

765kV 2회선 송전선 활선 작업자의 차폐복 자계저감 특성검토

論 文

56-9-19

Magnetic Field Reduction Characteristics of Hot-Line Worker's Shielding Wear for 765kV Double Circuit Transmission Line

閔錫源[†] · 朴峻炯^{*}

(Suk-Won Min · Jun-Hyeong Park)

Abstract - This paper analyses current densities induced inside human body of lineman for 765kV transmission line when he wears a protective cloth or not. Applying the boundary element method, we calculate current densities induced in organs inside a worker in case he was located at 15[cm], 30[cm], 50[cm], and 100[cm] far from a prefabricated jumper. As results of study, we find a maximum current density induced in all organs may be higher than 10[mA/m²] if he does not wear protective clothes. We also know high permeability materials can lower current density more than high conductivity materials

Key Words : Magnetic Field Reduction, 765kV, Shielding Wear , Hot-Line Worker

1. 서 론

전기 기술자의 암 발생과 극저주파 전자계 노출간의 가능한 연관성을 평가하기 위하여 많은 역학조사가 행해졌지만 [1]-[3], 연구결과가 일관성이 없기 때문에 전계와 자계 노출로 인한 건강영향에 불안이 있다. 이런 불안의 반향은 상당한 논쟁을 일으키고 전력선과 전력설비 건설의 지연과 비용증가를 초래하고 있다. 이와 관련하여 국제 비전리 방사선 보호위원회에서는 노출을 제한하기 위한 국제 가이드라인을 1998년에 제정하였으며[4], 극저주파 전자계에 노출된 직업인의 인체내부 유도전류밀도를 10[mA/m²] 이하가 되도록 요구하였다. 이런 상황을 극복하기 위해, 본 논문에서는 매우 높고 불균일한 자계에 노출되어 있는 765kV 2회선 송전선 활선 작업자의 인체내부에 유도되는 전류밀도를 다음과 같이 분석하였다.

첫 번째로 경계요소법을 적용하여 765kV 송전선의 prefabricated jumper로부터 15[cm], 30[cm], 50[cm]와 100[cm] 떨어져서 차폐복을 입지 않은 상태에서 활선작업을 하는 작업자의 인체 내부에 유도되는 전류밀도를 우선 계산하였다. 인체는 뇌, 심장, 폐, 간, 창자와 기타 부분으로 모델링하였으며 이들의 형상은 참고문헌 [5]와 같이 구형체와 원통형으로 모의하였고 도전율은 참고문헌 [6]을 참조하였다.

계산 결과, 활선작업자가 15[cm] 떨어져 있을 때 작업자

는 1.8[mT]의 높고 불균일한 자계에 노출되어 있기 때문에 뇌와 심장부근에서의 최대 유도 전류밀도가 각각 약 20[mA/m²]와 약 30[mA/m²] 이었다. 또한 점퍼로부터의 거리를 증가시키면 따라 유도 전류밀도가 감소할지라도 활선 작업자가 100[cm] 떨어져 있을 때 심장부근에서 17[mA/m²]가 유도되었다. 이것은 활선 작업자가 차폐복을 입지 않는다면 국제비전리방사선 보호 위원회의 가이드라인[6]인 10[mA/m²]보다도 더 높은 유도전류밀도가 발생할 수도 있음을 의미한다.

두 번째로 이 문제를 해결하기 위해서 활선 작업자가 15[cm]에 있을 때, 인체유도 전류밀도를 줄이기 위한 차폐복 재료의 자계 저감특성을 조사하였다. 자계를 저감할 수 있는 차폐재로는 크게 투자율이 매우 높은 자성재료와 도전율이 높은 도전재료로 구분할 수 있다. 즉, 투자율이 높은 자성재료는 자기저항을 변화시켜 차폐재로 자속이 집중하게 하여 다른 부분의 자속밀도를 낮추는 방법을 이용한 것이고 도전율이 높은 도전재료는 유도 와전류를 이용하여 자계를 저감시키는 방법이다. 따라서 본 연구에서는 고 투자율 물질로 퍼멀로이트, 고 도전율 물질로 구리, 투자율과 도전율이 중간정도인 규소의 3종류를 선택하여 어떤 재료특성이 활선작업자 차폐복에 적합한지와 국제 비전리 방사선 보호 위원회의 가이드라인을 만족하는지를 검토하였다.

2. 인체 유도전류밀도 해석기법

prefabricated jumper 외부에서 작업하는 실제상황은 그림 1과 같으며 이를 그림 2와 같이 활선작업자가 prefabricated jumper로부터 15[cm], 30[cm], 50[cm], 100[cm] 떨어져서 작업하는 경우로 모의 계산하였다.

[†] 교신저자, 正 會 員 : 順天鄉大學 전기통신시스템공학과 敎 授 · 工 博

E-mail : swonmin@sch.ac.kr

^{*} 正 會 員 : 順天鄉大學 전기통신시스템공학과 碩 士 課 程

接受日字 : 2007年 6月 19日

最終完了 : 2007年 7月 2日

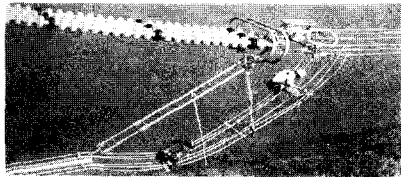


그림 1 prefabricated jumper에서 작업하는 실제상황
Fig. 1 Lineman's real practice working at a prefabricated jumper

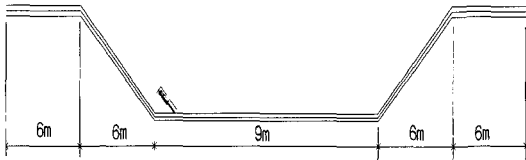


그림 2 prefabricated jumper에서 작업하는 조건의 모델
Fig. 2 Simulation model of a lineman and a prefabricated jumper

이와 관련한 자계 유도 전류 계산 기본방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times E = -j\omega B \quad (1)$$

$$\nabla \cdot j = 0 \text{ (전류 연속방정식)} \quad (2)$$

$$j = \sigma E \text{ (오옴의 법칙)} \quad (3)$$

여기서 E 는 유도전계강도, B 는 자속밀도, ω 는 각주파수, σ 는 도전율, j 는 유도전류밀도이고 시간미분은 $j\omega$ 로 치환하였다.

이상의 방정식을 풀 수 있는 수치계산법은 크게 임피던스법[7], FDTD법(유한차분 시간법)[8], 유한요소법[9], 경계요소법[6] 등으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 일반 3차원 경계요소법 프로그램인 캐나다의 IES(Integrated Engineering Software)사의 Faraday 3D 프로그램을 이용하여 인체내부 장기에 유도되는 전류밀도를 계산하였다. 이 프로그램을 사용한 이유는 입력데이터 작성이 용이하고 계산시간이 짧았기 때문이다. 인체모델은 그림 3과 같이 뇌, 심장, 폐, 간, 장과 기타 부분으로 모의하였으며 장기에 할당한 도전율은 표 1과 같이 가정하였다.

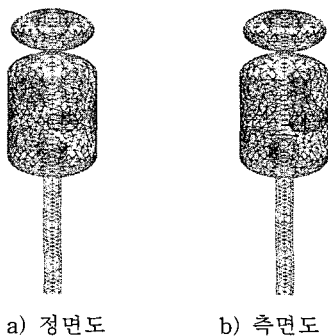


그림 3 수치계산에 이용된 인체 모델 표면 분할
Fig. 3 Surface meshes of human model

표 1 인체모델의 기관에 할당한 도전율
Table 1 Organ conductivity assigned to human model

기관	도전율(S/m)
뇌	0.75
심장	0.70
폐	0.10
간	0.10
장	0.03
기타	0.11

3. 계산결과

3.1 차폐복 없이 Prefabricated jumper 외부에서 작업하는 경우

3.1.1 15[cm] 떨어진 지점에 위치한 경우

그림 4는 최대부하 전류의 60%인 3,308[A]가 흐르는 765[kV] prefabricated jumper로부터 15[cm] 떨어진 지점에 작업자 인체중심이 위치한 경우의 자속밀도 분포도로 뇌는 약 1.6[mT], 심장은 약 1.8[mT]의 매우 높고 불균일한 자계에 노출됨을 알 수 있다. 따라서 그림 5와 같이 뇌에는 약 20[mA/m²], 심장에는 30[mA/m²], 그 외의 장기에서는 약 6[mA/m²]의 최대전류밀도를 보였다.

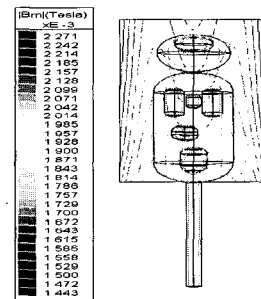


그림 4 prefabricated jumper로부터 15[cm] 떨어진 경우의 자속밀도 분포도
Fig. 4 Distribution of magnetic flux density when a man works at 15[cm] outside jumper

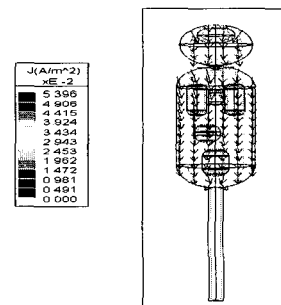


그림 5 prefabricated jumper로부터 15[cm] 떨어진 경우의 인체 유도전류 밀도 분포도
Fig. 5 Distribution of induction current density when a man works at 15[cm] outside jumper

3.1.2 30[cm] 떨어진 지점에 위치한 경우

그림 6은 prefabricated jumper로부터 30[cm] 떨어진 지점에 작업자 인체중심이 위치한 경우의 자속밀도 분포도로 뇌는 약 1.4[mT], 심장에는 약 1.6[mT]의 매우 높고 불균일한 자계에 노출되어 뇌는 약 17.1[mA/m²]의 최대전류밀도를, 심장은 약 26.9[mA/m²]의 최대치를 보였으며 그 외의 장기에서는 약 5[mA/m²] 이었다.

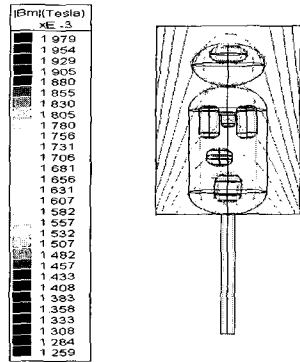


그림 6 prefabricated jumper로부터 30[cm] 떨어진 경우의 자속밀도 분포
 Fig. 6 Distribution of magnetic flux density when a man works at 30[cm] outside jumper

3.1.3 50[cm] 떨어진 지점에 위치한 경우

그림 7은 jumper로부터 50[cm] 떨어진 지점에 작업자 인체중심이 위치한 경우의 자속밀도 분포도로 뇌에는 약 0.9[mT]가, 심장에는 약 1.0[mT]의 불균일한 자계에 노출됨을 알 수 있다. 따라서, 뇌의 유도전류 밀도는 약 10.9[mA/m²], 심장은 약 20.2[mA/m²]의 최대치를 보였으며 그 외의 장기에서는 약 4[mA/m²] 이하이었다.

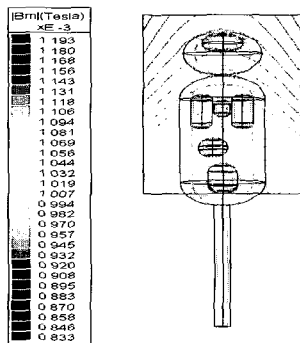


그림 7 prefabricated jumper로부터 50[cm] 떨어진 경우의 자속밀도 분포
 Fig. 7 Distribution of magnetic flux density when a man works at 50[cm] outside jumper

3.1.4 100[cm] 떨어진 지점에 위치한 경우

그림 8은 jumper로부터 100[cm] 떨어진 지점에 작업자 인체중심이 위치한 경우의 자속밀도 분포도로 뇌에는 약 0.7[mT]가, 심장에는 약 0.8[mT]의 불균일한 자계에 노출됨

을 알 수 있다. 따라서 뇌의 유도전류밀도는 약 7.8[mA/m²], 심장은 약 17[mA/m²]의 최대치를 보였으며 그 외의 장기에서는 약 3[mA/m²] 이하이었다.

이상의 각 경우에 각 장기에 유도되는 전류밀도의 최대치를 정리하면 표 2와 같다.

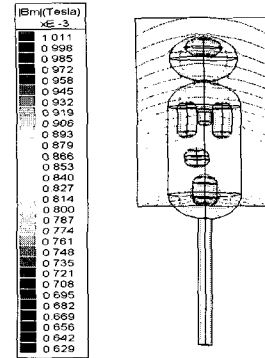


그림 8 prefabricated jumper로부터 100[cm] 떨어진 경우의 자속밀도 분포
 Fig. 8 Distribution of magnetic flux density when a man works at 100[cm] outside jumper

3.2 차폐복 재료변화에 따른 인체내부 유도전류밀도 저감특성

차폐복을 착용하지 않은 활선작업자가 jumper로부터 100[cm] 떨어져 있는 경우의 인체내부 유도전류밀도의 최대치가 표 2와 같이 약 17[mA/m²]로 국제비전리방사선 보호위원회의 가이드라인인 10[mA/m²]보다도 훨씬 높았다. 따라서 본 논문에서는 이를 줄이기 위해, jumper로부터 15[cm] 떨어진 지점의 작업자 차폐복 재료특성을 변화시켜 가면서 인체내부 유도전류밀도를 검토하였다. 차폐복의 두께는 1.5[mm]로 하였으며 옷과 인체와의 간격은 10[mm] 떨어진 형태로 모의하였다. 차폐복 재료는 표 3과 같이 고도전율 물질인 구리, 고부자율 물질인 퍼멀로이와 그 중간적인 성격을 갖는 실리콘을 검토하였다.

표 2 차폐복을 착용하지 않은 경우 각 계산 별 인체내부 장기 유도전류 밀도 최대치

Table 2 Maximum current densities of organs induced inside human body without wearing protective clothes

단위: (mA/m²)

계산case 인체장기	점퍼 외부			
	15cm	30cm	50cm	100cm
뇌	19.95	17.06	10.87	7.782
심장	29.94	26.87	20.15	16.99
폐	4.417	3.893	3.004	2.571
간	5.663	5.051	3.778	3.221
장	1.534	1.425	1.216	1.110

표 3 차폐복의 재료 특성

Table 3 Materials characteristics of a shielding cloth

재료	투자율	도전율(S/m)
구리	1	5.8×10^7
규소	8000	2.127×10^6
퍼멀로이	38000	1.666×10^6

3.2.1 구리재료의 차폐복을 입은 경우

표 3에서 검토한 재료 중에서 도전율이 가장 높은 재료인 구리를 차폐복으로 사용했을 경우 심장에서 유도되는 전류 밀도가 그림 9와 같이 $19.15[\text{mA}/\text{m}^2]$ 로 가장 높게 나왔으며, 차폐복을 입지 않았을 때의 $29.94[\text{mA}/\text{m}^2]$ 보다 낮은 유도 전류 밀도가 나타났다. 뇌에서의 유도 전류 밀도는 그림 10과 같이 $9.83[\text{mA}/\text{m}^2]$ 로 나타나며, 그 외의 장기에서는 $4[\text{mA}/\text{m}^2]$ 이하의 유도 전류 밀도가 나타났다.

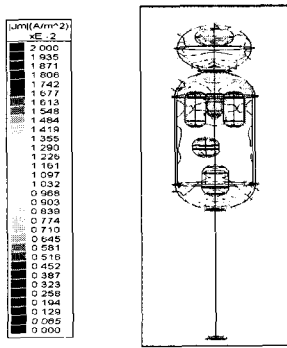


그림 9 구리재료의 차폐복을 입은 경우의 심장 중심 유도 전류 밀도

Fig. 9 Distribution of induction current density in a heart cross-section inside human wearing a copper cloth for shield

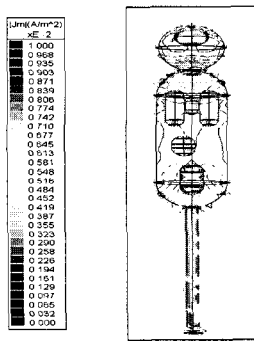


그림 10 구리재료의 차폐복을 입은 경우의 뇌 중심 유도 전류 밀도

Fig. 10 Distribution of induced current density in a brain cross-section inside human wearing a copper cloth for shield

3.2.2 규소재료의 차폐복을 입은 경우

규소는 투자율은 구리보다 높고 도전율은 낮은 경우로 심장에서 유도되는 전류 밀도가 그림 11과 같이 $3.95[\text{mA}/\text{m}^2]$

로, 차폐복을 입지 않았을 때의 $29.94[\text{mA}/\text{m}^2]$ 와 구리재료의 차폐복을 입은 경우의 $19.15[\text{mA}/\text{m}^2]$ 보다 낮았다. 또한, 뇌에서의 최대 유도전류밀도는 그림 12와 같이 $2.096[\text{mA}/\text{m}^2]$ 로 나타났으며, 그 외의 장기에서는 $1[\text{mA}/\text{m}^2]$ 이하의 유도 전류 밀도가 나타났다.

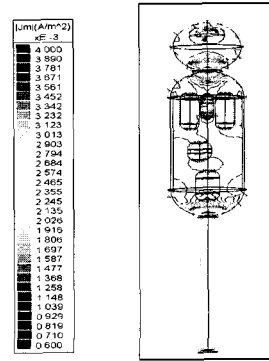


그림 11 규소재료의 차폐복을 입은 경우의 심장 중심 유도 전류 밀도

Fig. 11 Distribution of induction current density in a heart cross-section inside human wearing a silicon cloth for shield

3.2.3 퍼멀로이재료의 차폐복을 입은 경우

퍼멀로이는 검토한 재료 중에서 투자율이 가장 높고 도전율이 가장 낮은 경우로 심장에서 유도되는 전류 밀도가 그림 13과 같이 $0.4594[\text{mA}/\text{m}^2]$ 이었다. 이는 차폐복을 입지 않았을 때와 구리와 규소재료의 차폐복의 경우보다 훨씬 낮은 유도 전류 밀도이다. 또한 뇌에서의 유도전류 밀도도 그림 14와 같이 $0.3050[\text{mA}/\text{m}^2]$, 그 외의 장기에서도 $0.2[\text{mA}/\text{m}^2]$ 이하였다. 이것으로부터 투자율이 높은 재료를 이용하여 만든 차폐복이 인체 내부에서 가장 작은 유도전류를 만든다는 것을 알 수 있었다.

표 4는 prefabricated jumper로부터 15[cm] 떨어진 지점에서 차폐복을 입고 작업하는 경우의 차폐복 재료변화에 따른 각 장기의 유도전류 밀도 최대치를 요약정리 한 것이다.

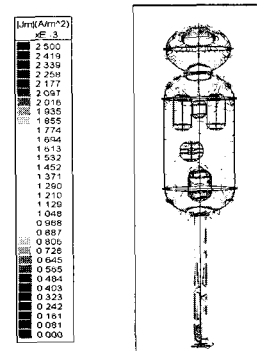


그림 12 규소재료의 차폐복을 입은 경우의 뇌 중심 유도 전류 밀도

Fig. 12 Distribution of induction current density in a brain cross-section inside human wearing a silicon cloth for shield

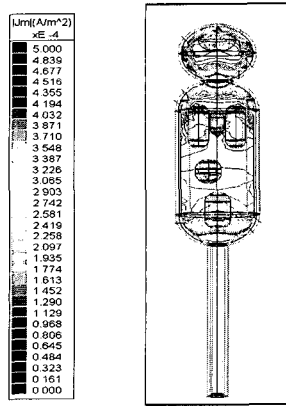


그림 13 퍼멀로이 재료의 차폐복을 입은 경우의 심장 중심 유도 전류밀도

Fig. 13 Distribution of induction current density in a heart cross-section inside human wearing a permalloy cloth for shield

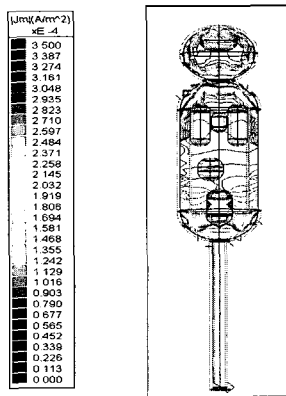


그림 14 퍼멀로이 재료의 차폐복을 입은 경우의 뇌 중심 유도 전류밀도

Fig. 14 Distribution of induction current density in a brain cross-section inside human wearing a permalloy cloth for shield

표 4 차폐복 재료 변화에 따른 각 장기의 유도전류 밀도 최대

Table 4 Maximum induction current densities of organ on various materials of shielding wearing

단위:(mA/m²)

차폐복의 재료 \ 인체장기	구리	규소	퍼멀로이
뇌	9.839	2.096	0.3050
심장	19.151	3.950	0.4594
폐	3.270	0.5978	0.07461
간	3.550	0.6472	0.1798
장	0.8252	0.2933	0.04848

4. 결 론

본 논문에서는 불규일 고자계 속에 노출될 수 있는 765kV 2회선 송전선 환선 작업자의 인체 내부에 유도되는 전류밀도를 차폐복을 입지 않은 경우와 입은 경우로 나누어 해석하였다. 경계요소법을 이용하여 우선, 차폐복을 입지 않은 상태에서 prefabricated jumper로부터 15[cm], 30[cm], 50[cm], 100[cm] 떨어진 곳에서 작업하는 작업자의 인체내부에 유도되는 전류밀도를 해석하였다. 해석결과로, 차폐복을 입지 않은 경우는 점퍼로부터 떨어진 거리가 증가됨에 따라 인체내부 유도전류 밀도가 감소될지라도 점퍼로부터 작업자가 100[cm] 떨어진 경우에도 심장에 약 17[mA/m²]의 유도전류 밀도가 발생하여 국제비전리방사 보호위원회의 가이드라인인 10[mA/m²]보다도 높음을 알 수 있었다.

이에 비해 규소나 퍼멀로이 재료의 차폐복을 착용하면 국제비전리방사선 보호위원회의 유도전류 밀도 안전 기준치보다 낮출 수 있음을 알 수 있었고 차폐복의 재료로는 도전율이 높은 재료보다는 투자율이 높은 재료가 유리함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] P. A. Demers, D. B. Thomas, A. Sternhagen, W. D. Thompson, M. G. Curnen, W. Satariano, D. F. Austine, P. Issacson, R. S. Greenberg, C. Key, L. K. Kolonel, D. W. West, "Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men," Am. J. Epidemiol., vol. 132, pp. 775-776, 1991.
- [2] G. Theriault, M. Goldberg, A. B. Miller, B. Armstrong, P. Guenel, J. Deadman, E. Imbernon, T. To, A. Chevalier, D. Cyr, C. Wall, "Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France-1970-1989," Am. J. Epidemiol., vol. 139, pp. 550-572, 1994.
- [3] D. A. Savitz, D. P. Loomis, "Magnetic field exposure in relation to leukaemia and brain cancer mortality among electric utility workers," Am. J. Epidemiol., vol. 141, pp. 123-134, 1995.
- [4] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz)," Health Phys., vol. 74, pp. 494-522, April 1998.
- [5] K. Yamazaki, T. Kawamoto, H. Fujinami, T. Shigemitsu, "Investigation of ELF magnetically induced current inside human body development of estimation tools and effect of organ conductivity," Trans. IEE Japan, vol. 120-A, pp. 81-87, Jan. 2000.
- [6] O. Bottauscio, R. Conti, "Magnetically and electrically induced currents in human body models by ELF electromagnetic fields," in Proc. of 10th Intern. Symposium on High Voltage Engineering 1997, 5-8.

- [7] P. J. Dimbylow, "Induced current densities from low-frequency magnetic fields in a 2 mm resolution, anatomically realistic model of body," Phys. Med. Biol., vol. 43, pp. 221-230, 1998.
- [8] C. M. Furse, O. P. Gandhi, "Calculation of electric fields and currents induced in a millimeter resolution human model at 60 Hz using the FDTD method," Bioelectromagnetics, vol. 19, pp. 293-299, 1998.
- [9] P. Baraton, J. Cahouet, B. Hutzler, "Three dimensional computation of the electric fields induced in a human body by magnetic fields," in Proc. of 8th Intern. Symposium on High Voltage Engineering 1993, pp. 517-520.

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(공학박사). 1984 ~ 1991년 한전 기술연구원 계통연구실 근무. 1996년~1997년 일본 교토대학 방문교수. 2005년~2006년 미국 신시내티 대학 방문교수. 현재 순천향대학교 전기통신시스템공학과 교수.

Tel : 041-530-1338, Fax : 041-530-1548
E-mail : swonmin@sch.ac.kr



박 준 형 (朴峻炯)

1984년 10월 2일생. 2007년 순천향대 공대 정보기술공학부 졸업. 현재 동 대학원 전기시스템 공학과 석사과정.

Tel : 041-530-1338, Fax : 041-530-1548
E-mail : jun00jjang@nate.com