

교류 아크용접기를 사용하는 작업자의 인체 유도전류밀도 해석

論 文

57-3-16

Analyses on Current Densities Induced Inside a Worker Using AC Arc Welder

朴 峻 炯* · 閔 錫 源*
(Jun-Hyeong Park · Suk-Won Min)

Abstract - This paper analyses current densities induced inside a worker using AC arc welder. Applying the boundary element method, we calculate current densities induced in organs inside a worker in case he was located at 1 cm, 3 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm far from a power cable of AC arc welder. As results of study, we find a maximum current density induces at a heart surface and may be higher than 10 mA/m² of ICNIRP guideline if he works within 15cm from a power cable.

Key Words : AC arc welder, Current Density, ICNIRP, Organs, Power cable

1. 서 론

대전류 근처에는 강한 자계가 발생한다. 전력산업에서 대전류는 가공송전선과 지중선 및 전력선의 모선에 흐르고 있다. 이런 전류에 의해 만들어지는 강자계에 활선작업자와 전기용접자 등은 직무로 인해 노출될 수 있다. 이런 전기기술자의 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. 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. 또한 이들 가이드라인에 맞추어 유럽연합은 물리매체(전자계) 노출로부터 생기는 작업자 최소건강 안정 요구사항에 관한 지시문서(Directive 2004/40/EC of European Parliament and the Council of 29 April 2004)를 2004년에 발표하였으며 2008년 이전까지 유럽연합 국가의 직업인 위험평가를 요청했다.

한편 우리나라에서는 아직 직업인의 전자계노출과 관련한 기준은 없으나 가까운 미래에 제정될 것으로 생각되어 본 논문 저자들은 765kV 2회선 송전선 활선작업자의 인체 유도전류 밀도와 차폐복의 자계저감 특성을 연구하였다[5,6]. 본 논문도 산업현장의 직업인의 직무에 따라 강자계가 어떻게 영향을 미치는 가를 검토하기 위해 교류 아크용접기를 이용하는 작업자의 인체내부 유도전류밀도 크기를 검토한 것이다.

아크용접에서는 금속이 두 전극 사이 또는 한 쪽 전극과

용접되어지는 금속 사이의 플라스마 아크 에너지에 의해 녹는다. 상용 주파수 전류가 보통 아크를 발생하지만 더 높은 주파수가 아크를 일으키거나 유지시키기 위해 이용될 수도 있다. 아크용접의 특징은 수백 암페어의 전류가 흐르는 절연된 전원케이블이 작업자의 몸에 접촉될 수 있다는 것으로 전원케이블 표면에서 자계가 1 mT 이상이 될 수 있다. 이와 관련하여 Stuchly와 Lecuyer는 1989년에 아크 용접자의 머리, 가슴, 팔목, 생식선, 팔과 다리로부터 10 cm 떨어진 지점의 자계를 조사하여 손목은 1 mT 이상, 몸통은 수백 μ T의 자계에 노출됨을 보였다[7].

따라서 본 논문에서는 경계요소법을 이용하여, 전원선으로부터 인체의 거리를 증가시키에 따라 용접자의 인체내부에 유도되는 최대전류밀도가 어떻게 감소하는가를 계산함으로써 어느 거리 이상에서 국제 비전리 방사선 보호위원회의 가이드라인을 만족하는지를 검토하였다. 사용전류는 아크용접기의 경우 통상 200 A에서 300 A가 평균적이거나 본 연구에서는 가혹한 순간 최대전류를 상정하여 1000 A로 하였다.

2. 인체 유도전류밀도 해석법

실제 아크 용접기를 가지고 작업하는 그림 1의 실제상황에서 볼 수 있듯이 보통 용접하는 순간에는 용접기의 전원선이 작업자의 몸통부분을 감쌀 수 있다. 그림 2는 이를 모의한 것으로 작업자가 전원선에 교류 1000 A 가 흐르고 있는 것으로 가정하였고, 작업자가 아크용접기의 전원으로부터 1 cm, 3 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm 떨어져서 작업하는 경우를 모의 계산하였다.

이와 관련한 자계 유도 전류 계산 기본방정식은 다음과 같다.

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

$$\nabla \cdot j = 0 \quad (2)$$

$$j = \sigma E \quad (3)$$

여기서 E 는 유도전계강도, B 는 자속밀도, ω 는 각주파

† 교신저자 : 順天鄉大學 전기통신시스템공학과 碩士課程

E-mail : jun00jjang@nate.com

* 正 會 員 : 順天鄉大學 전기통신시스템공학과 教授 · 工博

接受日字 : 2007年 12月 3日

最終完了 : 2008年 1月 22日

수, σ 는 도전율, j 는 유도전류밀도이고 시간미분은 $j\omega$ 로 치환하였다.

이상의 방정식을 풀 수 있는 수치 계산법은 임피던스법 [8], 유한 차분 시간영역법[9], 유한요소법[10]과 경계요소법 [11] 등이 있지만 본 연구에서는 경계요소법이 데이터 작성이 쉽고 계산시간이 짧기 때문에 일반 3차원 경계요소법 프로그램인 캐나다의 IES(Integrated Engineering Software)사의 Faraday 3D프로그램을 이용하여 인체 내부 장기에 유도되는 전류밀도를 계산하였다. 사용되어진 인체모델은 그림 3과 같으며 신장은 170 cm 로 뇌, 심장, 폐, 간, 창자의 위치 역시 신장에 비례하여서 위치시켰으며[12] 인체 내장기관의 도전율은 표 1과 같이 할당하였고 도전율은 일정하게 하였다[13].



그림 1 아크용접기를 사용하는 실제상황.
Fig. 1 A real situation in which an arc welder is being used.

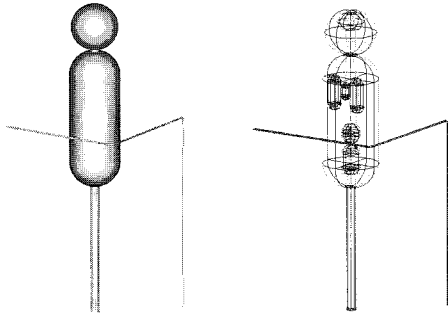


그림 2 교류 아크용접기 전원선 근처의 작업모델.
Fig. 2 Simulation model working near a power cable of an AC arc welder.

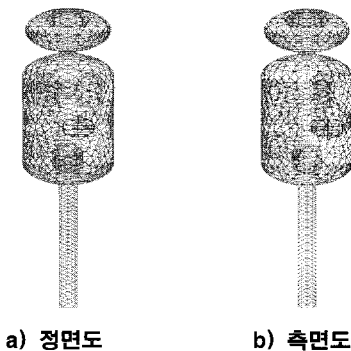


그림 3 경계요소법에 이용된 인체 모델 표면 분할도
Fig. 3 Surface meshes of human models used in boundary element method.

표 1 인체모델의 기관에 할당한 도전율
Table 1 Conductivity assigned to human model organ.

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

3. 인체로부터 전원선의 거리증가에 따른 유도전류밀도 변화

그림 4는 전원선으로부터 1 cm 떨어진 지점에 작업자가 위치하였을 경우, 인체정면에서 바라본 자속밀도를 벡터표시로 나타낸 것으로 뇌에는 약 0.126 mT, 심장과 폐에서는 약 0.655 mT의 불균일한 자계분포를 보이며 전원선으로부터 가장 가까운 간 부분은 약 2.508 mT의 가장 높은 값을 보였고 창자부분은 약 1.492 mT 정도로 여러 장기들 중 두 번째로 높았다. 그림 5와 6은 심장과 간 표면에 유도되는 전류밀도를 나타낸 것으로 심장에서는 약 11.2 mA/m²로 노출자계 값은 간에 비해 낮더라도 심장의 도전율이 높아서 최대값을 보였으며, 간에서는 약 9.8 mA/m²로 도전율이 낮아 두 번째로 높은 값을 보였다. 그 외의 기관으로 그림 7은 창자로 높은 노출자계로 인해 약 6.9 mA/m²를, 그림 8은 뇌가 도전율이 가장 높더라도 노출자계가 가장 낮아 약 5.9 mA/m²를 보였다. 마지막으로, 그림 9는 폐표면에서 본 유도전류밀도분포로 도전율도 낮고 노출자계도 적어 약 4.6 mA/m²의 가장 낮은 유도전류밀도 값을 보였다.

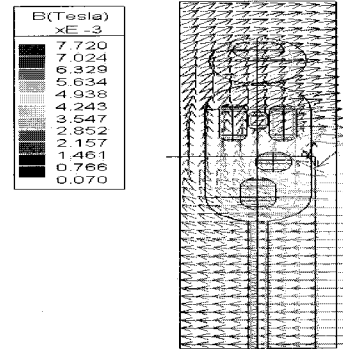


그림 4 전원선이 1 cm 떨어진 경우의 인체 정면에서 본 자속밀도 분포
Fig. 4 Distribution of magnetic flux density when working at 1 cm apart from power cable.

전원선으로부터 3cm 떨어진 지점에 작업자가 위치하였을 경우, 인체정면에서 바라본 자속밀도는 뇌에는 약 0.129 mT, 심장은 약 0.669 mT로 1cm의 경우에 비해 약간 증가하였고 간 부분은 약 2.142 mT, 창자부분은 약 1.331 mT 정도로 뇌나 심장에 비해 많이 감소하였다. 그림 10과 11은 최대값이 나타나는 심장과 간 표면의 유도전류밀도 분포로 심장에서는 약 11.6 mA/m²로 약간 증가하였으나 간에서는 약 8.4 mA/m²로 심장에 비해 많이 감소하였다.

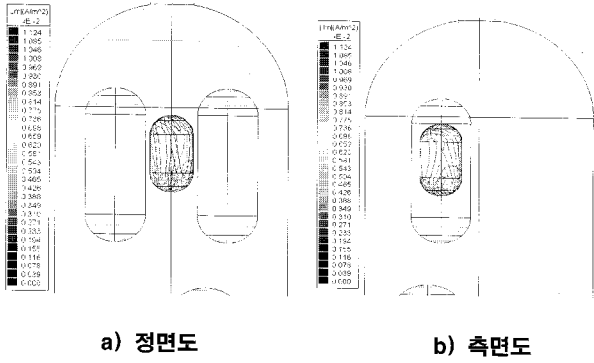


그림 5 전원선이 1cm 떨어진 경우의 심장 표면 유도전류밀도 분포

Fig. 5 Distribution of induction current density on the surface of the heart when working 1cm apart from a power cable.

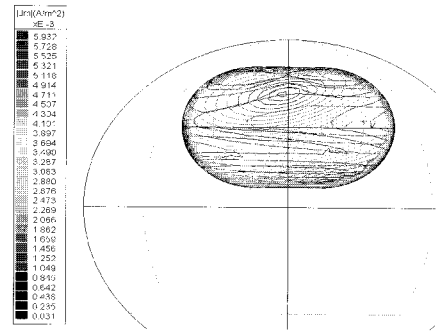


그림 8 전원선이 1cm 떨어진 경우의 뇌 표면에서 본 유도전류밀도 분포

Fig. 8 Distribution of induction current density on the surface of the brain when working 1cm apart from a power cable.

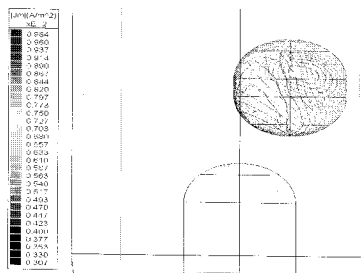


그림 6 전원선이 1cm 떨어진 경우의 간 표면에서 본 유도전류밀도 분포

Fig. 6 Distribution of induction current density on the surface of the liver when working 1cm apart from a power cable.

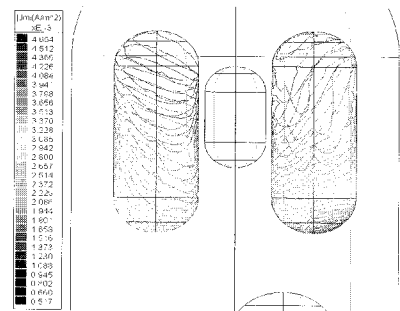


그림 9 전원선이 1cm 떨어진 경우의 폐 표면에서 본 유도전류밀도 분포

Fig. 9 Distribution of induction current density on the surface of the lugs when working 1cm apart from a power cable.

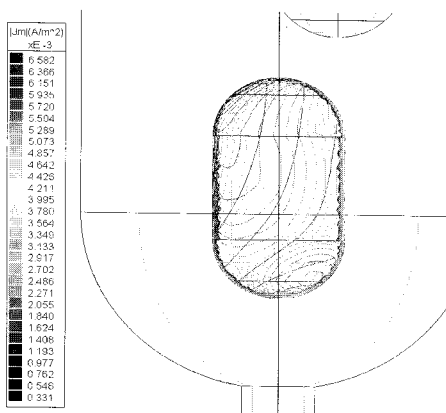


그림 7 전원선이 1cm 떨어진 경우의 내장 표면에서 본 유도전류밀도 분포

Fig. 7 Distribution of induction current density on the surface of the intestines when working 1cm apart from a power cable.

전원선으로부터 5cm 떨어진 지점에 작업자가 위치하였을 경우, 인체정면에서 바라본 자속밀도는 뇌에는 약 0.134 mT, 심장은 약 0.653 mT로 1cm의 경우에 비해 약간 증가하였고 간 부분은 약 1.827 mT, 창자부분은 약 1.215 mT 정도로 뇌나 심장에 비해 많이 감소하였다. 그림 12와 13은 최대값이 나타나는 심장파 간 표면의 유도전류밀도 분포로 심장에서는 약 11.3 mA/m²로 거의 같았으나 간에서는 약 7.1 mA/m²로 심장에 비해 많이 감소하였다.

전원선으로부터 10cm 떨어진 지점에 작업자가 위치하였을 경우, 인체정면에서 바라본 자속밀도는 뇌에는 약 0.158 mT로 1cm에 비해 약간 증가하였으나, 심장은 약 0.620 mT로 약간 감소하였고 간부분은 약 1.385 mT, 창자부분은 약 0.987 mT 정도로 뇌나 심장에 비해 많이 감소하였다. 그림 14과 15는 최대값이 나타나는 심장파 간표면의 유도전류밀도 분포로 심장에서는 약 10.6mA/m², 간에서는 약 5.2 mA/m² 정도로 1cm에 비해 많이 감소하였다.

전원선으로부터 15cm 떨어진 지점에 작업자가 위치하였을 경우, 인체정면에서 바라본 자속밀도는 뇌에는 약 0.171 mT로 1cm에 비해 약간 증가하였으나, 심장은 약 0.6084 mT로 약간 감소하였고 간 부분은 약 1.127 mT, 창자부분은 약 0.862 mT 정도로 뇌나 심장에 비해 많이 감소하였다.

그림 16과 17은 최대값이 나타나는 심장과 간 표면의 유도 전류밀도 분포로 심장에서는 약 9.5 mA/m², 간에서는 약 4.1 mA/m² 정도로 1cm에 비해 많이 감소하였다.

전원선으로부터 20cm 떨어진 지점에 작업자가 위치하였을 경우, 인체경면에서 바라본 자속밀도는 뇌에는 약 0.186 mT로 1cm에 비해 약간 증가하였으나, 심장은 약 0.578 mT로 약간 감소하였고 간 부분은 약 0.943 mT, 창자부분은 약 0.757 mT 정도로 뇌나 심장에 비해 많이 감소하였다. 그림 18과 19는 최대값이 나타나는 심장과 간 표면의 유도전류밀도 분포로 심장에서는 약 8.5mA/m², 간에서는 약 3.2 mA/m² 정도로 1cm에 비해 많이 감소하였다.

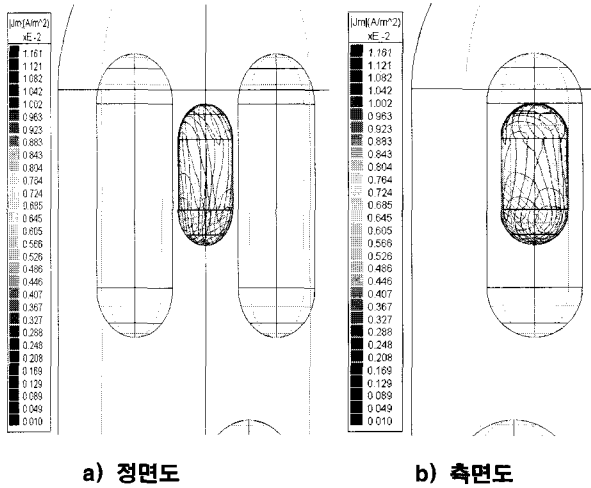


그림 10 전원선이 3cm 떨어진 경우의 심장 표면에서 본 유도전류밀도 분포

Fig. 10 Distribution of induction current density on the surface of the heart when working 3cm apart from a power cable.

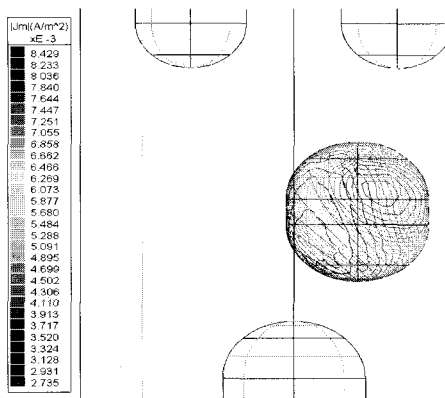


그림 11 전원선이 3cm 떨어진 경우의 간 표면에서 본 유도전류밀도 분포

Fig. 11 Distribution of induction current density on the surface of the liver when working 3cm apart from a power cable.

표 2는 본 논문에서 검토한 전원선으로부터 1cm, 3cm, 5cm, 10cm, 15cm, 20cm 떨어진 각 경우에 장기 표면에 유도되는 전류밀도의 최대치로 전원선으로부터 3cm 떨어진 경우가 가장 가혹한 결과를 보였다.

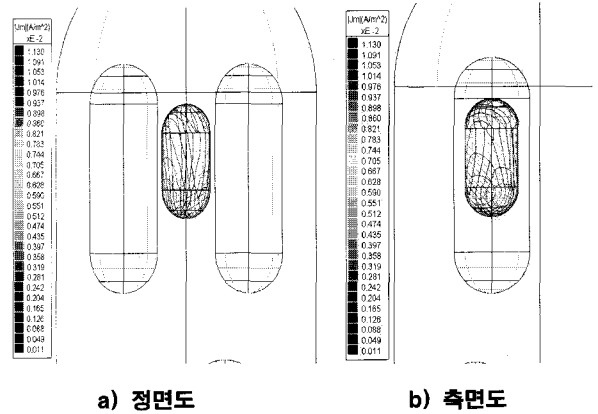


그림 12 전원선이 5cm 떨어진 경우의 심장 표면에서 본 유도전류밀도 분포

Fig. 12 Distribution of induction current density on the surface of the heart when working 5cm apart from a power cable.

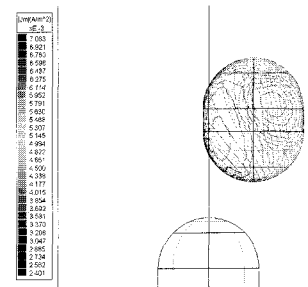


그림 13 전원선이 5cm 떨어진 경우의 간 표면에서 본 유도전류밀도 분포

Fig. 13 Distribution of induction current density on the surface of the liver when working 5cm apart from a power cable.

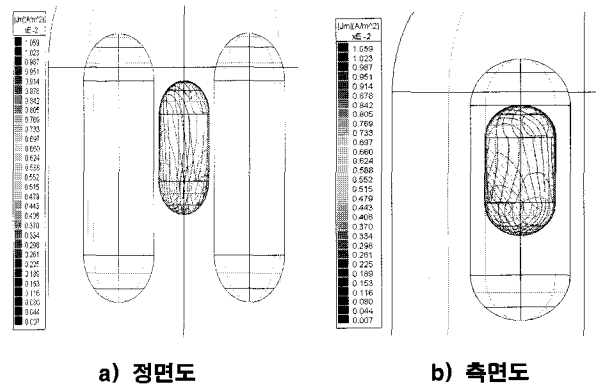


그림 14 전원선이 10cm 떨어진 경우의 심장 표면에서 본 유도전류밀도 분포

Fig. 14 Distribution of induction current density on the surface of the heart when working 10cm apart from a power cable.

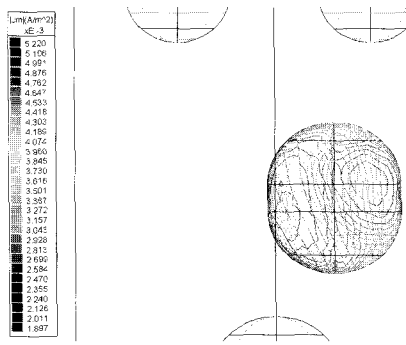
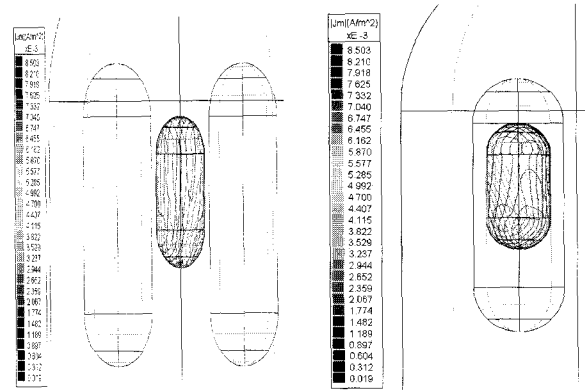


그림 15 전원선이 10cm 떨어진 경우의 간 표면에서 본 유도전류밀도 분포

Fig. 15 Distribution of induction current density on the surface of the liver when working 10cm apart from a power cable.

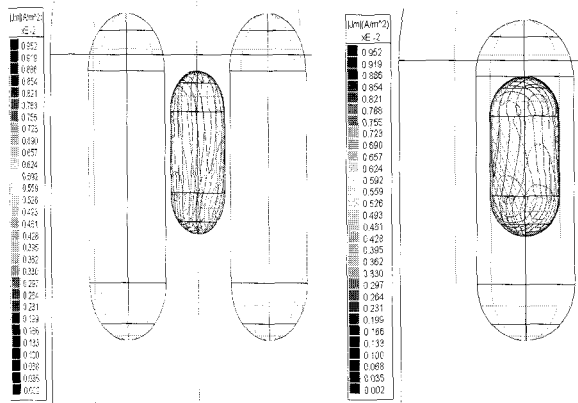


a) 정면도

b) 측면도

그림 18 전원선이 20cm 떨어진 경우의 심장 표면에서 본 유도전류밀도 분포

Fig. 18 Distribution of induction current density on the surface of the heart when working 20cm apart from a power cable.



a) 정면도

b) 측면도

그림 16 전원선이 15cm 떨어진 경우의 심장 표면에서 본 유도전류밀도 분포

Fig. 16 Distribution of induction current density on the surface of the heart when working 15cm apart from a power cable.

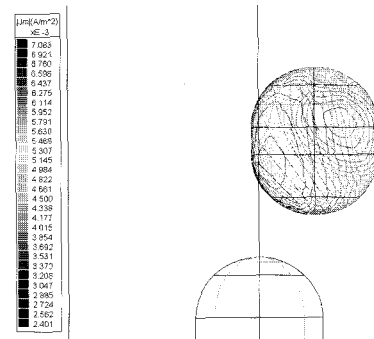


그림 19 전원선이 20cm 떨어진 경우의 간 표면에서 본 유도전류밀도 분포

Fig. 19 Distribution of induction current density on the surface of the liver when working 20cm apart from a power cable.

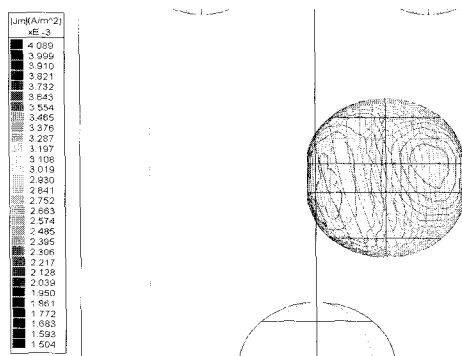


그림 17 전원선이 15cm 떨어진 경우의 간 표면에서 본 유도전류밀도 분포

Fig. 17 Distribution of induction current density on the surface of the liver when working 15cm apart from a power cable.

표 2 각 계산별 인체내부 장기표면 유도전류밀도 최대치
Table 2 The calculated maximum induction current densities of each organ.

단위 : (mA/m²)

	1cm	3cm	5cm	10cm	15cm	20cm
뇌	5.9	5.6	5.3	4.7	3.6	2.9
심장	11.2	11.6	11.3	10.5	9.5	8.5
폐	4.6	4.5	4.2	3.7	3.1	2.7
간	9.8	8.4	7.0	5.2	4.0	3.3
장자	6.5	6.1	5.8	4.8	3.8	3.1

4. 결 론

본 논문에서는 교류 1kA가 흐르는 아크용접기의 전원선으로부터 1cm, 3cm, 5cm, 10cm, 15cm, 20cm 떨어진 곳에서 작업하는 작업자의 인체내부 장기에 유도되는 전류밀도를 일반 3차원 경계요소법을 이용하여 해석하였다.

본 논문의 연구결과, 아크용접기의 전원선으로부터 1cm에서 5cm떨어진 지점의 작업자의 인체내부 최대전류 밀도는 심장에서 발생하였으며 약 11 mA/m²정도를 보이고 있음을 알았다. 또한 현재까지 가장 많이 적용되고 있는 국제비전리방사선 보호위원회와 국제주파 전자계 가이드라인의 안전기준치인 10 mA/m²을 만족하기 위해서는 작업자는 전원선으로부터 15 cm이상 떨어져야 함을 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] 민석원, 송기현, "765kV 2회선 송전선 활선 작업자 인체내부 유도전류 밀도 해석," 대한전기학회 논문지, vol. 55C, No. 5, pp. 231-238, 2005.

[6] 민석원, 박준형, "765kV 2회선 송전선 활선 작업자의 차폐복 자계저감 특성검토," 대한전기학회 논문지, vol. 56, No. 9, pp. 1632-1637, 2006.

[7] M. A. Stuchly, D. W. Lecuyer, "Exposure to electromagnetic fields in arc welding," *Health Phys.*, vol. 56, pp. 297-302, 1989.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

저 자 소 개



박준형 (朴峻炯)

1984년 10월 2일생. 2007년 순천향대 공대 정보기술공학부 졸업. 현재 동 대학원 전기통신공학과 석사과정.
Tel : 041-530-1338, Fax :041-530-1548
E-mail : jun00jjang@nate.com



민석원 (閔錫源)

1958년 1월 3일생. 1981년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1984 ~ 1991년 한전기술연구원 계통연구실 근무. 1996년 ~ 1997년 일본 교토대학 방문교수. 2005년 ~ 2006년 미국 신시내티 대학 방문교수. 현재 순천향대학교 전기통신공학과 교수.
Tel : 041-530-1338, Fax : 041-530-1548
E-mail : swonmin@sch.ac.kr