

침수조건에 따른 저압 지중함의 감전 위험성 평가

(The Assessment of Electric Shock Rate of Low Voltage Joint-Box Based Submerged Condition)

심건보* · 김경철* · 김한상** · 김종민**

*충익대학교 · **전기안전연구원

(Keon-Bo Shim · Kung-Chul Kim · Han-Sang Kim · Jong-Min Kim)

Abstract

The potential and step voltage distribution around low voltage joint-box cover were simulated with the variation of resistivity of water, depth of submerged water and point of leakage current. The potential distribution is very high gradient around low voltage joint-box, this condition is very dangerous states.

1. 서론

현재 우리나라의 일반 수용가에 전기에너지를 공급하기 위한 배전선로는 가공 및 지중선로를 사용하는 방법이 있으며, 최근에 산업의 발달과 도시 지역의 환경 및 미관을 위하여 지중 배전선로에 의한 전력에너지의 공급이 일반화되어 가고 있는 상태이다. 특히 대도시를 중심으로 배전선로의 지중화가 크게 증가하고 있어서 지중 배전선로의 설비에 대한 중요성이 증대되고 있으며, 지중 배전선로의 설비 중에서 접속함의 설치 장소도 늘어나는 추세이다. 지중 접속함 내부에는 지중 전선로의 접속부가 있으며, 접속부의 경년변화에 의한 절연열화 및 외피 손상 등에 의하여 설비사고의 가능성이 항상 존재하는 부분이다. 특히 지중 접속함은 사람들의 왕래가 많은 인도와 인접한 지역에 설치되는 경우가 많으므로 이러한 설비 사고 중에서 접속함 내부에서 발생한 누전에 의하여 지락이 발생하는 경우에 접속함의 금속재 뚜껑에 전압이 유기되어 인체에 대한 전기안전 사고가 발생할 우려가 있다. 최근에 기상이변에 의하여 자주 발생하는 국지성 호우에 의하여 도심지에서의 지중 접속함 침수에 의한 인명 피해가 우려되고 있다. 따라서 지중 접속함의 내부에서 발생하는 누전 등에 의한 대지전위 상승이 발생할 경우에 대하여 인체의 안전에 대한 지중 접속함의 안전성에 대한 평가를 통하여 인체의 안전에 대한 대책을 세워야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 저압 지중선로용 접속함에서 발생하기 쉬운 누전 등의 사고에 의하여 인체에 전기재해(감전)의 위험성을 평가하기 위하여 시뮬레이션[1]을 통하여 건조 시와 침수시의 침수 조건에 의하여 나타나는 지표

면의 전위분포를 계산하였다. 계산된 전위분포로부터 침수 조건에 따른 인체의 감전 위험성을 평가하였다.

2. 대지 지표면 전위 계산 이론

2.1. 균질대지에서의 전위

일반적으로 대지는 비균질이지만 근사화에 의해서 비교적 균질의 대지로 가정할 수 있다.

전극이 대지 저항률 ρ [$\Omega\cdot m$]인 대지에 위치하는 전극의 반경이 a 이고, 대지 표면에 그 중심을 갖는 반구라고 하고 전극에서 전류 I 가 대지로 유입된다면, 전류의 흐름선은 방사상으로 나타나고, 그 등전위면은 반구이다. 또한, 전류 밀도 J 는 반지름이 r 인 등전위면에서 균일하다.

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

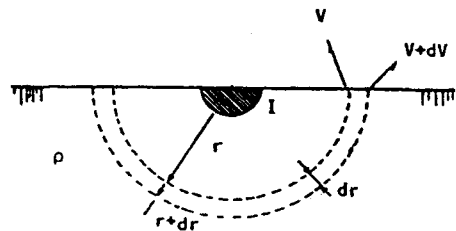


그림 1 반구형 전극(Hemispherical Electrode)

전극으로부터 전위 경도는 다음과 같다.

$$G(r) = \rho \frac{I}{2\pi r^2} \quad [V/m] \quad (2)$$

따라서 전극의 중심으로부터 거리 r 에서의 전위는

$$V(r) = - \int_r^\infty G dr = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad [V] \quad (3)$$

2.2. 2층 구조 대지에서의 전위

2층 대지구조의 한점에 매설된 점전원에 의하여 유도되는 전위를 계산하기 위한 기본적인 방정식은 유도하기 위하여 깊이 e 로 매설된 도체를 고려해 보자. 이 때, 지표면의 한 점 $M(x_0, y_0, z_0)$ 에서의 전위를 구하기 위하여 도체는 균일한 전류밀도를 갖는다는 조건을 가정하자. 그러면, xyz 좌표계와 uvw 좌표계의 관계로부터, 이 도체는 uvw 좌표계의 u 축에 위치하며, 좌표값은 <표 1>과 같이 표시되고 $v_s = v_p = w_s = w_p = 0$ 와 $z_s = z_p = e$ 의 관계가 있다.

<표 1> 도체의 각 좌표계 값

uvw 좌표계	xyz 좌표계	설 명
(u_s, v_s, w_s)	(x_s, y_s, z_s)	시 작 점
(u_p, v_p, w_p)	(x_p, y_p, z_p)	끝 점

도체의 미소부분 du 에 의한 관측점 $M(u_0, v_0, w_0)$ 에서의 전위는 식 (4)와 (5)로 주어진다.

$$dV_j^1 = \frac{\rho_1 S_j du}{4\pi} (1+k) \left[\frac{1}{r_{0j}} + \frac{1}{r_{0j'}} + \sum_1^\infty k^n \left(\frac{1}{r_{nj-}} + \frac{1}{r_{nj+}} \right) \right] \quad (4)$$

$$dV_j^2 = \frac{\rho_1 S_j du}{4\pi} \frac{(1+k)}{(1-k)} \left[\frac{1}{r_{0j}} + \frac{1}{r_{0j'}} + \sum_1^\infty k^n \left(\frac{1}{r_{nj-}} + \frac{1}{r_{nj+}} \right) \right] \quad (5)$$

각각의 도체에 의한 관측 점에서의 전체적인 전위계산을 위하여 적분을 수행하여야 하는데, 이 때 식 (6)의 r 항들이 uvw 좌표계의 값으로 표현되어야 한다.

$$\begin{aligned} r_0 &= [(u-u_0)^2 + v_0^2 + w_0^2]^{\frac{1}{2}} \\ r'_0 &= [(u-u_0)^2 + v_0^2 + (w_0+2z_s)^2]^{\frac{1}{2}} \\ r_{nj+} &= [(u-u_0)^2 + v_0^2 + (2nh+w_0)^2]^{\frac{1}{2}} \\ r'_{nj+} &= [(u-u_0)^2 + v_0^2 + (2nh+w_0+2z_s)^2]^{\frac{1}{2}} \\ r_{nj-} &= [((u-u_0)^2 + v_0^2 + (2nh-w_0-2z_s)^2)^{\frac{1}{2}} \\ r'_{nj-} &= [(u-u_0)^2 + v_0^2 + (2nh-w_0)^2]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (6)$$

이러한 계산은 좌표축의 변환에 의해서 달성되며, xyz 좌표가 uvw 좌표값으로 식 (7)과 같이 변환이 가능하다.

$$\begin{aligned} x &= u \cos \alpha - v \sin \alpha + x_s \\ y &= u \sin \alpha + v \cos \alpha + y_s \\ z &= w + z_s \\ z_s &= z_p = e \end{aligned} \quad (7)$$

식 (4)와 (5)를 함수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$dV = \theta(w_0) + \theta(w_0 + 2z_s) \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \theta(w_0) &= \frac{\rho_1 i du}{4\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{(u-u_0)^2 + v_0^2 + w_0^2}} \right. \\ &+ \sum_{n=1}^\infty k^n \left(\frac{1}{\sqrt{(u-u_0)^2 + v_0^2 + (2nh+w_0)^2}} \right. \\ &\left. \left. + \frac{1}{\sqrt{(u-u_0)^2 + v_0^2 + (2nh-w_0)^2}} \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 전체적인 도체에 의한 M 점에서의 전위는

$$V = \int_{u_s=0}^{u_p} \theta(w_0) du + \int_{u_s=0}^{u_p} \theta(w_0 + 2z_s) du \quad (10)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \int_0^{u_p} \theta(w_0) du &= \frac{\rho_1 i}{4\pi} \left[\ln \left(\frac{u_p - u_0 + \sqrt{(u_p - u_0)^2 + v_0^2 + w_0^2}}{-u_0 + \sqrt{u_0^2 + v_0^2 + w_0^2}} \right) \right. \\ &+ \sum_{n=1}^\infty k^n \ln \left(\frac{(u_p - u_0) + \sqrt{(u_p - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh + w_0)^2}}{-u_0 + \sqrt{u_0^2 + v_0^2 + (2nh + w_0)^2}} \right) \\ &\left. + \sum_{n=1}^\infty k^n \ln \left(\frac{(u_p - u_0) + \sqrt{(u_p - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh - w_0)^2}}{-u_0 + \sqrt{u_0^2 + v_0^2 + (2nh - w_0)^2}} \right) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

$\int_0^{u_p} \theta(w_0 + 2z_s)$ 는 식(9)에서 w_0 대신에 $w_0 + 2z_s$ 을 대입

함으로써 얻어질 수 있다. 따라서 V 는 다음과 같은 간단한 형태로 표현될 수 있다.

$$V = \frac{\rho_1 I}{4\pi L} \psi[u_p, u_0, v_0, w_0] + \psi[u_p, u_0, v_0, (w_0 + 2z_s)] \quad (12)$$

3. 침수에 의한 전위 분포의 계산

저압 지중 접속함의 침수시에 누전에 의한 지표면 전위 분포를 계산하여 보폭전압에 의한 재해 위험을 평가하기 위한 시뮬레이션을 위하여 지중 저압 접속함이 침수된 모양을 그림 2와 같이 모델링하였다.

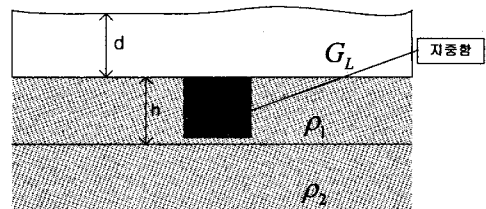


그림 2 침수된 지중함 모델링

그림에서 보는 바와 같이 등가적으로 2층 구조를 갖는 대지구조에 저압 지중함을 설치하였으며, 저압 지중함의 내부에 설치되어 있는 배전선로의 케이블 연결점은 침수 깊이와 시간에 따라 절연이 나빠져서 절연 열화 등으로 인하여 누설전류가 발생되고, 최악의 경우에 누설전류의 크기가 매우 커

질 수 있다. 본 연구에서는 계산의 편의성을 위하여 누설전류의 크기를 1[A]로 고정하고, 두 가지의 2층 등가 대지구조 모델($\rho_1 > \rho_2$ 인 경우와 $\rho_1 < \rho_2$ 인 경우)를 가정하여 침수된 물의 저항률을 40, 60, 80, 100 및 120[Ω -m]에 대하여 침수깊이를 0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 및 1.0[m]로 변화시키면서 절연 열화된 케이블의 누전점의 위치를 0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 및 0.6에 위치하는 각각의 경우에 대하여 저압 지중 접속함의 중심을 기준으로 사방으로 6[m]의 지역에서 전위분포를 계산하였다. 일반적으로 물의 저항률이 흙탕물인 경우에 40~60[Ω -m], 지하수는 80~100[Ω -m]와 지표수는 120[Ω -m]를 대표적인 값으로 적용하였다. 이 때 적용한 저압 지중접속함의 크기는 500×750×650[mm]로 하였다. 표 2는 본 연구에서 사례 연구를 위하여 지표면 전위와 위험전압을 계산한 각각의 경우를 보인 것이다.

<표 2> 저압 지중함의 침수 조건

대지구조	물의 저항률 [Ω -m]	침수깊이 [m]	누전 위치 [m]	비 고
모델 1 ($\rho_1 > \rho_2$)	40	0.0	0.01	
		0.1	0.1	
	60	0.3	0.2	
	80	0.5	0.3	
	100	0.7	0.4	
	120	1.0	0.5 0.6	
모델 2 ($\rho_1 < \rho_2$)	40	0.0	0.01	
		0.1	0.1	
	60	0.3	0.2	
	80	0.5	0.3	
	100	0.7	0.4	
	120	1.0	0.5 0.6	

4. 침수조건 별 전위 분포

4.1. 침수 저항률별 전위분포

그림 3과 4는 대지구조 모델1($\rho_1 = 100[\Omega$ -m], $\rho_2 = 500[\Omega$ -m], $h = 1.0[m]$)에서 침수수질의 저항률을 40[Ω -m], 누전점의 위치가 0.3[m], 침수 깊이를 0.3[m]일 경우와 침수수질의 저항률을 120[Ω -m], 누전점의 위치가 0.3[m], 침수 깊이를 0.3[m]일 경우에 대한 전위의 분포를 나타낸 것으로서, (0,0)인 좌표 점에 저압 지중접속함의 중심이 설치

되어 있고, 이 중심점을 기준으로 사방 6[m] 주변의 전위 분포를 계산한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 같은 조건에서 침수된 수질에 따라 전위분포가 다르게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

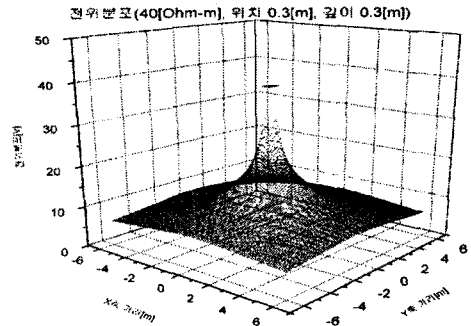


그림 3. 침수시의 전위분포(대지구조 모델1, 침수저항률 40[Ω -m], 누전점 0.3[m], 침수 깊이 0.3[m])

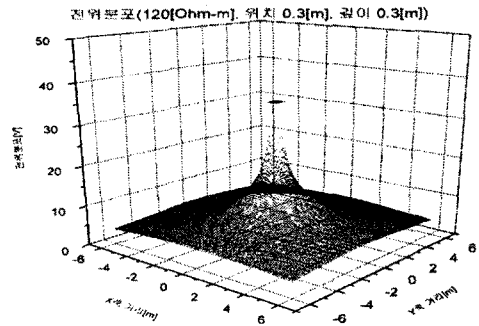


그림 4. 침수시의 전위분포(대지구조 모델1, 침수저항률 120[Ω -m], 누전점 0.3[m], 침수 깊이 0.3[m])

4.2. 침수 깊이별 전위분포

그림 5와 6은 대지구조 모델1에서 침수 수질의 저항률이 60[Ω -m], 누전점의 위치가 0.1[m], 침수 깊이가 0.0[m]인 경우와 침수 수질과 누전점의 위치는 같고 침수 깊이가 1.0[m]인 경우에 대한 각각의 전위분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 경우의 최고 전위가 비슷한 것으로 보이지만 그림 54는 침수깊이가 0.0[m]이므로 건조시의 전위를 나타내는 것이고, 그림 55는 침수가 완전히 된 경우로서 매우 위험한 상태임을 알 수 있다. 대지전위의 분포는 대지구조에 따라 전위 분포의 모양과 크기가 많은 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

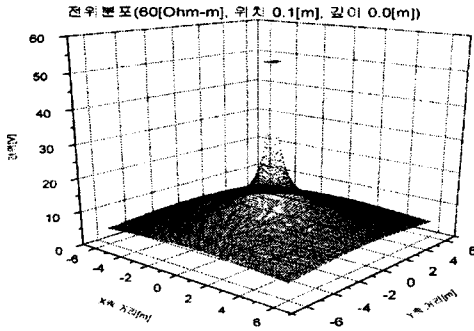


그림 5. 침수시의 전위분포(대지모델1, 침수저항률 60[Ω-m], 누전점 0.1[m], 침수깊이 0.0[m])

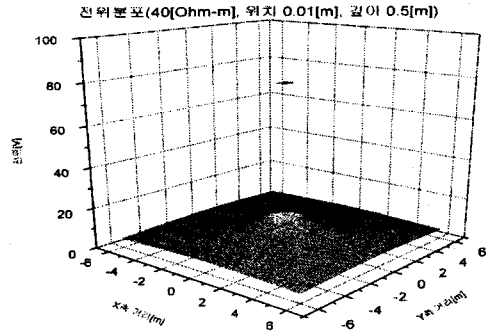


그림 7. 침수시 전위분포(대지모델1, 침수저항률 40[Ω-m], 누전점 0.01[m], 침수깊이 0.5[m])

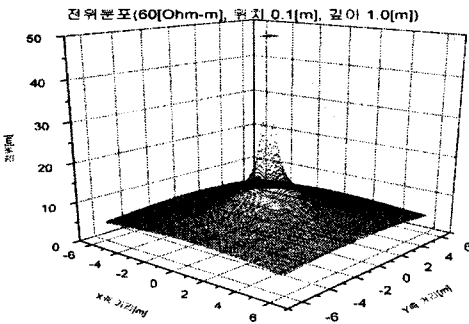


그림 6. 침수시의 전위분포(대지모델1, 침수저항률 60[Ω-m], 누전점 0.1[m], 침수깊이 1.0[m])

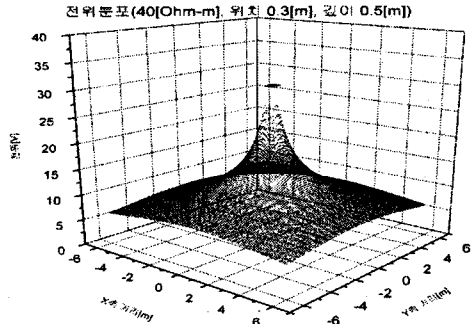


그림 8. 침수시 전위분포(대지모델1, 침수저항률 40[Ω-m], 누전점 0.3[m], 침수깊이 0.5[m])

4.3. 누전점 위치별 전위분포

그림 7과 8은 대지구조 모델1에서 침수 수질의 저항률이 40[Ω-m], 누전점의 위치가 0.01[m], 침수 깊이가 0.5[m]인 경우와 침수 수질과 침수 깊이는 같고 누전점의 위치가 0.30[m]인 경우에 대한 각각의 전위분포를 나타낸 것이다.

5. 침수조건 별 보폭전압 분포

저압 지중함이 침수가 되어 케이블의 접속부 등에서 누설전류가 발생한 경우에 누설전류에 의하여 지표면에 전위분포가 발생하며, 이 때 인체의 위험전압으로 작용하는 것은 주로 보폭전압이 된다.

5.1. 침수 저항률별 보폭전압분포

그림 9와 10은 대지구조 모델1($\rho_1 = 100[\Omega-m]$,

$\rho_2 = 500[\Omega-m]$, $h = 1.0[m]$)에서 침수수질의 저항률을 40[Ω-m], 누전점의 위치가 0.3[m], 침수 깊이를 0.3[m]일 경우와 침수수질의 저항률을 120[Ω-m], 누전점의 위치가 0.3[m], 침수 깊이를 0.3[m]일 경우에 대한 보폭전압의 분포를 나타낸 것으로서, (0,0)인 좌표 점에 저압 지중점속함의 중심이 설치되어 있고, 이 중심점을 기준으로 사방 5[m] 주변의 전위 분포를 계산한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 같은 조건에서 침수된 수질에 따라 보폭전압의 분포가 다르게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

5.2. 침수 깊이별 보폭전압분포

그림 11, 12는 대지구조 모델1에서 침수 수질의 저항률이 60[Ω-m], 누전점의 위치가 0.1[m], 침수 깊이가 0.0[m]인 경우와 침수 수질과 누전점의 위치는 같고 침수 깊이가 1.0[m]인 경우에 대한 각각

의 보폭전압의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 경우의 최고 보폭전압의 크기는 비슷한 것으로 보이지만 그림 60은 침수깊이가 0.0[m]이므로 건조시의 전위를 나타내는 것이므로 저압 지중접속함의 뚜껑부분에서는 위험한 것으로 나타나며, 그림 12는 침수가 완전히 된 경우로서 저압 지중접속함의 뚜껑부분 만이 아니라 주변에서도 매우 위험한 상태임을 알 수 있다.

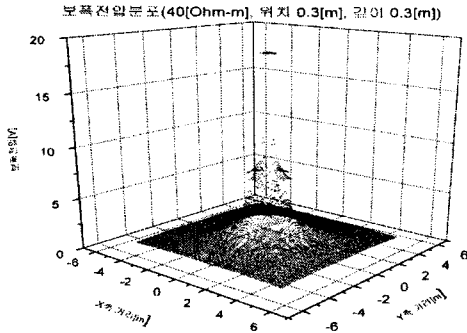


그림 9. 침수시의 보폭전압 분포(대지모델1, 침수저항률 40[Ω-m], 누전점 0.3[m], 침수 깊이 0.3[m])

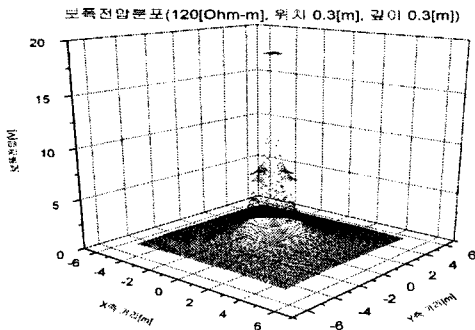


그림 10. 침수시의 보폭전압 분포(대지모델1, 침수저항률 120[Ω-m], 누전점 0.3[m], 침수 깊이 0.3[m])

5.3. 누전점 위치별 보폭전압분포

그림 13과 14는 대지구조 모델1에서 침수 수질의 저항률이 40[Ω-m], 누전점의 위치가 0.01[m], 침수 깊이가 0.5[m]인 경우와 침수 수질과 침수 깊이는 같고 누전점의 위치가 0.30[m]인 경우에 대한 각각의 보폭전압의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 누전점의 위치가 0.01[m]인 경우는 누전점이 거의 저압 지중접속함의 뚜껑에 붙어 있는 상태이므로 지중 접속함의 뚜껑에는

굉장히 높은 보폭전압을 나타내며, 뚜껑과 1[m] 이내에 근접한 지역에서는 매우 위험한 상태를 보여준다.

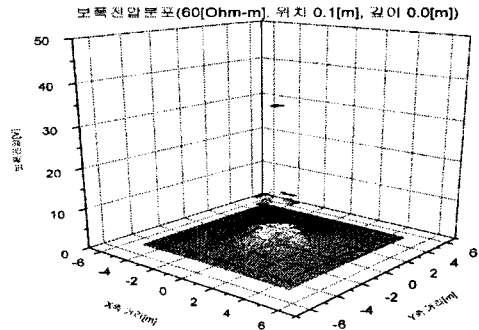


그림 11. 침수시의 보폭전압 분포(대지모델1, 침수저항률 60[Ω-m], 누전점 0.1[m], 침수 깊이 0.0[m])

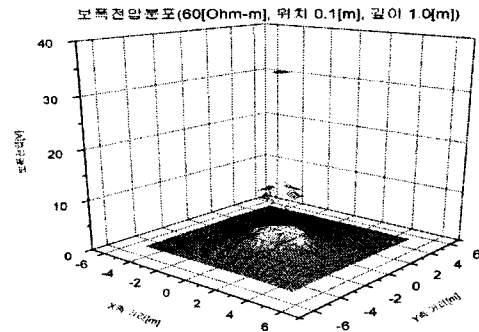


그림 12. 침수시의 보폭전압 분포(대지모델1, 침수저항률 60[Ω-m], 누전점 0.1[m], 침수 깊이 1.0[m])

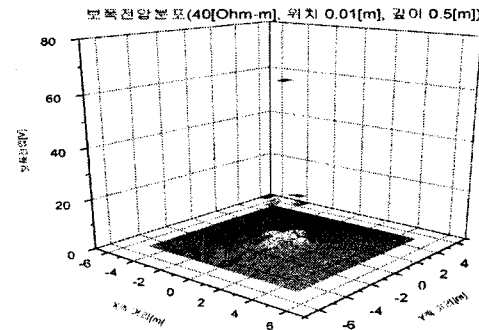


그림 13. 침수시의 보폭전압 분포(대지모델1, 침수저항률 40[Ω-m], 누전점 0.01[m], 침수 깊이 0.5[m])

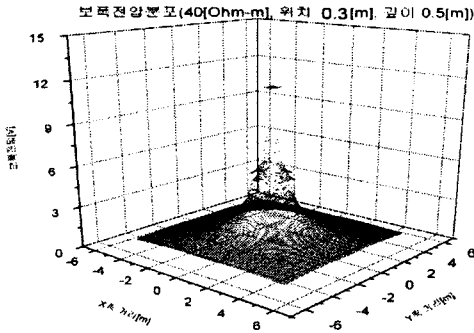


그림 14. 침수시 보폭전압 분포(대지모델1, 침수저항률 40[Ω-m], 누전점 0.3[m], 침수 깊이 0.5[m])

6. 안전성 평가

저압 지중 접속함이 침수가 되어 케이블의 접속부에서 누설전류가 발생한 경우에 누설전류에 의하여 주변에 전위분포가 발생하며, 이 때 인체에 영향을 미치는 감전의 위험전압으로 작용하는 것이 주로 보폭전압이 된다. 침수의 깊이가 깊어서 주변의 인체가 완전히 물에 잠기는 경우도 발생할 수 있으며, 신체의 일부만이 물에 잠겨서 누설전류에 노출될 수도 있다. 침수 깊이가 0.8[m] 이상인 경우에 인체의 대부분이 수중에 있는 상태가 되어 허용접촉 또는 보폭전압이 2.5[V] 이하가 되어야 한다. 보폭전압의 위험도에서는 지중 접속함을 중심으로 전위분포의 전위경도가 급격한 지점에서는 위험한 것으로 판단되며, 전위경도가 완만한 지역에서는 안전한 것으로 판단된다.

7. 결론

본 연구에서는 저압 지중선로용 접속함에서 발생하기 쉬운 누전 등의 사고에 의하여 인체에 전기재해(감전)의 위험성을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 통하여 건조 시와 침수시의 침수 조건에 의하여 나타나는 지표면의 전위분포를 계산하였다. 계산된 전위분포로부터 침수 조건에 따른 인체의 감전 위험성을 평가하였다.

저압 지중함의 케이블 접속부에서 발생한 누설전류가 인체에 감전의 위험 영향을 미치는 것은 보폭전압이며, 침수의 깊이가 깊어서 저압 지중함 주변의 인체가 일부만 잠기는 경우에는 접촉전압과 같은 효과로서 감전 위험성으로 작용할 수 있다. 따라서 침수깊이가 깊은 경우를 제외한 경우라면 지중 접속함을 중심으로 전위분포의 전위경도가 급격한 지점에서는 감전의 위험성이 높으며, 전위경도가 완만한 지역에서는 안전한 것으로 판단된다.

추후 침수된 물의 깊이와 접속함의 케이블 접속부에서 발생하는 누설전류의 크기 결정 방법에 대한 좀 더 깊이 있는 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] 심건보, 김경철, 김한상, 김종민, “시뮬레이션에 의한 저압 지중함의 안전성 평가”, 한국조명·전기설비학회 추계 학술대회 논문집, 2006. 11
- [2] 高橋健彦, 이형수역, 接地設計 入門, 동일출판사, 음사, 1993.
- [3] 高橋健彦, 이형수역, 接地技術 入門, 동일출판사, 음사, 1995.
- [4] 정종만 외, 지중 저압접속함의 침수조건에 따른 전위 분석, 한국조명전기설비학회 2006춘계 논문집