

공중욕조에서의 FLUX3D에 의한 전위분포 해석 및 인체의 전격위험성 평가

김두현[†] · 김성철 · 이종호 · 김한상* · 김종민*

충북대학교 안전공학과 · *한국전기안전공사 전기안전연구원

(2007. 2. 12. 접수 / 2007. 4. 14. 채택)

Electric Shock Risk Assessment of the Human Body and Potential Distribution Analysis by FLUX3D in a Public Bathtub

Doo-Hyun Kim[†] · Sung-Chul Kim · Jong-Ho Lee · Han-Sang Kim* · Chong-Min Kim*

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

*Electrical Safety Research Institute, KESCO

(Received February 12, 2007 / Accepted April 14, 2007)

Abstract : This paper considers the electrical shock risk of the human body due to underwater leakage current in such places of public baths. Many submerged electric facilities in a public bath may create a severe electric shock hazard for the human body, since wet body in an accidentally energized bathtub can result in low electrical resistance through the human body for leakage or fault currents. Therefore a major consideration, in the context of electrical safety underwater, is the shock risk to the bather as a result of electric current flowing through the water in bathtub. To assess the electric shock risk and to analyze the potential distribution in a bathtub, 2 different situation cases are set up, then experimental and simulation methods are adopted. The validity of 2 cases of simulation and experiment data in a bathtub for electric distribution underwater are compared and analyzed. Also electric shock risk assessment underwater in a real public bathtub by simulation program package, Flux 3D, was conducted herein, and the results are presented and discussed.

Key Words : public bathtub, electric shock risk assessment, potential distribution, flux 3D

1. 서 론

문명의 이기인 전기에너지의 사용은 생활수준의 향상과 더불어 지속적으로 늘어나고 있으며, 일상생활의 모든 장소에서 전기에너지를 필요로 한다. 특히 습기가 많은 욕실에서도 전기를 사용하는 전기 설비가 많이 보급되고 있으며 습기가 많은 장소나 물기가 있는 장소에서의 전기의 안전한 사용을 위해서는 인체의 치명적인 감전사고를 방지할 수 있는 충분한 보호장치가 시설되어야 한다. 습기가 많은 장소 및 수중에서의 감전사고 메커니즘 및 감전현상을 올바르게 이해하기 위해서는 감전에 영향을 주는 다양한 인자, 전류경로 및 인체저항에 대한 수

분에 의한 변화정도를 고려한 평가가 필요하다. 입욕시설의 감전사고로 인한 전격재해에 영향을 주는 인자 중에서 가장 중요한 것은 욕조의 형상 및 재질이다¹⁾. 욕조 내부에는 전격재해 정도에 영향을 줄 수 있는 다양한 파라메타가 있으며 이는 도전부로 작용할 수 있는 배수관, 급수관, 압축공기공급기관(일명 : 버블매트), 물마시지용 급수관 등이며 이들의 누전여부에 따라 욕조의 전위분포가 달라지며 전격재해의 가능성 및 심각도가 달라진다. 욕조의 재질 및 욕조의 유형에 따른 감전전류 및 전위분포에 대한 실험 및 시뮬레이션 자료는 욕조에서의 감전위험성을 평가하는데 매우 중요한 자료가 된다. 최근에 실험용 욕조에서의 감전현상을 시뮬레이션하고 실험치를 비교 분석한 연구가 발표되고 있으나^{2,3)}, 일반 공중욕조에서의 위험성을 평가한 연구는 이루어지고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 전기기기

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

의 설계와 해석 및 최적화를 위한 프로그램으로 신뢰성이 높은 FLUX 3D를 이용하여 일반 아파트나 주택에서 대중적으로 사용하는 자기재 욕조에서의 감전실험값과 시뮬레이션 값에 대해 상호 비교를 통하여 타당성을 검증한 후, 이를 통하여 공중 모의 욕조에 실제 입욕시설과 유사한 조건을 부여하여, 수중에서의 감전회로를 형성할 수 있는 경우별로 인체의 전격 위험성을 평가하고자 한다.

2. 수중에서의 감전사고

공기 중에서의 감전사고는 노출충전부 또는 누전 등의 원인으로 비충전 금속부가 충전된 상태에서 인체의 일부가 접촉함으로써 발생한다. 그러나 수중에서의 감전사고는 인체와 충전부 사이에 매질의 도전성으로 인해 항상 전기적으로 연결되고 있기 때문에 충전부에 직접 접촉하지 않아도 전격재해를 당할 수가 있다. 수중에서 발생하는 감전사고의 전격메커니즘은 세 경우로 분류하여 해석하고 있다^{4,6)}.

1) 충전된 금속에 인체가 접촉하는 경우

접지된 금속체가 있는 수중에 인체의 일부가 있고 동시에 다른 손이나 발이 충전된 조명설비에 접촉되어 전격이 발생하는 경우이다.

2) 수중전류에 의해 발생한 전계 중에 인체가 놓여진 경우

접지체가 있는 수중에서의 누전전류로 인해 야기된 전계 중에 인체가 놓이게 되어 전격이 발생하는 경우이다. 한다.

3) 등전위가 존재하는 수중에서 인체가 외부 접지체에 접촉한 경우

접지체가 없는 수중에서 등전위분포가 형성된 경우에는 인체가 수중에 있어도 감전사고가 발생하지 않으나 외부의 접지체에 접촉할 때 전격이 발생하는 경우이다.

수중에서의 감전사고는 통전경로상에 인체저항 성분만 유일하게 존재한다. 인체가 충전부에 직접접촉하는 공기중 감전사고의 경우에는 경로상의 저항은 피부저항, 내부조직저항 및 접촉점의 높은 접촉 저항의 합으로 구성된다. 수중감전은 공기중 감전현상과 달리 넓은 접촉면적으로 인해 접촉저항은 무시되며 피부저항은 건조한 경우의 25분의 1로 급격히 감소하여 저전압에 의해서도 치명적인 수준의 전격재해를 입을 가능성이 높다^{7,8)}.

3. 실험 및 시뮬레이션 방법

본 연구에서는 일반용 아파트나 개인주택에서 널리 사용되고 있는 자기재 욕조를 통하여 수중에서의 전위분포 특성을 실험값과 시뮬레이션값을 비교하고, 타당한 데이터를 확보하여 실제 공중 모의 욕조의 안전성평가를 위한 데이터를 확보하는 데 그 목적을 두고 있다. 감전현상 분류 2)의 경우는 자기재 욕조에서의 실험에서 case 1에 해당되며, 실제 공중 모의욕조에서는 조명등 누전에 수도꼭지가 접지체인 경우 및 버블매트 누전에 수도꼭지가 접지체인 경우에 해당된다. 또, 감전현상 분류 3)의 경우는 자기재 욕조 실험에서 case 2에 해당되며, 실제 공중 모의욕조는 전류가 유출되는 접지체가 없는 경우에 해당된다.

3.1. 상용 자기재 욕조

Fig. 1의 자기재 욕조의 경우 수도물을 사용했으며 배수구를 접지점으로 하였다. 자기재 욕조에 대한 실험방법은 다음과 같은 2가지 case로 구분하였다. case 1은 상용전원의 두 전선 중에서 전압축선을 약 5cm를 벗겨 욕조내로 삽입하여 누전점으로 하였고, 접지된 욕조를 통하여 전류회로가 형성되게 구성하였다. case 2의 경우는 case 1에서 방법으로 누전점을 만들고 절연된 욕조에서 전류가 흐르지 않은 상태를 유지하면서 욕조내의 전위분포를 측정하였다.

3.2. 시뮬레이션 방법(Flux 3D)

시뮬레이션의 목적은 크게 2가지로 설명할 수 있다. 첫째로 상용 자기재 욕조를 통하여 실험데이터와 시뮬레이션 데이터의 타당성을 분석하고 둘째로 타당성 분석을 바탕으로 실제 적용하기 힘든 공중 모의 욕조시설에 시뮬레이션을 통하여 안전성 평가를 실시하는 데 목적을 두고 있다. 또한 실제욕조를 모의한다는 것은 상당한 어려움이 있다. 따라서 형태와 수중 설비의 배치는 실제적인 실제 대중목욕탕의 욕조 크기와 근사화시키고 전체적인 탕의 크기는 5m×5m로 설계하였다. 또한 욕조 내부에 수중안마, 급기관(버블매트), 급수구, 배수구를 설치하여 동등한 값을 시뮬레이션에 입력하여 결과를 도출하였다⁹⁾. Fig. 2는 실제 공중 모의 욕조의 유한요소 모델을 나타내고 있으며, 매질(material)의 크기에 따라 large = 2mm, medium = 1.05735mm, small = 0.559mm로 3가지의 매쉬(mesh)를 입력하였다. Fig. 3에

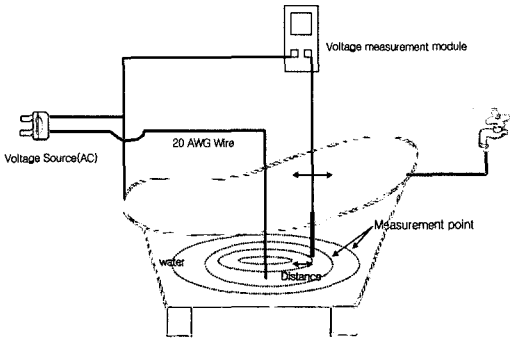


Fig. 1. Experimental setup(bathtub).

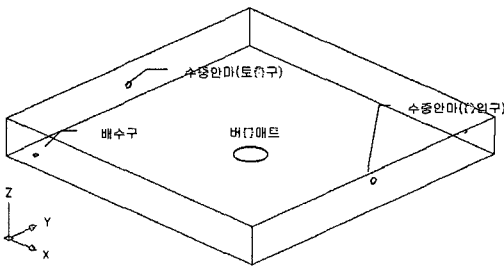


Fig. 2. Schematic diagram of a real public bathtub considering input parameter for simulation.

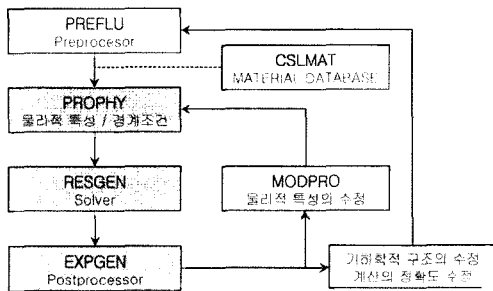


Fig. 3. Block diagram of FLUX 3D10).

FLUX 3D의 기본 개념을 설명하였다. 먼저 수중에서의 감전현상의 해석을 위해 데이터를 PREFLU에 저장 → 실험장치를 CSLMAT에 설계 → PROPHY에 물리적 특성/경계조건을 기입 → RESGEN을 통해 해석 → EXPGEN에서 최종원인 분석 및 저장 등으로 구성되어 있다¹⁰⁾.

4. 결과 및 고찰

4.1. 상용 자기재 욕조(case 1~case 2)

절연성이 확보된 상용 자기재 욕조에서 전위분포를 측정하였다. 자기재 욕조의 경우는 아파트나 일반 주택 등의 실생활에서 가장 대중적으로 사용되는

형태를 선택하였다. 여기서 물의 저항률(ρ)은 도전율계(CC-411)로 측정하였고 수돗물의 경우 $38[\Omega\text{m}]$ 으로 나타났다.

Fig. 4는 case 1의 자기재 욕조에 대한 실험 결과를 나타내며, Fig. 5는 Flux 3D에 의한 시뮬레이션데이터인 전위분포이다. Fig. 6에서 자기재 욕조의 실험데이터와 시뮬레이션데이터는 전구간에서 다소 오차가 나타났으나, 전위분포의 경향에 있어서는 접지점을 형성한 부분으로 전위분포가 직하하는 동등한 형태를 보였다. 또한 누전점에서 접지점의 방향으로 전위경도가 나타나며 접지점으로 전류경로를 형성하고 있으나 누전점에서 접지점의 반대방향으로는 전위차의 변화가 없음을 알 수 있다.

Fig. 7~9는 case 2에 해당되며, 전류가 유출되는 접지점이 없는 경우로 전원을 누전점으로 하여 전위차를 측정한 결과, 두 경우 모두 전위차의 변화를 확인할 수 없었으며 전원전압인 220V를 나타내었다. Fig. 9에 실험치와 시뮬레이션 데이터를 비교하였다.

4.2. 실제 공중 욕조의 욕조

실제 입욕시설에서의 실험은 한계가 있으므로 시뮬레이션을 통하여 실제 입욕시설에 적용하여 데이터를 통한 전격 재해 위험성 평가를 실시하였다. 또한 실제욕조에 입욕지점을 Zone 1~Zone 4로 지정하여 입욕자가 입욕중에 발생할 수 있는 상황을 고려하여 안전성 평가를 실시하였고 Zone마다 40cm 간격의 A점과 B점을 두어, A-B사이의 전위차를 분석하여 전격위험성을 정량적으로 평가하였다.

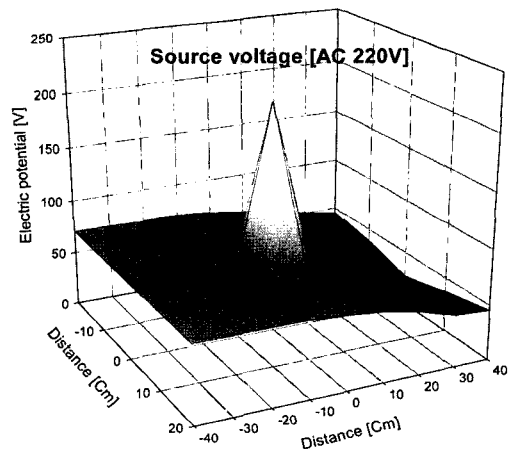


Fig. 4. Potential distribution of a bathtub(Experiment data of case 1, Depth = 6cm).

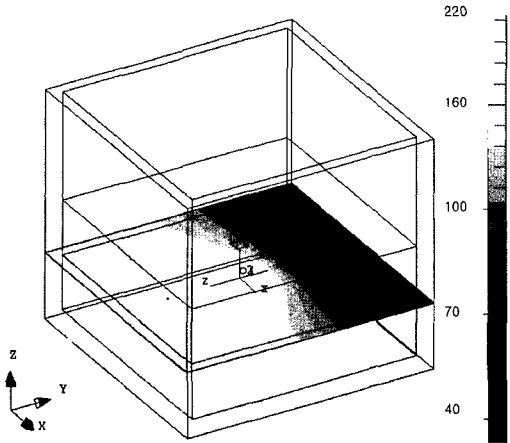


Fig. 5. Potential distribution of a bathtub(Simulation data of case 1, Depth = 6cm).

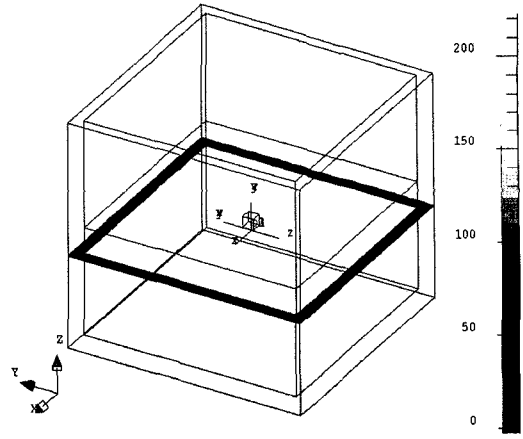


Fig. 8. Potential distribution of a bathtub (Simulation data of case 2, Depth = 6cm).

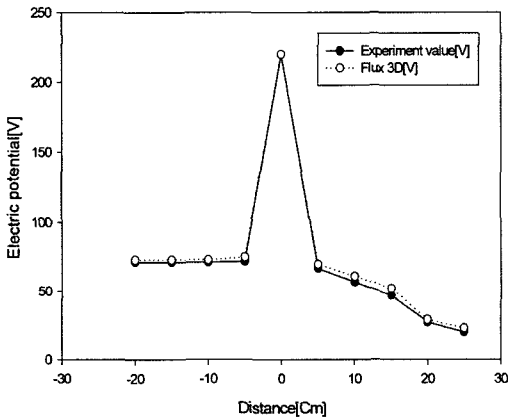


Fig. 6. Comparison of simulation data and experiment data (case 1; bathtub).

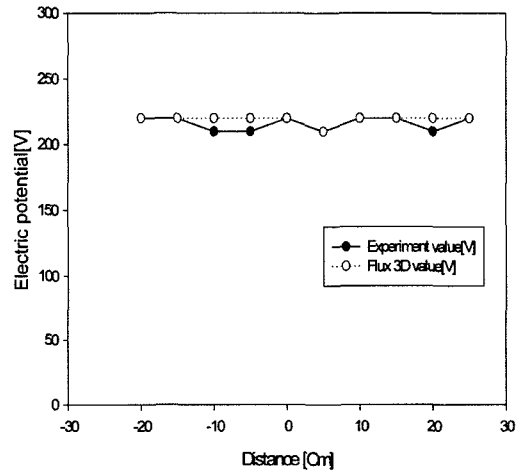


Fig. 9. Comparison of simulation data and experiment data (case 2; bathtub).

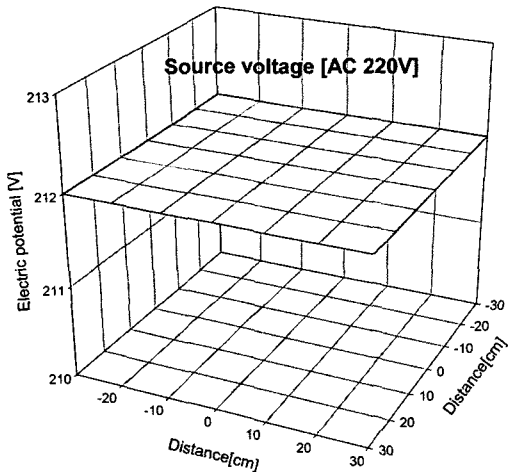


Fig. 7. Potential distribution of a bathtub(Experiment data of case 2, Depth = 6cm).

Fig. 10의 경우 욕조 벽면에 설치되어 있는 조명 등에 누전이 발생한 경우로, Zone 1은 수중안마(흡입관)와 버블매트의 중간지점이며 A-B의 전위차는 2V정도로 나타났다. Zone 2는 실제 벽면의 조명에서 누전이 발생한 지점으로 A-B의 전위차는 약 50V로 나타났다. Zone 3은 수중안마(토출관)와 버블매트 지점으로 A-B의 전위차는 약 2.2V정도로 나타났으나 입욕자가 수중에서 발을 버블매트 쪽이나, 누전점인 벽면으로 뻗었을 때는 또 다른 위험이 발생하게 된다. 또한 이 지점은 입욕자가 상당히 선호하는 지역이며 입욕자의 자세에 따라 새로운 감전회로를 형성할 수 있어 설비적인 특별한 안전장치를 요하는 지점이라 판단된다. Zone 4에 위치한 A-B의 전위차는 2V로 나타났다. Fig.10에서 접지체

와 연결되어 있는 노출 도전부에 가까운 Zone 2에서는 노출도전부의 영향에 의해 전위가 최고지점 55V에서 최저지점 1V로 매우 급격히 형성됨을 볼 수 있었다.

Fig. 11은 욕조 벽면에 설치되어 있는 조명등의 누전으로 가정하고 수도꼭지를 접지체로 연결하였다. Zone 1의 A-B의 전위차는 약 2V로 나타났고, Zone 2의 A-B에는 약 5V의 전위차를 보였다. Zone 3의 A-B의 전위차는 약 6.4V정도였으며, Zone 4의 A-B의 전위차는 10V로 가장 높은 값으로 나타났다. Zone 1을 제외한 나머지 부분에서 안전전압을 초과한 전위차를 보였다. 또한 누전점에서 수도꼭지를 연결된 지점으로 전계가 형성되어 실제 공중 모의 욕조에서는 접지점의 위치가 욕조내의 전위분포에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. Fig. 12는 버블매트 누전을 가정하고 수도꼭지를 접지체로 연결하였다.

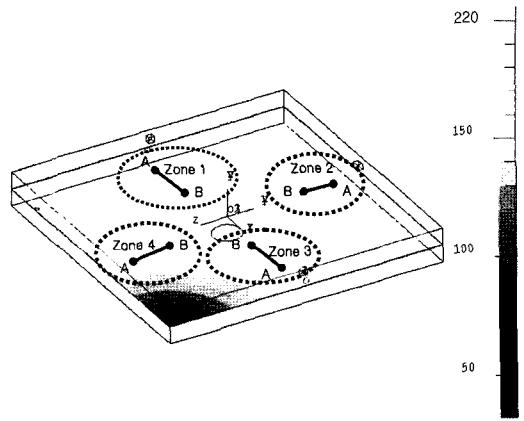


Fig. 12. Potential distribution for a real public bathtub(leakage source = bubble producer, grounded metallic = faucet).

Zone 1의 A-B사이에는 2V의 전위차를 보였고, Zone 2의 A-B에서는 약 3V로 나타났다. Zone 3의 A-B의 전위차는 약 10V정도였으며, Zone 4의 A-B사이에 14V로 가장 높은 전위차가 나타났다. 또한 Zone 1을 제외한 전구간에 대해서 안전 전압을 초과하는 전위차를 보였으며, 특히 버블매트에 누전이 발생할 경우, 접지체의 위치에 따라 상당히 높은 전위를 형성할 가능성이 높다. 이는 실제 입욕시설에서 버블매트가 상당히 큰 면적을 차지하고 있고, 대부분 욕조 중심부에 설치되어 있어 수중안마(흡입관), 수중안마(토출관), 배수구, 수도꼭지를 접지체로 하였을 때 욕조내의 전구간에 급격한 전위분포가 형성될 수 있음을 나타낸다. Fig. 13은 전류가 유출되는 접지체가 없는 경우를 가정하여 욕조의 바닥 한곳의 누전을 가정하고 욕조의 전위분포를 분석해 보았다. 이 경

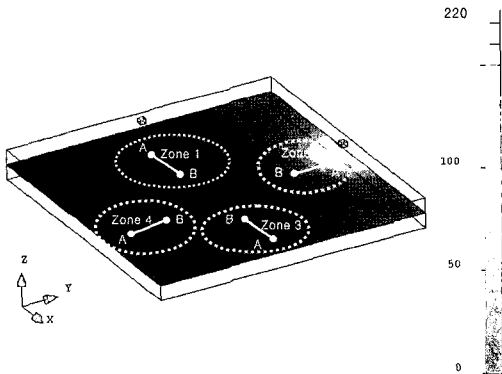


Fig. 10. Potential distribution for a real public bathtub(leakage source = exposed lighting, grounded metallic = bubble producer, drainpipe, kneader using water).

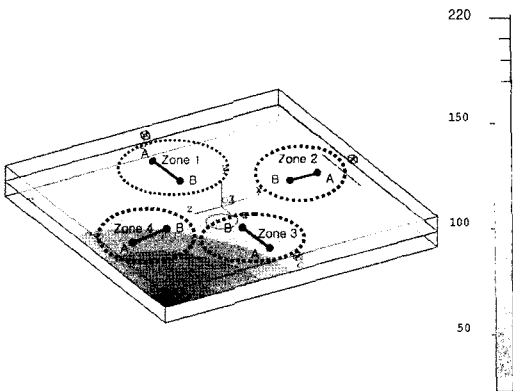


Fig. 11. Potential distribution for a real public bathtub(leakage source = exposed lighting, grounded metallic = faucet).

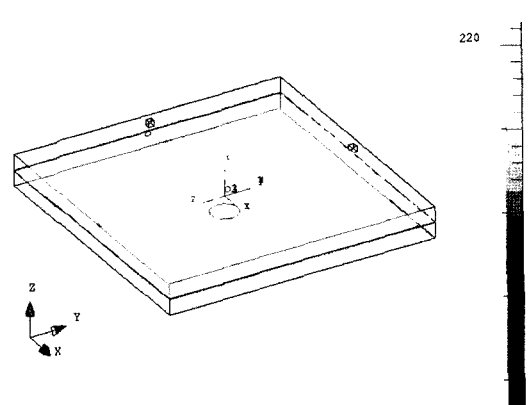


Fig. 13. Potential distribution for a real public bathtub(leakage source only).

우에는 욕조내에 전계가 형성되지 않아 인체가 수중에 있어도 감전사고가 발생하지 않으나 수중에서 나오기 위해 접지체를 잡거나 수중으로 들어가기 위해 접지된 상태에서 한 발을 넣으면 전격이 발생한다.

5. 결론

본 연구에서는 다양한 형태의 욕조내의 누전으로 인한 감전시물레이션과 감전실험을 수행하여 욕조 전위분포의 변화를 정량적으로 분석하였다. 전위분포를 측정 한 실험 데이터와 시물레이션에 의한 데이터를 통하여 실제 공중 모의욕조에서의 인체 감전 위험성을 평가하였다.

1) 상용 자기제 욕조의 경우 case 1~case2에서의 실험데이터와 시물레이션 데이터를 비교분석한 결과 전체적인 전위분포의 경향이 서로 유사함을 보였다.

2) 실제 모의욕조 시물레이션을 수행하였고, 모의욕조의 설비누전으로 인한 욕조내의 전위차를 계산하여 전격위험성을 평가하였으며, 버블메트의 누전시 전구간에 급격한 전위분포가 형성되어 적절한 대책의 수립이 요구된다.

3) 실제 모의 욕조에서는 노출도전부의 위치 및 접지체의 유무에 따른 전위분포의 분석에서 대부분의 경우 인체의 수중 안전전압을 초과하였으며 이는 욕조에서 전기설비의 고장으로 누전이 발생할 때 입욕자의 수중감전 위험성이 높다는 것을 나타낸다.

본 연구를 수행함에 있어서 욕조 외부의 다양한 환경에 대하여 실험하고 프로그램으로 정확하게 모의하기는 어려웠으며 감전사고의 가능성이 있는 상황을 모두 구현해 보는 것에도 다소 한계가 있었다. 특히 수도꼭지, 수면이 젖은 상태인 바닥에서의 가로등 또는 전등과의 접촉 등, 이로 인한 감전회로의 형성 및 전격재해의 가능성에 대한 지속적인 연구가 필요하며 이러한 연구결과를 바탕으로 욕조에서의 수중감전을 방지할 수 있는 종합적 대책수립이 요구된다.

감사의 글 : 이 논문은 2006학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 1) 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.
- 2) 김성철, 김두현 외, "수중에서의 인체에 대한 전격위험성 분석", 한국안전학회지, 제21권, 제6호, 2006.
- 3) 김종민, 김한상 외, "욕조에서의 전위분포 해석을 통한 전격재해 위험성 평가", 한국안전학회지, 제22권, 제1호, 2007.
- 4) Electrical shock safety criteria, international Symposium Electrical Shock, 1983.
- 5) 勞働省 産業安全研究所, 産業安全研究所 安全資料, 1970.
- 6) T. Bernstein, "Electrical Shock Hazards and Safety Standards", IEEE Trans. on Education, Vol. 34, No. 3, pp. 216~222, 1991.
- 7) C.H. Lee, and A.P. S. Meliopoulos, "Comparison of Touch and Step Voltages Between IEEE Std 80 and IEC 479-1", IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, Vol. 146, No. 6, pp. 593~601, 1999.
- 8) J.E. Bridges, "New Developments in Electrical Shock Safety", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 22~25, 1994.
- 9) 한국전기안전공사, 물놀이 입욕시설의 전기설비에 대한 전격재해 위험성평가 및 개선방안 연구, 한국전기안전공사, 2006.
- 10) 제우기술, "http://www.jaewoo.com".