

지하공간 대피경보기준 설정을 위한 한계침수심에 관한 연구

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

A Study on the Limit Inundation Depth for the Establishment of Evacuation Warning Criteria in Underground Space

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

요약

본 논문은 지하공간 침수시 대피경보 기준 마련을 위한 연구로써, 침수심에 따른 출입문 개방 가능 정도를 확률론적 모형으로 분석하였다. 과거 침수상황 체험 프로그램을 통해 확보된 401명의 자료를 이항 분포 모형에 적합한 허들회귀 모형에 적용하여 분석하였다. 분석 결과 침수심이 증가하는 경우 고립될 확률은 급격히 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 여성의 경우 0.30m에서 출입문을 개방하지 못하고 고립될 확률이 37.75%를 차지하며, 남성(0.35%)보다 100배 위험한 것으로 나타났다. 또한 0.25m에서의 침수심과 비교해 고립될 확률이 급격히 증가(0.04%→37.75%)하는 것으로 보아 침수심이 0.05m 증가만으로도 여성의 경우 출입문을 개방하지 못하고 고립될 확률이 매우 높아지는 것으로 나타났다.

1. 서론

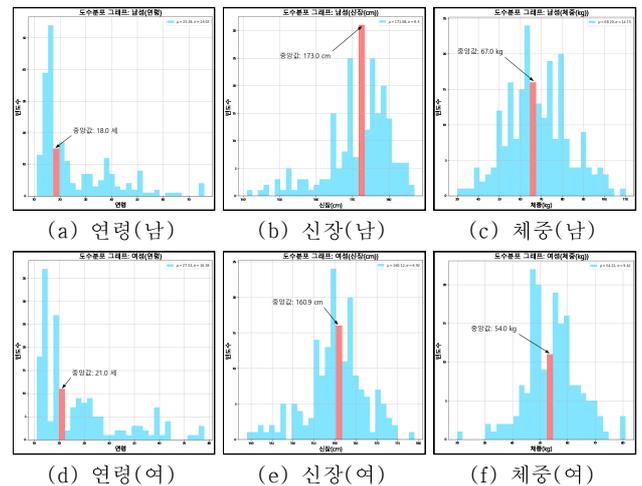
폐쇄적인 특성을 가지는 지하공간은 대피 통로가 제한적이어서, 침수 발생시 내부 침수심이 깊어지기 전 빠르게 지상으로 대피를 하는 것이 안전하다. 그러나 대부분의 지하공간 인명사고는 지상의 홍수 상황에 대한 정보를 실시간으로 얻지 못하여 지하공간이 침수됨을 조기에 인지하지 못하며, 시간이 지나 지하공간 침수심이 매우 증가하면 출입문을 열지 못해 지하공간에 고립되어 위험한 상황에 부닥치게 된다. 따라서 침수상황에 대비하여 지하공간은 대피경보시설 설치가 필수적이며, 대피 가능한 골든타임을 확보하기 위해 출입문 개방 한계수심에 관한 연구가 필요하다.

주재승과 김태훈(2015)은 0.4m를 성인 여성 1인 기준 출입문 개방이 어려운 침수심으로 제시를 하였으며, Baba *et al.*(2017)의 경우도 실험을 통해 성인 남성 0.4m, 성인 여성 0.3m의 수심에서 출입문 개방이 힘든 것으로 제시하였다. 그러나 선행연구의 경우 성인을 기준으로 제시한 실험 결과로써, 실험자의 다양한 연령대, 신장 등 특성치에 대한 반영과 확률적인 해석이 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 과거 침수상황 체험 프로그램 운영시 확보된 체험자의 기록을 활용하여 침수심별 체험자 특성치에 따른 출입문 개방 능력을 확률적으로 평가하고 대피한계 수심을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 자료 수집

출입문 개방 한계수심 분석을 위해 최근 3년간('19년~'21년) 침수상황 체험 프로그램에 참여한 일반인을 대상으로 관측된 자료를 활용하였다. 분석에 활용된 자료의 표본 수는 남성 226명, 여성 175명으로 총 401명의 표본자료를 확보하였으며, 체험 참여자의 특성 빈도 그래프는 그림 1과 같다.



[그림 1] 체험 참여자 특성 빈도 그래프

체험 진행 방법으로는 출입문 외부방향의 수심을 0.60m로 설정하고 체험 운영자의 신호와 함께 체험자가 출입문 개방을 시도하였다. 이때, 출입문을 개방하면 0.05m씩 수위를 증

가시커 개방이 가능할 때까지 제시도하였으며, 체험자가 출입문 개방이 어려우면 수심을 0.05m씩 낮춰 제시도하였다. 최종 개방된 수심은 기록자가 기록하여 정리하였으며, 최종적으로 기록된 표본자료의 구조는 표 1과 같다

[표 1] 401명의 출입문 개방 체험 표본자료 구조(401행 × 5열)

순번	성별	연령	신장(cm)	체중(kg)	개방 가능 수심(m)
1	남	45	178	90	0.55
2	남	38	177	63	0.45
3	남	31	168	59	0.35
4	여	32	164	56	0.35
5	남	28	177	81	0.50
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
397	여	13	152	53	0.25
398	여	12	150	40	0.35
399	여	12	145	32	0.20
400	여	12	142	35	0.30
401	여	12	167	79	0.45

2.2 자료 가공

출입문 외부에 침수심이 발생하여 수압이 작용한다면, 출입문 개방시 평소 사용하는 힘보다 더 큰 힘을 사용해야만 출입문 개방이 가능하다. 따라서 근육량은 출입문 개방 능력에 매우 중요한 인자로서, 신체기능 평가시 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 본 연구에서 수집된 표본자료는 연령, 신장, 체중만이 수집되어 근육량을 고려한 분석은 어려운 실정이며, 과거 체험에 참여한 일반인들의 체성분을 재측정한다는 것은 현실적으로 어려움이 따른다(Sung and Kim, 2014). 따라서 근육량을 대체할 다른 인자를 고려할 필요가 있다.

과거 다수의 연구사례를 살펴보면 근육량 또는 신체 구성 성분 대신 비만 지표인 체질량지수(Body Mass Index, 이하 BMI)를 일상생활, 기초활동 등의 상관관계 분석에서 많이 활용하고 있다. Lee and Lee(2005)는 여대생을 대상으로 BMI와 운동능력 인자를 평가하였으며, 체중이동을 하지 않는 운동 능력 인자에서 BMI 수치가 과체중에 해당하는 여대생이 정상체중, 저체중에 해당하는 여대생보다 악력, 배근력, 유연성 모두 높은 수치가 나타나는 것으로 제시하였다. 여기서 BMI 분류 등급은 비만진단기준에 따라 등급이 분류되었으며, 자세한 등급은 표 2에 나타내었다.

[표 2] 아시아-태평양 비만진단기준

분류	BMI(kg/m ²)
저체중	< 18.5
정상체중	18.5~22.9
과체중	23.0~24.9
비만 I	25.0~29.9
비만 II	30.0~39.9
고도비만	≥ 40.0

표 1에서 기록된 종속변수는 체험자가 해당 기록 이하에서 출입문 개방이 가능하다는 것을 의미하며, 해당 기록을 초과하는 수심에서는 개방할 수 없다는 것을 의미한다. 예를 들어 체험자 A는 수심 0.40m에서 출입문 개방에 성공하였다면, 0.45m 초과에서는 출입문 개방이 어려운 것으로 간주하여 수심별 출입문 개방 성공과 실패 범주 형태 자료로 변환할 수 있다. 따라서 본 연구의 종속변수를 표 3과 같이 이분형 범주 자료로 변환하였다. 이때, O는 출입문 개방 성공, X는 실패를 의미한다. 본 연구의 측정치인 개방 가능 수심은 체험자들이 독립시행되어 나타난 결과로써, 각 개인의 측정치는 독립적인 사건이며 이항분포로 정의될 수 있다.

[표 3] 종속변수의 이분형 범주자료 변환 결과

순번	종속변수	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
1	0.55	X	O	O	O	O	O	O	O	O
2	0.45	X	X	X	O	O	O	O	O	O
3	0.35	X	X	X	X	X	O	O	O	O
4	0.35	X	X	X	X	X	O	O	O	O
5	0.50	X	X	O	O	O	O	O	O	O
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
397	0.25	X	X	X	X	X	X	X	O	O
398	0.35	X	X	X	X	X	O	O	O	O
399	0.20	X	X	X	X	X	X	X	X	O
400	0.30	X	X	X	X	X	X	O	O	O
401	0.45	X	X	X	O	O	O	O	O	O

※ O : 성공, X : 실패

2.3 자료 분석

본 논문은 이항분포를 따르는 제한적 종속변수에 활용이 가능한 허들 회귀모형을 이용하여 분석을 수행하였다. 허들 회귀모형은 표본의 전체 사례 중 0인지, 양의 정수 인지를 추정하는 제로 모형(Zero model)과 얼마나 큰 양의 정수인지를 추정하는 카운트 모형(Count model)을 동시에 추정함으로써, 1 이상의 횟수에 대해 0을 예측하는 추정 결과와 1 이상의 횟수를 예측하는 추정 결과 두 가지를 제시한다. 이를 통해 0이 과도하게 발생하면서 생기는 과도분포 현상을 다루며, 허들을 넘는 과정에 영향을 미치는 변수 또한 허들을 넘고 난 후의 과정에 영향을 미치는 변수가 무엇인지를 구분하여 추정하고 설명한다. 이때, 제로 모형은 이항 로지스틱 회귀모형을 이용하며, 카운트 모형은 포아송 회귀모형 혹은 음이항 회귀모형을 이용해 추정하게 된다(백영민, 2019; Greene, 2012).

본 연구는 허들 회귀모형 중 제로 모형만을 사용하여 분석하였으며, 제로 모형은 이항 로지스틱 회귀모형에서 추정한 확률비(Odds rate)를 분자에 그리고 해당 확률비에 1을 더한 값을 분모에 투입한 값을 통해 허들을 넘을 확률을 계산한다. 확률비를 계산하는 산정식은 (식 1)과 같이 표현된다.

$$P(y_i = 0 | w_i) = \frac{1}{1 + e^{\gamma w_i}} = \pi_i \quad (\text{식 1})$$

[표 4] 침수심에 따른 허들 모형 회귀계수 추정 결과

구분	0.25m	0.30m	0.35m	0.40m
절편(남성=0)	-26.297 (7,404.682)	-5.591 (38.042)	-2.741 *** (0.285)	-0.887 *** (0.162)
성별(여성=1)	18.384 (7,404.681)	5.091 (38.042)	2.557 *** (0.316)	2.655 *** (0.287)
연령	-0.227 (0.293)	0.416 (0.188)	0.021 * (0.010)	0.008 (0.009)
BMI	-0.391 * (0.188)	-0.696 * (1.056)	-0.345 *** (0.059)	-0.292 *** (0.047)
구분	0.45m	0.50m	0.55m	0.60m
절편(남성=0)	0.509 ** (0.158)	2.003 *** (0.242)	3.328 *** (0.427)	4.725 *** (0.824)
성별(여성=1)	3.667 *** (0.613)	3.356 ** (1.029)	17.453 *** (2,038.054)	17.121 * (3,379.867)
연령	-0.002 *** (0.010)	-0.006 (0.012)	-0.016 (0.016)	-0.027 (0.027)
BMI	-0.291 (0.048)	-0.301 *** (0.054)	-0.323 (0.075)	-0.279 (0.128)

* 유의확률 수준 : *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001

3. 연구 결과

범주자료의 형태로 변환한 자료를 종속변수로 두고 독립변수 성별, 연령, BMI를 함께 적용하여 회귀계수를 추정하였다. 회귀계수 추정시 모형에 적용한 종속변수는 각각의 침수심에 따라 추정하였으며, 허들 회귀모형에서는 0이 발생할 확률을 추정하므로 성공(O)을 숫자 0으로 실패(X)를 숫자 1로 지정하여 추정한 결과의 y축이 대피확률 곡선으로 나타나도록 유도하였다. 또한 독립변수인 성별은 여성과 남성이라는 범주형 변수이므로 남성을 0, 여성을 1로 이진화하였으며, 성별과 다른 두 독립변수인 연령, BMI에 대한 상호작용을 추정하였다. 대피확률을 추정한 결과는 표 4에 나타내며, ()의 수는 표준 오차, (*)는 유의확률 수준을 의미한다. 분석된 결과에서 0.25m, 0.30m의 절편(남성=0) 및 성별(여성=1)과 0.55m, 0.60m의 성별(여성=1)의 표준 오차가 매우 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 각 수심의 종속변수에서 입력된 값이 전부 0이거나 1인 자료로 입력되어 과대 분포 현상이 발생한 결과로 판단된다.

도출된 결과를 해석하는 방법은 흔히 이항 로지스틱 회귀 모형에서 해석하는 회귀계수에 exponential(exp(회귀계수))을 취하는 방식이 아닌 (식 1)과 같이 회귀계수에 exponential을 취한 값에 1을 더한 후 역수를 산정한 값을 확률로 이용하게 된다. 또한 본 연구의 독립변수에서 성별과 연령, BMI에 대한 상호작용을 추정함에 따라 표 4의 절편은 성별의 0에 해당하는 남성의 회귀계수를 나타낸다. 따라서 남성에 대한 침수심 0.60m일 때 출입문을 개방하는 확률을 계산하면 다음 (식 2)와 같다. 여성의 경우 표 4.7(p.17 참조)의 성별(여성=1)에 대한 회귀계수를 절편(남성=0)의 값에 더해 줌으로써 확률

을 계산할 수 있다. 여성의 대피확률을 계산하는 방법은 식 3에 나타내었다.

$$\text{남성}_{\text{침수심}=0.60m} = \frac{1}{1 + e^{4.725}} \times 100 = 0.88\% \quad (\text{식 2})$$

$$\text{여성}_{\text{침수심}=0.60m} = \frac{1}{1 + e^{4.725 + 17.121}} \times 100 = 0.00\% \quad (\text{식 3})$$

(식 1)에 따라 침수심 0.60m에서 대피확률을 계산한 결과 남성은 0.88%, 여성은 0.00%로 남·여 모두 대피가 불가능한 것으로 나타났다. 각 침수심별 남·여별 대피확률을 계산한 결과는 표 5에 나타내었으며, 대피확률의 변화 양상을 그림 2에 성별-BMI에 따라 나타내었다. 또한 100%에서 대피확률을 차(-)한 값을 개방하지 못하고 고립될 가능성으로 판단하여 표 5에 함께 표기하였으며, 이때, 통계적으로 유의한 수준을 (*)로 나타내었다.

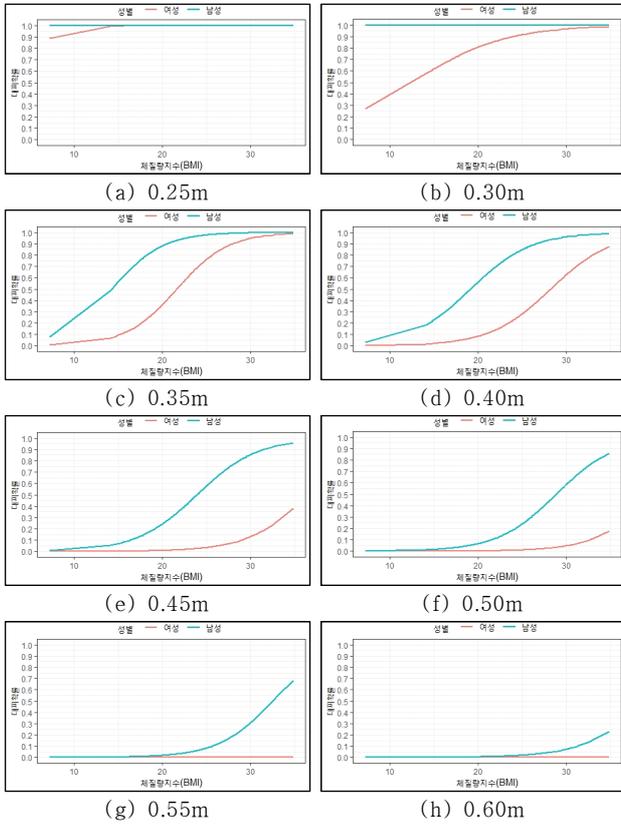
[표 5] 침수심별 남·여 출입문 개방 가능 확률 및 고립률

침수심(m)	대피확률 (%)		고립 위험률 (%)	
	남성	여성	남성	여성
0.25	100.00	99.96	0.00	0.04
0.30	99.63	62.25	0.37	37.75
0.35	93.94 ***	54.59 ***	6.06	45.41
0.40	70.83 ***	14.58 ***	29.17	85.42
0.45	37.54 **	1.51 ***	62.46	98.49
0.50	11.89 ***	0.47 **	88.11	99.53
0.55	3.46 ***	0.00 ***	96.54	100.00
0.60	0.88 ***	0.00 *	99.12	100.00

* 유의확률 수준 : *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001

참고문헌

- [1] 주재승, 김태훈, “지하공간 침수시 대피능력에 관한 실험적 연구”, 한국방재학회논문지, 제 15권 2호, pp. 189-196, 4월, 2015년.
- [2] Y., Baba, T., Ishigali, K. Toda, Experimental Studies on Safety Evacuation from Underground Space Under Inundated Situation, Journal of JSCE, Vol. 5, pp. 269-278, 2017
- [3] 성순창, 김현수, “지역거주 노인의 BMI와 활동체력과의 관계”, 한국생활환경학회지, 제21권, 제2호, pp. 223-229, 2014.
- [4] 이현옥, 이윤신, “여대생 비만지수에 따른 영양소 섭취량과 운동능력 및 신체 구성과의 상관관계”, 한국식품영양학회, 제18권, 제2호, pp. 127-134, 2005.
- [5] 국립재난안전연구원, “실증실험 기반 도시침수 방지시설 홍수저감 영향평가(I)”, pp. 91-107, 2021.



[그림 2] 지하공간 침수심에 따른 대피확률 변화 양상(성별-BMI)

4. 결론

출입문 외부 침수심 0.25m에서 남성의 경우 100% 출입문을 개방하여 대피가 가능한 것으로 나타났으며, 여성은 저체중에서 대피확률이 약 10%가량 감소하는 것으로 나타났다. 0.30m는 여성의 경우 저체중과 함께 정상체중, 과체중에서도 대피확률이 급격히 감소하는 것으로 나타났으며, 침수심 0.35m부터는 남성 역시 저체중과 정상체중의 대피확률이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 또한 침수심 0.45m부터 여성의 경우 과체중 이상을 제외한 나머지 체중에서 대피할 수 없는 것으로 나타났으며, 남성은 저체중에서는 대피가 어려운 것으로 나타났다. 침수심 0.60m는 남성의 과체중을 초과하는 체중을 제외한 나머지 체중에서 대피할 수 없는 것으로 나타났다.

침수심이 증가하는 경우 고립될 확률은 급격히 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 여성의 경우 0.30m에서 출입문을 개방하지 못하고 고립될 확률이 37.75%를 차지하며, 남성(0.35%)보다 100배 위험한 것으로 나타났다. 또한 0.25m에서의 침수심과 비교해 고립될 확률이 급격히 증가(0.04%→37.75%)하는 것으로 보아 침수심이 0.05m 증가만으로도 여성의 경우 출입문을 개방하지 못하고 고립될 확률이 매우 높아지는 것으로 나타났다.