른 도체의 작용에 의하여 유도전압이 발생한다. 유도전압은 절연된 도체상의 순전하의 합이 0이 되는 조건과 도체 표면의 전위는 항상 동일한 미지의 유도전압 V_i가 되는 것을 이용하여 구한다. 765[kV] 송전선로 하의 인체와 자동차의 유도전압은 2회선의 상도체 배열이 정상과 역상인 경우와 각각 2차원과 3차원에 대하여 나누어 계산하였다.

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 활선 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.



2차원(CSM계산), 3차원(SCM계산)
그림 4. 송전선로 정상 및 역상 배열시 인체 유도전압



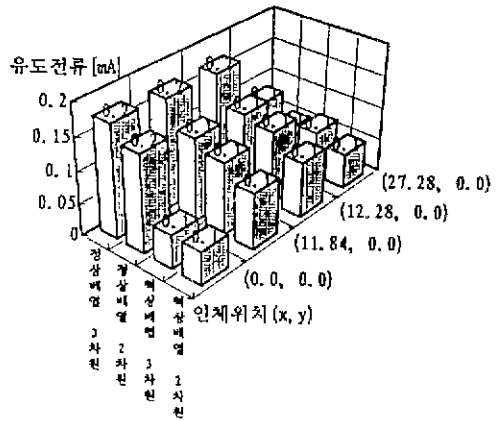
2차원(CSM계산), 3차원(SCM계산)
그림 5. 송전선로 정상 및 역상 배열시 자동차 유도전압

유도전류 계산

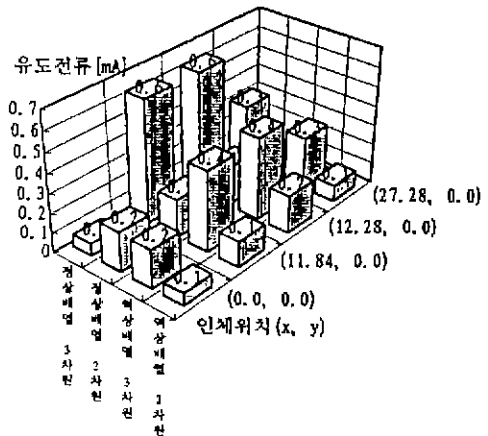
유도전류 계산은 두 종류로 나눌 수 있다. 하나는 도체가 정해진 전위 (통상은 접지)를 갖고 있는 경우로 유도전류만이 문제가 된다. 이 전류는 도체가 움직이지 않는 경우는 인가전압이 시간적으로 변할 때만 흐르므로 직류에서는 흐르지 않는다. 다른 하나는 도체가 절연된 경우로 절연된 도체에는 유도 전

압이 발생하고 도체를 통하여 유도 전류가 흐른다.

765 [kV] 송전선로 아래의 접지된 인체와 자동차의 유도 전류는 2회선의 상도체 배열이 정상과 역상인 경우와 각각 2차원과 3차원에 대하여 나누어 계산하였다. 그림 6, 7은 이들의 계산결과이다.



2차원(CSM계산), 3차원(SCM계산)
그림 6. 인체 접지시 정상, 역상배열하에서 흐르는 인체 유도전류



2차원(CSM계산), 3차원(SCM계산)
그림 7. 자동차 접지시 정상, 역상배열하에서 흐르는 자동차 유도전류

인체및 자동차에의 유도 전계

1) 2 차원장 모델에 의한 전계강도 계산

인체에의 유도 전기

그림 1.의 2회선 송전 선로 아래의 인체가 송전 선로 중심 (0,0,0)에 대지에 접지된 경우와 절연된 경우를 위의 이론에 의해 계산한 결과는 그림 8. 에서와 같다.

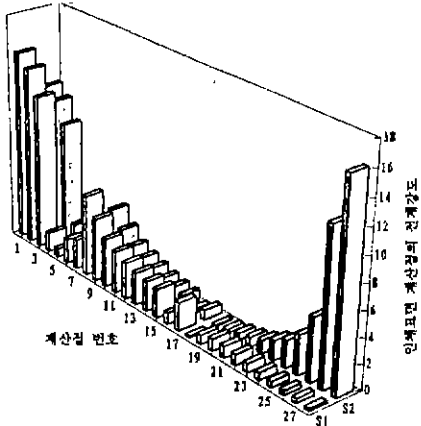


그림 8. 인체가 송전 선로 중심에 접지된 경우와 절연된 경우의 표면 전계강도 분포

자동차에의 유도 전기

인체와 같은 방법을 적용하여 해석한 결과는 그림 9.과 같다.

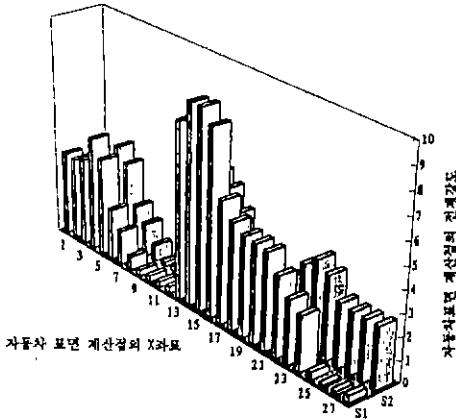


그림 9. 자동차가 송전 선로 중심에 접지된 경우와 절연된 경우의 표면 전계강도 분포 (자동차의 우측 표면)

2) 3차원장 모델에 의한 전계강도 계산

인체에의 유도 전기

해석 결과는 그림 10.과 같다.

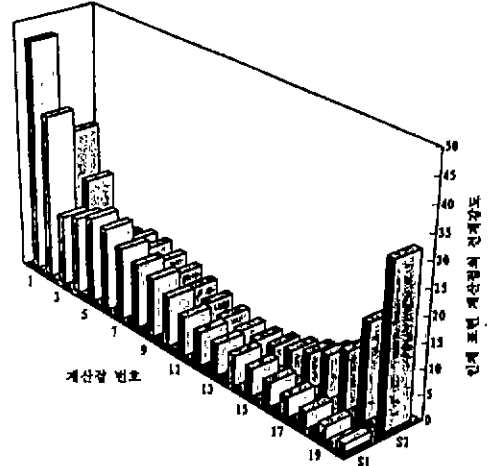


그림 10. 인체가 송전 선로 중심에 접지된 경우와 절연된 경우의 표면 전계강도 분포 (각 계산점의 z 좌표는 0.0임)

자동차에의 유도 전기

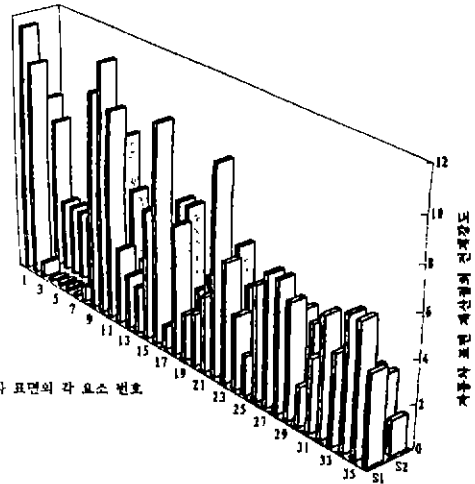


그림 11. 자동차가 송전 선로 중심에 접지된 경우와 절연된 경우의 표면 전계강도 분포 (3차원 모델링)

지표면 전계강도 감소 대책

1) 정상 배열 및 역상 배열의 지표면 전계강도 분포 계산

그림 1.와 같은 765 [kV] 송전선로 아래에서 지표면으로부터 1[m] 높이의 지점의 전계강도를 전하중첩법을 이용하여 계산하였다. 이 경우 선로하의 물체는 없으므로 2차원 모델만으로 계산이 가능하다. 각 소도체는 무

한 선전하 1개로 모의 하였으며 상배열은 정상 배열과 역상 배열로 나누어 검토하였다.

계산 결과는 그림 12.과 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 전기 강도를 줄이기 위해서는 역상이 정상 배열보다 훨씬 유리함을 알 수 있다.

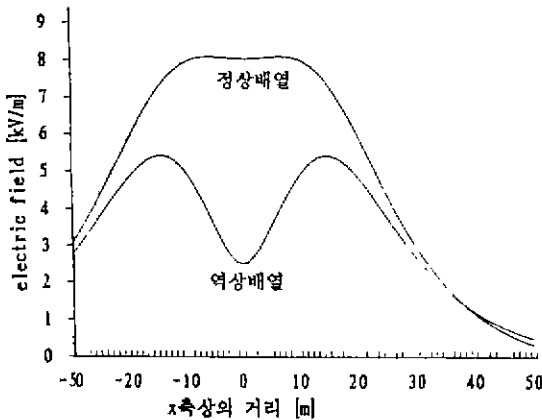
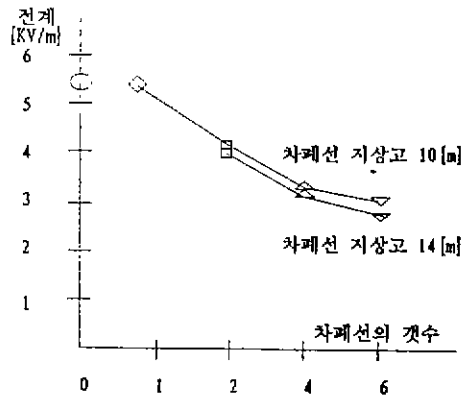


그림 12. 765[KV] 2회선 정상, 역상 배열 지표면 전기장도 분포

2) 차폐선을 이용한 지표면 전기장도 감소 대책

지표면 전기장도를 줄이기 위한 방법으로 차폐선을 이용하였다. 차폐선은 그림 1.과 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 전기장도 값이 최대로 나타나는 중심으로부터 14[m] 지점으로 하였으며 Y좌표는 선로로부터의 섬락 거리를 고려하여 지표면으로부터 14[m]와 10[m] 떨어진 지점을 선정하여 계산하였다.

그림 13.는 그 결과이다. 이상의 결과와 같이 차폐선을 많이 설치하면 할수록 지표면 전기장도를 감소시킬 수 있으나 경제성이 없어지므로 문제가 되는 특정지역만을 차폐선을 이용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.



- : 차폐선이 없는 경우 전기 최대치
- ◇ : X의 위치 14.0 [m] 에 차폐선 1개 설치
- : X의 위치 -14.0 및 14.0 [m] 에 차폐선 2개 설치
- △ : X의 위치 -14.0 -11.40 11.40 및 14.0 [m] 에 차폐선 4개 설치
- ▽ : X의 위치 -14.0 -11.84 -11.40 11.40 11.84 및 14.0 [m]에 차폐선 6개 설치

그림 13. 차폐선 설치 후의 최대전계치

결론

본 연구에서는 전하 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 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 송전 전공이 접근하는 위치인 (0.0m, 21.0m)에서의 역상 배열 유도 전압은 정상 배열의 6%정도로 유도 전압을 감소시키기 위해서는 역상 배열로 하는 것이 유리함을 알 수 있다. 그러나 송전선 코로나 장애에

관한 연구 결과는 역상 배열이 송전선 도체 표면 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. 이들 값은 역상 배열시 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. 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.

절연시 표면 전계강도치는 언제나 인체 자동차 공허 2차원, 3차원 모두 접지시 표면 전계강도치 보다 낮게 나타났다. 접지시 표면 전계강도치는 대지에 가까울수록 값이 낮게 나타난 반면, 절연시는 대지에 가까울수록 값이 크게 증가하는 특성을 보였다. 전위 계산 오차는 2차원 모의시 자동차 모델에서 가장 큰 0.08%를 보였다. 표면 전계강도치는 3차원 모델링 수치가 2차원 모델링 보다 약 3배 큰 값을 보이고 있으나 이것은 2차원 모델링의 경우는 인체 및 자동차 모델이 모두 무한 길이로 가정하여 한 단면만을 계산한 것으로 실제 형상과 차이가 있어 낮은 값을 보이고 있는 것으로 추정할 수 있다. 실제로 이와 유사한 형상을 실험으로 측정된 데이터를 보고한 참고 문헌 [13]과 비교한 결과, 3차원 모델 계산이 정확함을 확인할 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 없으므로 문제가 되는 문제가 되는 특정 지역만을 차폐선을 이용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1) 민 식원, 김정부, "코로나 케이지를 이용한 765kV 초고압 송전선 다중 도체방식 선형," 대한 전기학회 논문지 제 42권 7호, pp 84-94, 1993.
- 2) 민 식원, 박 중근, "코로나 잡음 특성을 고려한 초고압 송전선의 다중 도체 배열 방식 연구," 대한 전기학회 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 765kV 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 765kV Double Circuit Transmission Line of Korea Electric Power Corporation." Proc. of the 1988 U.S. Japan Seminar on Electromagnetic Interference in Highly advance Social Systems (Modeling, Characterization, Evaluation and Protection), pp. 5.12-5.23, 1988.
- 6) Chiba, A., Isaka, K., Yokoi, Y., "Strengths of Fields Induced Inside Human Under AC Transmission Line." IEE Japan, 103-11, pp. 56-64, 1983.
- 7) Baraton, P., Cahouet, J., Hutzler, 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., Kushiuro, 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, K., 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., Weiß, 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, 代用電河法과 그의 應用, 森北出版社. 東京. 1983
- 12) 河野照哉 宅間, 數値電界計算法, 코로나社 東京. pp. 126-144. 1980.
- 13) Matsumoto G., Shimizu K., "Evaluation of ELF Electric 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, 1988.