

욕조에서의 전위분포 해석을 통한 전격재해 위험성 평가

김종민[†] · 김한상 · 김성철^{*} · 김두현^{*}

한국전기안전공사 전기안전연구원 · ^{*}충북대학교 안전공학과
(2006. 10. 31. 접수 / 2007. 2. 14. 채택)

Evaluation on Electric Shock Risk due to the Electric Potential Distribution in Bathtub

Chong-Min Kim[†] · Han-Sang Kim · Sung-Chul Kim^{*} · Doo-Hyun Kim^{*}

Electrical Safety Research Institute KESCO

^{*}Department of Safety Engineering Chungbuk National University

(Received October 31, 2006 / Accepted February 14, 2007)

Abstract : It is evaluated that electric shock risk in bath so that we made and designed a bathtub which is the same size in real public bath. And then, we did an experiment, provided of electric leakage in various conditions, so we measured how to form an electric potential and knew the electric potential is formed variously under exposed conductor in bath. Also, we made certain that electric shock risk is down if we insert an insulated pipe in bathtub pipe which is prevent from being formed the electric field sharply. The results show that the increased shock risk and safe distance are estimated by the bathtub of limited width and depth, and the voltage simulated on the basis of Flux 3D concept is compared with the measured value.

Key Words : electric shock, leakage current, flux 3D

1. 서 론

오늘날 산업문명의 발달은 전기에너지의 역할이 그 무엇보다도 큰 힘으로 작용하였다 할 수 있으며, 또한 우리의 일상생활 속까지 깊숙이 자리 잡은 전기는 국민의 생활수준 향상과 비례하여 그 사용 장소가 지속적으로 증가하고 있다. 예전과는 달리 입욕 시설 등의 장소에서도 전기의 사용이 증가하고 있으며, 이러한 장소에서는 인체의 피부저항이 다른 어느 장소보다도 현저히 낮은 상태에 있게 되어 미약한 전압에도 인체에 치명적인 감전재해가 유발된다^{1,2)}. 특히, 욕실 내의 욕조에는 전기사용기계기구인 전동기 등과 배관을 통해 연결되어 있으며 자칫 잘못하면 감전에 의하여 사망으로까지 이어질 수 있다는 문제점을 지니고 있다. 욕조는 노출도전부로 된 배수관, 급수관, 압축공기 급기관(일명: 버블매트), 물마사지용 급수관이 욕조의 표면과 연결되어 있으며

일부 노출도전부는 전기사용기계기구인 전동기 등과 전기적으로 연결되어 누전시의 누설전류의 경로를 형성할 수 있으며 이러한 경우 욕조 내의 입욕자는 감전 및 2차재해인 익사에 노출될 우려가 있다³⁾. 본 연구에서는 물놀이·입욕시설에 있는 욕조에 가장 근접한 설치환경조건을 적용한 모의실험설비를 구축하고 이에 대하여 버블매트 등의 노출도전부와 연결된 전기사용기계기구의 다양한 누전형태를 가 정하여 시험전압을 인가한 후 노출도전부인 각종 금속체에 의한 영향 평가 및 전위발생점과 유출경로인 배관접속점 및 수중 이격거리별 전위분포를 측정하여 전격재해 위험성을 평가하고자 하였다.

2. 입욕시설에서의 전격사고 메커니즘

공기 중에서의 전격현상은 노출된 충전부 또는 누전 등의 원인으로 비충전 금속부가 충전된 상태에서 인체의 일부가 접촉함으로써 발생한다. 이와 같이 공기 중에서는 보폭전압에 의한 감전 사고를 제

[†] To whom correspondence should be addressed.
cmkim@kesco.or.kr

외하고 충전부나 충전상태의 물체에 접촉하지 않는 한 감전 사고를 막을 수 있다^{4,5)}.

그러나 수중에서의 감전현상은 인체와 충전부 사이에 매질로서 도전성 액체인 담수 또는 염수로 인해 항상 전기적으로 연결되고 있기 때문에 충전부에 직접 접촉하지 않아도 전격을 당할 수가 있다. 이때 통전경로의 저항은 인체저항과 매질의 저항으로 구성이 되는데, 매질의 저항도 비교적 작고 인체도 젖어있기 때문에 인체저항은 매우 낮아 건조한 상태인 공기중의 감전에 비하여 심한 전격재해를 입을 수 있는 가능성이 높은 것으로 추정하고 있다. 국내에서는 제 1종 상태라고 일컫는 인체의 대부분이 수중에 있는 경우에 대해 인체의 허용전류는 이탈전류의 최저치 즉, 5[mA]를 이용해 물 속에서의 인체저항을 500[Ω]으로 가정하여 오음의 범칙에 의해 허용접촉전압을 2.5[V]로 규정하고 있다. 전극이 수중과 같은 3차원의 매질속에 놓여 있을 때 전압이 가해져 전류가 흐름으로써 수중에 전위분포가 생긴다. 무한원점에 접지점이 있다고 가정할 수 있을 정도로 매질의 규모가 큰 경우에는 등전위 곡면은 전극을 중심으로 한 동심구형으로 나타난다. 전위분포가 나타나는 수중에 인체가 들어가 있는 경우 인체를 흐르는 전류는 인체 말단점 간의 전위차에 비례하며 아울러 저항을 갖는 인체가 위치하는 지점의 전계가 변화한다. 담수중의 인체와 같이 매질보다 작은 저항을 갖는 물체에서는 전류밀도를 집중시키고, 해수중의 인체와 같이 매질보다 큰 저항을 갖는 인체에서는 전류밀도를 감소시킨다고 한다. 미국 화재보험협회시험소(UL)에서는 풀장에서 발생하는 전격현상을 다음의 세 경우로 분류하여 해석하고 있다.

1) 충전된 금속에 인체가 접촉하는 경우

풀장에서 인체의 한 손이 접지된 금속제 사다리를 쥐고 동시에 다른 손이나 발이 누전에 의해 충전된 풀장내의 조명설비에 접촉되어 전격이 발생하는 경우이다. 이 경우 피부가 젖어 있기 때문에 인체 저항이 낮은 것 이외에는 통전경로 상에 물이 개입되어 있지 않기 때문에 지상에서 전류 경로가 오른손-왼손 또는 한 손-한 발인 경우와 같은 형태의 전격현상이다.

2) 수중에 누설된 전류에 의해 발생한 전계 중에 인체가 놓여진 경우

풀장의 수중 전등의 유리가 파손되어 수중으로 누설된 전류 또는 수중 조명설비의 고장으로 금속 부분이 충전되어 있을 때, 배수구와 같이 접지된 금속부분으로 전류가 흘러서 발생된 전위분포로 인한 전계 중에 인체가 놓이면 전격이 발생한다. 이때 인체전류의 크기는 전계의 크기(전위차)와 인체의 자세 또는 방위와 관계가 있다.

3) 전위가 존재하는 수중에서 인체가 접지된 물체에 접촉한 경우

노출 충전부가 수중에 있고 전류가 흐를 수 있는 접지체가 없는 경우 수중에는 노출 충전부의 전위와 동일한 전위분포가 나타난다. 이 경우에는 인체가 수중에 있어도 감전사고가 발생하지 않으나 수중에서 나오기 위해 접지체를 잡거나 수중으로 들어가기 위해 접지된 상태에서 한 발을 넣으면 전격이 발생한다.

3. 실험 및 시뮬레이션 방법

실제적인 물놀이·입욕시설에서의 욕조의 환경을 묘사하기 위하여 욕조의 크기를 실제 대중목욕탕의 욕조 크기와 근사화시키고 배수 및 물의 순환이 이루어질 수 있도록 모의 실험설비를 구축하였다. 전체적인 탕의 크기는 가로 1.8[m], 세로 1.2[m], 물의 높이 0.8[m]가 될 수 있도록 설계하였다. 욕조의 두께는 2.5[cm]인 아크릴로 제작하였으며 Fig. 1과 같이 수중안마, 급기관(버블매트), 급수구, 배수구를 설치하였다. 욕조는 금속앵글을 이용하여 바닥에서 40[cm] 높이에 설치하여 욕조 바닥의 배관의 형태를 확인가능하며 변형 가능도록 설계하였다. 욕조의 배관은 입욕시설 등에서 가장 많이 사용하는 황동·아연도금 강관을 사용하여 제작하였으며 아크릴 욕조의 밑에 노출시켜 언제든지 배관의 형태를 보고 실제 목욕탕의 조건을 만족시킬 수 있도록 설계하였다. 욕조내 바닥면의 노출도전부는 금속성의 배관을 통하여 급·배수, 순환설비인 전동기 펌프와 전기적으로 연결함으로써 전기설비의 누전시 누설전류의 경로로 형성될 수 있도록 제작하였다. 모의실험설비의 버블장치는 금속관을 이용하여 전동기와 전기적으로 연결되게 제작하였으며 욕조의 바닥 중앙에 지름 20[cm]인 원형으로 모의욕조 바닥 중앙에 스테인레스를 이용하여 노출 도전부를 형성하게 하였다.

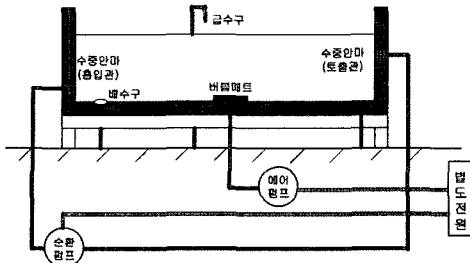


Fig. 1. Experimental apparatus of artificial bathtub.

일반목욕탕의 욕조 측벽에 설치되어 있는 수중안마를 모의실험설비에서는 순환펌프를 이용하여 모의하였고 한쪽에서 물의 흡입이 이루어지고 다른 한쪽에서 펌프의 압력을 이용하여 물의 토출이 이루어지도록 하였다. 각각의 입구는 금속관을 이용하여 순환펌프와 전기적으로 연결되게 시설하였다.

실제적인 입욕시설의 배관들은 다양한 형태로 서로 연결되어 있으며 각각의 형태 및 저항률이 달라 이를 모의하기는 쉽지 않다. 그래서 본 실험에서는 각각의 노출도전부와 배관들을 상호연결 및 분리를 할 수 있게 설계하여 다양한 형태의 누전형태가 가능하도록 설계하였다.

측정은 Fig. 2와 같은 방식으로 다채널스코프를 통해 동시에 16개 포인트씩 측정하였다. 전원계로는 고장전류의 분리 및 측정시 안전을 고려하여 절연 변압기를 사용하였고, 고장전류의 가변을 위한 전압조정기(AT : Auto-Transformer)가 포함되어 있다. 물의 저항률은 도전율계(CC-411)로 측정하였고, 일반 공중 목욕탕에서 사용하는 지하수를 사용하였으며 저항률은 39.3[Ω·m]로 측정되었다.

시뮬레이션은 FLUX 3D를 이용하여 실시하였으며 FLUX 3D는 3차원 전자계(電磁界)와 열계(熱界)의 시뮬레이션을 위한 프로그램으로 정전계, 정자계, 전자계에서의 동특성, 과도현상, 온도의 정상 및 과도특성, Magneto-thermal 및 Electro-thermal 등을 해석하여, 전기기기의 설계 및 최적화를 위한 유한요소 프로그램이다.

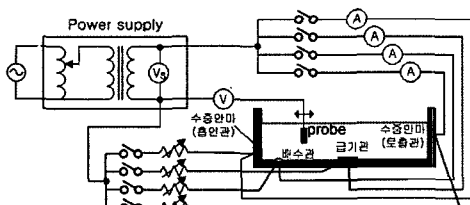


Fig. 2. Measurement circuit.

본 연구에서는 먼저 수중에서의 감전현상을 해석하기 위해 실험세트의 욕조와 동일한 기하학적 modeling을 FLUX 3D의 preprocessor인 PREFLU에서 수행하였고 노출도전부, 욕조재질, 물의 물리적 특성을 CSLMAT에서 설정하였으며, 경계조건을 지정하는 PROPHY를 수행하고 RESGEN을 통해 해석하였다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통한 FLUX 3D 데이터 및 모의 실험데이터를 가지고 수중에서 전격위험성을 평가하고자 하였다.

4. 결과 및 고찰

모의실험데이터와 시뮬레이션 데이터간에 전위 분포값을 상호 비교하여 안전적 측면을 고려하여 실험 및 시뮬레이션 데이터 중 더 위험한 값을 획득하여 전격재해 위험성 평가에 필요한 자료를 확보하고자 Case 1~Case 5의 5가지 경우를 바탕으로 분석하였다.

4.1. 누설점이 없는 경우 (Case 1)

Fig. 3과 4는 누설점이 없는 욕조에서의 전위분포를 측정된 데이터이다. Fig. 3은 일반 가정용 욕조와 같이 전류가 유출되는 접지체가 없는 경우를 가정하여 욕조의 바닥 한곳의 누전을 가정하고 욕조의 전위분포 형성을 측정된 실험데이터이며, Fig. 4는 Flux 3D의 시뮬레이션데이터이다. Fig. 3과 4의 경우는 전위분포형태가 비슷한 경향을 보이고 있다. 이는 욕조내의 충전된 설비만 있고 접지된 금속체가 없어 전계를 형성하지 못한 결과이다. 따라서 본

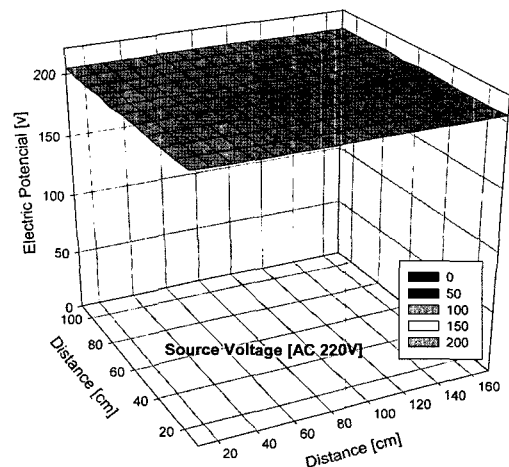


Fig. 3. Electric Potential, height = 30[cm](experiment data).

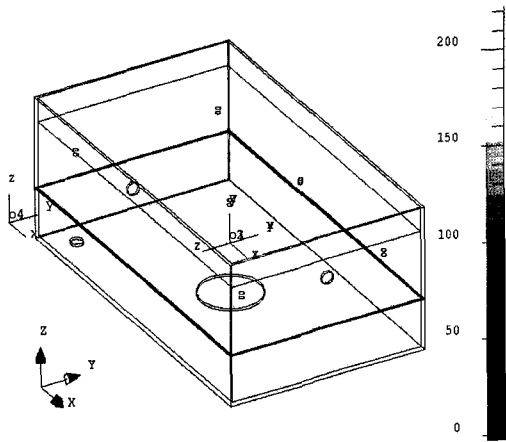


Fig. 4. Electric Potential, height = 30[cm](simulation data).

문 2. 입욕시설에서의 전격사고 메커니즘 중 3에 해당하며 욕조내에서 전계가 형성되지 않았다고 해서 누전된 욕조가 안전하다는 의미는 아니다.

이 경우 인체가 수중에 있으면 욕조내는 등전위 상태가 되어 전류가 흐르지 않아 감전사고가 발생되지 않으나, 수중에서 나오기 위해 접지체를 잡거나 수중으로 들어가기 위해 접지된 상태에서 한 발을 넣으면 접지점이 있는 욕조에서의 경우보다 매우 위험한 상황에 직면하게 되어 전위차에 따른 감전 회로가 구성되어 전격재해를 당한다.

4.2. 수중조명등에 누전이 발생한 경우 (Case 2)

Fig. 5~7은 물놀이 시설 등의 욕조에 설치되어 있는 수중조명등의 누전을 가정하기 위하여 욕조의 한쪽 벽면에 지름 5[cm]의 원형 금속체를 바닥에서 높이 35[cm]에 부착하여 전압을 인가한 후 욕조의 접지체인 바닥의 급기관(버블매트), 배수구, 수중안마(흡입관, 토출관)에 의한 전위경도의 영향을 평가한 데이터이다. Fig. 5는 높이 30[cm] 지점에서의 전위분포를 측정된 것으로 실험값이며, Fig. 6은 시뮬레이션에 의한 데이터로 전위분포 경향이 비슷한 형태를 형성하고 있다. Fig. 7에서 노출 도전부인 수중조명등에서 수중안마 흡입관 및 토출관까지의 전위분포를 분석한 결과 실험데이터의 경우 구간별 높은 전위차를 보이고 있으나 시뮬레이션 데이터의 경우 다소 낮은 전위를 보였다.

Case 2의 경우 본문 2. 입욕시설에서의 전격사고 메커니즘 중 2에 해당하며 안전적 측면을 고려하여 전체적으로 높은 전위를 형성하고 있는 시뮬레이션 값을 이용하여 보면 인체가 수중안마 흡입관의 위치

에 놓였을 경우, 인체와 누전점까지의 거리는 50[cm]이며, 인체와 10[cm] 떨어진 지점의 전위차는 1.4[V]로 안전전압으로 볼 수 있다. 하지만 입욕자가 누전점에 가까이 갈수록 사태는 완전히 달라진다고 볼 수 있다.

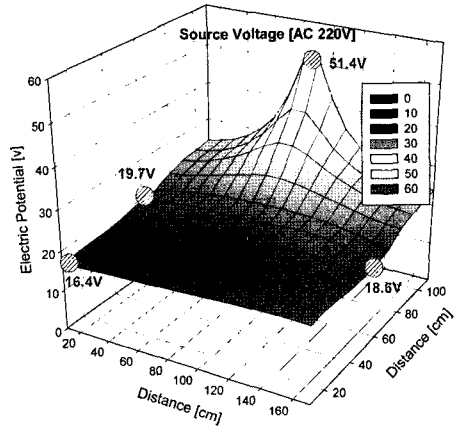


Fig. 5. Electric Potential, height = 30[cm](experiment data).

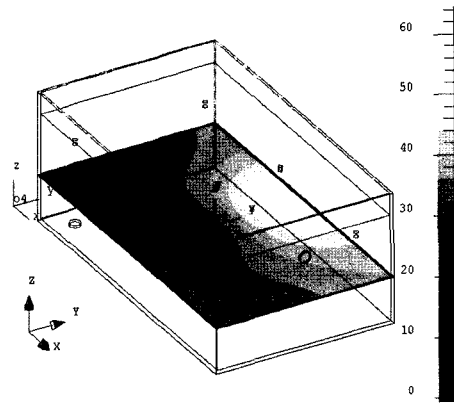


Fig. 6. Electric Potential, height = 30[cm](simulation data).

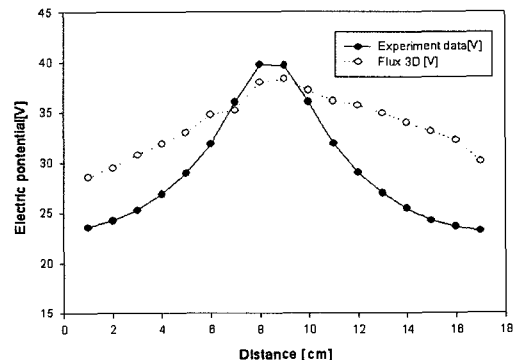


Fig. 7. Comparison of simulation data and experiment data.

4.3. 버블매트에 누전이 발생한 경우 (Case 3)

Case 3은 바닥의 버블매트에서의 누전을 가정하여 버블매트에 전압을 인가한 후 접지체인 배수구 및 수중안마 흡입관, 토출관에 의한 전위경도의 영향을 평가하고자 하는 실험이다. 수중안마 흡입관은 금속관을 통하여 전동기와 직접 연결되어 있으며, 수중안마 토출관은 절연관을 통하여 전동기와 연결되어 있다.

Fig. 8과 9는 높이 30[cm]에서의 전위분포의 데이터이며, 실험값과 시뮬레이션 값에 의한 전위분포가 비슷한 경향을 보여 주고 있다. Fig. 10은 수중안마 흡입관부터 수중안마 토출관까지의 0[cm]에서 170[cm]까지의 전위분포를 나타낸 것으로써, 0~90[cm] 구간에서 실험데이터가 시뮬레이션 데이터보다 다소 큰 전위분포를 보이고 있으며 90~170[cm]

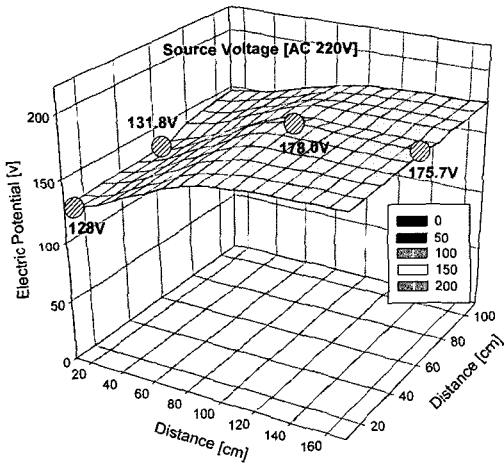


Fig. 8. Electric Potential, height = 30[cm](experiment data).

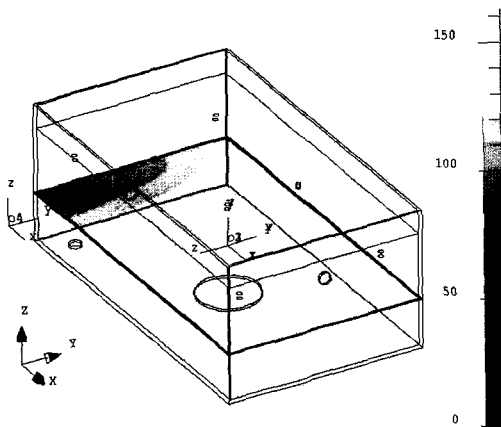


Fig. 9. Electric Potential, height = 30[cm](simulation data).

까지 즉, 수중안마 토출관에서는 전계분포가 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 토출관의 금속배관에 절연체를 삽입하였고 절연체로 인하여 전계분포가 형성되지 않음을 확인 할 수 있다. 이처럼 현상에는 Fig. 11과 같이 전동기의 댐퍼 역할을 하는 절연체의 연결관을 설치하기도 하지만 실제로는 그 절연성을 제대로 유지·관리되지 못하고 있는 실정이다.

Case 3의 경우, 수중안마 흡입관에 인체가 놓여 있을 때 누전점까지의 거리는 불과 10[cm]이며, 인체와 10[cm] 떨어진 곳의 전위차는 3[V]로 전격재해를 당할 수 있다. 또한 누전점인 버블매트는 욕조 중앙 바닥에 넓게 위치하고 있어 직접접촉의 위험성은 더욱 크다고 볼 수 있다. 수중안마 토출관쪽의 90~170[cm]까지는 토출관의 금속배관에 절연체가 삽입되어 있어 전위차가 거의 형성되지 않아 입욕자가 수중안마 토출관 쪽에 위치하였을 경우 전격재해를 피할 수도 있을 것이다.

4.4. 수중안마에 누전이 발생한 경우 (Case 4)

Case 4는 수중안마(흡입관, 토출관)에서의 누전을 가정하여 양쪽의 수중안마에 동시에 같은 전압을 인가한 후 접지체인 버블매트, 배수구에 의한 전위경도의 영향을 평가하고자 하는 실험이다.

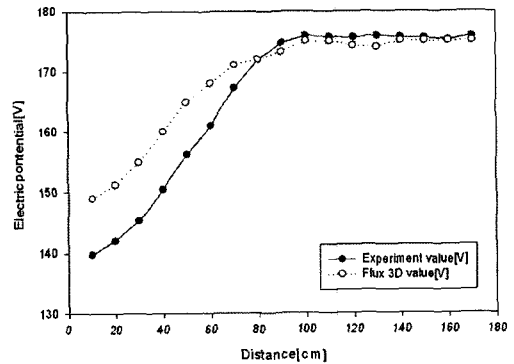


Fig. 10. Comparison of simulation data and experiment data.

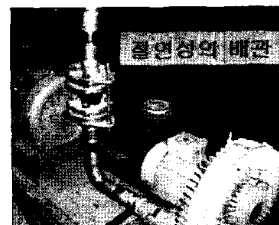


Fig. 11. Installed insulated pipe in the field.

왼쪽의 수중안마 흡입관의 위치는 왼쪽 측벽 중앙에 높이 10[cm]이며, 오른쪽의 수중안마 토출관의 위치는 오른쪽 측벽 중앙 높이 45[cm]이다.

Fig. 12는 실험데이터이며, Fig. 13은 시뮬레이션 데이터를 통한 전위 분포를 분석하였다. Fig. 14는 수중에서 높이 30[cm] 부근에서 분석한 데이터로 구간별 다소 차이를 보이고 있고 특히 60~120[cm] 구간에서는 시뮬레이션 데이터가 더욱더 보수적인 결과를 보였다.

Case 4의 경우 본문 2.입욕시설에서의 전격사고 매커니즘 중 2에 해당하며 Fig. 14와 같이 수중안마 흡입관과 토출관에 동시에 누전이 발생되면 욕조 전체적으로 전위차가 높게 형성되어 있음을 확인할 수 있으며 이러한 경우 인체는 욕조의 어느 위치에 있어도 전격재해로 안전하다고 할 수 없다.

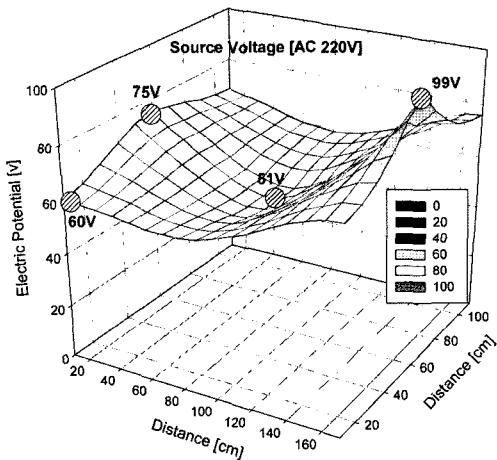


Fig. 12. Electric Potential, height = 30[cm](experiment data).

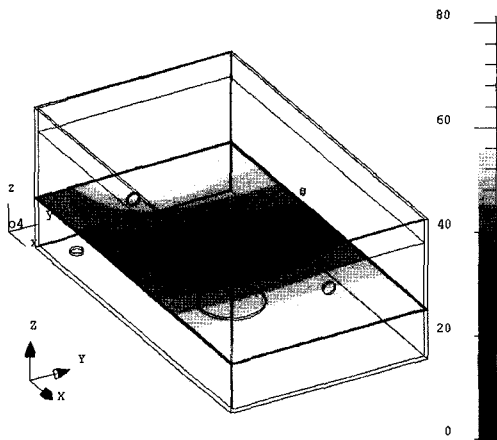


Fig. 13. Electric Potential, height = 30[cm](simulation data).

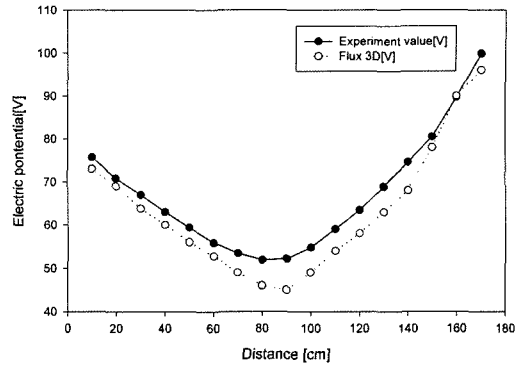


Fig. 14. Comparison of simulation data and experiment data.

4.5. 버블매트-배수관에 동시에 누전이 발생한 경우 (Case 5)

Case 5는 버블매트의 누전을 가정하고 버블매트의 배관이 배수관과 연결되어 있을 경우 주변의 접지체인 수중안마에 의한 전위경도의 영향을 평가하고자 하는 실험이다. 수중안마의 경우 양쪽 배관 모두 금속체로 연결되어 있다.

실제 입욕시설의 각종 배관들은 독립적으로 따로 설치되어 있는 경우도 있지만 보통 배관들은 기계적 지지를 위하여 금속체로 상호 연결되어 있어 어느 한 곳이라도 전기설비의 고장이 발생되면 금속 배관을 통해 여러 곳으로 누전경로를 형성할 수 있게 되어 있다. 이번 실험에서는 이처럼 버블매트의 누전을 가정했지만 이의 영향에 의해 배수관과 버블매트에 동시에 누전이 발생할 경우의 욕조의 전위분포를 측정하고자 하는 실험이다.

Fig. 15와 16은 높이 30[cm]에서의 실험데이터와

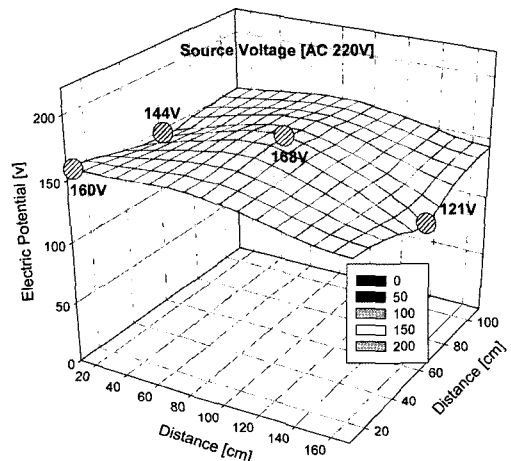


Fig. 15. Electric Potential, height = 30[cm](experiment data).

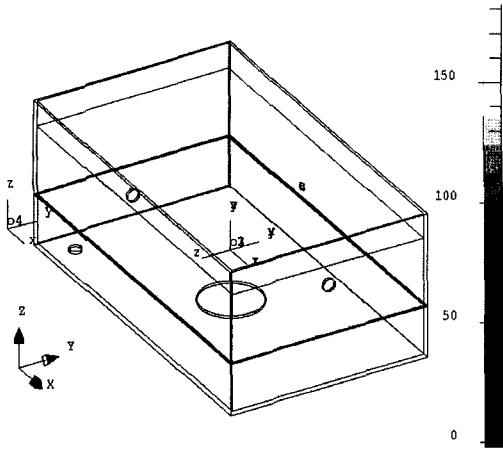


Fig. 16. Electric Potential, height = 30[cm](simulation data).

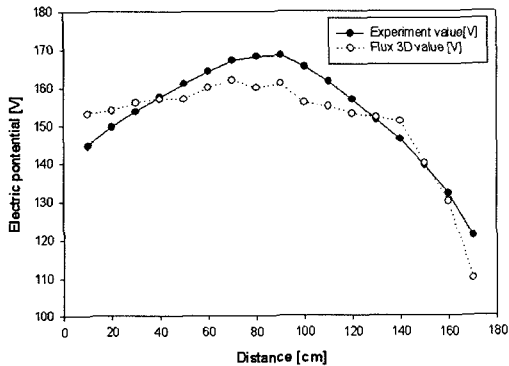


Fig. 17. Comparison of simulation data and experiment data.

시뮬레이션 데이터를 이용한 전위분포이며 서로 비슷한 경향을 보여 주고 있다. Fig. 17은 수중안마 흡입관부터 수중안마 토출관까지의 0[cm]에서 170[cm]까지의 전위분포를 나타낸 것으로써, 40~120[cm] 구간에서 실험데이터가 시뮬레이션 데이터보다 높은 전위분포를 보이고 있으며 120~170 [cm]에서는 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. Case 5의 경우 바닥의 버블매트 및 배수관에 누전이 발생한 경로로, 직접접촉 및 욕조 전체적인 전위차가 높게 형성되어 욕조내의 인체는 매우 위험하다고 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 입욕시설 중 욕조에서 발생할 수 있는 전격사고의 위험성을 측정하기 위하여 모의 욕조에서의 누전을 가정하고 다양한 조건의 노출도전부에 따른 전위분포를 측정하는 실험을 하였다. 실

험 및 시뮬레이션 결과 욕조내의 노출도전부의 위치 및 접지체들의 영향에 의해 욕조의 전위분포가 각기 다르게 형성됨을 알 수 있었다.

1) 모의실험데이터 및 시뮬레이션 데이터를 비교 분석한 결과 전위분포경향에서는 동등한 분포를 보였고 경우에 따라 다소 차이를 보이는 곳도 있었으나 데이터값은 상호 신뢰할 만하다.

2) 입욕시설의 배관에 절연관을 삽입하여 금속관만으로 연결되어 있는 욕조내의 전위분포의 차이를 비교하였다. 비교결과 금속관만으로 연결되어 있는 쪽은 누전 위치로부터 인체와 10[cm] 떨어진 곳의 전위차는 3[V] 이상이지만 절연관이 삽입되어 있는 쪽은 전위차가 2.5[V] 이하로 측정됨을 확인하였다. 실제 입욕시설에 이처럼 절연관을 삽입하여 누전경로의 형성을 차단하면 욕조내에서의 감전사고의 위험성은 조금이나마 줄일 수 있을 것으로 추측된다.

추후 계속되는 연구에서는 본 연구를 바탕으로 실제 입욕시설 재현하여 현장에서 발생할 수 있는 다양한 파라메타 등을 고려한 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글 : 본 연구는 산업자원부 전력산업기반 기금의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Electrical shock safety criteria, international Symposium Electrical Shock, 1983.
- 2) T. Bernstein, "Electrical Shock Hazards and Safety Standards", IEEE Trans. on Education, Vol. 34, No. 3, pp. 216~222, 1991.
- 3) J.E. Bridges, "New Developments in Electrical Shock Safety", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 22~25, 1994.
- 4) 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.
- 5) C.F. Dalziel, "Electric Shock Hazard", IEEE Spectrum, pp. 41~50, 1972.
- 6) ANSI/IEEE Std 80, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 1986.