

가로등의 지중전로 손상으로 인한 인체감전 위험성에 대한 실험 연구

정재희

서울산업대학교 안전공학과

(2009. 9. 14. 접수 / 2009. 10. 14. 채택)

Human Experimental Studies on the Risk of Electric Shock due to Damage of Underground Wire in Street Lamp

Jaehee Chung

Department of Safety Engineering, Seoul National University of Technology

(Received September 14, 2009 / Accepted October 14, 2009)

Abstract : This study performed an experiment for the danger of an electric shock in the human body, which is directly touched or approached to the exposure of buried metals in a leak caused by certain ground faults at a buried cable in street lamp. In the results of the experiment, the dangerous of electric shocks due to the earth specific resistance and wet and submersion of the earth surface represents a high level as the human body is directly touched to the buried metal at a leak point. In addition, it can be seen that the safety of the human body is influenced by the earth specific resistance, separated distance from buried metals, and shape of buried metals at around the leak point.

Key Words : electric shock, ground faults, safety of the human body, touch voltage

1. 서 론

2001년 전국을 휩쓴 홍수시 침수된 전기설비에 의한 감전으로 인해 많은 사람이 희생되었음은 주지된 사건이며 이로 인하여 가로등과 같은 도로시설물의 안전에 대한 사회적 관심이 높아졌다. 또한, 2007년 계절에 따른 감전사고의 발생률을 보면 여름철인 6월에서 8월까지 3개월간의 감전사상자가 222명으로 전체의 34.2%를 점유하고 있으며¹⁾, 홍수가 잘 일어나는 7월과 8월의 2001년 이후 감전사고로 인한 사상자는 다음 Table 1과 같이 상당히 많이 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

이렇듯 여름철에는 높은 습도 및 물기로 누전이 되기 쉬우며, 주변에 습기와 물기가 많으므로 감전사고를 쉽게 유발할 수 있어 우리 주변에 흔히 있

Table 1. Electric shock casualty in summer¹⁾

[단위: 명]

월	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
7월	131	114	101	98	95	68	87
8월	129	95	91	81	65	104	81

joung@snut.ac.kr

는 가로등과 같은 도로시설물 등으로 인한 전기감전사고가 지속적으로 발생하여 심각한 우려를 낳고 있다.

따라서, 본 연구에서는 가로등의 지중전로에서 전선의 절연손상으로 인한 누전이 주변의 매설금속체에 직접 접촉 또는 근접한 경우 동 금속체의 지상부에 접촉하는 인체감전 위험성을 분석하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 실험의 모의

지중전로에서의 누전에 의한 인체감전 위험성을 분석하고자 본 연구의 실험은 IEC 61936-1, 10.5 항²⁾과 CENELEC HD 637 S1 부속서G³⁾에 나타난 측정방법을 적용하였으며, 적용된 측정방법을 보면, 다음과 같다.

- ① 인체저항을 대신하는 저항의 양단에 나타나는 유효 접촉전압(이하 ‘접촉전압’) 측정에 있어 인체저항을 $1k\Omega^6$ 으로 모의한다.
- ② 발(足)을 모의하는 측정접지극(足電極)은 전면적(全面積) $400cm^2$ 로서 최소 500N의 힘을 가

- 해야 한다(Fig 1 참조).
- ③ 만일 추가저항을 고려하지 않는다면 지중(地中)에는 적어도 20cm 깊이로 매설한 접지봉을 전극으로 사용할 수 있다(Fig 2 참조). : 본 실험에서 적용
 - ④ 접촉전압의 측정시 전극은 설비의 노출도전성부분으로 1m 거리에 설치하여야 한다.
 - ⑤ 손(手)모의용 전극은 확실하게 도장막(塗裝膜)을 관통할 수 있는 것이어야 한다.
 - ⑥ 전압계의 1단자는 손전극에, 다른 단자는 족전극에 접속한다.
 - * 접촉회로로의 전원전압(USTP)의 개략치를 쉽게 알 수 있는 방법으로 높은 내부저항의 전압계로 측정시 탐침은 10cm 깊이로 충분하다(Fig 3, IEC 60936-1의 예상 접촉전압).

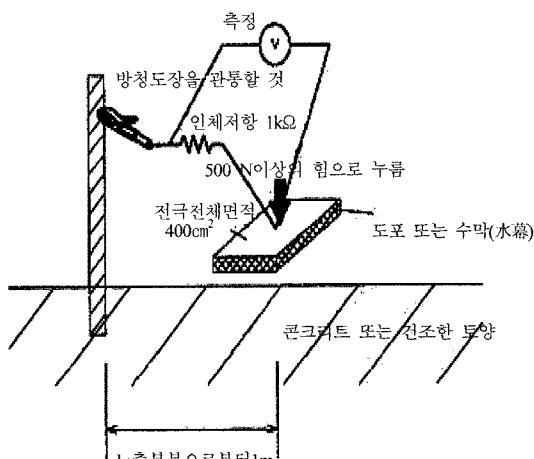


Fig. 1. Method for simulation of human body.

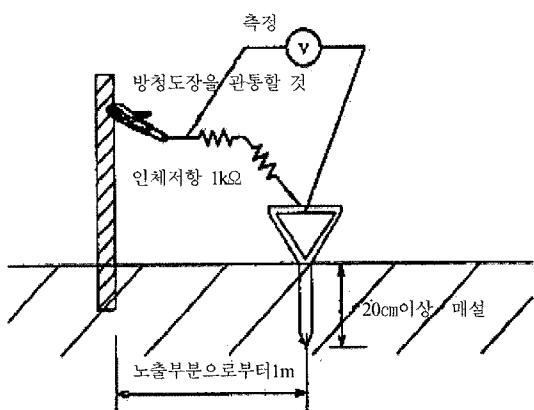


Fig. 2. Probe method(use ground rods instead of foot electrode, touch voltage).

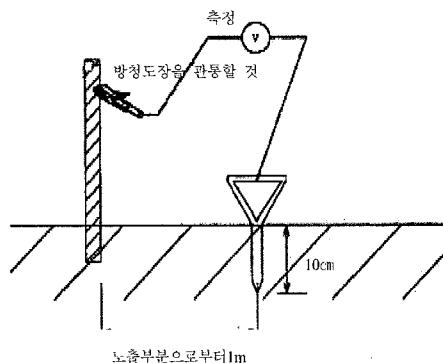


Fig. 3. Method of simplified measurement(anticipated touch voltage).

이러한, 측정방법을 적용하여 건조한 상태, 젖은 상태, 침수상태의 환경을 모의하였으며, 지중 60cm에 매설된 가로등 전선에 약 5cm 정도의 절연손상이 발생된 상황을 가정하여 다음과 같이 구성하였다.

- ① 손상된 지점으로부터 10cm, 20cm, 30cm 거리에 금속체가 매설되어 있음을 구성
- ② 대지가 젖은 경우와 침수된 경우를 고려하여 젖은상태 및 침수상태로 모의
- ③ 대지고유저항이 낮은 경우를 고려하여 누전 점의 국소대지저항 $120\Omega \cdot m$ 로 구성

2.2. 실험환경 및 측정방법

2.2.1. 실험환경

인체의 저항은 $1k\Omega$ 과 현저히 젖었을 경우인 500Ω 을 가정^{4,6)}하였으며, 상용전원과의 간섭을 피하기 위하여 절연변압기를 사용하고, 절연변압기의 2차 측의 1상을 상용전원의 2종접지극과 접속하여 일반적인 가로등의 배전상황과 유사한 조건을 모의하였다. Table 2는 모의환경에 따른 대지조건을 나타내었다.

2.2.2. 건조상태

전국의 대지고유저항 분포가 $30\Omega \cdot m$ 정도에서 $4,000\Omega \cdot m$ 정도⁷⁾로 다양하므로 대지고유저항이 실

Table 2. Ground condition of experimental environment

	대지고유저항($\Omega \cdot m$)	지표면상태
실험환경 I	$375.1(1m \text{ 깊이}) \sim 229.2(8m \text{ 깊이}) (120)*$	건조상태
실험환경 II	$375.1(1m \text{ 깊이}) \sim 229.2(8m \text{ 깊이})$	젖은상태
실험환경 III	$375.1(1m \text{ 깊이}) \sim 229.2(8m \text{ 깊이})$	침수상태

* 지락점과 인근 P10, P20, P30 매설장소의 국소 대지고유저항

험장소보다 낮은 곳의 경우를 모의하기 위해서 누전점과 매설금속체 모의용 동관이 묻혀 있는 부분만 $120\Omega \cdot m$ 의 토양으로 채우고(대략 가로: 40cm, 세로: 40cm, 깊이: 10cm), 건조상태에서 실험을 실시하였다.

누전점 가까이 있는 매설금속체가 지상으로 노출되어 대지와 접촉되지 않은 상태로 상당한 거리까지 연장되었을 때 전도에 의한 접촉전압을 모의하기 위해 인체저항을 $1k\Omega$ 으로 설정하여 아래와 같이 4가지 조건으로 구분하여 누전점으로부터 거리별로 지표면과의 전위차를 측정하였다.

① 측정조건 1(P_{10} 과 Pipe 연결)

- 전원방향 인가전압 220V, 누설전류 615mA
- 전원반대 방향 : 인가전압 220V, 누설전류 453mA

② 측정조건 2(P_{30} 과 Pipe 연결)

- 전원방향 인가전압 220V, 누설전류 595mA
- 전원반대 방향 : 인가전압 220V, 누설전류 592mA

③ 측정조건 3(P_{10} 과 Pipe 연결)

- 인가전류 200mA, 인가전압 75V

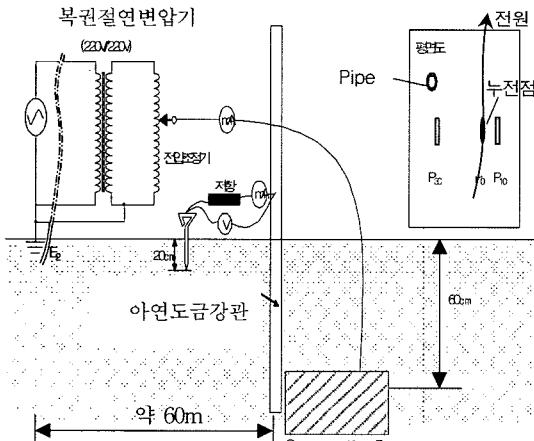


Fig. 4. Configuration of the test set-up on dry condition.

Table 3. The results of measuring in case of test condition

구분		거리[m]	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3	3.3
전원 방향	접촉전압[V]	17.4	22.4	23.1	24.2	25.8	28.1	26.5	27.6	29.1	43	41.6	
	감전전류[mA]	16.63	21.48	22.3	22.7	21.6	25.9	25.8	26.4	27.7	41.5	40.1	
	예상접촉전압[V]	38.8	51.2	63	73.4	81.3	87.1	91.6	95.4	98.2	101	101.9	
전원 반대 방향	접촉전압[V]	20	24.5	17.9	14.4	24.3	23.3	40.9	43.2	38.4	44.3	42.9	
	감전전류[mA]	13.4	23.5	17.1	13.8	23	27.9	39.4	41.5	37.1	42.5	41.5	
	예상접촉전압[V]	49.2	59.8	67.3	75.9	82.7	86.3	88.8	91.4	93.7	95.7	97.0	

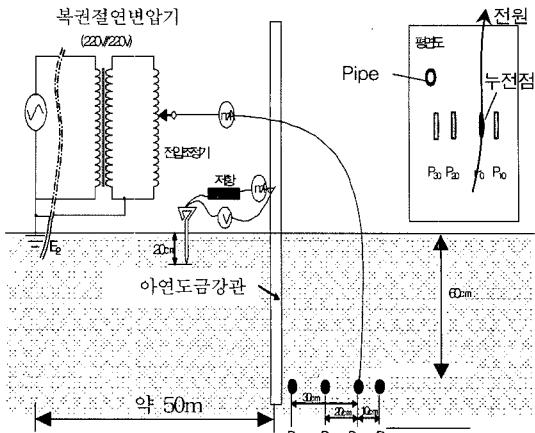


Fig. 5. Configuration of the test set-up on water-wet and submerged condition.

④ 측정조건 4(P_{30} 과 Pipe 연결)

- 인가전류 200mA, 인가전압 71V

2.2.3. 젖은상태 및 침수상태

실험 현장의 대지 조건은 빗물로 인하여 현저히 젖었을 경우와 지표면이 침수된 경우를 가정하였으며, 특히 침수된 경우는 지표면으로부터 10cm까지 수돗물을 채운상태로 실험을 하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1. 건조상태

3.1.1. 측정조건 1(P_{10} 과 Pipe 연결)

지중의 누전점에 220V를 인가하고 누전점으로부터 10cm 이격되어 지상으로 노출된 Pipe에 전도되는 전압을 측정한 결과 전원반대방향과 전원방향이 차이가 있었으며, Pipe와 30cm 떨어진 지점에서 예상 접촉전압은 전원방향이 38.8V, 전원반대방향이 49.2V, $1k\Omega$ 의 저항을 통하여 Pipe에 접촉시켰을 경우 접촉전압은 전원반대방향이 20V, 전원방향이 17.4V, 감전전류는 전원반대방향이 13.4mA,

전원방향이 16.63mA로서 가수전류범위(약 5mA)⁴⁾를 넘는 것으로 나타났다.

대지와 접촉되지 않은 상태로 거리가 멀어질수록 점점 증가하여 전원방향으로 3m 지점에서는 예상 접촉전압이 최대 101.1V, 1kΩ의 저항을 통하여 Pipe에 접촉시켰을 경우 접촉전압이 최대 43V이고 이 때 감전전류는 41.5mA로 나타났다.

3.1.2. 측정조건2(P₃₀과 Pipe 연결)

누전점에 220V를 인가하고 누전점으로부터 30cm 이격되어 지상으로 노출된 Pipe에 전도되는 전압을 측정한 결과 전원 반대방향과 전원방향에 차이가 있었으며, Pipe와 60cm 떨어진 지점에서 예상 접촉 전압은 전원방향이 20.6V, 전원반대방향이 35.9V, 1kΩ의 저항을 통하여 Pipe에 접촉시켰을 경우 접촉 전압은 전원방향이 8.1V, 전원반대방향이 12.2V, 감전전류는 전원방향이 7.6mA, 전원반대방향이 11.4mA로서 가수전류범위를 넘는 것으로 나타났다.

지상으로 노출된 매설금속체가 대지와 접촉되지 않은 상태로 거리가 멀어질수록 전위차는 점점 증가하여 전원방향으로 3m 지점에서는 예상접촉전압이 65.3V, 1kΩ의 저항을 통하여 접촉시켰을 경우 접촉전압이 25.5V이고 이 때 감전전류는 24.2mA로 나타났다.

3.1.3. 측정조건3(P₁₀과 Pipe 연결)

누전점에 200mA를 누설시킨 상태에서 누전점으로부터 10cm 가량 근접된 매설금속체가 지상으로 노출된 경우 대지간 전위분포를 측정한 결과 예

Table 4. The results of measuring in case of test condition 2

구분	거리[m]	0.6	1	3	6	9
전원 방향	접촉전압[V]	8.1	13.5	25.5	21.7	25.5
	감전전류[mA]	7.6	12.8	24.2	20.5	23.5
	예상접촉전압[V]	20.6	32.1	65.3	72.9	74.3
전원 반대 방향	접촉전압[V]	12.2	11.7	26.2	28.5	20.8
	감전전류[mA]	11.4	11.2	25.08	26.1	19.12
	예상접촉전압[V]	35.9	45.1	65	68.4	71.6

Table 5. The results of measuring in case of test condition 3

구분	거리[m]	1	3	6	9
200mA 누설 75V 인가	접촉전압[V]	4.1	12.9	12.8	13.7
	감전전류[mA]	3.88	12.35	12.11	13.1
	예상접촉전압[V]	25.2	31.5	32.8	33.32

Table 6. The results of measuring in case of test condition 4

구분	거리[m]	1	3	6	9
71V 인가 200mA 누설	접촉전압[V]	4.22	7.90	9.53	8.19
	감전전류[mA]	4	7.5	9.07	7.80
	예상접촉전압[V]	14.12	20.60	22.37	22.57

상접촉전압은 25.2V, 접촉전압은 4.1V로 나타났고 이때의 감전전류는 3.88mA로 나타났다.

대지와 접촉하지 않고 3m 이상 연장된 경우 예상 접촉전압 31.5V, 접촉전압 12.9V, 이때 감전전류는 12.35mA로 감전위험성이 있는 것으로 나타났다.

3.1.4. 측정조건4(P₃₀과 Pipe 연결)

누전점에 200mA를 누설시킨 상태에서 누전점으로부터 30cm 가량 근접된 매설금속체가 지상으로 노출된 경우 대지간 전위분포를 측정한 결과 예상 접촉전압은 14.12V, 접촉전압은 4.22V로 나타났고 이때의 감전전류는 4mA로 나타났다.

대지와 접촉하지 않고 3m에서 예상접촉전압 20.60V, 접촉전압 7.9V로 이때의 감전전류는 7.5mA로 나타났으며, 9m 이격된 지점은 예상접촉전압 22.57V, 접촉전압 8.19V, 이때 감전전류 7.80mA로 가수전류범위에 있는 것으로 나타났다.

3.2. 젖은상태

3.2.1. 지중누전점이 매설금속체에 직접 접촉

지표면이 젖은 상태에서 200V를 인가한 지중누전점(P₀)이 매설금속체에 직접접촉한 경우 가로등 지중전로의 절연손상 등의 원인으로 누전이 되고

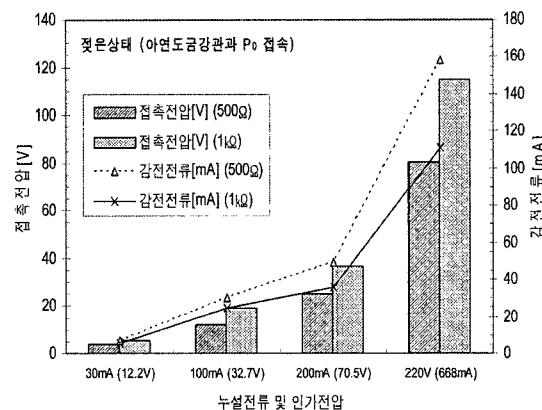


Fig. 6. The touch voltage and induced current in accordance with the applied voltage and leakage current when it coupled galvanized steel pipe with P₀ in water-wet condition.

있는 상태에서 누전점(P_0)이 매설금속체에 직접 접촉되어 대지전압 220V로 충전되었을 때, 인체가 젖은상태에서 이 매설금속체에 접촉하는 경우 인체감전전류는 110.8mA(인체저항 1k Ω)~158.2mA(인체저항 500 Ω), 접촉전압은 114.7V(인체저항 1k Ω)~80.6V(인체저항 500 Ω)로 나타나 감전위험성은 매우 높은 것으로 나타났다.

3.2.2. 100~200mA 누설시 지중누전점과 매설금속체 직접 접촉

지중전로에 100~200mA를 누설시켰을때 누전점(P_0)과 매설금속체가 직접 접촉된 경우 인체감전전류는 30.3mA(100mA 누설)~49.5mA(200mA 누설), 접촉전압은 12.24V(100mA 누설, 인체저항 500 Ω)~36.8V(200mA 누설, 인체저항 1k Ω)로 감전위험성이 큰 것으로 나타났다. 또한, 30mA를 누설시킨 경우에는 7.3mA(인체저항 500 Ω)로 가수전류 범위에 있으나 사람에 따라 쇼크를 받을 수 있는 것으로 나타났다.

3.2.3. 지중누전점과 매설금속체가 10~30cm 이격된 경우

200V를 인가한 지중누전점(P_0)에서 10cm떨어진 매설금속체에 인체가 접촉하는 경우 인체감전전류는 8.05mA(인체저항 500 Ω)로 가수전류에 근접하여 인체가 쇼크를 받을 수 있는 것으로 나타났고, 20~30cm에서는 감전위험성은 극히 낮은 것으로 나타났다.

3.3. 침수 상태

3.3.1. 지중누전점이 매설금속체에 직접 접촉

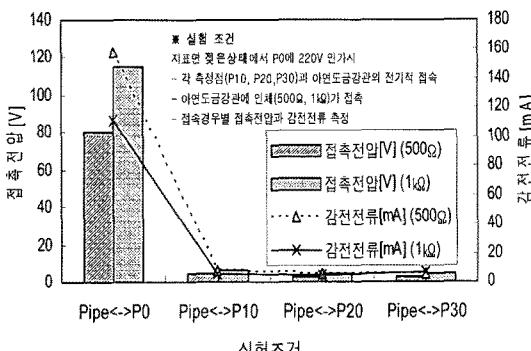


Fig. 7. The touch voltage and induced current in accordance with the applied 220 voltage and leakage current when it coupled galvanized steel pipe with P_0 in water-wet condition.

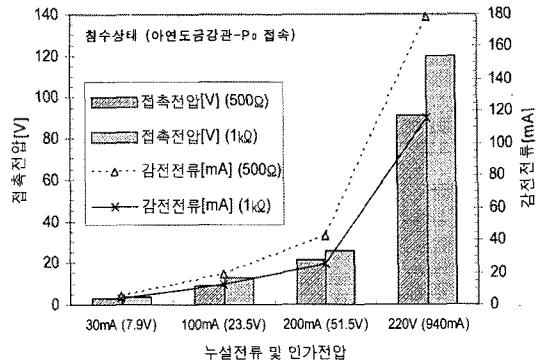


Fig. 8. The touch voltage and induced current in accordance with the applied voltage and leakage current when it coupled galvanized steel pipe with P_0 in submerged condition.

지표면이 침수된 상태에서 220V를 인가한 지중누전점(P_0)이 매설금속체와 직접 접촉한 경우 가로등 지중전로의 결연소상 등의 원인으로 누전이 되고 있는 상태에서 누전점(P_0)이 매설금속체에 직접 접촉되어 대지전압 220V로 충전되었을 때, 인체가 젖은상태에서 이 매설금속체에 접촉하는 경우 인체감전전류는 115.4mA(인체저항 1k Ω)~178.7mA(인체저항 500 Ω), 접촉전압은 119.7V(인체저항 1k Ω)~91.2V(인체저항 500 Ω)로 나타나 감전위험성은 매우 큰 것으로 나타났다.

3.3.2. 100~200mA 누설시 지중누전점과 매설금속체 직접 접촉

지중전로에서 100~200mA를 누설시켰을때 누전점(P_0)과 매설금속체가 직접 접촉된 경우 인체감전전류는 12.34mA(100mA 누설, 인체저항 1k Ω)~42.5mA(200mA 누설, 인체저항 500 Ω), 접촉전압은

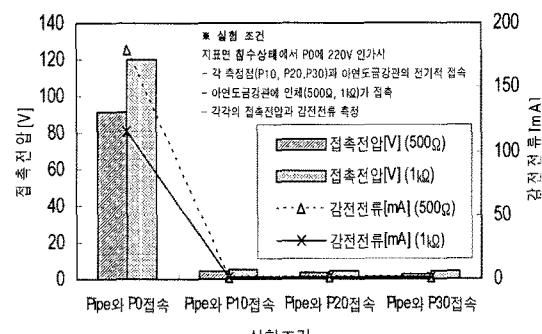


Fig. 9. The touch voltage and induced current in accordance with the applied 220 voltage and leakage current when it coupled galvanized steel pipe with P_0 in submerged condition.

25.7V(200mA 누설, 인체저항 1k Ω)~9.46V(100mA 누설, 인체저항 500 Ω)로 감전위험성이 큰 것으로 나타났다. 또한, 30mA를 누설시킨 경우에는 5.72mA(인체저항 500 Ω)로 나타났다.

3.3.3. 지중누전점과 매설금속체가 10~30cm 이격된 경우

200V를 인가한 지중누전점(P₀)에서 10cm떨어진 매설금속체에 인체가 접촉하는 인체감전전류는 1.81mA(10cm이격, 인체저항 500 Ω), 접촉전압은 5.45V(인체저항 1k Ω) 이하로 감전위험성은 아주 낮은 것으로 나타났다.

3.4. 실험결과의 분석

3.4.1. 건조상태에서의 감전위험성

건조상태에서는 대지고유저항을 변화시켰을 때 매설금속체에 전도되는 전압은 누전점으로부터 이격된 매설금속체가 지상으로 노출되었을 때 대지와 접촉되지 않은 상태로 연장되는 거리가 길어질수록 접촉전압과 인체감전전류가 커지는 것으로 나타났다.

교류 220V를 인가한 누전점으로부터 3m 떨어진 경우 이격거리가 10cm인 매설금속체의 예상접촉전압은 101V, 접촉전압 43V, 이때의 감전전류는 41.5mA로 나타났고 이격거리가 30cm인 경우에 예상접촉전압 65.3V, 접촉전압 25.5V 이때 감전전류는 24.2mA로 감전위험성이 있는 것으로 나타났다.

3.4.2. 젖은상태에서의 감전위험성

젖은상태에서 누전점에 30mA의 전류가 누설시 누전점과 직접 접촉된 매설금속체의 예상접촉전압은 11.25V, 접촉전압은 5.66V(인체저항 1k Ω)~3.7V(인체저항 500 Ω)로 나타났고 이때 인체감전전류는 5.46mA(인체저항 1k Ω)~7.3mA(인체저항 500 Ω)로 나타나 가수전류 범위에 있어 감전위험성이 있는 것으로 나타났다. 또한 누전점에 220V의 전압을 인가시 누전점에서 10~30cm 이격된 매설금속체의 예상접촉전압은 8.2V(30cm 이격)~12V(10cm 이격), 접촉전압은 2.8V(인체저항 500 Ω , 30cm 이격)~6.3V(인체저항 1k Ω , 10cm 이격)로 나타났고 이때 인체감전전류는 4.1mA(인체저항 1k Ω , 30cm 이격)~8.05mA(인체저항 500 Ω , 10cm 이격)로 나타나 인체가 젖은 경우 가수전류 범위이나 사람에 따라 감전위험성이 있을 수도 있는 것으로 나타났다.

3.4.3. 침수상태에서의 감전위험성

침수상태에서 누전점에 30mA의 전류 누설시 누전점과 직접 접촉된 매설금속체의 예상접촉전압은 5.3V, 접촉전압은 3.3V(인체저항 1k Ω)~3.83V(인체저항 500 Ω)로 나타났고 인체감전전류는 3.72mA(인체저항 1k Ω)~5.72mA(인체저항 500 Ω)로 가수전류 이하로 나타나 감전위험성은 낮은 것으로 나타났다. 또한 누전점에 220V 전압 인가시 누전점에서 10~30cm 이격된 점의 매설금속체의 예상접촉전압은 6.72V(30cm 이격)~8.15V(10cm 이격), 접촉전압은 2.93V(인체저항 500 Ω , 30cm 이격)~5.45V(인체저항 1k Ω , 10cm 이격)로 나타났고, 이때 인체감전전류는 1.09mA(인체저항 1k Ω , 30cm 이격)~1.81mA(인체저항 500 Ω , 10cm 이격)로 감전위험성이 낮은 것으로 나타났다.

이상의 실험결과에 의하면 누전점 가까이에 있는 매설금속체의 경우 접촉전압은 인체 감전시 감전전류로 인해 누전점과 매설금속체간 토양의 저항 영향으로 전압강하가 크게 일어나기 때문에 예상접촉전압보다 훨씬 낮게 나타났다. 이는 누전점 주변의 대지고유저항, 매설금속체와의 이격거리, 매설금속체의 형상 등에 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며 본 실험에서는 대지고유저항이 낮은 경우에 상대적으로 감전의 위험성이 높은 것으로 나타났다.

4. 결 론

가로등의 지중전선로에서 누전시 매설금속체와 직접 접촉하는 경우와 일정거리를 이격시킨 상태에서 이 매설금속체와 인체가 접촉하였을 경우 감전위험성에 대한 실험결과는 아래와 같다.

1) 지중전로 누전점의 매설금속체에 직접 접촉한 경우 이 구조물에 인체가 접촉시에는 지표면의 젖은상태와 침수상태 모두 감전위험성이 매우 큰 것으로 나타났다.

2) 지표면의 젖은 상태의 지중전로에서 매설금속체를 통한 누설전류를 30~200mA까지 변화시켰을 때 이 매설금속체의 지상부에 인체가 접촉할 경우 인체감전전류가 30.3mA(100mA 누설)로 감전위험성이 있는 것으로 나타났다.

3) 지중누전점 부근의 대지고유저항을 변화시켰을 때 누전점으로부터 이격된 매설금속체가 지상으로 노출되었을 때 매설금속체에 전도되는 전압은 대

지와 접촉되지 않은 상태로 연장되는 거리가 길어
질수록 접촉전압과 인체감전전류가 커지는 것으로
나타나 인체감전 위험성이 있는 것으로 나타났다.

따라서 지중전로에 의한 인체감전위험성은 대지
고유저항, 인접 금속매설체의 형상 등의 영향을 받
는 것으로 나타나 향후 심도 있는 연구가 필요한
것으로 판단된다.

감사의 글 : 본 논문은 지식경제부 전력산업기
반기금의 지원으로 수행된 연구입니다.

참고문헌

- 1) 한국전기안전공사, “전기재해통계분석”, 17호,
pp. 56~57, 2008.
- 2) EC 61936-1 “Power installations exceeding 1 kV ac.
Part-1 : Common rules”, pp. 161, 2002
- 3) CENELEC HD 637 S1, “Power installations exceeding
1 kV ac”, pp. 102, 1999.
- 4) IEC 60479-1, “Electrical installations and protection
against electrical shock”, pp. 14~16, 45~46, 2005.
- 5) IEC 61200-413, “Protection against electric shock
common aspects for installation and equipment”, pp.
14~18 1996.
- 6) IEEE Std. 80, “IEEE Guide for Safety in Ac Substa-
tion Grounding”, pp. 11~19, 2000.
- 7) 산업자원부, “가로등관련 전기설비기술기준 개
선방안 연구”, pp. 240~247, 2006.