

수중 전격 과도현상 해석을 위한 ATPDraw 시뮬레이션

(ATPDraw Simulation for Transient Phenomena Analysis of Electrical Shock Underwater)

정중욱* · 정진수

(Jong-Wook Jung · Jin-Soo Jung)

요 약

본 논문에서는 전자과도현상 해석 프로그램인 ATPDraw를 이용한 사례연구로써 인체에 전격이 가해지는 순간의 과도현상을 해석하였다.

사례연구를 위한 2가지 전격 모델은 최악의 환경을 조성하고자 수중에서 발생하는 것으로 가정하였으며, 첫째, 인체가 수중에서 전원설비의 노출 충전부에 접촉하였을 경우와 둘째, 인체의 수족이 수중에서 동시에 대지에 접촉하는 경우를 모델링하였다. 모델링 후 각 사례에 대해 인체의 각 부위에서의 계산된 전압, 전류를 비교하여 전격 순간의 과도현상을 해석하였다.

첫 번째 모델에 대한 해석 결과, 인체가 수중 노출충전부에 축수시 순간적인 과도현상이 발생하며, 이때의 전압, 전류는 축수 전후보다 현저히 증가되는 것을 확인하였다. 그러나 이 현상은 지속시간이 매우 짧아 통전전류와 시간의 적이 안전한계 이내임을 감안할 때, 수용가의 상용전압에서의 전격의 영향은 그다지 크지 않을 것으로 사료된다. 두 번째 모델에서는 인체의 수족이 대지에 동시에 접촉했을 경우, 접촉 순간 인체에 유기되는 전압의 크기는 전반적으로 감소되었으나, 가슴 부위를 통과하는 전류량이 급증하였다. 그러나 그 크기가 작고 지속시간이 짧아 인체에 미치는 전격의 영향은 미미할 것으로 사료된다. 결국 두 경우 모두 전압의 크기, 인체 임피던스에 따라 전격의 영향이 좌우될 것으로 판단된다.

Abstract

This paper describes the analysis of transient phenomena on the point that a human body suffers an electrical shock. A couple of case studies were discussed by using an ATPDraw simulation tool.

Two models for the case studies were constructed on the assumption that the electrical shock event takes place under water to simulate the severest condition ; the first model that the human body contacts with an energized part exposed to water ; the second model that both hands and feet simultaneously contact with the ground under water. After modeling, the transient phenomena for the models were analyzed by comparing the voltages and currents calculated at each part of the human body.

As a result, steep front kicks in voltage and current were observed as transient phenomena on the point that the human body contacts with the energized part exposed to water in the first model and the magnitudes of the kicks considerably increased. It was considered, however, the effect of the kicks due to the commercial power source on the human body could be neglected because the product of the current through the body and the short duration is less than the safety limit. When both hands and feet simultaneously contact with the ground in the second model, the voltage generally decreased all over the body parts, while the current flowing through the chest abruptly increased. The duration of this current was very shot, as well, thus its effect on the electrical shock is considered insignificant. After all, it was confirmed through the simulation results that the electrical shock depends on the magnitude in voltage and the body impedance.

Key Words : Transient phenomena, Human body, Electrical shock, ATPDraw

* 주저자 : 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원

Tel : 031-580-3063, Fax : 031-580-3111, E-mail : phdjung@korea.com

접수일자 : 2007년 1월 16일, 1차심사 : 2007년 1월 19일, 심사완료 : 2007년 2월 9일

1. 서 론

현재 우리나라는 전력설비의 첨단화·IT화가 국가기반산업으로서 기술개발의 주된 추세를 이루어가고 있다. 인간이 누리고 있는 문화적 활동은 편리함과 쾌적함을 목적으로 하는 전기적 창조활동을 반석으로 삼아 구축되어 왔으나, 이와 같은 편리함의 이면에는 안전성이 간과된 설비나 비록 안전보장형 설비라도 외부적 요인에 의해 인간의 안전을 위협하는 설비가 있기 마련이다. 일반적으로 전기설비에 의한 안전상의 위험은 전기기기의 내부에서 발생한 '누전'에 의한 경우가 많으며, 그림 1과 같이 인체와 대지를 매개로 하여 전기적 경로가 형성된다[1].

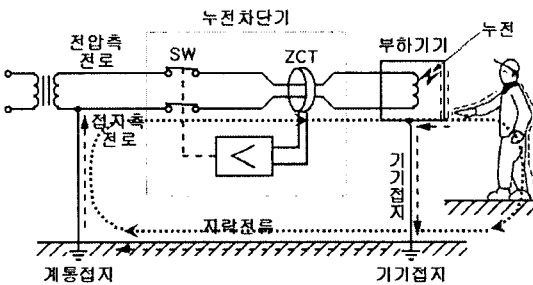


그림 1. 배전계통의 전격 상징도
Fig. 1. Schematic of electrical shock in distribution system

누전은 기기의 절연이 '열화'되어 발생하며, 이때 충전부에서 외함으로 전기적 누설경로가 형성되므로, 간접접촉에 의한 전격의 위험이 상존한다. 위험의 정도는 개인의 체형조건 및 주위환경에 의해 결정되는 인체 임피던스에 따라 달라진다. 저압전로의 경우, 상용전원에 의한 전격을 방지하기 위해 누전 차단기를 설치하지만, 실제 전로에서는 다양한 원인에 의해 이의 적절한 동작이 이루어지지 않아 전격 사고가 발생하는 사례도 발생하고 있다.

본 연구에서는 실제 발생가능한 가장 가혹한 조건으로서 인체가 수중에 잔류하는 경우, 역시 수중 노출된 전기적 충전부로 인해 인체가 전격을 경험하는 순간의 과도적 위험성을 분석하기 위해 전자과도현상 해석 프로그램인 ATPDraw를 이용하여 인체 각 부에서의 전기적 변수들을 계산하였다.

2. 수중 잔류 인체에 대한 전격 해석 시뮬레이션

2.1 시뮬레이션 프로세스

본 연구에서는 전격 순간의 인체 내 통전현상 및 위험성을 고찰하기 위해 전자과도현상 해석 프로그램인 ATPDraw를 이용하였다. ATPDraw는 MS-DOS platform 상에서 ATP(Alternative Transients Program)를 구현하기 위한 마우스 구동식 그래픽 전처리장치로서, 사용자로 하여금 메뉴에서 전기소자를 선택하여 구현하고자 하는 전기회로를 그래픽으로 처리할 수 있도록 한 프로그램이다.

수중에 잔류하는 인원이 경험할 수 있는 전격의 위험은 건조상태에 비해 매우 높으며, 이 조건에서 상정가능한 전격의 일반적인 2가지 사례에 대해 다음과 같은 플로우를 따라 시뮬레이션하였다.

수중 잔류 인원에 대한 전격 상황 설정
침수 환경 및 인체모델 구성
침수용액 및 인체에 대한 전기적 구성요소 선정 및 설정
측정 대상 및 부위 선정
결과 도출 후 비교 및 고찰

그림 2. 수중 인체에 대한 전격 시뮬레이션 플로우
Fig. 2. Simulation flow of electrical shock for human body in water

그림 2에 보인 바와 같이, 우선 수중에 잔류하고 있는 인체가 경험할 수 있는 전격을 시뮬레이션하기 위한 인체모델을 상정하였다.

인체를 전기적 도체라고 가정했을 경우, 피부, 혈액, 근육, 관절 및 기타 세포 등, 인체의 각 부위는 전류에 대해 저항성과 용량성으로 이루어진 임피던스라고 할 수 있으며, 일반적으로 이 임피던스는 전류 경로, 접촉전압, 통전 지속시간, 주파수, 피부의 습윤 상태, 접촉면적, 접촉압력 및 온도에 따라 비선형적

수중 전격 과도현상 해석을 위한 ATPDraw 시뮬레이션

으로 달라진다고 알려져 있다[1-3]. 지금까지 발표된 대표적인 인체 임피던스로는 Dalziel, Freiberg 및 Andrews가 제시한 것들이 있으나[1], 본 시뮬레이션에서는 순간적인 과도현상의 모델링에 적합한 Andrews의 인체 임피던스를 적용하여 수중에 잔류된 인체가 경험하는 전격을 모의하기로 한다[3].

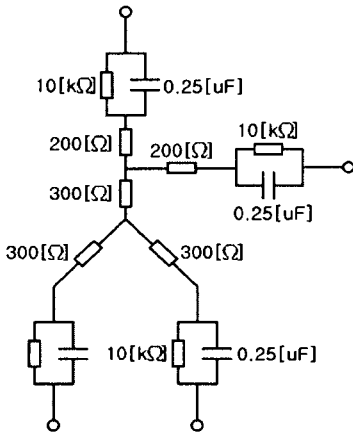


그림 3. Andrews가 제시한 인체 임피던스
Fig. 3. Body impedance by C.J. Andrews

수중에 노출된 충전부와 인체 간에는 물이라는 매체가 존재한다. 전기설비가 물에 잠긴 실제 상황에서의 침수용액은 순수(純水)라기보다는 다양한 물질이 용존되어 있는 도전성 수용액에 가깝다고 여겨지므로, 본 모델링에 있어서는 우수(雨水)의 도전율을 실측하여 적용하였으며, 이와 같이 문헌상에서 발견하기 곤란하거나 계측기를 사용하여 측정이 가능한 전기적 인자들의 값은 모두 실측하여 적용하였다. 또한 2가지 모델 모두에는 한쪽 단자가 접지된 220[V]의 전원전압이 인가되는 것으로 설정하였으며, 시뮬레이션의 총시간 100[ms] 중, 40[ms]에서 전격이 발생하는 것으로 하여 사건 직전·직후의 전압·전류의 변화를 관찰하였다. 전격은 노출된 충전부에 대한 축수 순간에 발생하므로, 이의 모의를 위해 40[ms]에서 단히도록 설정된 스위치 소자를 채용하였다. 인체 각 부위에서의 전압·전류 계산을 위한 샘플링 간격은 0.5[μs]로 지정하였으며, 지금까지 설명한 모든 것을 정리하여 표 1에 나타내었다.

표 1. 수중 전격 발생 시의 과도현상 해석에 적용하기 위한 전기적 파라미터

Table 1. Electrical parameters for applying to transient phenomena analysis at electrical shock under water

전원 전압 (원지)	침수용액의 전기적 파라미터					시간요소			인체 임피던스
	수중 상-대지	수중 상-대지	수중 상-대지	수중 상-대지	수중 상-대지	ΔT	Tmax	SWclo	
220[V]	75[kΩ]	15[G.Ω]	1[pF]	5[pF]	2[pH]	0.5[μs]	100[ms]	40[ms]	그림 3 참조

그림 3 및 표 1에서 제시한 값을 적용하여 첫 번째 사례에 대한 모델로서 그림 4와 같은 회로를 구성하였으며, 또한 두 번째 사례에 대한 모델로서 그림 5와 같은 회로를 구성하였으며, 각 모델에 대한 전압과 전류의 계산은 각각 인체의 손, 가슴 및 다리에서 이루어지는 것으로 하였다.

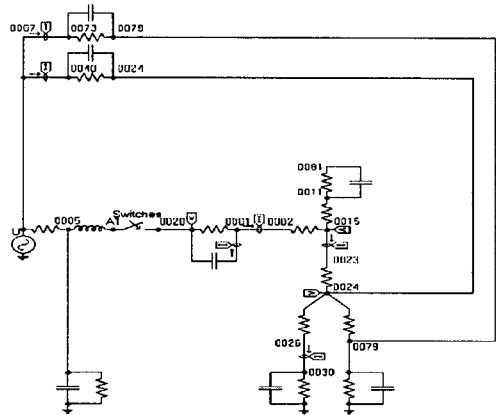


그림 4. 수중 전격 발생 시의 과도현상 해석 모델 및 각 노드명(모델 1 : 수중 노출 충전부 축수)
Fig. 4. Model and its node names for transient phenomena analysis at electrical shock under water(case 1 : contacted with energized part under water)

인체에 영향을 미치는 전격의 위험은 수중 노출된 충전부에 신체가 직접 축수하는 상황 이외에도, 침수상황 하 누설전류로 인한 전기적 쇼크에 의해 전방으로 쓰러진 인체의 수족이 대지에 직접 접촉함으로써 수족과 대지 간에 도전로가 형성됨으로써 심장에 전격이 가해지는 상황도 가정할 수 있으며, 이와 같은 상황은 현재 언론에 자주 보도되고 있는 도로 전기설비에 의한 감전사고가 그 대표적인 예라고 할

수 있다[4]. 따라서 본 모델에서는 인체 및 전기설비가 수중에 잠겨있고 인체의 수족이 대지에 동시에 접촉하는 순간을 가정하므로, 그림 4와 같은 회로에서 인체 및 도전액을 비롯한 대부분의 전기적 파라미터는 그대로 유지한 채 인체가 대지와 흡수하는 순간의 회로만을 변경하여 매 순간마다의 전압, 전류가 측정되도록 하였다. 이 회로를 그림 5에 나타내었다.

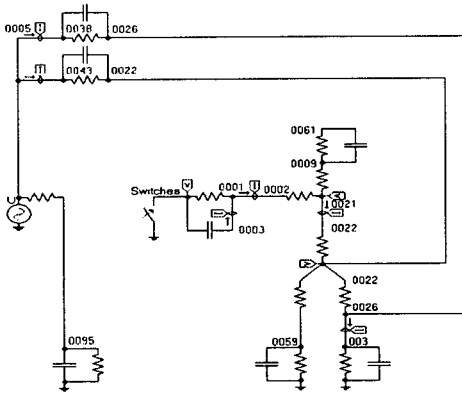


그림 5. 수중 전격 발생 시의 과도현상 해석 모델 및 각 노드명(모델 2 : 수중 인체의 수족이 동시에 대지 접촉)

Fig. 5. Model and its node names for transient phenomena analysis at electrical shock under water(case 2 : both hands and feet simultaneously contacted with ground under water)

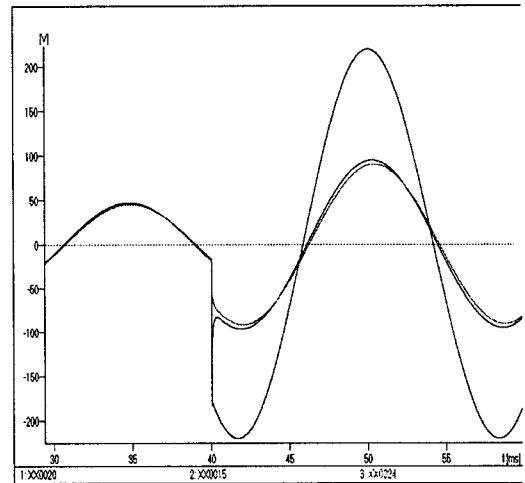
3. 결과 및 고찰

3.1 수중 인체의 노출 충전부 흡수 시 접촉전압 및 통전전류

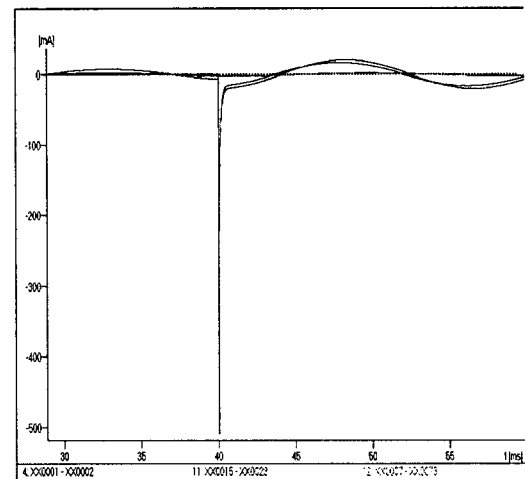
일반적으로 수중에 존재하는 노출된 충전부 및 이에 인체가 흡수되는 순간의 과도 접촉전압 및 통전전류를 해석하여 그림 6에 각각 나타내었다.

그림 6 (a)에 보인 바와 같이, 수중에 존재하는 인체의 각 부위에서 계산된 전압은 충전된 전원에 접촉하기 이전에는 35[ms] 순간, 손(XX0020 ; 흑색), 가슴(XX0015 ; 청색) 및 다리(XX0024 ; 적색)에서 약 46.9[V] 정도의 피크전압을 가지는 정현파형을 나타냈지만, 40[ms]에서 흡수되는 순간, 급격히 증가하여

손과 가슴에서는 약 183[V], 다리에서는 약 52[V]로 급증한 후, 정현파형을 가지며 증가하여 흡수된지 1.7[ms] 후에 손에서는 220[V], 가슴에서는 96.2[V] 및 다리에서는 91.6[V]의 피크를 나타내었다.



(a)



(b)

그림 6. 모델 1의 접촉전압(a) 및 통전전류(b) (40[ms]에서 흡수)

Fig. 6. Voltage(a) and current(b) of case 1 (contacted at 40[ms])

수중의 인체 각 부위에 인가되는 전압 간의 위상차는 거의 무시할 수 있을 정도로 작았으며, 모델링한 회로상의 수중 저항과 정전용량의 변화에 따라서

수중 전격 과도연상 해석을 위한 ATPDraw 시뮬레이션

는 전압, 전류파형의 위상과 크기가 크게 달라지지 않음을 알 수 있었다. 실제 수중 인체가 경험하는 전격의 정도에는 인체를 통과하는 통전전류의 영향이 인체 각부에 인가되는 전압의 영향보다 클 것으로 사료되어 역시 인체 각 부위에서의 통전전류를 측정하였으며, 이 결과를 그림 6 (b)에 나타내었다.

그림 6 (b)에 보인 바와 같이, 수중 인체에 흐르는 통전전류는 충전된 전원에 접촉하기 이전에는 33[ms] 순간 손(XX0001-XX0002 ; 흑색), 가슴(XX0015-XX0023 ; 청색) 및 수중(XX0007-XX0073 ; 적색)을 통과하는 통전전류가 각각 3.8×10^{-12} [mA], 7.2[mA] 및 2.5[mA] 정도의 피크전류를 가지는 정현파형을 나타내지만, 40[ms]에서 축수되는 순간, 동일부위 순으로 약 510[mA], 약 244[mA]까지 과도적으로 급증하였으나, 약 0.5[ms] 경과 후 안정되기 시작하여 각각 약 17[mA]와 21[mA]의 피크전류값을 가지는 정현파형을 나타내었다. 그러나 수중 통전전류의 경우에는 축수 이전의 값이 크게 변하지 않은 채 축수 이후에도 약 1.6[mA] 정도의 미소한 값을 유지하였다.

인체 통전전류의 크기 및 파형은 인간의 심장 제어신호가 교란되어 심근을 진동시키는 심실세동(ventricular fibrillation)에 직접 영향을 미친다. 축수되는 순간 약 244[mA]까지 급증하여 심장부근을 흐르는 과도전류는 인간의 심장 제어신호를 교란시키기에 충분하므로, 이에 대한 적절한 대책, 즉 절연장갑이나 절연장화와 같은 보호장구를 적절히 착용할 경우, 수중에서도 어느 정도 보호효과가 있음은 그림 4에서 약 15[GΩ]의 저항만을 스위치와 손 간에 추가로 삽입하였을 경우의 시뮬레이션 결과를 통해 확인할 수 있었으며, 그 결과를 그림 7에 나타내었다.

그림 7에 보인 바와 같이, 약 15[GΩ]의 저항을 스위치와 손 간에 삽입하였을 경우, 심장 부근에 흐르는 전류(XX0013-XX0021 ; 청색)는 축수에 무관하게 약 6[mA] 정도를 유지하였다.

한편 본 시뮬레이션에서는 수중에 인체가 존재할 경우, 충전된 전원설비와 인체 간을 직접 통전하는 전원에서의 누설전류도 측정하였으며, 신체 각부에 흐르는 수중 누설전류의 크기 및 파형을 계산하여 그림 8에 나타내었다.

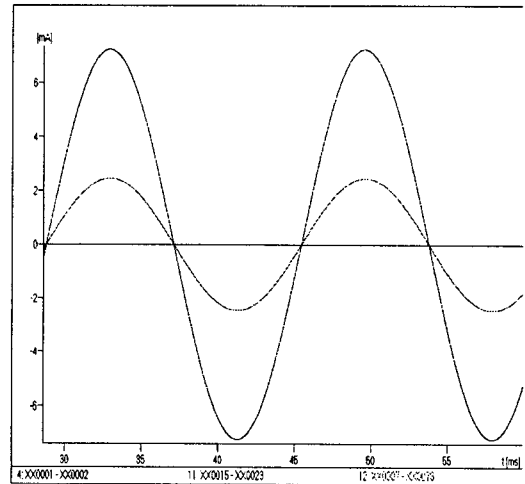


그림 7. 절연장갑 착용 모델의 인체 통전전류(40[ms]에서 축수)

Fig. 7. Current flowing through human body with insulating glove(contacted at 40[ms])

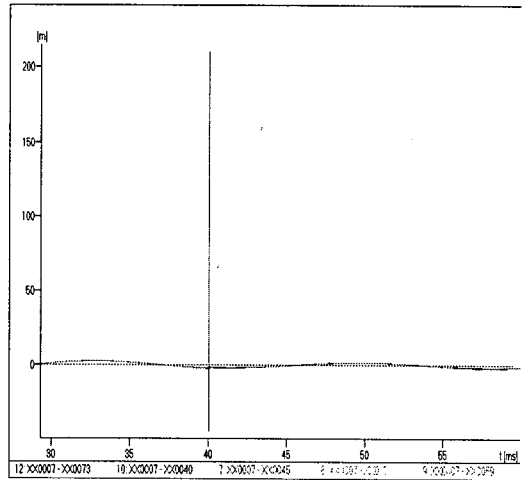


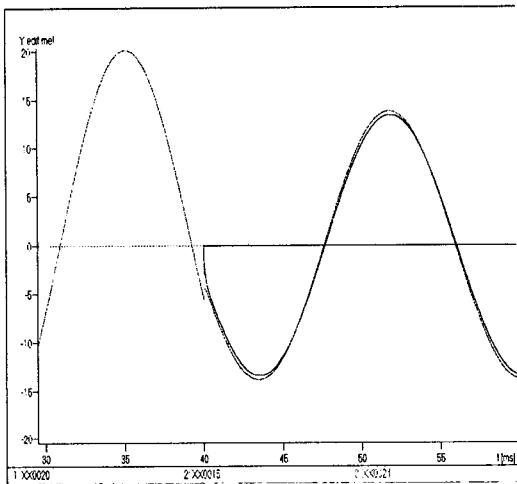
그림 8. 수중 인체의 충전 전원설비 축수 시 수중 전류별 비교(40[ms]에서 축수)

Fig. 8. Comparison of each current flowing through water(contacted at 40[ms])

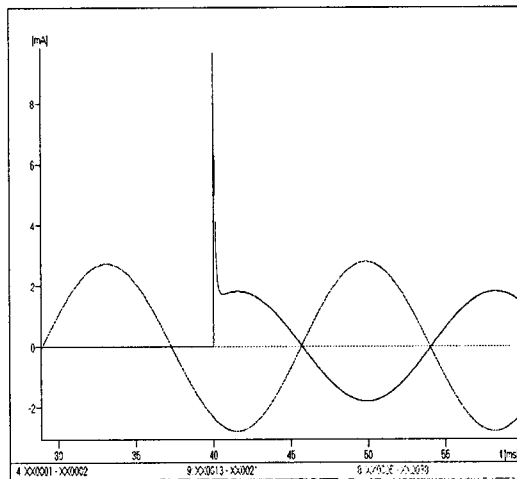
그림 8에 보인 바와 같이, 수중에 노출된 충전부와 인체가 동시에 존재하는 경우, 수중을 통해 인체에 이르는 전류는 축수 전에는 약 2.4[mA], 축수 후에는 1.6[mA]의 피크전류를 기록하였으나, 축수 순간에 전원설비로부터 가슴에 이르는 경로 상의 전류가 약 210[mA]까지 도약하였음을 알 수 있었다. 그러나 이는 통전전류와 통전시간과의 적으로 표현되는

Köeppen의 인체통과전류의 안전한계인 50[mA · s]보다 매우 적어 인체의 안전성에 미치는 악영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

3.2 수중 인체 수족의 대지 동시 접촉 시 접촉전압 및 통전전류



(a)



(b)

그림 9. 모델 2의 접촉전압(a) 및 통전전류(b) (40[ms]에서 접촉)

Fig. 9. Voltage(a) and current(b) of case 2 (contacted at 40[ms])

일반적으로 수중에 노출된 충전부 및 인체가 존재

할 경우, 인체의 수족이 동시에 대지에 접촉되는 순간, 인체의 각 부위에서 계산한 과도 접촉전압 및 통전전류를 그림 9에 나타내었다.

그림 9 (a)에 보인 바와 같이, 수중 인체의 수족이 대지에 동시에 접촉하였을 경우, 인체의 각 부위에 인가되는 전압은 대지에 접촉하기 이전에는 35[ms] 순간, 손(XX0020 ; 흑색), 가슴(XX0015 ; 청색) 및 다리(XX0024 ; 적색)에서 약 20[V] 정도의 피크전압을 가지는 정현파형을 나타내지만, 40[ms]에서 축소되는 순간, 손은 영전위를 지속적으로 유지하고 가슴에서는 약 1.7[V], 다리에서는 약 8[V]로 약간 감소하는 경향을 나타낸 후, 3.5[ms]가 지나 손에서는 약 13.4[V], 가슴에서도 약 13.8[V]의 피크전압을 나타내었다.

본 시뮬레이션에서도 수중 인체 각부에 인가되는 전압간의 위상차는 거의 무시할 수 있을 정도로 작았으며, 모델링한 회로 상의 수중 저항과 정전용량의 변화에 따라 전압, 전류파형의 위상과 크기가 크게 달라지지 않음을 알 수 있었다.

그림 9 (b)에 보인 바와 같이, 수중 인체의 수족이 대지에 접촉하였을 경우, 인체 각부를 흐르는 통전전류의 크기는 대지에 접촉하기 이전에는 33[ms] 순간 손(XX0001-XX0002 ; 흑색), 가슴(XX0013-XX0021 ; 청색) 및 수중(XX0005-XX0038 ; 적색)을 통과하는 통전전류가 각각 3.5×10^{-13} [mA], 3.8×10^{-11} [mA] 및 2.7 [mA] 정도의 피크전류를 가지는 정현파형을 나타내지만, 40[ms]에서 대지에 축소하는 순간, 손 및 가슴을 흐르는 통전전류는 약 9.65[mA]까지 과도적으로 급증한 후 바로 안정되어 1.8[mA] 정도의 피크전류를 가지는 정현파형을 나타내었으나, 수중을 흐르는 통전전류는 대지에 축소됨에 의한 영향을 거의 받지 않는다는 것을 알 수 있었다.

이 결과 역시 순간적인 과도전류가 통전되었을 경우 그 크기가 인체에 영향을 줄 정도로 크지는 않으나, 그 크기가 불수의전류를 초과할 경우 순간적인 전격에 의해 근육이 마비되어 인체에 지속적인 통전전류가 흐르므로, Köeppen의 인체통과전류의 안전한계를 결정하는 $I \cdot t = 50$ [mA · s]를 넘는 영역에서는 인체에 치명적인 영향을 줄 수도 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

첫 번째 모델인 수중 노출된 충전부에 인체의 손이 접촉하였을 때에는 순간적인 과도현상 발생하며, 이때의 과도값은 건전 시보다 매우 증가된 값을 나타내었다. 그러나 과도현상의 지속시간은 0.5[ms] 이내로 매우 짧아 전류와 시간의 적인 안전한계곡선 이내에 들므로, 220[V]에서의 전격의 영향은 미미할 것으로 판단되었다.

또한 두 번째의 모델인 수중 노출된 충전부가 존재하는 상황에서 인체의 수족이 대지에 동시에 접촉하였을 때에는 손에는 영전위가 유지되며, 전체적으로 인체에 유기되는 전압은 대지 접촉 전보다 감소됨을 확인할 수 있었다. 또한 대지 접촉 순간, 가슴부위를 통과하는 전류는 갑자기 증가하지만, 전류의 크기가 작고 지속시간이 짧아 인체에 미치는 전격의 영향은 미미할 것으로 판단된다.

결국 두 경우 모두 상용전압의 크기, 인체의 임피던스에 따라 인체에 미치는 전격의 영향이 결정될 것으로 판단되지만, 적절한 보호장비를 갖출 경우 전격으로부터 보호받을 수 있음도 확인하였다. 추후에는 실증실험에 의한 비교연구를 통해 시뮬레이션 결과와의 일치성을 검증한 후, 보다 가혹한 환경에서의 결과를 유추할 수 있는 환경까지도 조성되어야 할 것이다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금 조성 사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) 다카하시 다케히코, 접지·등전위 본딩 설계 실무지식, 성안당, pp.3-12, 2004.
- (2) L.E. Virr, "Increased electric shock risk underwater due to electrode configuration and insulating boundaries", IEE Proceedings, Vol.137, Pt.A, No.5, pp.261-268, Sep. 1990.
- (3) 이형수 외 8명, 전자파 생체영향 및 표준화 연구, 01MR2900-01-2700P, 정보통신부, pp.28-35, 2001.
- (4) 하태현 외 3명, "옥외 전기시설물 침수시 누설전류에 의한 인체영향", 대한전기학회 논문지, 제52권, 제12호, pp.602-607, 2003.
- (5) 하태현 외 3명, "침수수 옥외 전기시설물의 누전원인 분석", 전기의 세계, 제51권, 제8호, pp.15-17, 2003.

◆ 저자소개 ◆

정중욱 (鄭鍾旭)

1969년 2월 17일생. 1992년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1997~2003년 동대학원 전기공학과 졸업(석사, 박사, 전기전자재료 및 대전력 전공). 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 설비안전연구그룹 선임연구원.

정진수 (鄭鎭洙)

1976년 9월 12일생. 2003년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2005년 동대학원 전기공학과 졸업(석사, 전력계통 전공). 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 설비안전연구그룹 연구원.