

## 수중에서의 감전 메카니즘 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristic of Electric-Shock  
Mechanism in the Water

도 범 성\*

Do, Bum Sung

## Abstract

Recently electric shock accidents constantly occurs caused by the street lamps. Especially the chance of electric shock accident is high when the street lamp submerges by heavy rainfall. Electric shock accident occurs mostly on the low voltage facilities of 220V, but the awareness of its danger is insufficient. The electric shock accident by street lamp voltage of 220V is very dangerous because it is installed in the street which is easily in contact with people. But there are insufficient investigation concerning the affect to human body of underwater electric potential distribution as the distance changes from the leakage object in case of short circuit. In this thesis, the analysis will be made on the affect of underwater Earth leakage to human body and electric potential distribution in underwater, and to draw a comparison between electric shock channel and electric shock mechanism by experimenting on the affect to human body of underwater electric shock as the distance changes from the leakage object.

**key words** : Earth leakage, Electric shock, Underwater electric potential distribution

## 요 지

최근에 들어와 가로등에 의한 감전사고가 지속적으로 발생하고 있다. 특히 집중호우로 인해 가로등이 침수 될 경우 누전에 의한 감전 사고는 매우 높다. 전기감전사고가 발생할 경우 사고전압을 분석해 보면 주로 220V의 저압시설물에서 발생되고 있으나 이에 대한 위험성을 충분히 인식하지 못하고 있는 실정이다. 가로등 시설물의 사용전압 220V는 주로 일반인이 쉽게 접촉할 수 있는 도로변에 시설되어 있기 때문에 감전사고의 위험성은 매우 높은 편이다. 그러나 가로등 침수로 인해 누전이 발생했을 경우 누전체에서의 거리변화에 따른 수중전위분포가 인체에 미치는 영향을 연구하는 사례는 미약한 실정이다. 본 논문에서는 수중에서 누전이 발생했을 경우에 인체에 미치는 영향과 수중전위분포를 분석하고 수중에서 누전체와의 거리 및 깊이에 따른 변화가 어떻게 인체에 영향을 주는지 실험을 통하여 감전경로와 감전메카니즘을 비교 분석하고자 한다.

**핵심용어** : 누전, 전기감전, 수중전위분포

## 1. 서 론

최근에 들어와 가로등에 의한 감전사가 매년 지속

적으로 발생하고 있다. 특히 2001년에는 집중호우로 인해 가로등이 침수되었으나 누전차단기의 미 부착, 미 작동 등으로 인하여 도로 보행자의 인명손실을 가져왔다. 특히 가로등 사용전압 220V는 일반인이 쉽게

\* 정희원 · 서울산업대학교 에너지환경대학원 박사과정 (E-mail : ddh23@korea.com)

접촉할 수 있는 도로변에 시설되기 때문에 감전사고의 위험성은 매우 높다. 가로등은 도로시설물로 주의가 요구되는 시설물이지만 안전시설 미비와 전기안전에 대한 인식부족으로 가로등 침수시 도로 보행자의 감전 사고는 높은 편이다. 일반적으로 인체를 보호하기 위한 안전장치 시설로 누전차단기 설치와 접지시공 등의 방법이 있으나 기존의 가로등 시설물은 누전차단기의 미 설치와 접지시공 미비로 인체보호와 설비보호의 안전성에 문제점을 안고 있다. 국내 접지시공 경우 내선 규정기준을 따르고 있으나 접지저항값 변화에 따른 대책은 없는 실정이다. 국내의 배전선로측의 접지시스템은 다중접지방식(TN-C)을 기본으로 하고 있으며 수용가 측의 접지는 개별접지방식(TT)을 적용하고 있으나 이 또한 많은 문제점을 안고 있다. IEC 국제기준에서 제시하는 TN접지계통에 접근한 TN-S방식과 TN-S방식의 접지설계방법을 일부 제시 하였으나(감전예방을 위한 접지계통개선에 관한 연구, 2003 유재익) 누전체에서의 거리변화에 따라 수중전위분포가 인체에 미치는 영향을 연구하는 사례는 미약한 실정이다. 특히 가로등이 침수되어 누전이 발생했을 경우 수중전위분포를 알 수 없기 때문에 누전체로부터 거리 변화와 수중깊이에 따른 전위 변화가 어떻게 인체에 미치는지에 대한 연구사례는 전무하다. 본 연구에서는 수중에서 누전이 발생한 감전 상황을 실험을 통하여 인체에 미치는 감전위험성을 분석함으로써 누전체와의 거리와 수중깊이의 변화에 따라서 어떻게 인체에 미치는 지에 대한 감전 메카니즘을 파악하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

#### 2.1.1 수조와 가로등 제작

폭우로 인해 가로등이 침수되는 상황을 재현하기 위하여 가로 30cm, 세로 35cm, 길이 88cm인 수조를 제작하였고, 가로등 외함은 직경 11cm, 높이 62cm의

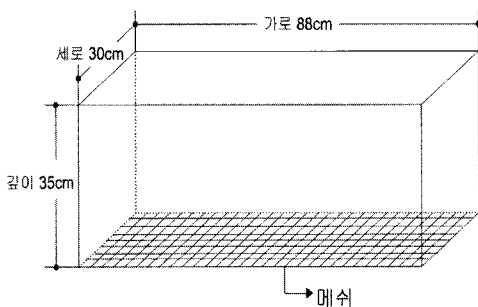


Fig. 1. 수조 바닥 메쉬 구성도

연통을 사용하였으며 외함에 하트선(H)을 연결하였고, 바닥으로부터 메쉬, 흙, 벽돌의 순서로 일반적인 인도를 가정하여 실험조건을 구성하였고, 메쉬에는 중성선(N)을 연결한다.

#### 2.1.2 시액 제작

가로등 침수시 시액 고유저항이 주변 환경적 조건에 따라 다르기 때문에 비온 뒤 자연적으로 형성된 시액을 가지고 고유저항을 측정하여 시액을 제작하였고 장시간의 실험으로 인하여 전도성물질 등의 침전으로 인한 전도도의 변화를 방지하기 위해 시액을 수시로 희석시켜 주면서 실험한다.

#### 2.1.3 실험장치 구성

수조에 설치된 가로등 외함에 만능전원장치로부터 나온 H선을 연결하고 이때 N선은 Fig. 4와 같이 수조 바닥에 설치된 메쉬와 연결한다. 수조 바닥에는 수조 바닥 크기만 한 메쉬를 Fig. 1과 같이 설치하고 그 위에 흙을 1.5cm 깔고 다시 그 위에 높이 5.5cm인 벽돌을 설치한다. 이때 가로등 외함으로부터 가로 1cm, 세로 4cm, 깊이 4cm 간격으로 수중전위를 측정하였고, 지름 8cm, 높이 24cm 시편을 가로등 외함으로부터 가로방향 5cm 간격으로 거리를 이격시키며 수중전위 변화를 측정한다. 실험장치 구성도는 Fig. 2와 같다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 시액 고유저항 측정

수조에 시액을 붓고 수조 양단 끝에 가로 30cm, 세로 24cm의 동판을 집어넣고 H선과 N선을 양극단에 접속시킨 후 220V(A.C)의 전압을 가한 상태에서 수조에서 양극단간에 흐르는 전류를 측정한다. 양극동판에 인가한 전압을 측정 전류 값으로 나누어 시액 저항 값을 구하고, 고유저항 값을 계산하는 방법은 다음과 같다.

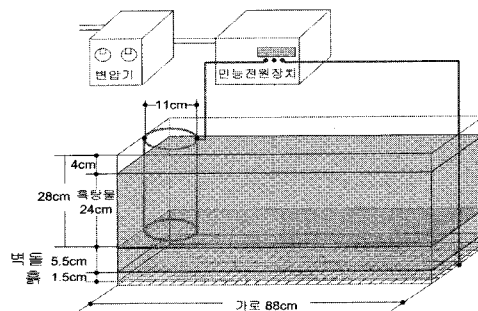


Fig. 2. 실험장치 구성도

$$\text{시액의 저항 } R = \frac{220}{\text{측정 전류값}}$$

$$[\Omega] = \frac{220 V}{0.695 A} = 316.5 [\Omega] \quad (1)$$

(1)의 값을 R에 적용시키고 고유저항을 구하기 위해서 다음공식에 대입하였다.

$$R = \rho \times \frac{l}{A} \Rightarrow$$

$$\text{시액의 고유저항 } \rho = \frac{A}{l} \times R \quad [\Omega \cdot m]$$

$$= \frac{0.072}{0.88} \times 316.5 = 25.9 [\Omega \cdot m]$$

위의 실험을 통하여 시액 고유저항은 25.9[Ω·m]임을 확인하였다.

### 2.2.2 시편 고유저항 측정

지름 8cm, 높이 24cm 원통형 시편의 양단에 동판을 연결하고, H선과 N선을 접속시킨 후 220V를 인가한 시편의 양극단간에 흐르는 전류 값을 [Fig. 2-3]과 같이 측정하였다. 양극동판에 인가한 전압을 측정 전류 값으로 나누어 시편 저항 값을 나타내었고, 고유저항을 계산하는 방법은 다음과 같다.

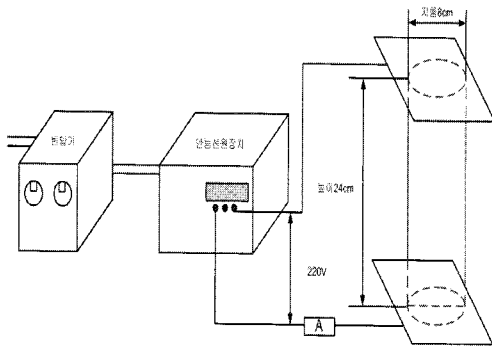


Fig. 3. 시편 고유저항 측정

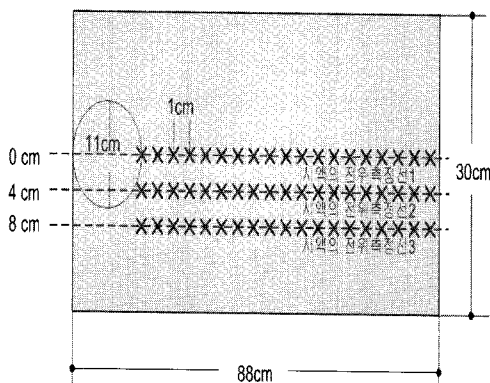


Fig. 5. 수중전위 측정점 평면도

$$\text{시편의 저항 } R = \frac{220 V}{\text{측정 전류값 } A}$$

$$[\Omega] = \frac{220 V}{2.2 A} = 100 [\Omega] \quad (2)$$

(2)의 값을 R에 적용시키고 고유저항을 구하기 위해서 다음공식에 대입하였다.

$$R = \rho \times \frac{l}{A} \Rightarrow$$

$$\text{시편의 저항 } \rho = \frac{A}{l} \times R \quad [\Omega \cdot m]$$

$$= \frac{0.005}{0.24} \times 100 = 2.08 [\Omega \cdot m]$$

위의 실험을 통하여 시편 고유저항은 2.08[Ω·m]임을 확인하였다.

### 2.2.3 수중전위와 총 전류 측정

누전체인 연통으로부터 Fig. 5와 같이 가로 1cm, 세로 4cm, Fig. 6과 같이 수면으로 부터의 깊이 4cm 씩 측정거리에 변화를 주면서 시편을 시액에 미침가시 수중전위 측정 점 1491개, 시편을 시액에 침가시 수중전위 측정 점 1281개를 측정한다.

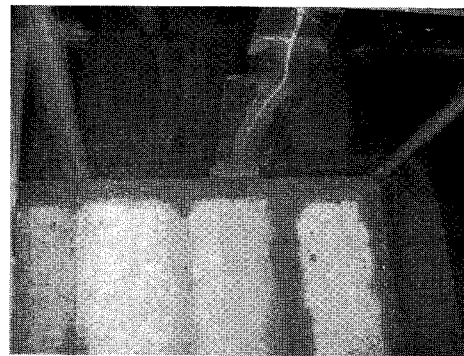


Fig. 4. 메쉬와 중성선 연결 사진

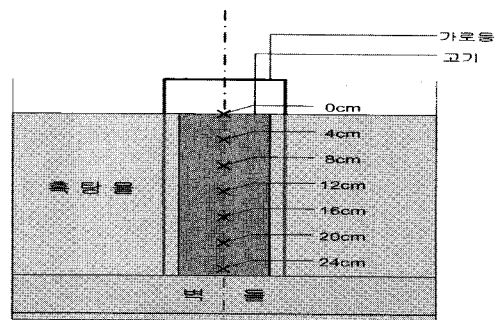


Fig. 6. 수중전위 측정점 측면도

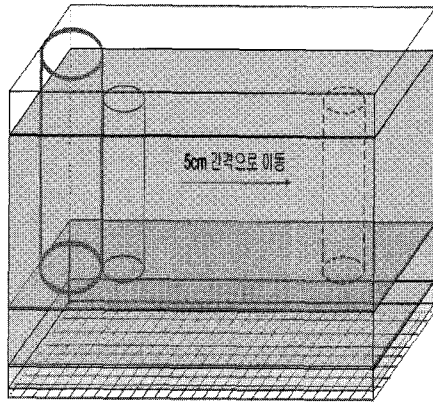


Fig. 7. 시편 이동경로

Fig. 7과 같이 누전체인 연통으로부터 가로 5cm씩 거리변화를 주면서 Fig. 8과 같이 시편 전위측정점 294개를 측정하였다. 그리고 전원이 공급되는 전선에 클램프메타를 걸어서 전체 회로에 걸리는 총 전류를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 시편 미첨가시 수중전위 측정결과

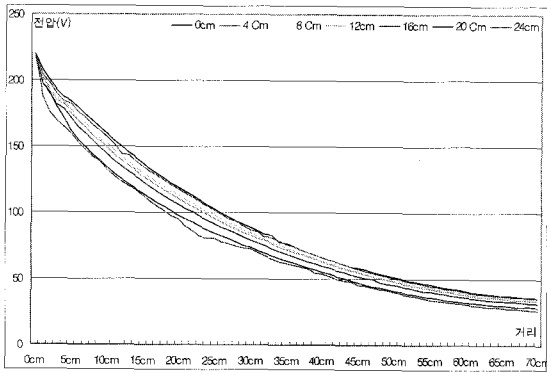


Fig. 9 시편 미첨가시 전위측정선 깊이변화에 따른 수중전위

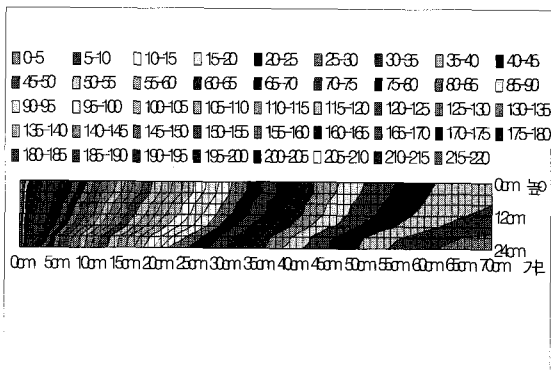


Fig. 10. 시편 미첨가시 전위측정선 깊이변화에 따른 등전위선

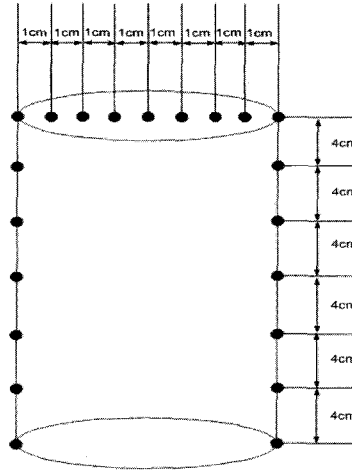


Fig. 8. 시편 측정점

#### 3.2 시편 첨가시 수중전위 측정결과

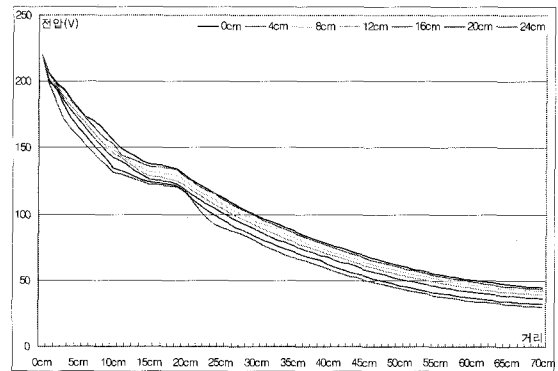


Fig. 11. 시편 첨가시 전위측정선 깊이변화에 따른 수중전위

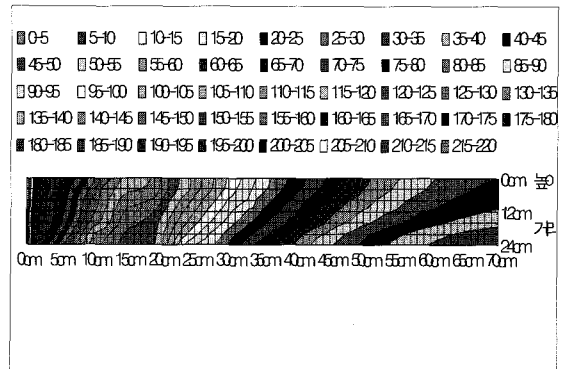


Fig. 12. 시편 첨가시 전위측정선 깊이변화에 따른 등전위선

#### 3.3 시편 첨가시와 미첨가시 전위비교

시편이 누전체와 10cm 이격되어 첨가 되었을 경우 시편의 전위와 미첨가시 같은 위치의 수중전위의 차는 Table 1과 같고, -는 전위의 감소를 나타내며 +는 전위의 상승을 나타낸다. 즉 시편을 첨가하였을 경

**Table 1. 시편 첨가시와 미첨가시 전위차(단위 : V)**

깊이	0cm	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm	6cm	7cm	8cm
0cm	-4.6	-3.3	-2	-1.4	0.4	3.9	7.4	9.7	12
4cm	-7.4	-2.07	-3.11	-1.43	0.76	4.26	7.36	10.09	12.5
8cm	-4.4	-1.81	-1.13	0.26	1.77	4.93	8.2	10.77	12.9
12cm	-2	-1.12	-0.14	0.11	1.46	4.29	7.12	9.54	11.2
16cm	0.6	1.61	1.93	2.23	3.13	6.05	9.26	11.77	13.3
20cm	2.9	5.12	6.71	8.06	9.77	12.55	15.73	18.04	20.3
24cm	2.3	4.93	6.12	7.39	9.61	13.58	16.95	20.16	22.8

**Table 2. 누전체와 시편의 거리와 시편의 위치에 따른 전위차(단위:V)**

	수직(앞)	수직(뒤)	수평(위)	수평(아래)	대각선
0cm	0	16.4	29.6	46	46
5cm	10	13.7	14.5	18.2	28.2
10cm	19.8	13.8	15.6	9.6	29.4
15cm	11.2	12.6	7	8.4	19.6
20cm	10.4	7.4	5.6	2.6	13
25cm	9.4	7.6	6.2	4.4	13.8
30cm	7.8	8.5	6.7	7.4	15.2
35cm	7.6	9.7	4.1	6.2	13.8
40cm	6.2	9.5	3.4	6.7	12.9
45cm	6.9	8.3	1.8	3.2	10.1
50cm	6.6	7.6	1.8	2.8	9.4
55cm	6.7	6.98	1.4	1.68	8.38
60cm	7.2	6.8	1.3	0.9	8.1

우와 미첨가시의 같은 위치에서의 전위차는 시편을 기준으로 하였을 때 상단 좌상귀 부분에서는 전위가 감소하였으나 나머지 부분에서는 전위가 증가하는 것으로 나타났다. 그 이유는 시편 미 첨가 전위곡선과는 틀리게 시편부분에서 등전위선과 같은 형상을 하여서 시편을 넣은 경우에 시편을 지난 후에 미첨가보다 전위가 상승된 것을 알 수 있다.

### 3.4 누전체에서 거리 변화에 따른 시편 전위측정

시편이 누전체에서 5cm 등 간격으로 이격되어 이동되었을 경우 시편의 수조내 위치에 따른 시편전위차는 Table 2와 같다. 시편의 위치는 수직(앞쪽), 수직(뒤쪽), 수평(위쪽), 수평(아래쪽)과 대각선으로 구분하였으며, 시편이 누전체와 이격거리가 증가하였을 경우 시편의 위치에 따른 전위는 감소가 하는 것으로 나타났다. 대각선이 다른 시편의 위치에 비하여 전위차가 크게 나타났으며, 누전체로부터 거리가 멀어 질수록 감전의 위험성이 감소하는 것으로 나타났으나 제 1 종(인체의 대부분이 수중에 있는 상태) 허용접

촉접압 2.5V를 만족하는 것은 하나도 없다.

### 3.5 통전전류

누전체로부터 11cm 떨어진 위치에 시편을 첨가한 경우 시편을 통과하는 전류와 시편이 없는 경우 동일한 부위를 흐르는 전류를 계산하면 다음과 같다.

#### (1) 시편이 있는 경우

시편의 좌측상단의 시편의 전위와 우측상단의 시편의 전위의 평균값을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{시편 상부의 평균값} \\ & = \frac{140.8 + 134.2}{2} = 142 \text{ V이다.} \end{aligned}$$

시편의 좌측하단의 시편의 전위와 우측하단의 시편의 전위의 평균값을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{시편 하부의 평균값} \\ & = \frac{130 + 120.4}{2} = 125.2 \text{ V이다.} \end{aligned}$$

시편 상부와 시편 하부의 전위차가 시편에 인가된 전위로 16.8V이다.

시편의 고유저항값에 시편의 높이를 곱하고 시편의 단면적으로 나누어 시편의 저항 값을 계산하는 방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{시편의 저항 } R \\ &= \frac{\text{시편의 고유저항값} \times \text{시편의 높이}}{\text{시편의 단면적}} \\ &= \frac{2.08 \times 0.24}{0.005} \\ &= 99.84 [\Omega] \text{이다.} \end{aligned}$$

시편에 인가된 전위를 시편의 저항으로 나누어 시편에 흐르는 통전전류를 계산하는 방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{통전전류 } A &= \frac{\text{시편에 인가된 전위}}{\text{시편의 저항}} = \frac{16.8}{99.8} \\ &= 0.1682 \text{A이다.} \end{aligned}$$

## (2) 시편이 없는 경우

시편이 위치한 동일위치인 좌측상단의 시액 전위와 우측상단의 시액 전위의 평균값을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{시액 상부의 평균값} \\ &= \frac{154.4 + 122.2}{2} = 138.3 \text{V이다.} \end{aligned}$$

시편이 위치한 동일위치인 좌측하단의 시액 전위와 우측하단의 시액 전위의 평균값을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{시액 하부의 평균값} \\ &= \frac{127.7 + 97.6}{2} = 112.65 \text{V이다.} \end{aligned}$$

시액 상부와 시액 하부의 전위차가 시액에 인가된 전위로 25.65V이다.

시액의 고유저항 값에 시액의 높이를 곱하고 시액의 단면적으로 나누어 시편과 같은 형태를 가진 시액의 저항 값을 계산하는 방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{시액의 저항 } R \\ &= \frac{\text{시액의 고유저항값} \times \text{시액의 높이}}{\text{시액의 단면적}} \\ &= \frac{25.9 \times 0.24}{0.005} \\ &= 1243.2 [\Omega] \text{이다.} \end{aligned}$$

시액에 인가된 전위를 시액의 저항으로 나누어 시액에 흐르는 통전전류를 계산하는 방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{통전전류 } A &= \frac{\text{시액에 인가된 전위}}{\text{시액의 저항}} = \frac{25.65}{1243.2} \\ &= 0.0206 \text{A이다.} \end{aligned}$$

위와 동일 방법으로 구한 통전전류는 Table 3과 같다.

**Table 3. 시액과 시편의 통전전류(단위 : mA)**

이격거리	시액의 통전전류	시편의 통전전류
0cm	11.0	82.1
5cm	31.8	118.6
10cm	20.6	168.2
15cm	20.8	119.1
20cm	17.3	89.1
25cm	16.16	85.1
30cm	11.5	81.6
35cm	10.6	86.6
40cm	9.7	78.6
45cm	9.8	76.1
50cm	8.6	71.1
55cm	8.3	68.5
60cm	7.6	70.1

### 3.6 시편 첨가시와 미첨가시 수중전력선 비교

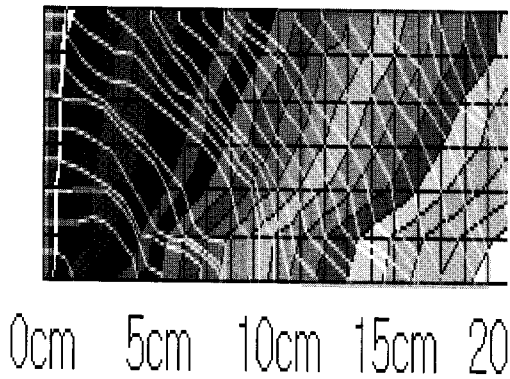


Fig. 13. 시편 미첨가시 수중전력선

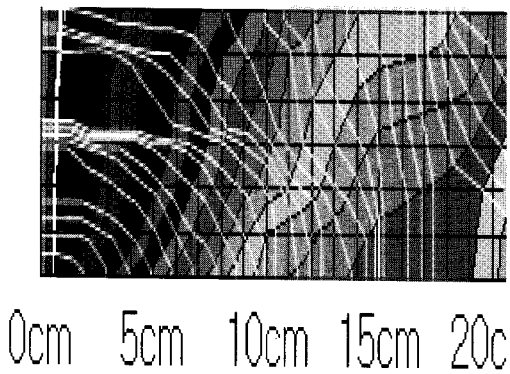


Fig. 14. 시편 첨가시 수중전력선

## 4. 결 론

폭우로 인하여 가로등과 같은 저압 시설물이 침수되어 누전이 발생하였을 경우 인체가 직접적으로 누전체에 접촉하여 감전되어 사망하는 것을 제외하면, 보통 누전체에 의하여 형성된 수중 전위분포에 의하여 1차적으로 쇼크를 받아 물속으로 쓰러지게 되고, 2차적으로 일반적인 감전메카니즘에 따라 피해자가 사망에 이를 가능성이 많다. 즉, 수중에서는 인체의 다리 부위에 전류가 흘러 근육 경직으로 인해 인체가 물속으로 쓰러져 익사하게 되거나 또는 수중에 잠긴 상태에서 심실세동이 발생하여 혈액순환기능이 상실되어 사망하게 되는 감전 메카니즘을 가정할 수 있다. 본 논문에서는 침수로 누전이 되고 있는 가로등 옆을 지나가다가 사람이 감전되는 경우를 가정하여, 인체가 수중에 있을 때 누전체로부터의 거리 및 물속 깊이에 따른 전위분포를 파악하고 이로부터 수중에서의 인체 감전 메카니즘을 해석하고자 하였다. 실험 장치로 흠탕물에 준하는 시액을 담은 수조에 금속체 원통을 세우고 여기에 220V의 전압을 인가하여 가로등이 누전

되는 상황을 설정하였다. 우선, 단지 누전체만 존재하는 경우의 수중전위를 측정하여 전위분포를 분석하였으며 통전전류가 흐르게 되는 방향을 나타내는 전력선을 그렸다. 다음으로 인체가 수중에서 근접하는 경우를 가정하여 돼지고기를 시편으로 하여 수중에 담고 누전체로부터 거리를 변경시키면서 전위분포를 측정하였으며, 등전위선으로부터 전력선을 그렸다.

측정된 수중전위 값과 전력선의 모양으로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 누전체에 근접할수록 거리변화에 대한 전위강하율이 크게 나타났다.
2. 전위측정 위치가 수중으로 깊어질수록 전위가 감소하는 것으로 나타났다.
3. 시편 첨가시에는 시편이 없는 경우보다 시편 앞부분에서 전위가 감소하는 경향으로 나타나고, 또한 흠탕물보다 도전도가 높은 시편의 영향으로 시편에는 전위감소가 적게 나타나 시편 뒤에서는 시편이 없는 경우보다 수중전위가 상승하는 것으로 나타났다.
4. 시편 첨가시에는 전력선의 분포가 시편이 없는 경우보다 시편 쪽으로 더 많이 집중되는 현상을 확인할 수 있었다.
5. 시편을 통과하는 전력선이 수직에 더 가까운 모양으로 형성되어 인체가 물에 잠긴 경우는 전력선이 인체 쪽으로 집중하게 된다는 것을 유추할 수 있다.
6. 시편이 없는 경우 동일한 부위를 흐르는 전류는 20.6mA로 계산되었으나, 누전체로부터 11cm 떨어진 위치에 시편을 첨가한 경우 시편을 통과하는 전류는 168.2mA로 계산되어 인체가 물속에 있는 경우는 심실세동의 가능성이 충분한 큰 값의 전류가 흐르는 것으로 유추할 수 있다.
7. 모든 시편에 걸리는 전압은 허용접촉전압 2.5V보다 크고, 통전전류도 심실세동 전류인 50mA보다 크므로 감전위험성이 매우 컸다.

이상에서와 같은 실험결과를 통하여 수중에서 전격위험을 결정하는 인자로 일반적 전격의 위험인자 외에 다음과 같은 것을 추가로 들 수가 있다.

- (1) 시편의 침수정도 및 단면적
- (2) 시편의 저항율
- (3) 누전체와 시편의 접근거리
- (4) 시액 고유저항율
- (5) 누전체 형상

## 참 고 문 헌

- 김성모 등 (2001) 접지설계 입문. 통일출판사. pp. 16-17.
- 김찬오 등 (1998) 전기안전공학. 동화기술. pp. 38-61.
- 유재익 (2003) 감전예방을 위한 접지계통 개선에 관한 연구, 석사학위논문, 서울산업대학교.
- 이기홍 (2001) 접지와 뇌 방호. 통일출판사. pp. 13-27.
- 이복희 (1999) 접지의 핵심 기초기술. 의제출판사. pp. 1-20.
- ◎ 논문접수일 : 2007년 08월 24일
- ◎ 심사의뢰일 : 2007년 08월 27일
- ◎ 심사완료일 : 2007년 10월 03일