

# 유전율 및 도전율을 고려한 765kV 송전선하의 전계에 의한 인체내부 유도 전류밀도 해석

論 文  
53A-8-6

## Analysis on Induced Current Density by Electric Field of Human under the 765 kV Transmission Line Considering Permittivity and Conductivity

閔錫源\* · 宋棋鉉\* · 梁光鎬\*\* · 朱玠魯\*\*  
(Suk-Won Min · Ki-Hyun Song · Kwang-Ho Yang · Mun-No Ju)

**Abstract** - This paper analysed the induced current density by electric field of human body under the 765 kV transmission line considering permittivity and conductivity. As permittivity of human body is very high as  $10^6$  at 60 Hz, special numerical computation technique in Surface Charge Method(SCM) for composite media with extremely different properties is applied to reduce calculation error of induced current density and electric field inside the human body. Calculation results show that the average of the induced current density inside human body is about  $3\text{mA/m}^2$ , which is less than ICNIRP criterion ( $10\text{mA/m}^2$ ).

**Key Words** : Human Body, Current Density, Surface Charge Method

### 1. 서 론

현대 생활을 지탱하는 과학 기술은, 한편으로는 인간 생활을 간섭하는 환경 문제를 일으키기도 한다. 이것은 자연에는 존재하지 않는 것을 가짐으로서 발생하는 필연적인 결과이지만, 인간 생활 환경과 조화시킬 수 있는 제품과 설비를 만들고 사용상태를 유지하는 것이 설계자와 제작자 및 사용자의 중요한 의무이기도 하다.

전기 에너지, 즉 전력이 발전소로부터 수용가로의 수송이 시작된 지 약 110년이 되었다. 그 동안 가공 송전선은 고전압화, 대전류화와 함께 대형화, 다회선화 함에 따라 각종의 환경 영향이 문제로 되게 되었다. 교류 송전선의 고전압화, 대형화에 기인한 현상으로는 정전유도, 전선 및 애자의 코로나 방전에 의한 가청소음, 라디오 및 텔레비전 잡음, 전파의 반사와 차폐에 의한 텔레비전 수신 장애, 경관에의 영향 등이 있다[1],[2],[3],[4]. 대전류에 기인한 문제로는 금속 철망에의 전자유도로 인한 감전 외에, 최근에는 송변전 설비에서 발생하는 자계에 의한 인체에의 영향이 주목받고 있다. 한편 직류 송전선에서는 정전유도 문제는 없지만 대신에 코로나 방전에서 발생한 이온이 대지의 절연된 물체에 유입되는 것에 의한 이온류 대전이 문제이다[5].

이들 문제에서는, 발생하는 전자계의 크기를 현상을 토대로 정확히 파악하는 것이 중요하며 각종 변수의 영향을 명확히 함으로서 설계에 응용할 수 있다. 특히 인체에 유도되는 전계, 자계, 전류 등은 주로 측정 불가능한 것으로 정량적으로 파악할 필요가 있다.

이와 관련하여 본 저자는 이미 표면 전하법을 이용하여 765 kV 2회선 송전선하의 인체 및 자동차의 표면 유도 전압, 전류 및 전계강도를 계산한 경험이 있다[6],[7]. 그 논문은 인체를 유전율과 도전율을 고려한 모델로 계산하지 못하고 단순한 도체로 가정하였기 때문에 인체의 표면에서만 계산이 가능하였다. 도전율을 고려한 전하 중첩법의 기법은 이미 개발되어졌지만 전하 중첩법으로 복잡한 3차원 형상을 모의하기가 어려운 문제점이 있다. 또한 매질의 특성이 크게 상이한 경우, 전위 및 전계 계산 오차가 매우 커지는 문제점이 있어 표면 전하법으로 이를 해결하기 위해 본 저자가 제안했던 기법[8]을 응용하여 인체를 유전율과 도전율을 갖는 직육면체 사각모델로 모의한 인체 유도 전계를 계산한 실적이 있다 [11].

또한, 본 논문에서는 직육면체 모델보다는 인체모델을 실제에 가능한한 근사화 시킨 곡면 모델을 적용하여 인체 내부 유도 전류밀도를 해석하여 현실성을 높이고자 하였다.

### 2. 계산기법 및 결과

#### 2.1 계산 기법

표면 전하법에도 여러 종류의 기법이 있고 대부분은 수치적분을 이용하여 전위와 전계를 계산하고 있지만 본 논문에서는 일정 전하 밀도를 갖는 삼각형 요소의 전위 및 전계가 특이해 문제없이 해석적으로 주어지는 장점이 있어 이것을 사용한 삼각형 요소 표면전하법[10]을 이용하였다. 도전율의 특성을 모의하기 위하여 복소 유전율과 복소 표면전하밀도가 유전체 경계면에 적용되었다.

일반적인 방법은 도체와 유전체 표면 전하를 모의하기 위해 단일층의 표면 전하를 이용하는 것이다[9]. 이 방법은 고체 유전체의 유전율과 저항률 특성이 크게 상이한 경우, 유전체 외부의 전계계산 오차는 작지만, 유전체 내부에서는 상당히 커지고 있다. 이 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 도체부는 단일 전하를, 유전체 경계면에는 이중층의 표면 전하

\* 學生會員 : 圓光大學 電氣工學科 碩士課程  
\*\* 正 會 員 : 圓光大學 電氣工學科 博士課程  
\*\*\* 正 會 員 : 圓光大學 電氣工學科 教授 · 工博  
接受日字 : 2004年 1月 19日  
最終完了 : 2004年 6月 22日

를 배치한 기법을 사용하였고 이에 관한 자세한 내용은 참고 문헌 [8],[11]을 참조하기 바란다.

**2.2 인체모델 유도전위 및 전계해석 결과**

그림 1과 같은 765 kV 송전선하의 인체내부 유도전류를 계산하는 경우, 송전선과 인체를 동시에 고려하여 3차원으로 계산하는 것이 실제 현상을 그대로 모의하는 방법이지만 이것은 매우 복잡한 계산이 될 뿐만 아니라 송전선로 크기, 송전선로와 인체간의 거리를 인체 크기와 비교할 때 인체는 매우 작게 되어 결국 인체 표면에서의 전계강도는 일정하게 된다. 따라서 본 논문에서는 지표면으로부터 1[m] 떨어진 지점의 전계강도를 인체를 고려하지 않고 별도로 2차원으로 해석하여 그림 2와 같은 결과를 얻은 후, 일정 균등 전계가 인체에 작용하는 것으로 모델링하여 인체 내부 유도전계를 계산하였다.

그림 2에서 알 수 있듯이 지표면 전계강도의 최대치가 3.5 [kV/m] 보다 낮기 때문에 그림 3과 같은 신장 160cm의 인체 모델이 3.5 [kV/m]의 균등 전계에 있을 때, 인체 표면 및 내부의 유도 전위 및 전계를 계산하였다.

인체모델을 실제와 근사화 시키기 위해 그림 3과 같은 곡면형상모델을 검토하였다. 인체는 머리, 목, 어깨, 몸통, 왼팔, 오른팔, 왼쪽 다리, 오른쪽 다리로 구분하였으며 인체를 참고 문헌 [12]와 같이 비유전율  $10^6$ 만으로 모의한 것과 비유전율  $10^6$  뿐만 아니라 도전율  $0.1s/m$ 를 모두 고려하여 모의한 두 가지 경우로 나누어 비교 계산하였다. 사용된 삼각형 요소수는 모두 678개 이며 각 요소가 이중층 표면전하로 표현되어 사용된 전하수는 1356개이다.

계산 결과로 표 1은 각각 인체의 유전율과 도전율을 동시에 고려한 인체 표면의 유도 전위와 전계치이다. 본 연구에서 인체표면의 유도 전위와 전계치는 유전율만 고려한 경우와 도전율을 함께 고려한 경우가 거의 유사한 값이었고 지표면으로부터 멀어질수록 높은 현상은 참고문헌[11]의 사각모델과 같았으나 곡면모델의 표면 유도전위는 위치에 따라 곡면모델이 약 2~3배 높았고 유도전계도 곡면모델 쪽이 더 높았으나 정확한 배수를 정하기는 어려웠다.

표 2는 인체 내부의 유도 전위, 전계 계산치로 인체 표면과 마찬가지로 유도 전위와 전계치 모두 유전율만 고려한 경우와 도전율을 함께 고려한 경우가 거의 유사한 값이었으나 인체 표면과는 달리 유도전위는 목의 전위가 높게 나와 일부의 전계의 방향이 머리 쪽을 향하고 있는 참고문헌[11]의 사각모델과 같은 결과를 얻었다.

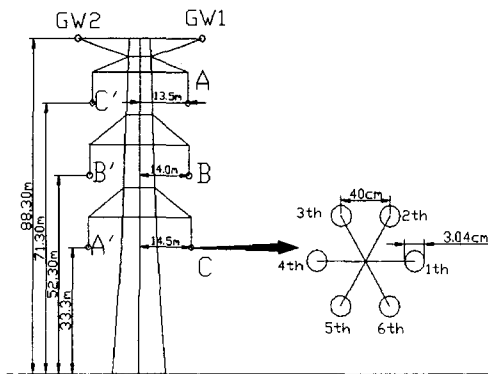


그림 1. 765 kV 송전선로 및 상도체 구조  
Fig. 1. 765 kV transmission line and phase conductor configuration

또한 곡면모델의 경우는 사각모델에 비해 위치에 따른 전계의 변화가 컸으며 크기도 사각모델에 비해 평균적으로 약 3배 정도 컸으나 정확한 배수를 정하기는 어려웠다. 또한 그림 4는 비유전율만 고려한 경우의 곡면 모델 인체내부의 전계분포도를 나타낸 것으로 그림 4 a)는 인체의 중심의 단면에서의 결과이고 b)는 중심으로부터 5cm 앞 쪽의 단면에서의 결과로 전계의 세기가 중심보다는 표면 쪽이 약간 커짐을 알 수 있다.

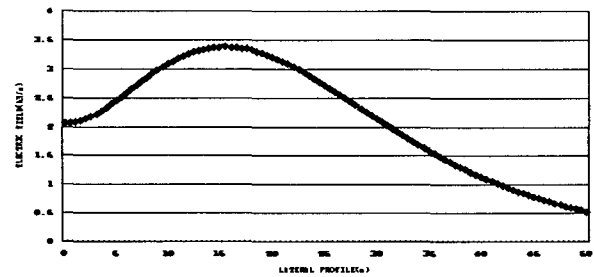


그림 2. 765 kV 송전선하의 지표면 전계강도  
Fig. 2. Electric field at 1 m above the ground under 765 kV transmission line

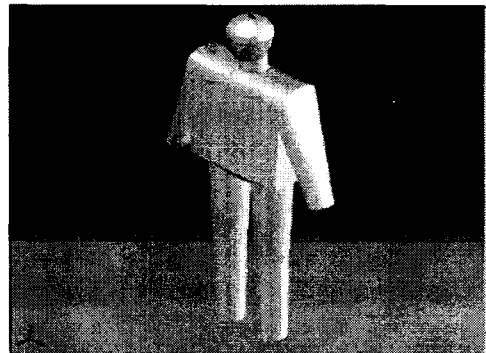


그림 3. 곡면형상 인체모델  
Fig. 3. Human model represented by smooth curve

표 1. 비유전율  $\epsilon_r=10^6$ 과 도전율  $\sigma = 0.1[S/m]$  를 모두 고려한 곡면 인체 모델 표면 유도 전위 및 전계

Table 1. Induced potential and electric field at surface of human body for relative permittivity  $\epsilon_r=10^6$  and conductivity  $\sigma = 0.1[S/m]$

인체 부위 및 좌표(cm)	전위(kV)	전계(kV/m)
머리 (2.368, 1.367, 157.74)	$0.99 \times 10^{-5}$ $+j0.297 \times 10^{-5}$	53.88
목 (1.51, 4.73, 140.81)	$0.7756 \times 10^{-5}$ $+j0.2323 \times 10^{-5}$	14.92
몸통 ( 7.39, 2.33, 133.0 )	$0.973 \times 10^{-5}$ $+j0.2915 \times 10^{-5}$	7.805
왼팔 (29.2, 4.95, 104.17)	$0.3268 \times 10^{-5}$ $+j0.979 \times 10^{-6}$	17.493
오른팔 (-25.39, 6.77, 117.57)	$0.631 \times 10^{-5}$ $+j0.189 \times 10^{-5}$	22.023
왼쪽 다리 (8.332, 6.064, 50.65)	$0.222 \times 10^{-6}$ $+j0.666 \times 10^{-7}$	4.7256
오른쪽 다리 (-5.91, 5.0, 67.37)	$0.6472 \times 10^{-6}$ $+j0.1939 \times 10^{-6}$	3.491

표 2. 비유전율  $\epsilon_r=10^6$ 과 도전율  $\sigma=0.1[S/m]$ 를 모두 고려한 곡면 인체모델 내부 유도 전위 및 전계

Table 2. Induced potential and electric field inside human body for relative permittivity  $\epsilon_r=10^6$  and conductivity  $\sigma = 0.1[S/m]$

인체 부위 및 좌표(cm)	전위(kV)	전계(kV/m)
머리 (0.0, 0.0, 155.0)	$0.8652 \times 10^{-5}$ $+j0.2592 \times 10^{-5}$	$0.4126 \times 10^{-4}$
목 (0.0, 0.0, 137.5)	$0.8329 \times 10^{-5}$ $+j0.2484 \times 10^{-5}$	$0.3150 \times 10^{-4}$
몸통 (0.0, 0.0, 110.0)	$0.6389 \times 10^{-5}$ $+j0.1914 \times 10^{-5}$	$0.19892 \times 10^{-4}$
왼쪽다리 (8.0, 3.0, 50.0)	$0.2201 \times 10^{-6}$ $+j0.6594 \times 10^{-7}$	$0.1974 \times 10^{-5}$
오른쪽다리 (-12.0, -3.0, 60.0)	$0.3491 \times 10^{-6}$ $+j0.1045 \times 10^{-6}$	$0.290 \times 10^{-5}$

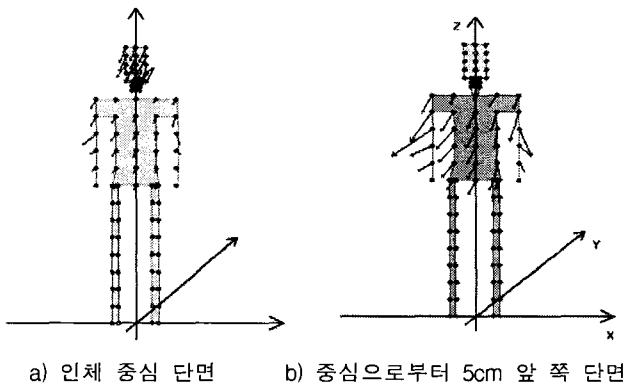


그림 4. 곡면 모델의 인체내부 전계분포도  
Fig. 4. Distribution of electric field of smooth curve model inside human body

2.3 인체 모델 내부 유도전류 밀도 계산

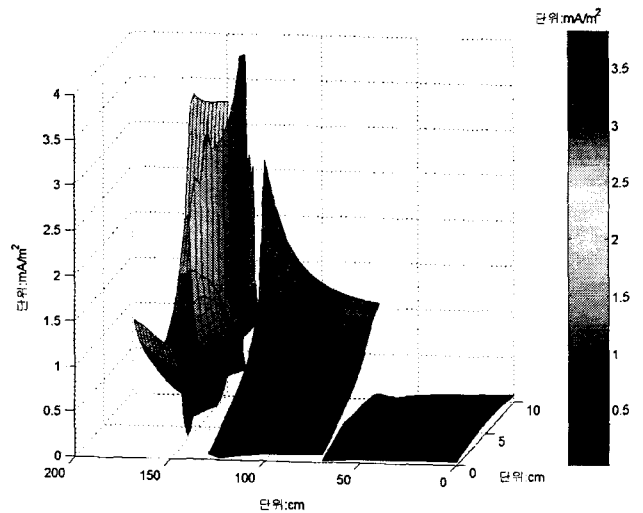
인체를 비유전율  $10^6$ 과 도전율  $0.1 S/m$ 로 가정하여 인체 내부의 유도전류 밀도를 계산하였다. 그림 5는 사각모델의 경우로 a)는 인체의 중심단면의 전류 분포로 머리 쪽이 가장 높았으며, 어깨, 목, 몸통, 팔, 다리 순으로 전류밀도가 낮아지고 평균치는 약  $0.77mA/m^2$  있었으며 b)는 인체 중심에서 왼쪽으로 5cm 떨어진 곳 (다리의 경우는 3 cm)의 단면으로 인체 중심보다 유도전류 밀도가 약간 증가하여 평균치가 약  $0.83mA/m^2$ 이어서 인체 표면 쪽으로 갈수록 유도전류 밀도가 약간 증가함을 알 수 있었다. 그림 6은 곡면모델의 경우로 형태는 참고문헌[11]의 사각모델과 유사하였으나 유도전류 밀도치가 위치에 따라 사각모델보다 변화가 심하였고, 평균치도 사각모델보다 약 3배 정도 높아 평균치가 a)의 인체중심 단면에서는 약  $2.23mA/m^2$ , b)의 인체중심에서 왼쪽으로 이동한 단면은  $2.61 mA/m^2$ 가 나왔다.

또한 인체부위별 유도전류 밀도의 평균치는 표3과 같다.

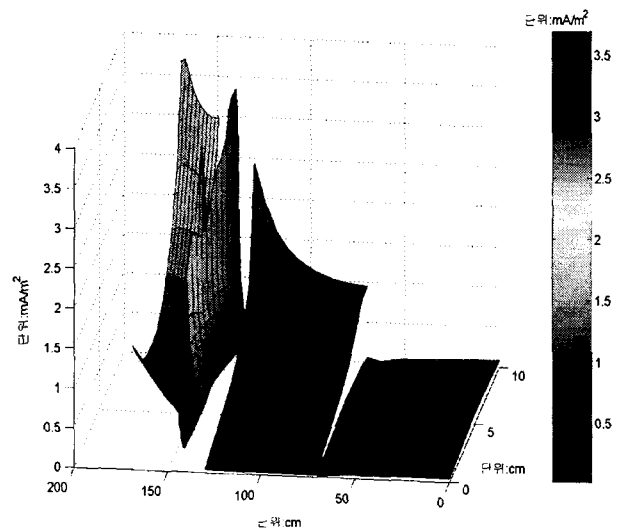
표 3. 계산부위 별 전류밀도 평균치(단위 :  $mA/m^2$ )

Table 3. Mean values of current density for human body's each parts

계산 부위	정밀모델 (인체 중심단면)	정밀모델 (X축 중심이동 단면)	사각모델 (인체 중심단면)	사각모델 (X축 중심이동 단면)
머리	3.9492	4.306	1.3295	1.2644
목	2.8627	3.8224	0.79408	0.86443
어깨			1.1247	1.3973
몸통	1.864	2.0048	0.48489	0.52491
다리	0.25665	0.30512	0.094399	0.096555
평균	2.23	2.61	0.77	0.83



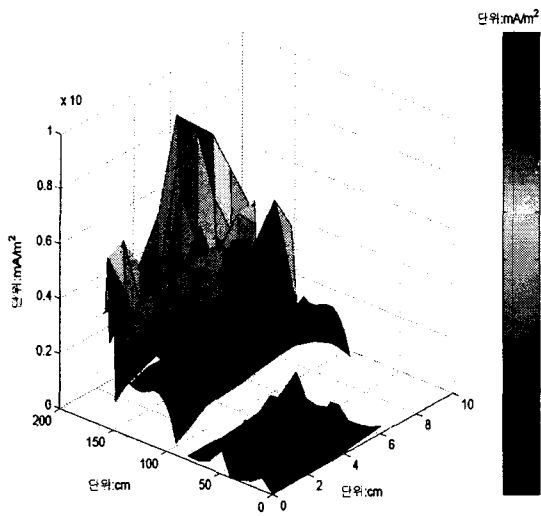
a) 중심 단면



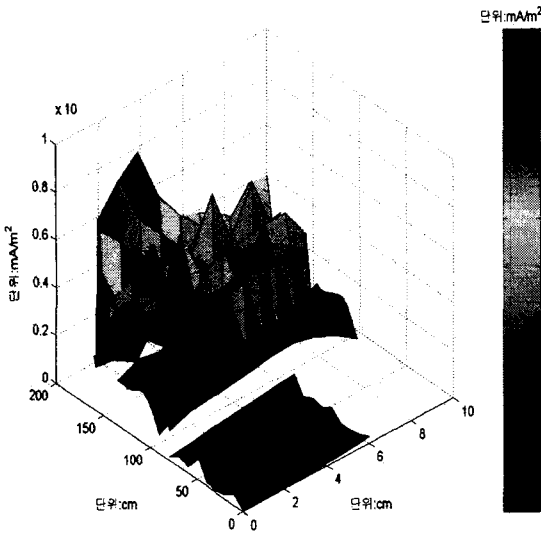
b) 인체 중심으로부터 왼쪽의 단면

그림 5. 사각모델 전류밀도

Fig. 5. Distribution of current density of rectangular model



a) 중심 단면



b) 인체 중심으로부터 왼쪽의 단면

그림 6. 곡면모델 전류밀도

Fig. 6. Distribution of current density of smooth curve model

### 3. 결 론

인체를 유전율과 도전율을 갖는 복합 유전체로 모의하여 인체 표면과내부에 유도되는 전위 및 전계를 계산하였다. 이 경우 인체의 비유전율이 60[HZ]에서  $10^6$ 으로 매우 높기 때문에 인체 내부의 유도 전위와 전계 계산오차가 매우 커지는 문제점이 있다.

따라서 인체모델을 유전율만 고려한 경우와 도전율을 함께 고려한 두 가지 경우에 유전체 표면을 이중 모의 전하로 표현하는 기법을 적용하여 인체 표면과 내부의 유도 전위 및 전계를 계산하였다. 계산 결과로 인체모델을 사각과 곡면으로 모의한 경우, 인체표면과 내부의 유도 전위와 전계치는 유전율만 고려한 경우와 도전율을 함께 고려한 경우가 거의 유

사한 값이었고 지표면으로부터 멀어질수록 높았다.

인체 내부의 유도 전계치는 사각모델의 경우는 유전율만 고려한 경우와 도전율을 함께 고려한 경우 외부 인가 전계치는 약  $10^6$  정도 감소하여 인체내부의 유도전계는 도전율보다는 유전율에 지배됨을 알 수 있었다. 그러나 곡면모델의 경우는 사각모델에 비해 위치에 따른 전계의 변화가 컸으며 크기도 사각모델에 비해 평균적으로 약 3배 정도 컸으나 정확한 배수를 정하기는 어려웠다.

인체내부의 유도전류 밀도는 사각모델의 경우는 평균치가 약  $1\text{mA/m}^2$  인 것에 비해 곡면모델의 경우는 평균치가 약  $3\text{mA/m}^2$  로 사각모델의 3배까지 증가하였지만, 세계보건기구에서 유도전류 밀도 안전 기준치인  $10\text{mA/m}^2$  보다 충분히 낮음을 알 수 있었고 이상의 기법은 최근 문제가 되고 있는 송전선 저주파수 전자계 영향에 관한 정량적 해석에 토대가 될 것으로 생각한다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력기반 기금으로 수행되었음.

### 참 고 문 헌

- [1] 민석원, 김정부, “코로나 케이지를 이용한 765kV 초고압 송전선 다중 도체방식 선정,” 대한전기학회논문지, 7호, 제42권, pp. 84-94, 1993.
- [2] 민석원, 박종근, “코로나 잡음 특성을 고려한 초고압 송전선의 다중 도체 배열 방식 연구,” 대한전기학회논문지, 5호, 제39권, pp. 508-515, 1990.
- [3] S. W. Min, J. B. Kim, D. I. Lee, “A Study on Corona Characteristics of Symmetric and Asymmetric Conductor Bundle for 765kV Double Circuit Transmission Line by the Use of Corona Cge,” Proc. of 8th ISH, Vol.3, pp. 457-460, 1993.
- [4] S. W. Min, J. K. Park, J. B. Kim, “Conductor Bundle Geometry Optimization in view of Conductor Surface Gradient,” IEE Japan, vol. 111-B, pp. 1065-1072, 1991.
- [5] T. Takuma, T. Kawamoto, “A Very Stable Calculation Method for Ion Flow Field of HVDC Transmission Lines,” IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 1, pp. 189-198, 1987.
- [6] 민석원, “송전선 인근의 생체 및 물체 표면 전계 분포 해석,” 순천향대학교 산업기술연구소 논문집, 1호, 제2권, pp. 39-48, 1996.
- [7] 민석원, 김용식, 명성호, 이병윤, 박종근, “765kV 교류 2회선 송전선하의 인체 및 자동차에 유도되는 전압, 전류 계산,” 대한전기학회논문지, 5호, 제45권, pp. 301-309, 1996.
- [8] 민석원, 타구마, “매질 특성이 크게 상이한 다매질 유전체 내부의 전계 계산을 위한 표면 전하법 기법,” 대한전

기학회논문지, 5호, 제47권, pp. 662-672, 1998.

[9] T. Kouno, T. Takuma, "Numerical Calculation Methods of Electric Fields", Corona Pub. Co., Tokyo, 1980, Appendix 6, pp. 224-225.

[10] T. Kouno, T. Takuma, *ibid.*, chap. 16, pp. 160-178.

[11] 민석원, "유전율 및 도전율을 고려한 765kV 송전선하의 인체 유도 전계해석," 대한전기학회논문지, 6호, 제49권, pp. 341-345, 2000.

[12] Charles Polk, Elliot Postow, et al., "Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields," CRC Press, Newyork, 1996, pp. 55-57.

저 자 소 개



**민 석 원(閔錫源)**

1958년 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. 1996년~1997년 일본 교토 대학 방문교수. 현재 순천향대학교 정보기술공학부 교수  
 Tel : 041-530-1338, Fax : 041-530-1548  
 E-mail : swonmin@sch.ac.kr



**양 광 호(梁光鎬)**

1957년 11월 16일생. 1981년 충북대 전기공학과 졸업. 1986년 성균관대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1986년~현재 한국전기연구원 전력연구단 전기환경·송전연구그룹 책임연구원, Technical Leader (전력설비 환경친화 설계기술 분야). 1999년도 대한전기학회 및 2000년도 한국과학기술단체총연합회 우수논문상 수상. KIEE, IEEE 정회원.  
 Tel : 055-280-1322  
 Email : khyang@keri.re.kr



**송 기 현(宋棋鉉)**

1974년 5월 27일생. 2000년 순천향대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.  
 Tel : 041-530-1338  
 Fax : 041-530-1548  
 E-mail : songkha@nate.com



**주 문 노(朱玠魯)**

1968년 7월 7일생. 1994년 인하대 환경공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년~현재 한국전기연구원 전력연구단 전기환경·송전연구그룹 선임연구원.  
 Tel : 055-280-1324  
 Email : mnju@keri.re.kr