

Human Hazard by Outdoor Electrical Facilities in Submerged Area

河泰玟* · 李鉉求* · 裴廷孝* · 金大景**

(Tae-Hyun Ha · Hyun-Goo Lee · Jeong-Hyo Bae · Dae-Kyeong Kim)

Abstract - We show three-dimensional distribution of voltages resulted from the leakage current originated from outdoor electrical facilities in a submerged area. In case these facilities are grounded by the neutral line multiple grounding method, the existence of ungrounded electrical facilities can cause a disastrous effect on near-by passengers. In order to investigate this situation, we installed a real-scale test field for the experiment type I (for the leakage current path between a enclosure grounded electrical facility and another enclosure grounded one), and that for the experiment type II (for the leakage current path between a enclosure grounded electrical facility and another ungrounded one). For both cases, we carried out three-dimensional monitoring of the voltage distribution while varying additional conditions such as the exposure of the underground cables and the finishing of cable connection part. The result shows that a disastrous effect on human safety can arise from the leakage current without a pertinent measure for the construction and maintenance of outdoor electrical facilities.

Key Words : Leakage current, Human safety, Three-dimensional distribution of voltage

1. 서론

도시화가 활발히 진행됨에 따라 가로등, 신호등, 입간판 등과 같은 옥외 전기시설물이 급증하고 있으며, 폭우나 홍수에 의해 옥외 전기시설물이 침수되어 누설전류가 유출될 경우 인근의 사람에게 위해를 줄 수 있다.

전기시설물의 누설전류가 인체에 미치는 영향에 대하여 오랜 동안 연구가 진행되고 있으며, 이론적으로 수치해석 프로그램을 사용하여 누설전류가 발생할 경우의 전위분포를 해석할 수 있다.[1, 2, 3]

본 연구에서는 옥외 전기시설물이 침수되었을 때 옥외 전기시설물의 전선접속부에서 발생하는 누설전류로 인해 옥외 전기시설물과 주변의 외함접지 시설물이 누전경로를 형성하는 경우(Type I)와 주변의 접지가 되지 않은 기타 옥외 전기시설물이 누전경로를 형성하는 경우(Type II)에 대하여 실증 실험을 통해 인체의 영향을 검토하였다.

2. 실증실험장

2.1 실험장 구성

침수시 옥외 전기시설물의 누설전류에 의한 인체의 영향

을 분석하기 위하여 실태조사에서 추정한 누설전류원을 토대로 누전경로가 형성되도록 간이 실험장을 설계·시공하였다.

- ① 실험장의 크기는 12[m]×6[m]×1.5[m](가로×세로×높이)이며, 옥외 전기시설물과 외함접지 시설물 또는 접지가 되지 않은 기타 옥외 전기시설물 사이의 거리는 6[m]로 하였다.
- ② 실험장의 벽면은 절연을 위하여 목재를 사용하고 수조 내면에는 천막을 이용하여 방수가 되도록 하였다.
- ③ 실험장 바닥은 도로의 상황을 모의하기 위하여 아스팔트 포장 도로와 보도블록 보도로 구분하였다.
- ④ 전위측정용 전극은 1[m]간격의 격자구조로 틀에 고정하고, 침수 높이별 전위분포를 측정하기 위하여 틀 전체를 바닥에서 1.5[m]까지 상하로 조절할 수 있도록 하였다.
- ⑤ 전위측정용 전극이 바닥면 전위를 측정할 때는 높이차가 있는 도로와 보도에 동시에 닿도록 하고, 수중의 전위를 측정하기 위해 틀을 들어올렸을 때는 전극의 끝부분이 같아지도록 유동성 있게 하였다.
- ⑥ 누설전류의 분포를 모의하고 분석하기 위하여 옥외 전기시설물과 외함접지 시설물 또는 접지가 되지 않은 기타 옥외 전기시설물 사이에서 ELP 30[mm] 전선관과 600V CV 1×5.5[mm²] 케이블의 3개소에 피복을 노출(전선관: 3[cm]×3[cm] 노출, 케이블: 1[cm]길이 노출)시켰으며, 옥외 전기시설물의 전선접속부는 비닐절연테이프를 감는 방법과 단자대를 이용한 완전 노출형의 두 가지로 시공하였다. 여기서 완전노출부로 모의한 단자대는 60[A]용을 사용하였다.
- ⑦ 회로의 결선은 모두 외부에서 조작할 수 있도록 하고, 실

* 正會員 : 韓國電氣研究院 지중시스템연구그룹

** 正會員 : 韓國電氣研究院 지중시스템연구그룹장

接受日字 : 2003年 9月 1日

最終完了 : 2003年 11月 10日

중 실험을 위해 시공한 임의의 절연불량 전선, 비닐테이프 시공부분 및 전원노출부분을 제외하고는 침수되는 부분에 전선접속부가 없도록 하여 확실히 절연하였다.

⑧ 실험장내 접지는 옥외 전기시설물, 외함접지 시설물 그리고 보조용으로 3군데에 제 3종 접지공사를 하였다.

그림 1은 각각의 실험조건 별로 전위분포측정 지점을 나타낸 실험장 평면도이다.

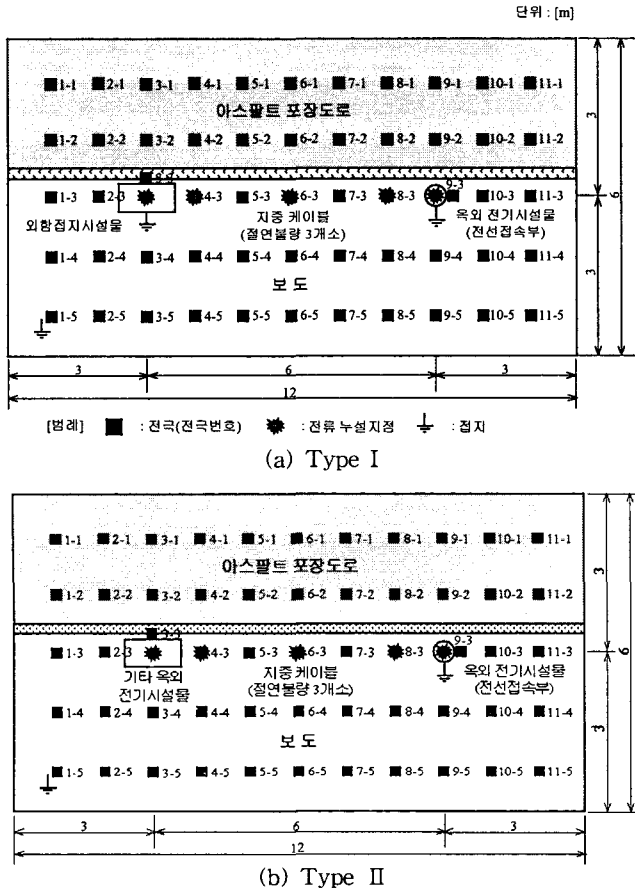


그림 1 실험장 평면도
Fig. 1 Floor plan drawings of the test fields

2.2 실험장의 대지저항률

실험장 바닥에 대해 굴착 후의 대지저항률을 측정된 결과는 표 1과 같다. 여기서 굴착 깊이는 약 2[m]이다.

표 1 실험장 바닥의 대지저항률 측정값
Table 1 The measured soil resistivity at the bottom of the test field

Pin 간격[m]	측정저항값	대지저항률[Ω·m]
1	17.00	106.76
2	11.50	144.44
3	8.85	166.73
4	6.90	173.32

2.3 실험장내 접지저항

실험장내에 물을 외함접지 시설물이 침수되는 위치(보도 위 약 1.5[m]높이)까지 채우고 실험장내 물의 전기저항률을 측정된 결과는 170[Ω·m]이었다. 이 때 물을 채운상태로 각 부위의 접지저항을 측정된 결과는 표 2와 같다.

표 2 실험장내 접지저항 측정값
Table 2 The measured grounding resistance

구 분	접지저항[Ω]
옥외 전기시설물	21.1
외함접지 시설물	18.0
중성선 접지	44.5

3. 전위분포 특성 실험

3.1 실험 조건

침수시 옥외 전기시설물이 누설전류원인 경우와 접지가 되어 있지 않은 기타 옥외 전기시설물이 누설전류원인 경우에 대해 그림 2와 같이 회로를 구성하고 아래의 실험조건에서 1[m] 격자간의 전위차를 측정하였다.

- ① 접지 : 외함접지 시설물은 1선(중성선)접지, 기타 옥외 전기시설물의 외함은 접지하지 않고 전원측에서 1선(중성선)접지
- ② 지중케이블 : 정상일 때와 절연 불량일 때(3개소; #1(4-3), #2(6-3), #3(8-3)) 고려
- ③ 전선접속부 : 비닐테이프 시공일 때와 완전노출일 때 고려
- ④ 침수 수위 : 바닥일 때와 외함접지 시설물 침수일 때 고려
- ⑤ 측정 높이 : 바닥 → 30[cm] → 60[cm] → 90[cm] → 120[cm] → 수면

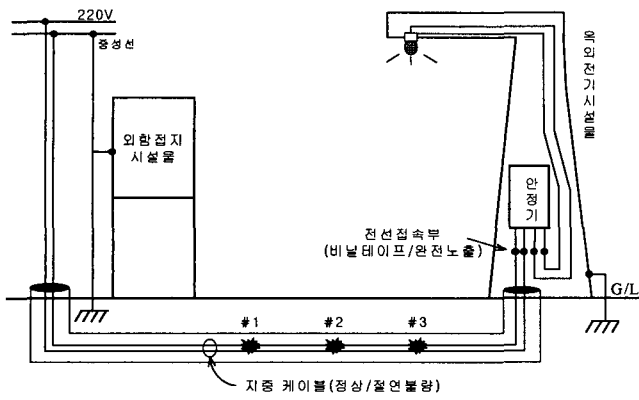
3.2 측정 장비

누설전류 및 전위분포 측정에 사용된 주요장비는 디지털 오실로스코프(TDS 3032, Tektronix사)와 멀티메타/스위치 시스템(2750, KEITHLEY사)이다. 여기서 멀티메타/스위치 시스템에 사용되는 다중 모듈(7702)은 40채널/모듈로서 2개 모듈을 사용하여 55개의 전위값을 동시에 측정하였다.

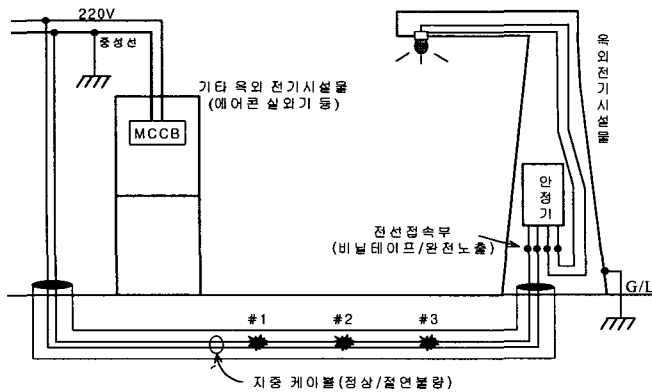
실험장의 전원공급장치는 절연변압기를 이용하여 2차측에서 전원접지를 용이하게 하였고, 디지털 판넬메타와 전자접촉기를 사용하여 설정치 이상의 과도한 전류는 차단할 수 있도록 하였다.

3.3 전위분포도 작성

그림 3과 그림 4는 옥외 전기시설물과 외함접지 시설물이 완전 침수되었을 때 옥외 전기시설물 주변에 지중케이블 절연불량 개소가 있고 전선접속부에 비닐테이프 시공과 완전 노출시의 경우에 대하여 실험장에서 1[m]간격의 격자로 구성된 55개의 전극에서 측정된 전압값을 토대로 보간법(Interpolation)으로 계산된 10[cm] 간격의 격자로 작성한 전위분포도의 평면도와 횡단면도 예를 각각 나타낸 것이다.[4]



(a) Type I



(b) Type II

그림 2 실험 결선도

Fig. 2 Circuit configurations for the test fields

각각의 실험조건에 따라 전위분포도에서 계산한 수중에서의 최대접촉전압과 최대전위경도 값을 표 3에 나타내었다. 여기서 수중에서의 접촉전압은 전극(1-5)을 기준으로 하여 각 지점의 상대전압을 나타낸 것이다. 옥외 전기시설물 부근에 외함접지 시설물이 있고 옥외 전기시설물이 누설전류원인 경우 옥외 전기시설물 주변의 전위차가 외함접지 시설물 주변의 전위차보다 컸으며, 옥외 전기시설물 부근의 최대전위차는 옥외 전기시설물내 전선접속부가 완전노출인 경우가 비닐테이프 시공인 경우보다 컸다.

그림 5와 그림 6은 옥외 전기시설물과 기타 옥외 전기시설물이 완전 침수되었을 때 옥외 전기시설물 주변에 지중케이블 절연불량 개소가 있고 전선접속부에 비닐테이프 시공과 완전노출시의 경우에 대하여 작성한 전위분포도의 평면도와 횡단면도 예를 각각 나타낸 것이다.

각각의 실험조건에 따라 전위분포도에서 계산한 수중에서의 최대접촉전압과 최대전위경도 값을 표 4에 나타내었다. 옥외 전기시설물 부근에 외함접지를 하지 않은 기타 옥외 전기시설물이 있고 기타 옥외 전기시설물이 누설전류원인 경우, 기타 옥외 전기시설물 주변의 전위차가 옥외 전기시설물 주변의 전위차보다 컸으며, 옥외 전기시설물내의 전선접속부가 완전 노출인 경우의 최대전위차가 비닐테이프를 시공했을 경우보다 컸다.

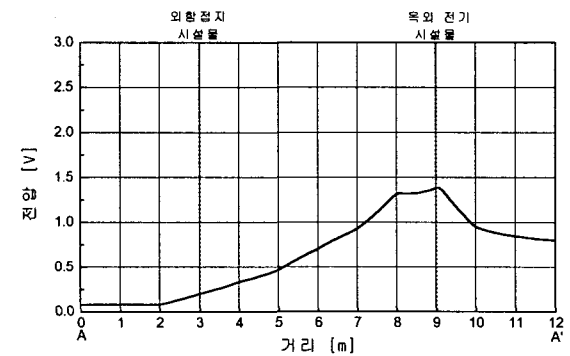
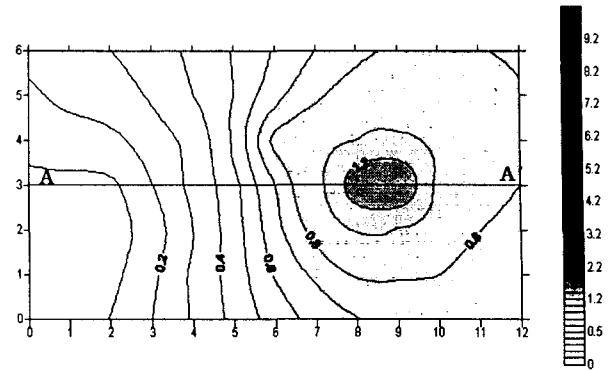


그림 3 전선접속부에 비닐테이프 시공시 전위분포도(Type I)
Fig. 3 3-D voltage distribution in experiment type I with the connection part insulated by vinyl taping

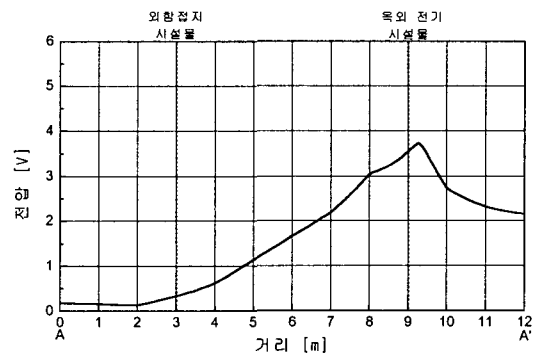
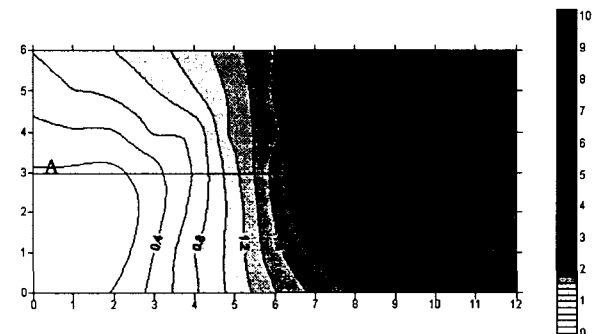


그림 4 전선접속부가 완전 노출시 전위분포도(Type I)
Fig. 4 3-D voltage distribution in experiment type I with the connection part completely exposed

표 3 수중에서의 접촉전압과 전위경도값(Type I)

Table 3 The measured maximum voltage and maximum voltage gradient in experiment type I

실험조건			최대접촉전압 [V]	최대전위경도 [V/m]
전선 접속부	지중 케이블	측정높이 [cm]		
비닐테이프 절연	절연 파괴 없음	바닥	0.6144	0.3503
		30	0.5022	0.2330
		60	0.5055	0.2424
		90	0.5271	0.2878
		120	0.4665	0.2002
	절연 파괴 #1	바닥	0.8067	0.3451
		30	0.7410	0.2978
		60	0.6809	0.2725
		90	0.6542	0.2585
		120	0.6696	0.2485
	절연 파괴 #2	바닥	1.0790	0.2080
		30	0.9073	0.4456
		60	0.9042	0.2547
		90	0.8772	0.2755
		120	0.8486	0.2634
	절연 파괴 #3	바닥	0.8204	0.2330
		30	1.2242	0.3705
		60	1.2210	0.3823
90		1.1764	0.3534	
120		1.1726	0.3201	
완전노출	절연 파괴 없음	바닥	4.3181	2.2992
		30	3.8356	1.7319
		60	3.9117	1.8706
		90	3.8535	1.8115
		120	3.7510	1.7104
	절연 파괴 #1	바닥	3.5724	1.4846
		30	4.3128	2.0389
		60	3.9794	1.7212
		90	3.9547	1.7590
		120	3.8889	1.7126
	절연 파괴 #2	바닥	3.6782	1.4398
		30	3.2100	1.1958
		60	3.1571	1.1999
		90	3.0729	1.1177
		120	3.0272	1.0492
	절연 파괴 #3	바닥	2.9576	0.9404
		30	2.8841	0.8385
		60	3.7479	1.5645
90		3.4754	1.2955	
120		3.4623	1.1906	
	바닥	3.3804	1.1472	
	30	3.2358	0.9852	
	60	3.1626	0.8632	
	90			
	120			

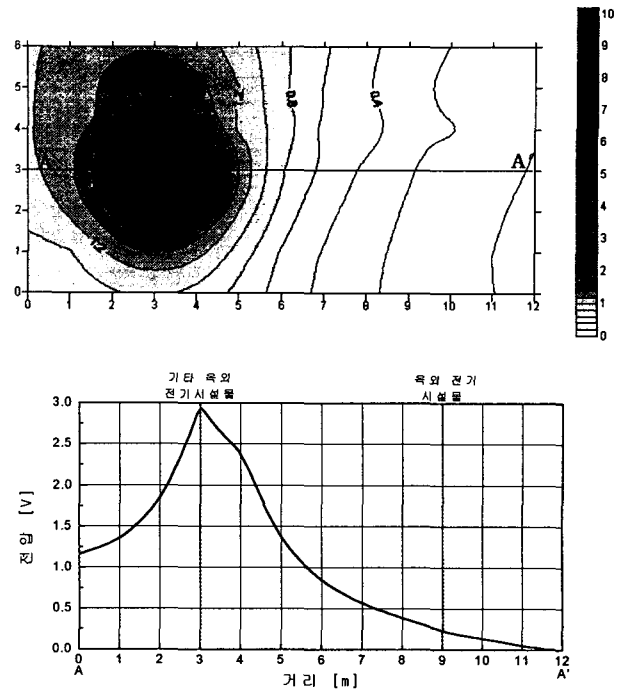


그림 5 전선접속부에 비닐테이프 시공시 전위분포도(Type II)
Fig. 5 3-D voltage distribution in experiment type II with the connection part insulated by vinyl taping

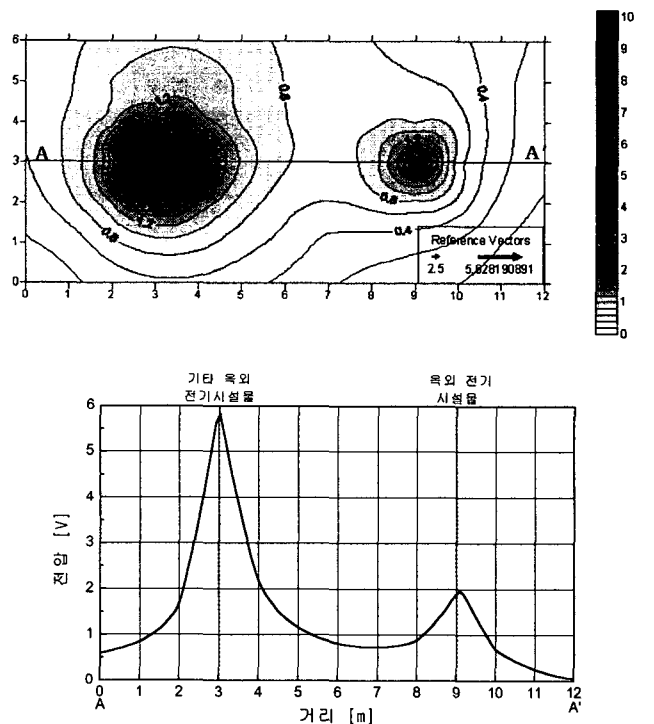


그림 6 전선접속부가 완전 노출시 전위분포도(Type II)
Fig. 6 3-D voltage distribution in experiment type II with the connection part completely exposed

표 4 수중에서의 접촉전압과 전위경도값(TypeII)

Table 4 The measured maximum voltage and maximum voltage gradient in experiment typeII

실험조건			최대접촉전압 [V]	최대전위경도 [V/m]
전선 접속부	지중 케이블	측정높이 [cm]		
비닐테이프 절연	절연과피 없음	바닥	2.9228	1.7623
		30	4.4906	3.4789
		60	4.2169	2.8586
		90	3.5721	1.8484
		120	3.3330	1.4719
		수면	3.2566	1.3750
	절연과피 #1	바닥	3.0333	2.0066
		30	4.4322	3.4270
		60	4.2244	2.8429
		90	3.5651	1.8212
		120	4.2244	2.8429
		수면	3.3080	1.4078
	절연과피 #2	바닥	2.9069	1.6216
		30	4.4598	3.3887
		60	4.1617	2.7790
		90	3.6074	1.8395
		120	3.3783	1.5019
		수면	3.3590	1.4560
	절연과피 #3	바닥	3.4141	2.0066
		30	4.4166	3.3717
		60	4.2304	2.8755
		90	3.6427	1.8557
		120	3.3722	1.4834
		수면	3.3938	1.4660
완전노출	절연과피 없음	바닥	2.7750	1.7435
		30	5.4727	4.8143
		60	5.7863	2.4305
		90	3.2256	1.7122
		120	3.0469	1.4653
		수면	3.0926	1.4971
	절연과피 #1	바닥	2.6971	1.6500
		30	5.3044	4.6067
		60	4.0595	2.8375
		90	3.1124	1.6371
		120	2.9251	1.3867
		수면	2.9182	1.3623
	절연과피 #2	바닥	5.7879	5.7831
		30	4.6021	4.4155
		60	3.6652	3.0899
		90	2.6374	1.7228
		120	2.4828	1.5202
		수면	2.5315	1.7227
	절연과피 #3	바닥	5.8169	5.6282
		30	5.1849	4.4279
		60	4.1814	2.9868
		90	3.2303	1.6951
		120	3.0934	1.5066
		수면	3.2303	1.6951

4 침수시 누설전류가 인체에 미치는 영향

4.1 침수시 인체의 안전 기준

우리나라에서는 접촉전압에 대한 안전전압의 허용값을 규정하고 있지는 않지만 일반적으로 일본의 기준을 사용하고 있다. 일본전기협회의 저압전로지락보호지침에 의하면 접촉 조건에 따른 허용접촉전압의 크기에 있어서 인체의 대부분이 수중에 있는 상태(제1종)인 경우의 허용접촉전압은 2.5[V]이다.[5]

4.2 침수수위에 따른 인체의 영향

- ① 실험 조건에서 옥외 전기시설물이 누설전류원인 경우와 접지되지 않은 기타 옥외 전기시설물이 누설전류원인 경우 모두 도로가 침수되지 않은 상태에서는 인체에 위해를 주지 않는 것으로 나타났다.
- ② 침수시 옥외 전기시설물이 누설전류원인 경우의 모든 실험조건(지중케이블의 손상 상태 및 전선접속부의 처리 상태)에서 인체의 접촉전압은 안전기준치인 2.5[V] 미만 이므로 인체에 안전한 것으로 나타났다. 그러나, 접지되지 않은 기타 옥외 전기시설물이 누설전류원인 경우의 실험조건에서 옥외 전기시설물내 전선접속부를 비닐테이프 시공할 경우에는 인체에 안전한 것으로 나타났으나 전선접속부가 완전히 노출될 경우에는 인체에 위해를 줄 수 있는 것으로 나타났다.
- ③ 실험 조건에서 측정시 옥외 전기시설물과 전극의 접촉저항에 따른 오차를 고려하면 옥외 전기시설물에 인체가 직접 접촉할 경우에는 인체의 접촉전압이 측정값보다 더 높게 나타날 수 있으므로 인체에 위해를 줄 수도 있다고 판단된다.

4.3 이격거리에 따른 인체의 영향

- ① 옥외 전기시설물이 누설전류원인 경우에는 인체에 위험한 영역이 없는 것으로 나타났으며, 접지가 없는 옥외 전기시설물이 누설전류원인 경우에는 전선접속부가 완전히 노출될 경우 기타 전기사용 도로시설물로부터 인체의 감전에 대한 안전 이격거리는 1.4~1.5[m] 정도로 나타났다.
- ② 상기의 모든 측정결과는 대지저항률, 물의 전기저항률 및 시설물의 접지저항에 따라 달라질 수 있다.

5. 결 론

옥외 전기시설물 침수시 옥외 전기시설물의 전선접속부에서 누설전류가 발생하고 옥외 전기시설물 주변에 외함접지 시설물이 있는 경우에 대하여 실증 실험장에서의 주어진 실험 조건에서 실험한 결과 옥외 전기시설물에 직접적으로 접촉하지 않는 한 인체에는 위해를 주지 않는 것으로 나타났다. 그리고 접지되지 않은 기타 옥외 전기시설물에서는 지중케이블이 정상이거나 전선접속부의 비닐테이프 시공이 정상적으로 처리되면 설비에 직접적으로 접촉하지 않는 한 안

전한 것으로 나타났으며, 지중케이블이 손상되거나 비닐테이프 시공이 부실하게 되면 인체에 위험한 것으로 나타났다.

그러므로, 전기시설물에서의 누설전류를 저감시킴으로써 인체에 미치는 위험을 줄이기 위해서는 접속부의 절연을 확보하고 지중케이블의 유지관리에 유의해야 하며 적절한 차단기가 설치되어야 한다.

참 고 문 헌

- [1] KWIKGRID®, Computer Software, Ground-it.com Consulting Ltd., 2001
- [2] IEEE STD 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 1980
- [3] CDEGSTM, Resistivity, Grounding, Cable & Line Parameters, Fault Current Distribution, Electrical Interference and Electromagnetic Fields Analysis Software, Safe Engineering Services & Technologies Ltd.
- [4] John C. DAVIS, "Statistics and Data Analysis in Geology", 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1986
- [5] JEA G8101-1971, 저압전로지락보호지침

저 자 소 개



하 태 현 (河 泰 珉)

1962년 12월 20일생. 1987년 동아대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 한국해양대 박사과정 수료. 1989년~현재 한국전기연구원 지중시스템연구그룹 선임연구원
Tel : 055-280-1366 Fax : 055-280-1390
E-mail : thha@keri.re.kr



이 현 구 (李 鉉 求)

1971년 8월 8일생. 1995년 충남대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년~현재 한국전기연구원 지중시스템연구그룹 선임연구원
Tel : 055-280-1364 Fax : 055-280-1390
E-mail : leehg@keri.re.kr



배 정 효 (裵 廷 孝)

1964년 1월 6일생. 1986년 경북대 전자공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2003년 한국해양대 대학원 기관공학과 졸업(공학박). 1989년~현재 한국전기연구원 지중시스템연구그룹 책임연구원
Tel : 055-280-1362 Fax : 055-280-1390
E-mail : jhbae@keri.re.kr



김 대 경 (金 大 景)

1958년 2월 20일생. 1981년 부산대 전기기계공학과 졸업. 1983년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 영국 UMIST 박사과정. 1984년~1987년 현대엔지니어링 사원. 1987년~현재 한국전기연구원 지중시스템연구그룹장
Tel : 055-280-1360 Fax : 055-280-1390
E-mail : dkkim@keri.re.kr