

지하구내 침수 시 인체에 대한 전기적 위험요소 도출

정종욱, 임용배, 정진수, 고원식  
한국전기안전공사 전기안전연구원

Electrical Risk Factors affecting Human Body due to Underground Flooding

J.W. Jung, Y.B. Lim, J.S. Jung, and W.S. Ko  
Electrical Safety Research Institute, KESCO

**Abstract** - In this paper, electrical risk factors due to the powered recovery equipments thrown to escape the dangerous condition that electrical apparatuses were submerged were derived and analyzed. After surveying several underground flooding sites, we could find out the *status quo* of the underground electrical equipments and what the most dangerous factors to a human body under water were. The results acquired from this study are applying to safety assessment algorithm.

의 폭우로 일본 후쿠오카에서는 미카사강이 갑작스럽게 범람하여 지하철 수개 노선이 침수되는 결과를 야기하였다[2]. 1999년 12월 17일에는 베네수엘라 카라카스의 지하철시스템이 침수로 인해 마비되었다[3]. 2000년 7월에는 칠레에서 수일에 걸친 폭우로 산티아고와 발파라이소의 지하철시스템이 마비되었다[4]. 그러나 이들 침수에 대한 피해액은 보고되어 있지 않다. 직접적인 피해액(보수비용)이 1,000만유로를 초과하고 일주일 이상의 정전기간을 기록한 몇가지 사례를 표 1에 나타내었다.

1. 서 론

최근 전 세계적으로 빈발하는 이상기후 현상으로 국지성 폭우에 의한 침수피해가 날로 증가하여 사회적인 문제를 만들어 내고 있다. 자연재해는 그 변화 및 규모를 예측하기 곤란하고 일단 발생하면 대규모 인명 및 재산 피해를 수반한다는 이유로 비연에 철저한 방재대책을 마련하는 것이 중요하다. 국외의 경우에는 각종 재난을 담당하는 기관이 정부 또는 민간차원에서 마련되어 운용되고 있으나, 국내의 경우에는 소방방재청에서 이와 같은 업무를 담당하고 있을 뿐, 재난 발생 시의 종합적인 대응체계가 아직도 미흡한 실정이다. 재난관리는 그 위험성에 대한 철저한 사전인식과 훈련에 의해서만 원활히 이루어질 수 있으며, 당장의 피해복구에만 급급하게 실시되는 임기방편적인 대응책만으로는 더 큰 피해를 야기할 수 있다. 또한, 일단 피해가 발생하면 인간의 패닉현상에 의해 적절한 대응이 불가능하게 되므로, 사전방재 대책을 수립함으로써, 체계적인 대응책을 마련하는 것이 무엇보다 시급히 요구된다.

본 논문에서는 재해발생 시 피해를 최소화하기 위한 모든 대응조치를 최적으로 통제하는 프로그램을 개발하기 위한 사전작업의 일환으로 각종 내·외부적 요인에 의해 지하구내가 침수되었을 경우, 이 상황으로부터 신속히 벗어나기 위해 투입되는 전기장비의 누전에 의한 위험상황으로부터 복구인력의 안전을 보장하는 프로그램을 개발하기 위해 안전위험요소를 도출하고자 한다.

2. 지하구내 침수피해

2.1 국내·외 지하구내 침수피해 현황

지하구내 침수 시의 위험·피해정도를 알기 위해 기왕 침수사례를 조사하였다. 지난 십수년간 수많은 지하구내 침수가 보고되어 있었다. 1992년, 12월 뉴욕시 근방의 강력한 태풍은 연안홍수를 유발하였으며, 철도와 지하철시스템의 일부를 침수시켜 마비를 야기했다[1]. 1999년 6월

표 1 침수피해현황

	보스턴 1996	서울 1998	타이페이 2001
시스템 총비용	미보고	790*	15,000**
km당 총공사비	미보고	18	~180
침수깊이[km]	2.5~8	11	12~67
침수피해 보고액	~10	40	60~140
km당 산정피해액	1.3~4	~3.6	0.9~12

\* 7호선 한정

\*\* 전 시스템(86[km])

2.2 국내 지하구내 전기설비 설치현황

국내의 경우, 지하구내의 전기설비 설치현황을 파악하고 현황 관리실무자로부터 지하구내 침수대책에 대한 의견을 수렴하기 위해 전국의 기왕침수지역을 대도시 위주로 12개소(서울 4개소, 연안 중소도시 8개소)를 선정하여 현장을 답사한 결과, 지하구내에는 주로 전기실, 기계실 및 주차장으로 이루어져 있었으며, 각 공간을 점유하고 있는 대표적 설비를 표 2에 나타내었다.

표 2 지하구내 공간구성 및 전기설비

전기실	· 특고압수전반(AISS, MOF, P.F, L.A 등) · 변압기반(전동변압기, 동력변압기) · 저압배전반(전동반, 동력반) · 저압 자동절환수위치반 · 비상발전기 · 콘센트 및 전등
기계실	· MCC반(소화전펌프, 급수펌프, 집수정펌프, 환기팬) · 저수조탱크 자동수위 조절반
주차장	· 차량관제설비 컨트롤반 · 전등 및 콘센트

이중, 전기실 내의 설비는 일반적으로 섹션화된 하나의 캐비닛에 수납되어 운용되고 있었으며, 모두 지하구내 공간에 설치되어 있었으나, 침수피해 후 옥상으로 이설한 경우도 있었다. 그러나 침수 이후에도 대부분이 물의 침입에 대비한 대책이 미비한 채 별다른 방안을 강구하지 않은 경우가 많았다.

본 연구에서는 추후에 안전성보장 프로그램에 적용하기 위한 지하 전기설비공간에 대한 전형적인 모델을 제시하였으며, 이를 그림 1에 나타내었다.

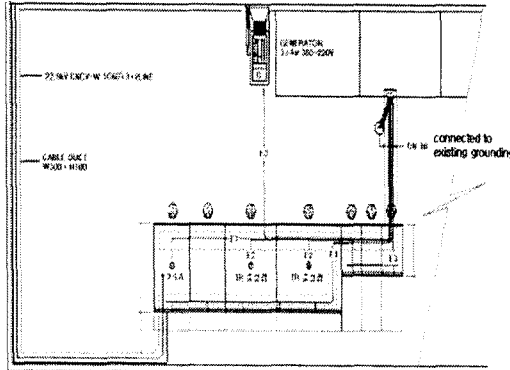


그림 1 지하구내 전기설비의 일반적 배치

### 3. 지하구내 침수 시 전기적 위험요소

특정장소의 지하설비에 빈번한 침수가 발생한다고 해도 대부분의 지하설비를 위한 적절한 침수조절방법이나 가이드라인은 없다. 도심침수사건의 경우, 실시간 침수위험관리를 위해 적절하게 설계된 경보 및 배수전략을 마련하는 것은 매우 중요하다. 빈발하는 침수에 대처하기 위한 가이드라인 및 복구전략을 설계기 위해 지하설비의 침수특성을 분석하는 것 역시 매우 중요하다. 물의 이동에 있어 다수의 다른 출구 및 분기로를 갖는 지하시스템의 복잡성으로 인해 매우 제한된 시도들이 지하설비에서의 유동특성을 모델링하는데 이루어져 왔다.

본 논문에서는 침수환경에서 인체에 가해질 수 있는 잠재적 위험요인을 내적요인과 외적요인으로 대별하여 각각 고찰하였다[5].

본 연구에서는 이미 침수이력을 가진 현장을 답사하여 당시 피해자 및 현장관리자의 진술 및 전문가의 의견을 수렴함으로써 지하구내가 침수되었을 경우의 잠재적인 위험요인들을 선별한 결과, 다양한 팩터들이 거론되었으나, 본 연구의 최종목적인 안전보장프로그램에 반영할 수 있는 요소만을 내적요인과 외적요인으로 대별하여 표 3과 같이 정리하였다.

#### 3.1 내적요인에 의한 위험요소

내적요인에 의한 위험요소를 세부적으로 구분하여 각각의 위험유발 특성을 고찰하였다.

##### · 작업공간의 여유도

현재 전기설비가 설치된 국내 지하구내의 특징은 도시와 지방이 전기설비가 설치된 공간면에서 현격한 차이를 나타내었다. 도시의 경우 지방에 비해 부지의 평단가가 높은 관계로 설비의 설치공간이 대체로 좁아 작업자의 행동반경에 제약이 따를 정도로 동선이 제한되므로, 이에 따른 전격의 위험도 상대적으로 높은 것으로 판단되었다.

표 3 지하구내 침수 시 위험요소

구분	위험요소	
	위험군	단위 위험요소
내적요인	공간배치	· 작업공간의 여유도 · 피난용 유도등의 높이 및 사용전압 · 수전실의 위치
	전기환경	· 복구용 투입장비 사용전압 · 운전 중인 변전설비의 사용전압 · 전원차단 조건 · 접지상태 · 콘센트 설치높이 · 수위센서 동작 여부 · 배수펌프의 용량 · 인체관련 전기적 파라미터 · 작업공간의 수위
외적요인	하천범람	· 모래주머니, 차수벽 구비 여부 · 외수 유입경로의 넓이
	침수환경	· 우수의 도진율 · 우수의 유입속도 · 우수의 유입량 · 침수정을 통한 역류

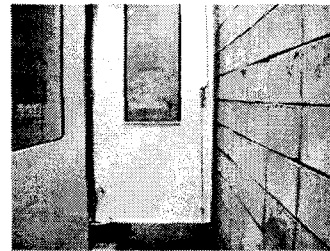


사진 1 작업공간이 불충분한 지하구내 변전실

- 피난용 유도등의 높이 및 사용전압  
현장답사를 실시한 대부분의 지하구내에는 피난용 유도등이 설치되어 있었으며, 이상없이 동작되었다. 그러나 실제 상황발생 시 이들 전원에 의한 위험도 배제할 수 없다고 생각된다.

##### · 수전실의 위치

현장답사를 실시한 대부분의 변전실은 침수 이전에는 가장 아래층에 설치되어 있는 경우가 많았으나, 침수 이후, 지상으로 이설한 경우가 있었다. 그러나, 이 경우에도 외부환경에 대한 적절한 대책이 마련되어 있지 않은 곳이 있어 침수와는 또다른 사고위험을 여전히 내포하고 있었던 반면, 사진 --과 같이 옥상 변전실을 따로 설치하여 적절한 대책을 강구한 사례도 있었다.

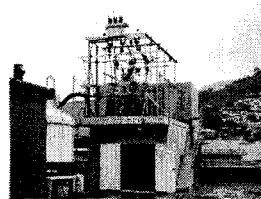


사진 2 지하구내 침수 후 옥상 위로 이설된 변전실

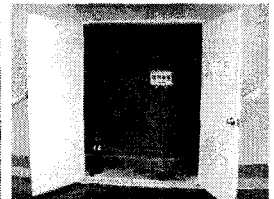


사진 3 지하구내 침수 후 옥상 위에 신축된 변전실

- 복구용 투입장비 사용전압  
침수상황에서 신속히 벗어나기 위해서는 전기설비를 이용한 복구작업이 이루어져야 하며, 복구장비를 단순한 환경에서 사용할 경우 이에 대한 전격의 위험성을 배제할 수 없다.
- 운전 중인 변전설비의 사용전압  
지하구내가 침수된 환경에서는 대부분의 차단기가 동작하여 변전설비의 전원을 차단하지만, 부득이한 상황에서 차단에 실패하였을 경우나 복구완료 후 전원을 재투입하는 과정에서 발생할 수 있는 2차재해에 대해서도 검토가 이루어져야 한다.
- 접지상태  
다습한 지하환경에서 전기설비에 누전이 발생할 경우 이를 운용하거나 접촉하는 인원은 전격의 위험으로부터 자유로울 수 없으며, 이때 인체임피던스와 함께 인체통전전류의 크기를 지배하는 요소가 접지상태이다.

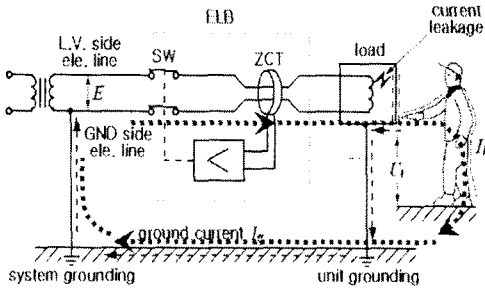


그림 2 저압전로의 감전사고 상정도

- 콘센트 설치높이  
콘센트의 설치높이는 대부분의 경우 바닥면에서 30 [cm]-1[m] 정도, 각종 스위치의 경우 바닥면에서 1[m]-1.5[m] 정도의 높이에 설치되어 내선규정에 맞춰 설치되었다고는 하나 물의 유입 시 인체에 전격을 유발할 수 있는 원인이 될 수 있었다. 일반적으로 지하구내는 습기가 많은 반면, 통풍이 이루어지지 않아 설비부식에 의한 노화가 빠르며, 각종 시설물들의 누전가능성이 지상보다 높았다.



사진 4 바닥면 높이가 약 30[cm]에 매입설치된 콘센트

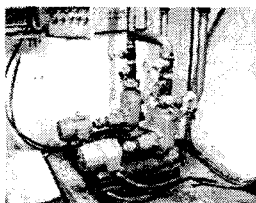


사진 5 지하구내 설치된 배수펌프

- 배수펌프의 용량  
대부분의 지하구내에서는 배수펌프를 설치하였으나, 외수법람과 같이 대량의 물이 유입했을 경우, 이를 적절히 배수하지 못했으며, 평상시 다습한 환경에서의 유지관리가 제대로 이루어지지 않아 비상시의 운전애로가 발생함은 물론 주전원차단 상태를 가정하여 비상전원에 의한 운전이 요구되었다.

- 인체관련 전기적 파라미터  
수중에서 전격에 의한 인체감전에 있어 인체와 관련된 제반 전기적 파라미터, 즉, 인체내부임피던스 및 인체피부임피던스로 이루어진 인체임피던스는 물론 절연장구 착용과 같은 제반요소가 도출되었다.
- 작업공간의 수위  
침수환경에서 작업공간과 관련된 많은 요소 중, 작업공간의 수위는 가장 중요한 요소라고 해도 지나치지 않다. 작업공간의 수위는 심실세동전류를 심장전류계수로 나눈 인체통전경로에 의한 감전전류를 결정하는 중요한 요소이기 때문이다. 작업공간의 수위는 외수의 유입량과 집수정이나 하수구를 통한 역류속도에 의해 결정된다.

### 3.2 외적요인에 의한 위험요소

외적요인으로는 하천의 범람 시 유입되는 외수에 의한 위험요인이 주를 이루며, 외수의 유입을 억제하기 위한 차수대책과 이미 유입된 물의 양과 침수속도와 같은 파라미터들은 인체의 행동을 제약하고 도전을 등의 위험요인들은 전격에 직접적인 영향을 미치지므로, 역시 고려의 대상이 되어야 한다.

- 모래주머니, 차수벽 구비 여부  
외수유입에 대비한 1차적 방안이 모래주머니와 차수벽과 같은 차수대책이며, 적절한 차수대책에 의해 침수속도를 경감함은 물론, 지하구내의 인원을 대피시킬 수 있는 시간을 획득할 수 있다.



사진 6 지하주차장 입구에 설치된 전동차수벽

- 외수 유입경로의 넓이  
지하구내 침수상황을 설정하기 위해서는 지하구내 출입구 주변의 침수고, 유입상황, 지하구내 상황을 검토한다. 지하구내 침수상황을 추정하기 위해서는 지상부 침수실태, 즉 침수고와 침수속도가 중요한 요소가 된다. 지하구내로의 유입상황을 판단하기 위해서는 지하구내 각 유입구에 관한 위치, 표고, 규모 등을 정리한다. 먼저 설정한 침수실태를 기초로 하여 각 유입구에서 지하구내로 유입된 유량을 산출함과 동시에 그것을 합산하여 시간에 따른 지하구내로의 유입용량을 산출한다. 또한, 지하구내로의 유입량은 지상의 침수심과 함께 시간마다 변화하며, 각 시간의 침수심에 대한 유입량은 아래와 같이 산출된다.

$$Q(t) = 1.59BH(t)^{1.65}$$

단,  $B$  : 유입폭[m]

$H(t)$  : 시간  $t$ 에서 지상침수고[m]

$Q(t)$  : 시간  $t$ 에서 지하구내 유입량[l/s]

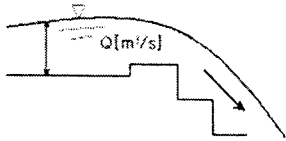


그림 3 지상침수심과 외수유입량과의 관계

시작시간부터 시간  $t$ 까지의 지하구내의 유입체적은 시작부터 시간  $t$ 까지의 유입량을 적분한 것이다. 계산방법으로는 입구쪽으로 유입된 물이 빠르게 전체 면적에 수평으로 된다는 가정 하에 산출하는 것이 좋지만, 통로 등의 특정한 구획만이 활용되는 경우도 있으므로, 지하구내의 구조를 자세히 조사하여 지하구내의 구조가 복잡한 경우, 필요에 따라 별도로 유입구의 고저 차이, 유입방지 조치, 지하구내 고저차 등을 고려하여 해석해야 한다.

$$h(t) = V(t)/A_s$$

단,  $h(t)$  : 시간  $t$ 에서 지하구내 침수심[m]

$V(t)$  : 시간  $t$ 에서 지하구내 유입용량[ $\pi$ ]

$A_s$  : 유입수가 지나는 지하구내 바닥면적[ $\pi$ ]

· 우수의 도전을

지하구내로의 외수유입은 계단은 물론 환기를 위한 통풍구 및 집수정을 통해서도 이루어졌으며, 이로 인해 각종 이물질에 의한 오염수가 전격위험성 및 인명피해를 증가시킬 수 있다.

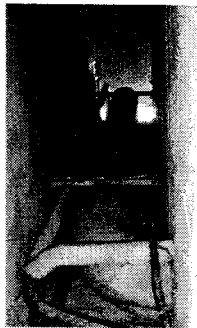


사진 7 외수유입의 통로가 된 통풍구

· 우수의 유입속도/유입량

지하구내로의 우수유입속도 및 유입량은 이미 설명한 작업공간의 수위를 결정하는 요소로서, 우수의 도전율과 함께 인체에 대한 전격위험성을 좌우하는 중요한 요소로 작용한다. 지상의 침수심 및 월류수심의 상승속도는 지형특성을 고려하여 설정한다. 단, 하천의 범람 또는 해일에 의한 침수가 발생하는 경우, 적절한 침수속도를 산정하는 것은 매우 중요하다. 해당 지역에서 제시된 침수심은 지하구내의 자산을 지키는 침수 방어시설 설계 시의 판단자료가 되므로, 기왕홍수에 의한 침수심이나 최대침수심에 대해서도 정리해둘 필요가 있다. 침수속도는 주변의 지형특성에 의해 설정하는 것을 기본으로 하지만, 하천 범람의 경우, 해일에 의한 침수가 추정된 구역에서는 이를 감안해야 한다. 과거의 침수실태나 범람 계산 등을 살펴볼 때, 침수속도는 최대침수심과 어느 정도 비례한다. 수심에 따른 침수속도의 일례를 표 4에 나타내었다[7].

표 4 수심에 따른 추정침수속도

수심 0.0~0.5[m]	추정침수속도 2[cm/분]
수심 0.5~2.0[m]	추정침수속도 3[cm/분]
수심 2.0[m] 이상	추정침수속도 별도 설정

4. 결 론

본 논문에서는 지하구내가 내·외부적인 요인으로 인해 침수되었을 경우, 이와 같은 상황에서 벗어나기 위해 투입되는 복구인력이 경험할 수 있는 전기적인 위험을 최소화시키기 위한 일환으로 전기위험요소를 도출하였다. 이를 위해 기왕침수 지역을 답사하고 현장관리인들로부터 침수방지대책에 대한 의견을 수렴하였음은 물론, 다양한 문헌조사와 국내·외의 사례를 분석함으로써 침수 시 전기적인 위험요소를 도출할 수 있었다. 이와 같이 도출된 위험요소는 추후 각각의 웨이트 부여 및 전문가들의 의견수렴과정을 거쳐 침수 시의 위험으로부터 벗어나기 위한 총체적인 관리프로그램을 개발하는데 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] C. Beardsley, "Simple Solutions(preventing the flooding problem of the Hudson River tubes)", Mechanical Engineering, CIME, Feb. 1993.  
 [2] K. Toda and K. Inoue, "Characteristics of Recent Urban Floods in Japan and Countermeasures against Them", Second International Symposium on Flood Defence, Beijing, Sep. 2002.  
 [3] B. Jones, The Columbian, 17 Dec. 1999.  
 [4] UPI, 14 Jun. 2000.  
 [5] D. Dutta, H. Takamura, and S. Herath, "Understanding Flood Behavior in Underground Facilities for Urban Flood Risk Management", New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, pp.206-207, Oct. 2003.