

침수된 전기설비의 누전으로 인한 수중에서의 감전특성에 관한 연구

김두현[†] · 강동규

충북대학교 안전공학과

(2002. 4. 15. 접수 / 2002. 7. 25. 채택)

A Study on the Characteristics of Electric Shock in Water due to the Leakage of Submerged Electric Facility

Doo-hyun Kim[†] · Dong-kyu Kang

Department of safety Engineering, Chungbuk National University

(Received April 15, 2002 / Accepted July 25, 2002)

Abstract : A study on the characteristics of electric shock in fresh water due to the leakage of submerged electric facility is conducted by using a reduced scale model at a scale of 1:10 in laboratory. Electric potential as a function of distance from leakage source, type of the leakage source, magnitude of the source voltage, submerged depth and diameter of a copper rod electrode is measured. On the basis of safety standard, separation for guarantee of safety is determined by the measured potential. Also supposing that body resistance is 500[Ω], the human reaction was estimated by calculating body current for some shock duration. Thus, in this paper, the hazard of the electric shock is assessed by introducing representative safety factors, body voltage and body current due to leakage source.

Keyword : electric shock, leakage, separation, body voltage, body current

1. 서 론

감전사고의 대부분은 전기설비의 고장으로 누전이 되어 대지전위의 상승 또는 충전부와 접촉함으로써 허용치를 초과하는 인체전류의 크기와 통전시간에 의해 사람의 안전에 부정적인 영향을 끼친다¹⁾. 이런 이유로 각 국에서는 감전모델과 관련된 안전 기준을 마련하여 감전위험성 분석 및 평가를 시행하고 있다²⁾. 그럼에도 불구하고 최근 수년간 감전사고로 인한 사망, 부상 등의 인명피해와 재산피해가 증가하고 있다. 지난 하절기에는 집중호우로 인해 가로등이나 교통신호등 자동점멸기함이 침수되면서 누전이 발생해 10명 이상이 감전사하였다. 이러한 감전사고의 원인은 누전차단기가 설치되어 있지 않거나 설치되어 있어도 작동하지 않는데 있다. 또한 습기 등의 환경조건이 원인이 되어 누전차단기가 오작동하여 가로등이 일시에 꺼지는 것을 막기 위

해 누전차단기의 결선을 끊어 미작동 상태로 방지시킨 관리적인 결함도 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 관리관청에서는 침수로 인한 누전을 방지할 목적으로 가로등 및 자동점멸기함 지지대의 높이를 보완하는 한편 전기설비의 고장으로 누전이 발생할 우려가 있는 곳에 감전보호장치의 설치, 무선방식에 의한 가로등 설비의 제어 등 다각적으로 감전사고 예방에 노력을 기울이고 있다.

가로등 결선함 등과 같은 도로상의 전기설비는 이격거리를 제공하는 안전망이 설치되어 있지 않기 때문에 집중호우로 인한 침수시 보행자들이 감전사고에 노출되어 있다. 이러한 잠재 위험성을 평가하기 위해 축소모델을 이용하여 수중 누전으로 인한 감전현상의 정량적 해석이 필요하다. 본 연구에서는 접지된 금속부에 인체가 접하고 그로부터 충전부와 의 거리를 측정할 경우로 가정하여 인체에 인가될 수 있는 인체전압과 인체전류의 크기를 추정하고자 한다. 또한 수중에서 인체의 생리학적 반응을 예측함으로써 보행자의 안전을 보장하는 이격거리를 제시하는 것이 가능하다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
dhk@cubucc.chungbuk.ac.kr

2. 수중에서의 감전현상

육상에서의 감전현상은 인체의 일부가 노출된 충전부 또는 누전 등의 원인으로 비충전 금속부가 충전된 상태에서 접촉에 의해 발생한다. 그러나 수중에서의 감전현상은 인체와 충전부 사이에 도전성 액체, 예를 들어 해수로 인해 항상 접촉하고 있기 때문에 충전부에 접촉하지 않아도 감전되는 것으로 추정하고 있다. 담수풀장과 염수풀장에서 발생하는 감전현상은 일반적으로 세 경우로 분류하여 해석하고 있다³⁾.

2.1. 충전된 금속에 인체가 접촉하는 경우

풀장에서 인체의 한 손이 접지된 금속제 사다리를 쥐고 동시에 다른 손이나 발이 누전에 의해 충전된 풀장 내의 조명설비에 접촉되어 감전사고가 발생하는 경우이다. 이 경우 피부가 젖어 있기 때문에 인체저항이 낮은 것 이외에는 통전경로상에 물이 개입되어 있지 않기 때문에 육상에서 통전경로가 손-손 또는 손-발인 경우와 같은 형태의 감전이다.

2.2. 수중에 누설된 전류에 의해 발생한 전계 중에 인체가 놓여진 경우

풀장의 수중 전등의 유리가 파손되어 수중으로 누설된 전류 또는 수중 조명설비의 고장으로 금속부분이 충전되어 있을 때, 배수구와 같이 접지된 금속부분으로 전류가 흘러서 발생된 전계 중에 인체가 놓이면 감전현상이 발생한다. 이때 통전전류의 크기는 수중에서의 전계의 크기와 전계 중의 인체의 자세와 관계가 있다.

2.3. 전위가 존재하는 수중에서 인체가 접지된 물체에 접촉한 경우

절연재로 되어 있는 풀장에서 수중 조명설비가 고장나 물이 대지보다 전위가 클 때 풀장에서 나오려고 접지체에 접촉하여도 감전현상이 발생한다.

2.1, 2.2, 2.3은 침수된 가로등이나 교통신호등 자동점멸기함 주위를 사람이 걸을 때 누전으로 인해 발생 가능한 감전사고의 형태이다. 세 경우에 대한 실험과 정확한 해석이 필요하며 이를 통해 재발방지 대책수립이 요구된다.

3. 실험장치 및 방법

본 실험의 목적은 여름철 집중호우로 인해 가로등이나 자동점멸기함과 같은 일부가 침수된 전기설비의 고장으로 인한 누전환경을 묘사하기 위해 약 1:10의 축소모델을 사용하여 거리에 따른 전위분포를 측정한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 강철로 제작한 두께가 6[mm]이고, 크기가 100×100×75[cm]인 물탱크에 수돗물(fresh water)을 채우고 가변-교류 전압원을 설치하였다. 전압원의 한 전선은 접지시킨 물탱크와 연결하고 다른 한 전선은 끝 부분을 약 5[cm]를 벗겨 누전점으로 하였다. 누전점은 한가닥 전선을 수면 아래 쪽에서 연결하는 방식과 가로등 자동점멸기함을 실제 크기의 1/10인 5.8×2.8×6.7[cm]로 스테인레스-스티일을 사용하여 제작한 가로등 자동점멸기함 내부에서 누전이 발생하도록 하였다. 본 실험에서 연결을 위해 사용한 전선은 크기가 20[AWG]로 유사한 실험⁴⁾에서 사용된 전선과 동일한 것을 사용하였다. 누전지점 근처의 인체는 침수 깊이가 비교적 낮아 전류가 한쪽 발을 통과하여 흐르는 경우와 물의 깊이가 깊어 몸통부분을 경유하여 전류가 흐르는 경우에 대해 길이가 17[cm]이고, 직경이 각각 1.6[cm], 3.5[cm]인 동봉으로 모델링하였다. 동봉의 침수 깊이는 통전경로가 한쪽 발과 몸통부분인 경우에 대해 50[cm]와 85[cm]의 1/10인 5[cm], 8.5[cm]로 각각 구분하여 실험하였다. 동봉의 직경은 한 발의 대지저항이 지표면에 수평으로 위치한 반경이 8[cm]인 원판과 등가인 점을 참고하였고, 인체의 표면적, S는 키와 몸무게의 함수로 표현⁵⁾되는 식(1)을 이용하였다.

$$S = H0.725 \times W0.425 \times 72.46 \quad (1)$$

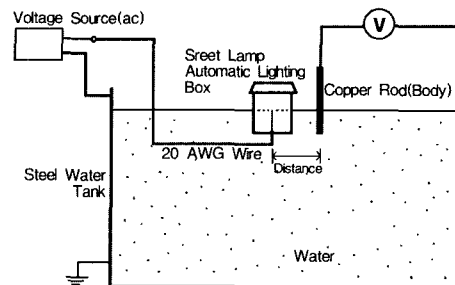


Fig. 1. Experimental set up

키가 170[cm], 몸무게가 75[kg]인 인체를 원통측면으로 모델링 할 경우 직경이 약 35[cm]인 원통으로 모델링할 수 있다는 점을 고려하여 동봉의 직경을 결정하였다. 전압을 100~220[V]로 가변함과 동시에 누전점으로부터 동봉사이의 거리에 변화를 주면서 동봉과 물탱크 사이에 전압계를 연결하여 전위를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

수중에서의 감전특성 요소인 누전점의 형태, 누전점으로부터 동봉까지의 거리, 동봉의 직경 및 침수 깊이에 따라 누전점 전압의 크기를 달리하여 전위분포를 구한 결과가 Fig. 2~Fig. 5에서 보여준다. 상용전압인 220[V]에서의 거리에 따른 전위분포를

누전점의 형태에 따라 제시한 그래프가 Fig. 6~Fig. 8이다. Fig. 9는 상용전압에서 거리에 따른 전위분포를 접촉전압으로 가정한 경우, 인체저항을 500[Ω]으로 하여 계산한 인체전류의 값을 나타낸 그래프이다.

누전점의 형태가 한 선인 경우의 전위가 Fig. 2~Fig. 3이고, 가로등 자동점멸기함 내부인 경우의 전위가 Fig. 4~Fig. 5로 누전점으로부터 50[cm]에서 3[cm]까지 가까이 접근해 감에 따라 두 경우 모두 약 40[V]까지 상승함을 알 수 있다. 앞에서 살펴본 수중에서의 감전현상 중 인체가 충전된 금속에 직접 접촉하는 경우는 220[V]가 모두 인체에 인가되므로 가장 위험한 감전현상으로 판단되며, 수중에

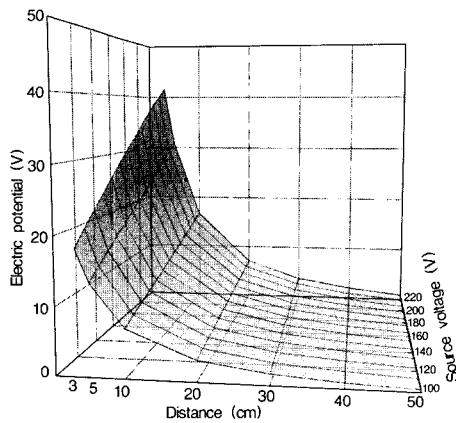


Fig. 2. Electric potential with a line source I (submerged depth=5[cm], rod diameter=1.6[cm])

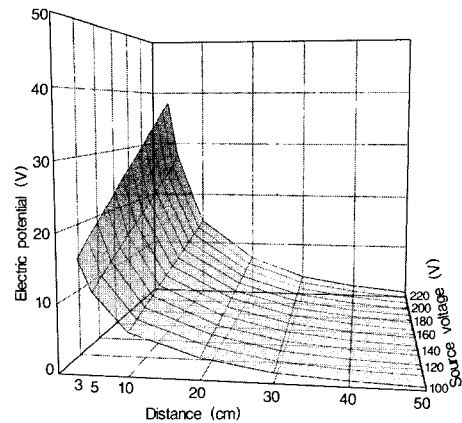


Fig. 4. Electric potential with a street lamp controlbox source II (submerged depth=5[cm], rod diameter=1.6[cm])

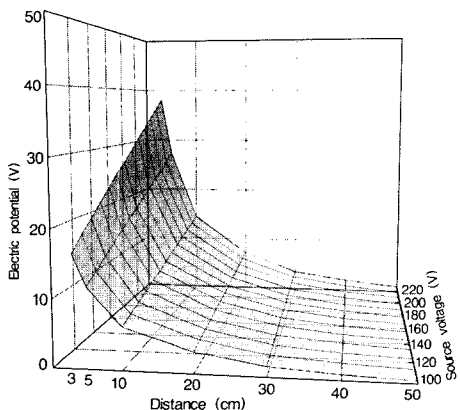


Fig. 3. Electric potential with a line source I-1 (submerged depth=8.5[cm], rod diameter=3.5[cm])

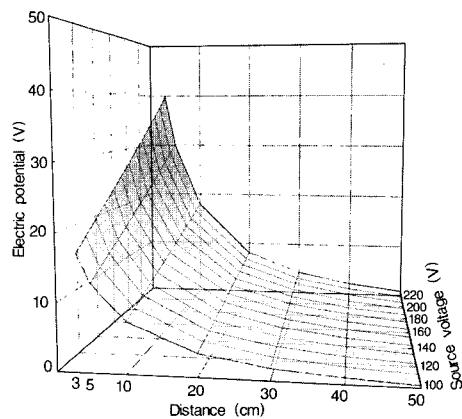


Fig. 5. Electric potential with a street lamp controlbox source II-1 (submerged depth=8.5[cm], rod diameter=3.5[cm])

누설된 전류에 의해 발생한 전계 중에 인체가 놓여진 경우나 전위가 존재하는 수중에서 인체가 접지된 물체에 접촉하는 경우, 수중에서 접촉전압의 최대값은 인체가 위치한 지점의 전위로 가정한다. 또한 인체의 보폭을 약 50[cm]로 가정할 때, 누전점으로부터 3~50[cm] 사이에 인가되는 보폭전압은 약 40[V]이다. 이러한 보폭전압은 인체의 보폭과 서 있는 위치에 따라 변한다. 침수깊이나 동봉직경의 차이에 대한 전위의 변화는 큰 차이점을 보이지 않는다. 또한 누전점의 형태에 따라 비교할 때 동일한 동봉직경에 대해 누전점이 한 선인 경우와 가로등 자동점멸기함 내부인 경우 모두 뚜렷한 특징을 보이지 않았다.

Fig. 6은 상용전압에서 누전점으로부터의 거리에 따른 전위분포를 누전점의 형태별로 제시한 그래프이다. 인체의 대부분이 수중에 있는 상태에서의 허용접촉전압을 2.5[V]이하로 제시⁶⁾하는데, 이것을 기초로 하여 구한 이격거리가 약 40[cm] 이상이다. Fig. 7과 Fig. 8은 누전점의 형태별로 동봉의 침수깊이와 직경에 대해 전위의 경향을 알 수 있다. Fig. 9는 누전점으로부터의 거리에 따른 인체전류를 계산

한 그래프로 직선 A의 윗 부분은 통전시간이 1초인 경우, 인체전류가 20[mA]로 근육수축, 호흡장애, 회복성 심장정지 등이 발생할 우려가 있는 구간이고, 직선 B의 윗 부분은 동일한 통전시간에 대해 인체전류가 50[mA]로 심실세동이 일어날 수 있는 구간이다. 직선 아래의 화살표는 만약 통전시간이 길어지면 이격거리도 커진다는 것을 나타낸다. 참고로 인체전류를 이용한 인체반응, 즉 심실세동을 막기 위한 이격거리는 약 10[cm] 이상, 근육수축과 같은 인체반응을 예방하기 위한 이격거리는 약 20[cm] 이상으로 추정할 수 있다. 제시한 이격거리는 육상에서 인체전류에 대한 인체반응의 데이터를 참고로 추정된 최소값이며, 동일한 인체전류와 통전시간에 대한 수중에서의 인체반응은 더 큰 이격거리가 요구된다. 본 논문에서 사용한 모델은 점멸기함과 인체를 대표하는 동봉을 축소하였을 뿐 거리단위는 변화가 없다. 즉, 축소모델과 이격거리는 독립이므로 모델링 이격거리는 실제 이격거리로 직접 적용이 가능하다. 또한 물의 종류에 따른 위험성의 정도는 수돗물, 소금물, 흙탕물을 이용한 콘센트의 수중실험 결과, 차이가 없다고 보고⁷⁾된 바가 있다.

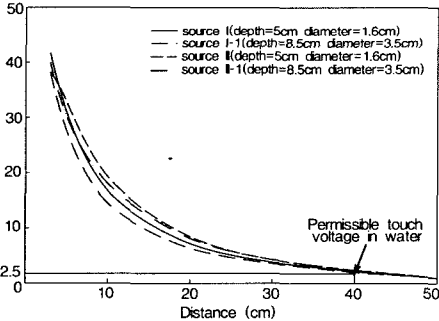


Fig. 6. Electric potential vs. distance at 220[V]

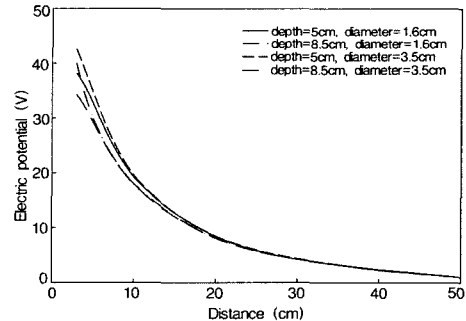


Fig. 8. Electric potential vs. distance from a streetlamp control box source at 220[V]

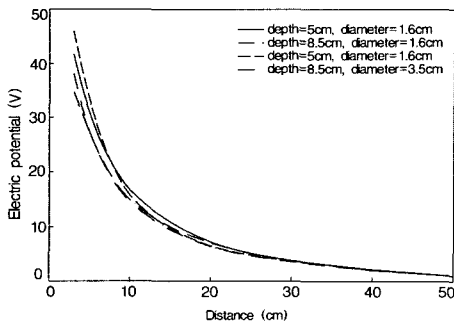


Fig. 7. Electric potential vs. distance from a line source at 220[V]

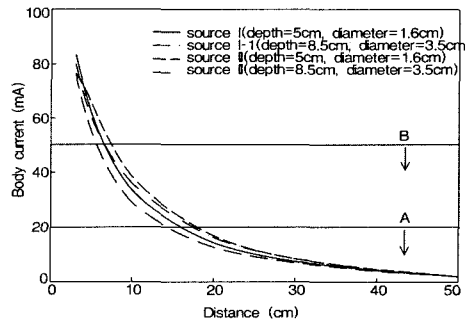


Fig. 9. Body current vs. distance at 220 [V]

5. 결 론

본 연구는 침수된 전기설비의 누전으로 발생 가능한 인체의 감전위험성을 평가하기 위해 누전점의 형태별, 동봉의 직경 및 침수깊이, 누전점으로부터의 거리에 따라 전위를 측정하여 인체전압과 인체전류라는 대표적인 안전요소를 이용하여 누전점으로부터의 이격거리를 구하였다.

인체를 동봉으로 모델링한 경우 누전점의 형태, 동봉의 침수깊이와 직경에 따른 뚜렷한 차이점은 발견하지 못했다. 인체의 대부분이 수중에 있을 경우에 대해 제시된 허용접촉전압, 2.5[V]를 이용하여 이격거리의 최소값을 40[cm]로 예측하였다. 또한 인체저항의 최소값, 500[Ω]과 통전시간을 1[초]로 가정해 인체전류 20[mA], 50[mA]에 대해 이격거리를 20[cm]와 10[cm]로 각각 추정하였다. 통전시간에 따라 이격거리는 변하고, 인체가 위치한 지점의 보폭 전압과 자세에 따라 인체의 감전위험성은 달라질 수 있다.

본 연구에서 고려하지 못한 수중에서 인체저항의 정확성, 감전시 재해자의 상태, 침수된 전기설비 주위에서 인체의 감전메커니즘에 대한 폭넓은 연구와 적용이 필요하다.

참고문헌

1) 김두현, 강동규, 김상철, “저전압에서 통전전류

를 이용한 인체의 동저항 측정 및 예측,” 산업안전학회지, Vol. 16, No. 1, pp. 37~42, 2001.

2) 김두현, 강동규, “그래프법을 이용한 안전기준에 의한 감전위험성 평가,” 산업안전학회지, Vol. 16, No. 3, pp. 53~60, 2001.

3) 勞働省 産業安全研究所, 産業安全研究所 安全資料, 1970.

4) Baldev Thapar, Victor Gerez, and Vijay Singh, “Effective Ground Resistance of the Human Feet in High Voltage Switchyards,” IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, Jan. 1993.

5) 人間工學 handbook 編輯委員會編, 人間工學 handbook, 金原出版株式會社, 1966.

6) 김두현외, 전기안전공학, 동화기술, 1995.

7) 한국전기안전공사 부설 전기안전시험연구원, 배선기구류의 감전위험성 연구, 한국전기안전공사, 1999.

8) Kim, Doo-Hyun · Kang, Dong-Kyu Kim, Sang-Ryull Park, Yang-Birm, “Estimation of Permissible Body Voltage and Body Current Considering Reduction Factor for Ground Resistance of the Feet,” Journal of the KIIS, Vol. 16, No. 5, 2001.

9) ANSI/IEEE Std 1048, IEEE Guide for Protective Grounding of Power Lines, 1990.

10) L. E. Virr, BSc, PhD, CEng, FIEE, “Increased electric shock risk underwater due to electrode configuration and insulating boundaries,” IEE Proceedings, Vol. 5, No. 5, 1990.