

욕조에서의 전위분포 해석 및 전격재해 위험성 평가

김종민, 김한상, 정종욱, 정진수, 김성철*

Analysis of the Electric Potential distribution and Evaluation of Electric Shock Risk in Bathtub

Chong-Min Kim, Han-Sang Kim, Jong-Wook Jung, Jin-Soo Jung, Sung-Chul Kim*
Electrical Safety Research Institute KESCO, Chungbuk National University*

Abstract -This paper presents the evaluation 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.

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 사용장소가 지속적으로 증가하고 있다. 예전과는 달리 입욕시설 등의 장소에서도 전기의 사용이 증가하고 있으며, 이러한 장소에서는 인체의 피부저항이 다른 어느 장소보다도 현저히 낮은 상태에 있게 되어 미약한 전압에도 인체에 치명적인 감전 재해가 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 있다. 본 연구에서는 물놀이·입욕 시설에 있는 욕조에 가장 근접한 설치환경조건을 적용한 모의시험설비를 구축하고 이에 대하여 버블매트 등의 노출도전부와 연결된 전기사용기계기구의 다양한 누전형태를 가정하여 시험전압을 인가한 후 노출도전부인 각종 금속체 상호간의 등전위분포의 유무에 의한 영향 평가 및 전위발생점과 유출경로인 배관접속점 및 수중 이격거리별 전위분포를 측정하여 전격재해 위험성을 평가하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 관련이론

입욕시설과 같은 수중에 전기설비가 누전이 되거나 비충전부가 충전이 되는 경우에 충전부를 중심으로 방사상으로 전류가 흘러 동심구 형상의 등전위면이 만들어진다고 간주한다. 입욕시설의 규모가 매우 커서 무한원점에 접지점이 있다고 가정할 수 있는 경우에는 동심구 형태의 등전위면을 기대할 수 있으나, 실제의 입욕시설의 구

모는 이러한 가정을 하기에는 규모가 작거나 입욕시설의 기하학적 형상이 특이한 형태로 만들어져 있으므로, 방사상으로 흐르는 전류의 흐름이 방해받지 동심구 형태의 등전위면이 만들어지지 않는다. 방사상 경로의 전류흐름이 막혀있지 않고 등전위면이 동심구라고 가정하여도 큰 오차가 발생하지 않으므로 이와 관련한 수식의 전개를 알아본다.

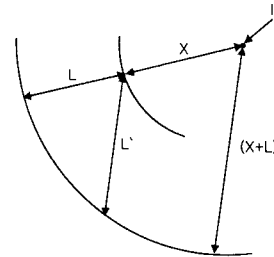


그림 1. 수중 전류원 (무한원점에 접지극이 있는 경우)

그림 1에서처럼 폴장의 한 점에 노출된 충전부를 전류 I [A]가 흐르는 전류원이라 생각한다. 이 때 거리 r[m]만큼 떨어진 점의 전류밀도는 식 (1)로 주어진다.

$$j_r = \frac{I}{4\pi r^2} \text{ [A/m}^2\text{]} \quad (1)$$

매질, 즉 물의 저항율을 s 라 할 때, r에서의 전계강도는 식 (2)로 계산된다.

$$E_r = \frac{sI}{4\pi r^2} \text{ [V/m]} \quad (2)$$

x+L인 점과 x점 사이의 전위차 V_L 는 식(2)를 적분하여 구할 수 있으며 적분 경로와 무관하게 식(3)으로 얻어진다.

$$V_L = V_{(x+L)} - V_x = - \int_x^{x+L} E_r dr = - \int_x^{x+L} \frac{sI}{4\pi r^2} dr = \frac{sIL}{4\pi x(x+L)} \quad (3)$$

Diesen과 Mole 의 연구결과에 따르면 무한한 크기의 도전성 매질에 있는 타원형 공간내에 있는 한 점의 전계는 타원형 공간이 없이 도전성 매질로만 채워진 그 점의 전계의 3배보다 크지 않다고 한다. 이 결과를 인용하면 물속에 인체가 들어가 있는 경우 그 말단부가 x 점과 x+L점에 놓인다고 가정할 때 인체에 나타나는 전위차는 식(4)로 나타낼 수 있다[8].

$$V_L = \frac{3sLI}{4\pi x(x+L)} \quad (4)$$

2.2 실험장치 및 방법

실제적인 물놀이·입욕시설에서의 욕조의 환경을 묘사하기 위하여 욕조의 크기를 실제 대중목욕탕의 욕조 크기와 근사화시키고 배수 및 물의 순환이 이루어질 수 있도록 모의 시험설비를 구축하였다. 전체적인 탱크의 크기는 가로 1.8m, 세로 1.2m, 물의 높이 0.8m가 될 수 있도록 설계하였다. 욕조의 두께는 2.5cm인 아크릴로 제작하였으며 그림 2, 3과 같이 수중안마, 급기관(버블매트), 급수구, 배수구를 설치하였다. 욕조는 금속앵글을 이용하여 바닥에서 40cm 높이에 설치하여 욕조 바닥의 배관의 형태를 확인가능하며 변형 가능토록 설계하였다. 욕조의 배관은 입욕시설 등에서 가장 많이 사용하는 황동·이연도급 강관을 사용하여 제작하였으며 아크릴 욕조의 밑에 노출시켜 언제든지 배관의 형태를 보고 실제 목욕탕의 조건을 만족시킬 수 있도록 설계하였다. 욕조내 바닥의 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 20cm인 원형으로 모의욕조 바닥 중앙에 스테인레스를 이용하여 노출도전부를 형성하게 하였다.

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.

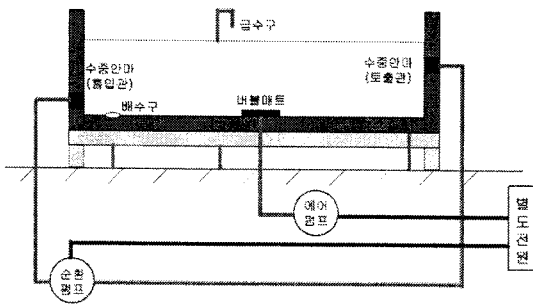
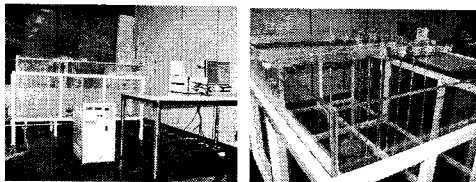


그림 2 모의욕조 실험장치 구성도



(a) 욕조설비 (b) 측정장치

그림 3 구축된 실험용 모의욕조설비

실제적인 입욕시설의 배관들은 다양한 형태로 서로 연결되어 있으며 각각의 형태 및 저항률이 달라 이를 모의하기는 쉽지 않다. 그래서 본 실험에서는 그림 2와 3처럼 모의실험 욕조를 설계하였고 그림 4처럼 각각의 노출도전부와 배관들을 상호연결 및 분리를 할 수 있게 설계하여 다양한 형태의 누전형태가 가능하도록 설계하였다. 측정은 그림 4와 같은 방식으로 다채널스코프를 통해 동

시에 16개 포인트씩 측정하였다. 전원계로는 고장전류의 분리 및 측정시 안전을 고려하여 절연변압기를 사용하였고, 고장전류의 가변을 위한 전압조정기(AT : Auto-Transformer)가 포함되어 있다. 이와 같이 다양한 형태의 누전을 모의하고 각각의 전위분포를 물의 깊이에 따라 측정하고 반복하여 실험하였다. 물의 저항률은 도전율계(CC-411)로 측정하였고, 일반 공중 목욕탕에서 사용하는 지하수를 사용하였으며 저항률은 39.3[Ω·m]로 측정되었다.

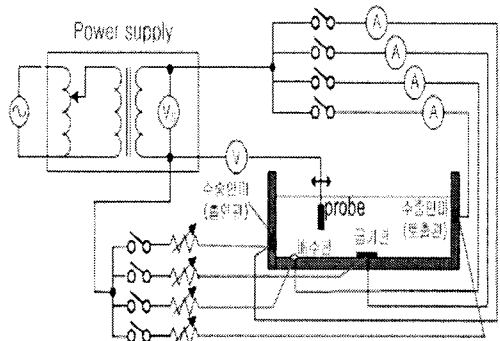


그림 4 측정회로

2.3 결과 및 고찰

2.3.1 1차 실험

수중에서의 감전특성에 영향을 주는 요소로써는 누전점의 형태, 누전점으로부터 거리, 물의 저항률 및 수중에서 인체의 방위 및 형태를 나타내는 L을 고려할 수 있으며, 본 연구에서는 누전점에서의 거리와 L에 변화를 주면서 감전특성을 조사하였다.

먼저 본 실험에서는 일반 가정용 욕조와 같이 전류가 유출되는 접지체가 없는 경우를 가정하여 욕조의 바닥 한곳의 누전을 가정하고 욕조의 전위분포 형성을 측정해보았다. 그림 5는 욕조 바닥면의 전위를 측정된 결과이다. 이 경우 욕조 전체에서 전위차의 변화를 확인할 수 없었으며 전원전압인 110[V]가 욕조의 전체에 형성되었다. 이런 경우 욕조의 전체 지점에서 전위차가 발생되지 않는다고 해서 욕조가 안전하다는 의미는 아니다. 이 경우에도 입욕자가 금속재나 기타 접지점을 형성하는 회로와 접촉한다면 110[V]가 인체에 인가됨에 따라 전위차에 따른 감전회로가 구성되어 전격재해를 당한다.

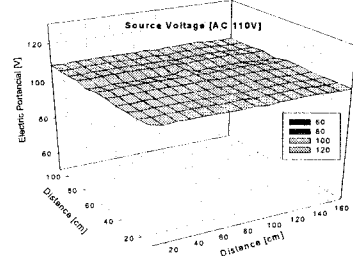


그림 5 욕조 바닥면의 전위경도(유출점이 없는 경우)

2.3.2 2차 실험

실험 2에서는 물놀이 시설등의 욕조에 설치되어 있는 수중조명등의 누전을 가정하기 위하여 욕조의 한쪽 벽면에 지름 8[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 평가하고자 하는 실험이다. 수중안마(흡입관)의 왼쪽은 금속관을 통하여 전동기와 직

접 연결되어 있으며, 오른쪽은 절연관(길이 20[cm])을 통하여 전동기와 연결되어 있다. 원형 금속체는 가로측 측면의 중앙에 높이 30[cm] 위치에 부착하여 실험을 하였다.

그림 6, 7, 8은 욕조의 깊이에 따른 전위경도를 나타낸 값이며 그림과 같이 누전이 되는 측면의 전위는 높게 측정되고 있으며 노출도전부인 버블매트, 배수관쪽으로 전위가 급격히 감소됨을 볼 수 있다. 그리고 왼쪽의 수중안마(흡입관)쪽으로도 전위는 급격히 감소됨을 볼 수 있는데 절연관이 삽입되어 있는 오른쪽의 수중안마(토출관)쪽으로 전위의 감소가 거의 없음을 확인할 수 있었다. 노출 도전부가 가까이 있는 바닥면의 경우 노출도전부의 영향에 의해 전위차가 매우 급격히 형성됨을 볼 수 있었고 높이 30[cm]와 물 표면의 전위경도는 누전점에서 거리에 따라 전위가 서서히 감소됨을 볼 수 있었다.

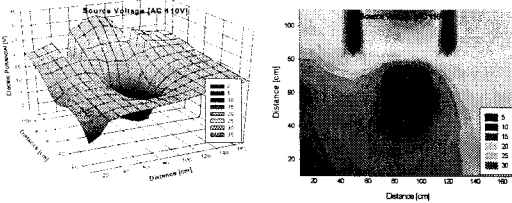


그림 6 욕조 바닥면의 전위경도

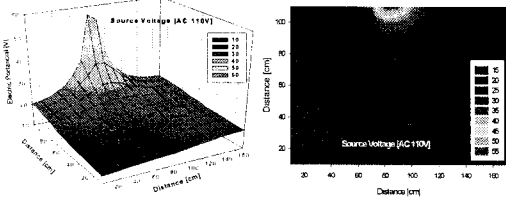


그림 7 높이 30[cm]에서의 전위경도

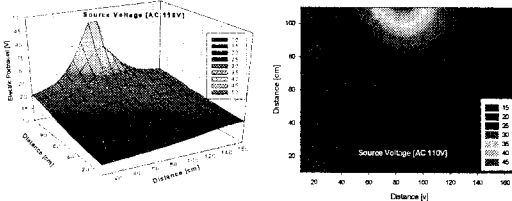


그림 8 물 표면(높이 57[cm])에서의 전위경도

2.3.3 3차 실험

실험 3은 바닥의 급기관(버블매트)에서의 누전을 가정하여 급기관에 전압을 인가한후 접지체인 배수구 및 수중안마(급수관)에 의한 전위경도의 영향을 평가하고자 하는 실험이다. 수중안마(흡입관)의 왼쪽은 금속관을 통하여 전동기와 직접 연결되어 있으며, 오른쪽은 절연관을 통하여 전동기와 연결되어 있다.

그림 9, 10, 11에서 보는 것처럼 누전점인 버블매트에서 접지체인 배수구 및 수중안마(흡입관)의 방향으로 전위경도가 나타나며 접지점으로 전류경로를 형성하고 있으나 누전점에서 절연관이 삽입되어 있는 수중안마(토출관) 방향으로는 전위차의 변화가 매우 적음을 알 수 있다. 특히 전위경도, 즉 전계가 형성되는 누전점과 접지점 사이에 인체가 욕조에 들어가 있으면 감전사고로 인한 전격채해를 당하게 된다. 반면에 전계가 미약하게 형성되는 반대측에서는 인체가 욕조에 들어있어도 감전사고가 발생할 확률이 적다. 그러나 전위차가 적음뿐이지 전체적인 전위값이 접지면보다 높게 형성되어 있어 욕조의

영역으로 인체가 들어가거나 나오기 위해 한쪽 발이나 손이 수중에 접촉하고 다른 한손이나 발이 욕조 외부의 접지된 금속으로 된 배수관, 철제용 기구와 접촉하거나 지면의 물기와 접촉했을 때는 감전회로를 형성하여 전격채해를 당할 수 있다.

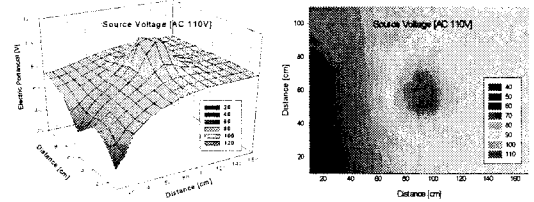


그림 9 욕조 바닥면의 전위경도

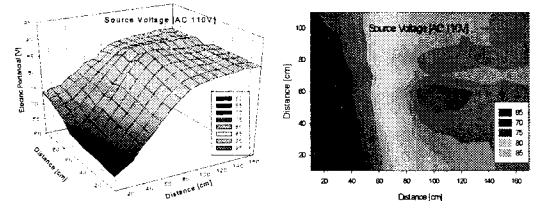


그림 10 높이 30[cm]에서의 전위경도

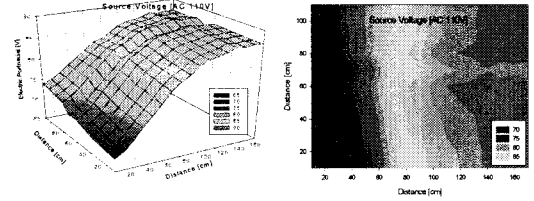


그림 11 물 표면(높이 57[cm])에서의 전위경도

2.3.4 4차 실험

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

왼쪽의 수중안마 흡입관의 위치는 왼쪽 측면 중앙에 높이 10[cm]이며, 오른쪽의 수중안마 토출관의 위치는 오른쪽 측면 중앙 높이 45[cm]이다. 그림 12, 13, 14에서 보는 것처럼 양쪽의 수중안마에서 접지체인 배수구 및 버블매트 쪽으로 전위의 차가 급격히 형성됨을 확인할 수 있다. 앞선 실험 2, 3에서는 수중안마의 오른쪽(토출관)에는 절연관을 삽입하여 전계의 형성이 왼쪽보다 힘들음을 확인했지만 이번 실험은 양쪽 모두를 급기관에 직접 연결하여 누전을 동시에 시켰다. 예상했던 것처럼 욕조의 전위분포는 접지체인 버블매트와 배수구로 급격한 전위감소가 발생되었으며 욕조의 전체에 전계가 형성되고 있음을 확인하였다.

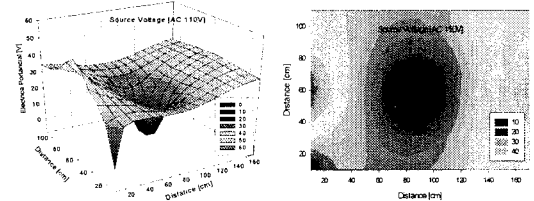


그림 12 욕조 바닥면의 전위경도

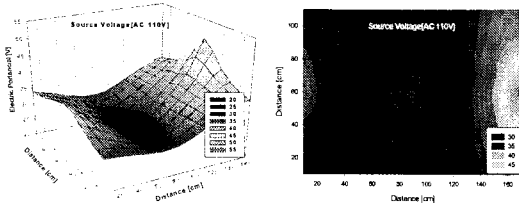


그림 13 높이 30[cm]에서의 전위경도

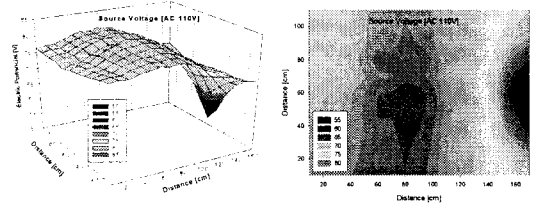


그림 17 몸 표면(높이 57[cm])에서의 전위경도

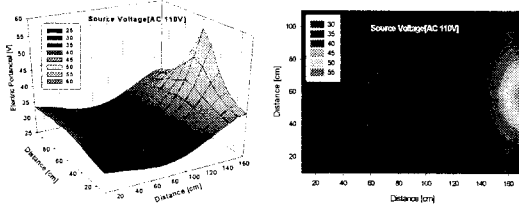


그림 14 몸 표면(높이 57[cm])에서의 전위경도

3. 결 론

본 연구에서는 모의 욕조에서의 누전을 가정하고 다양한 조건에서 노출도전부에 따른 전위분포를 측정하는 실험을 하였다. 실험실 조건의 환경이다 보니 실제 입욕시설에 설치되어 있는 배관들의 접지조건 및 누전의 상황을 정확히 모의 할 수 없었지만 노출도전부에서의 누전에 의해 욕조안에 있는 접지체들이 어떻게 영향을 미치는지를 확인하였으며 욕조의 전위분포가 각기 다르게 형성됨을 측정 할 수 있었다.

그리고 입욕시설의 배관에 절연관을 삽입하여 금속관만으로 연결되어 있을때와의 욕조내의 전위분포의 차이를 비교하였다. 실제 입욕시설에 이처럼 절연관을 삽입하여 누전경로의 형성을 차단하면 욕조내에서의 감전사고의 위험성은 조금이나마 줄일 수 있을 것으로 추측된다.

추후 계속되는 연구에서는 본 논문에서와 같이 절연변압기를 이용한 실험조건이 아닌 실제 입욕시설의 접지조건을 제한하고, 현장에서의 여러 가지 파라메타들 특히 수면이 젖은 상태인 바닥 및 외부의 접지체들과의 접촉으로 인한 감전회로의 구성 가능성 및 전격재해 가능성에 대해 지속적으로 연구가 실시될 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전기안전공사, 감전·화재사고 취약장소의 전기설비 시설지침, 1999
- [2] 한국전기안전공사 부설 전기안전연구원, “배선기구류의 감전위험성 연구”, 한국전기안전공사, 1999
- [3] 전기설비 기술기준, 산업자원부 고시 제2003-24호
- [4] 대한전기협회, 내선규정, 2000
- [5] 김두현 외, 전기안전공학(최신), 신광문화사
- [6] J.E. Bridges, “New Developments in Electrical Shock Safety”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 22-25, 1994.
- [7] 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.

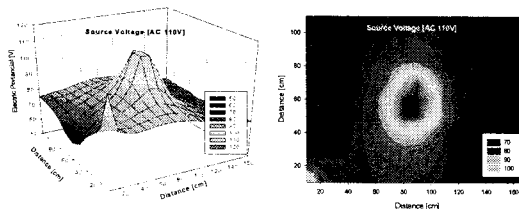


그림 15 욕조 바닥면의 전위경도

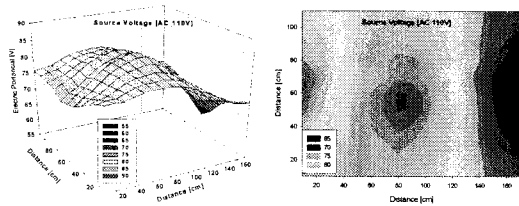


그림 16 높이 30[cm]에서의 전위경도