

# 도시침수 발생 시 침수계단 대피 시간 정량화에 관한 실험적 연구

김예림, 주재승, 김학수, 이보람, 금호준, 이훈석  
국립재난안전연구원  
e-mail: yerim05@korea.kr

## An Experimental Study on the Quantification of Evacuation Time in Flooded Stairs During Urban Flooding

Ye-Rim Kim, Jae-Seung Joo, Hak-Soo Kim, Bo-Ram Lee, Ho-Jun Keum, Hoon-Seok Lee  
National Disaster Management Research Institute

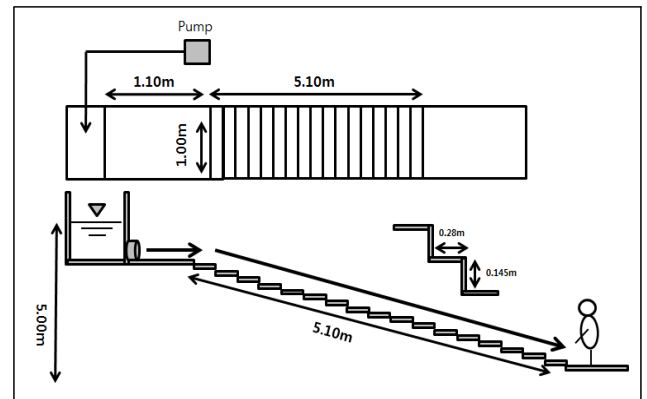
### 요약

본 논문에서는 도시침수 시 발생할 수 있는 침수계단 탈출상황에 대한, 대피자의 유형(성별, 연령, 신장, 체중, BMI)에 따른 대피 시간 정량화 실험을 수행하였다. 토빗 회귀모형을 이용한 분석 결과, 침수심 30cm 조건에서, 독립변수 성별과 신장에 대한 유의미한 결과를 확인할 수 있었고, 이를 통해 침수심 30cm에서 성별과 신장에 따른 대피 시간을 계산할 수 있는 경험식을 도출하였다. 도출된 경험식은 침수 시 지하공간 대피로 설정을 위한 시뮬레이션 등에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

였고 추가 지원자를 대상으로 일본토목학회 지하공간연구위원회(2006)에서 제시한 권장한 청년이 계단을 대피하지 못하는 지상 침수심 40cm에 대한 실험을 진행하였다.

## 1. 서론

최근 기후변화의 영향으로 집중호우가 빈번하게 발생하며, 이에 따라 도시지역에 침수가 발생하는 상황이 자주 생긴다. 도시침수 시 지하공간에서 지상으로 탈출하기 위해선 반드시 침수되어 물이 흘러 내려오는 계단을 거슬러 오르는 과정이 발생하게 된다. 따라서 지하공간 대피기준을 마련하기 위해서는 계단을 통해 탈출하는 대피 시간을 계산하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 국립재난안전연구원의 침수상황 체험프로그램 중, 침수계단 탈출체험의 탈출시간 자료를 활용하여 대피시간을 산정할 수 있는 회귀식을 제시하고자 한다.



[그림 1] 침수계단 탈출체험시설 모식도

피실험자는 가슴장화와 안전띠, 안전모를 착용하였고, 실험자가 미끄러질 경우를 대비하여 안전띠를 머리 위의 고리에 연결하여 실험자의 이동에 따라 레일을 따라 함께 이동하도록 하였다.

## 2. 실험 방법 및 분석모형 결정

### 2.1 실험 장치 및 방법

실험에 사용된 장치는 그림 1과 같다. 왼쪽 위의 수조를 통해 물이 흘러나오며, 피실험자가 첫 번째 계단을 밟는 순간부터 마지막 계단을 밟는 순간까지를 대피 시간으로 정하였다. 침수심은 안전을 고려하여 유입구 앞의 수심 기준 30cm로 하

### 2.2 분석모형 결정

2019년부터 3년간 총 366명(남성 196명, 여성 170명)의 자료를 수집하였고, 독립변수는 피실험자의 연령, 신장, 체중, BMI 수치이며, 종속변수는 탈출에 걸리는 시간이다. 수심

30cm와 40cm의 피실험자의 기술통계량은 표 1, 2와 같다.

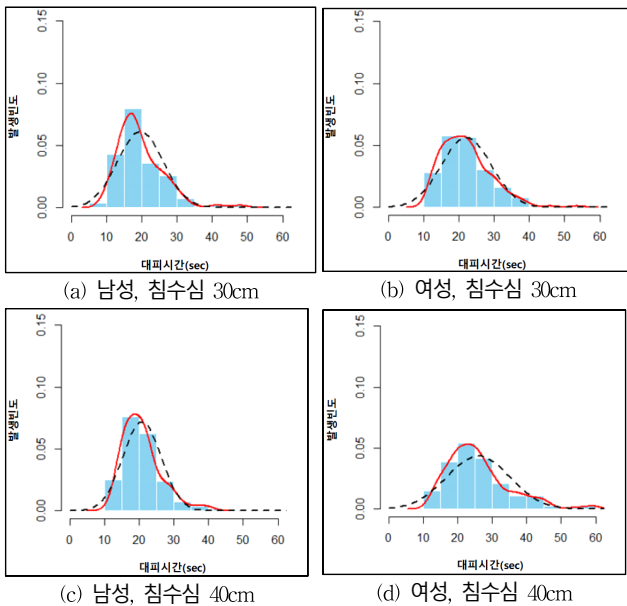
침수심과 성별에 따른 대피 시간의 빈도 그래프와 비모수 추정 확률밀도 분포, 독립변수의 정규분포 추정 결과를 비교하였다(그림 2(a)~(d)). 자료분포가 왼쪽으로 치우치며 꼬리가 오른쪽으로 길게 나타나는 양의 왜도(positive skewness) 형태이므로 정규성을 만족하지 못하므로 최소제곱법 회귀모형을 이용하여 분석하는 것은 적합하지 않은 것으로 판단된다.

[표 1] 침수심 30cm의 피실험자 기술 통계량

| 구분   | 남성(N=196) |         |         | 여성(N=170) |         |         |
|------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
|      | 연령        | 신장 (cm) | 체중 (kg) | 연령        | 신장 (cm) | 체중 (kg) |
| 최대   | 76.0      | 187.0   | 110.0   | 78.0      | 179.0   | 81.0    |
| 최소   | 11.0      | 141.0   | 30.0    | 11.0      | 139.0   | 20.0    |
| 평균   | 24.2      | 171.1   | 67.2    | 27.3      | 159.9   | 54.0    |
| 표준편차 | 13.7      | 8.6     | 14.7    | 16.7      | 7.0     | 9.6     |
| 중앙값  | 17.0      | 173.0   | 66.0    | 18.0      | 160.0   | 53.0    |
| 최빈값  | 17.0      | 170.0   | 80.0    | 18.0      | 160.0   | 50.0    |

[표 2] 침수심 40cm의 피실험자 기술 통계량

| 구분   | 남성(N=160) |         |         | 여성(N=144) |         |         |
|------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
|      | 연령        | 신장 (cm) | 체중 (kg) | 연령        | 신장 (cm) | 체중 (kg) |
| 최대   | 75.0      | 187.0   | 110.0   | 64.0      | 179.0   | 81.0    |
| 최소   | 14.0      | 150.0   | 35.0    | 14.0      | 145.0   | 20.0    |
| 평균   | 25.1      | 172.4   | 68.5    | 27.5      | 161.3   | 55.0    |
| 표준편차 | 13.0      | 7.1     | 14.0    | 14.4      | 6.0     | 8.7     |
| 중앙값  | 18.0      | 173.0   | 67.5    | 21.0      | 161.0   | 55.0    |
| 최빈값  | 17.0      | 170.0   | 80.0    | 18.0      | 161.0   | 60.0    |



[그림 2] 성별 및 침수심에 따른 대피 시간 빈도 및 정규분포 추정

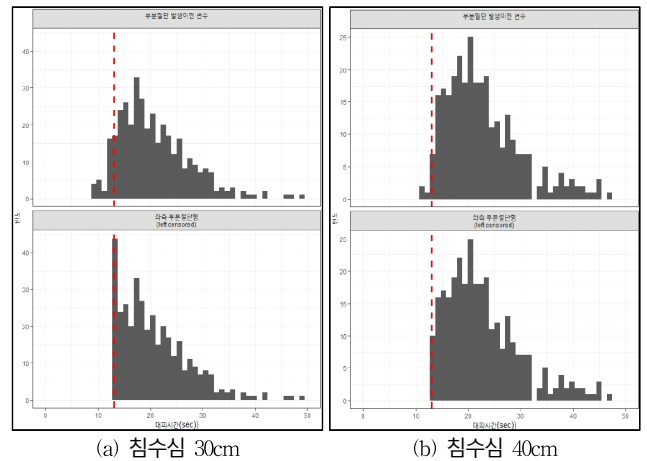
본 연구의 종속변수인 대피 시간을 측정할 때는 앞에서 언급한 것과 같이 체험자의 이동에 맞춰 안전고리를 함께 이동

시키게 된다. 고리의 최소 이동시간은 13초로 고정되어 있으나, 일부 신체 능력이 우수한 피실험자는 고리의 이동속도보다 빠르게 계단을 오를 수 있다. 이때, 체험자는 고리에 의해 뒤로 당겨지거나 고리의 속도를 의식하여 본인의 능력보다 느린 속도로 이동하는 등 대피 시간에 간섭을 받게 된다. 따라서 대피 시간 측정치는 중도절단(censoring) 되었다고 판단할 수 있다. 자료의 분포가 정규성을 만족하지 못하고, 중도절단 되었으므로 이러한 표본 자료에 적합한 회귀모형인 토빗 회귀모형(Tobit regression model)을 이용하여 침수계단에서의 대피 능력을 추정하였다.

### 3. 결과분석

#### 3.1 토빗 회귀분석

토빗 회귀모형은 일반화선형모형 중 하나인 프로빗 회귀모형(Probit regression model)을 이용하여 중도절단 자료를 다룰 수 있도록 고안된 통계모형으로, 토빗 회귀모형의 종속변수는 정규분포를 따르는 것으로 가정하여 중도절단된 시점 전·후의 종속변수를 정규분포 내의 확률로 추정할 수 있다. 분석에 앞서 대피 시간 측정값을 중도절단 자료에 적합하도록 변형시켜 주어야 한다. 고리의 최소 이동시간인 13초 이하의 자료를 모두 13초로 변환시켜 중도절단 자료화하여 원래의 자료와 비교한 그래프를 침수심별로 그림 3(a), (b)에 나타내었다.



[그림 3] 중도절단 자료 분포 변화

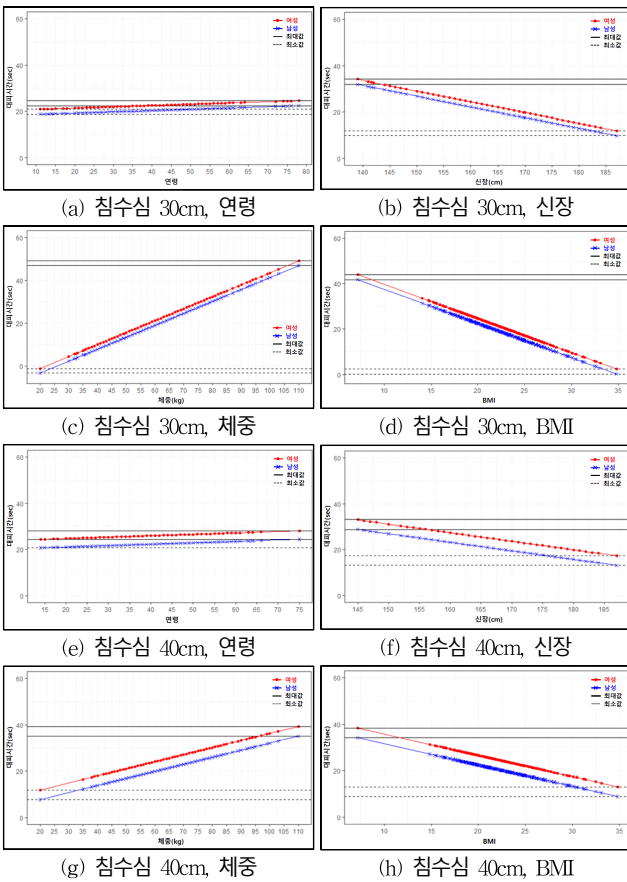
#### 3.2 실험결과 및 분석

토빗 회귀모형에 입력된 자료는 종속변수인 대피 시간과 독립변수인 연령, 신장, 체중, BMI이다. 분석은 R의 'VGAM' 패키지를 활용하였다. 추정된 결과는 표 3과 그림 4(a)~(h)와 같다. 성별을 제외한 독립변수의 효과를 통제했을 때 유의확률

[표 3] 토빗 회귀모형을 이용한 대피 시간 회귀분석 결과

|              | 침수심 30cm                   |      |         | 침수심 40cm                   |      |         |
|--------------|----------------------------|------|---------|----------------------------|------|---------|
|              | 회귀계수                       | 표준편차 | t-value | 회귀계수                       | 표준편차 | t-value |
| 절편           | 19.53***                   | 0.58 | 33.62   | 21.44***                   | 0.70 | 30.53   |
| 성별<br>(여성=1) | 2.18*                      | 0.95 | 2.29    | 3.67**                     | 1.16 | 3.15    |
| 연령           | 0.06*                      | 0.03 | 2.08    | 0.06                       | 0.03 | 1.77    |
| 신장           | -0.46*                     | 0.21 | -2.17   | -0.37                      | 0.30 | -1.24   |
| 체중           | 0.56                       | 0.29 | 1.93    | 0.34                       | 0.39 | 0.84    |
| BMI          | -1.50                      | 0.82 | -1.83   | -1.03                      | 1.13 | -0.92   |
| LRT          | $x^2(5) = 74.65, p < 0.01$ |      |         | $x^2(5) = 40.00, p < 0.01$ |      |         |

\* 유의수준: \* p < 0.05, \*\* p < 0.01, \*\*\* p < 0.001



[그림 4] 침수심별 회귀모형 결과 비교

수준 5%에서, 여성의 대피 시간이 남성보다 침수심 30cm에서 2.18초(p<0.05), 침수심 40cm에서 3.67초(p<0.05) 늦은 것으로 나타났다. 연령에 따른 변화는 두 침수심에서 모두 연령 1세당 0.06초씩 대피 시간이 증가하였으나, 침수심 40cm의 결과는 통계적으로 유의미하지 않은 것으로 나타났다. 신장이 증가할수록 대피시간은 감소하는 경향을 보였으며, 연령과 동일하게 침수심 40cm의 결과는 통계적으로 유의미하지 않은 것으로 나타났다. 체중과 BMI는 모두 유의확률 수준을 벗어나 통계적으로 유의미하지 않았다. 침수심 30cm에 비해 침수심 40cm의 결과가 전반적으로 유의수준이 저조하였는데,

이는 침수심 30cm를 경험한 사람을 대상으로 40cm 시험을 진행하였으므로, 침수계단 대피 경험이 또 다른 변수로 작용하였다고 생각된다. 전체 모형의 설명력은 우도비(likelihood ratio) 테스트를 통해 검증하였는데, 유의확률 수준 1%에서 통계적으로 유의미한 것으로 나타났다.

각 독립변수에 따른 침수계단 대피 시간 추정 결과를 종합적으로 해석하면, 성별에 따른 대피 시간은 통계적으로 유의미한 수준에서 여성이 남성의 차이가 있었으며, 신장이 클수록 대피 시간이 빨라지는 것으로 나타났다. 연령이 증가함에 따라 대피 시간도 증가하였으나 그 추세가 크지 않았고, 체중과 BMI의 결과 또한 통계적으로 유의미하다고 보기 어려웠다. 따라서 통계적으로 의미가 있는 침수심 30cm에서 신장과 대피 시간의 관계를 이용하여 다음 식 1과 같은 경험식을 제시할 수 있다.

적용한계: 침수심 30cm일 때,  $139cm \leq \text{신장}(cm) \leq 187cm$   
 남성의 대피 시간:  $97.91 - 0.46 \times \text{신장}(cm)$  [식 1]  
 여성의 대피 시간:  $100.09 - 0.46 \times \text{신장}(cm)$

위의 식 1은 침수심 30cm일 때와 침수심 30cm의 실험에 응한 피실험자의 신장 최솟값인 139cm와 최댓값인 187cm 사이의 값에만 적용할 수 있으며, 이를 이용하여 침수 시 지하공간 대피로 설정을 위한 시뮬레이션 등에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 5. 결론

토빗 회귀모형을 이용하여 침수심 30cm와 40cm에서 지하계단 대피 시간에 관한 연구를 진행하였다. 분석 결과 침수심 30cm일 때, 성별·신장과 대피 시간의 관계를 이용하여 대피 시간을 추정할 수 있는 경험식을 도출하였다. 본 연구에 활용한 신장, 체중 등의 독립변수는 종속변수와의 설명력이 전반적으로 높지 않은 것으로 나타나 향후 실험 시 근육량, 심리적 영향(두려움, 불안감 등) 등의 자료를 추가로 수집하여 보완연구를 진행한다면 더욱 의미 있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] 백영민, "R 기반 제한적 종속변수 대상 회귀분석", 한나래 아카데미, 2019년.
- [2] 주재승, 김태훈, "지하공간 침수시 대피능력에 관한 실험적 연구", 한국방재학회 논문집, 제15권 제2호, pp. 189-196, 2015년.
- [3] 本土木学会 地下空間研究委員会, 地下空間浸水時の避難・救助システムに関する研究, 2006년.