대피 곤란 정도와 동수역학적 흐름특성을 고려한 지하공간 침수 위험도 산정

Inundation Risk Evaluation of Underground Spaces Considering Evacuation Difficulty and Hydrodynamic Flow Characteristics

한용식* · 이동섭** · 김형준*** · 송창근****

Han, Yongsik*, Rhee, Dong Sop**, Kim, Hyung-Jun***, and Song, Chang Geun****

Abstract

As rapid climate change and urbanization are underway, the impervious area of the land cover is increasing. Rain falling on the ground surface can flow into underground spaces by gravity. Rainwater flowing over steep slopes enters underground spaces with a high flow velocity even at low water depths, resulting in increased momentum, leading to loss of life and property. However, previous studies have not yet provided quantitative information on the extent of flooding in underground spaces. In this study, the inundation risk of underground spaces was evaluated considering both the difficulty in evacuation and the hydrodynamic flow characteristics. When the inundation depth was approximately 0.2 m, its propagated velocity and momentum were not huge, the damage caused by the inundation was low over the entire area, and there were no difficulties in evacuation. However, in case of flow depths larger than 0.6 m, the risk index in most of the domain reached a level of 4-5.

Key words : Inundation Risk Evaluation, Underground Space, Hydrodynamic Modeling

요 지

최근 급작스러운 기후변화와 도시화가 급속도로 진행됨에 따라 도심지에 불투수층 면적이 넓어지고 있다. 지표면에 내린 우수는 중력에 의해 지하 공간으로 유하되며, 계단과 같이 급격한 경사를 가지는 구조물을 통과하는 경우 낮은 수심에서도 빠른 유속이 발생하고, 이에 따라 운동량이 증가하여 인명피해나 재산손실을 야기할 수 있다. 하지만 국내외에서 지하공간에서의 침수 피해를 정량적으로 분석한 연구는 아직 드문 실정이다. 본 연구에서는 대피 곤란 정도와 동수역학적 흐름특성을 고려하여 지하공간의 침수위험도를 산정하였다. 유입 수심이 0.2 m로 낮은 경우 공간으로 퍼져나가는 우수의 유속과 운동량이 크지 않아 침수에 의한 피해 정도가 전 영역에 걸쳐 높지 않게 나타났으며 따라서 대피에 큰 어려움이 없는 것으로 분석되었다. 그러나 유입 수심이 0.6 m 이상인 경우 대상 영역의 대부분에서 위험도 4~5등급이 나타났다.

핵심용어 : 침수 위험도 산정, 지하 공간, 동수역학 모델링

*정회원, 인천대학교 안전공학과 석사과정(E-mail: dydtlr11456@naver.com)

Member. Master Course Student, Department of Safety Engineering, Incheon National University

**정회원, 한국건설기술연구원 복합재난대응연구단 연구위원(E-mail: dsrhee@kict.re.kr)

Member. Research Fellow, Multi Disaster Countermeasure Organization, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

***정회원, 한국건설기술연구원 복합재난대응연구단 수석연구원(E-mail: john0705@kict.re.kr)

Member. Senior Researcher, Multi Disaster Countermeasure Organization, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

****교신저자, 정회원, 인천대학교 안전공학과 부교수(Tel: +82-32-835-8291, Fax: +82-32-835-0779, E-mail: baybreeze119@inu.ac.kr)

Corresponding Author, Member. Professor, Department of Safety Engineering, Incheon National University

1. 서 론

최근 급속도로 도시화가 진행되면서 건축물의 고층화와 동시에 지하 공간의 이용이 증대되고 있으며, 지하철, 지하도, 지하상가, 지하변전소, 주차장 등 다양한 용도로 밀집되어 활용되고 있다. 복합시설의 밀집화, 지하 공간의 폐쇄성, 유동인구의 고밀도화 등의 위험요인은 기후변화로 인한 집중호우나 게릴라성 폭우의 증가와 함께 작용하여 지하공간 침수피해의 위험성을 높이고 있다(Joo and Kim, 2015). 도심지의 불투수층 면적이 증가하여 강우가 내린 경우 중력에 의해 저지대로 이동하며, 노면을 따라 유하하는 우수는 다양한 경로를 통해 유입되며, 지하 공간의 침수 피해를 야기한다. 특히 계단과 같이 경사가 급한 구조물을 따라 우수가 저지대로 유입되는 경우 급류가 형성되며 낮은 수심에서도 매우 빠른 유속이 발생하고, 이에 따라 유체의 운동량이 증가하여 인명피해나 재산손실을 야기할 수 있다.

따라서 도시 전체 기반 시설 중 불특정 다수가 이용하는 지하시설의 위험성이 높으므로 집중호우에 따른 지하시설의 침수 영향 정도를 정량화할 필요가 있다. 지하공간의 침수 현상을 수치모의하는 경우 3차원 흐름모형이 가장 정확한 결과를 도출하지만 상부층과 하부층의 층고가 높은 영역을 모의하는 경우 계산격자가 많이 필요하며, 이에 따라 모의 소요 시간이 길고 결과 분석과정의 번거로움이 존재한다. 따라서 종횡방향으로 퍼져나가는 흐름에 의한 유속과 침수심 등을 계산하기 위해서는 수평 2차원 모형을 적용하는 것이 바람직하다(Rhee et al., 2015).

본 논문에서는 수평 2차원 모형을 적용하여 홍수시 지하공간으로 유입되는 우수의 침수위험도를 분석하였다. 유입수심에 따라 지하공간 내부에서 시공간적으로 변하는 유속과 수심 등의 동수역학적 흐름 특성과 내부 구조물(벽, 기둥 등)을 기준으로 공간을 구분하여 각 공간구역의 중심점에서 탈출구까지의 이동거리를 고려한 대피곤란 정도를 고려하여 위험도를 산정하였다.

2. 침수위험도 산정 방법론

2.1 위험도 분석 조건

Fig. 1과 같이 지상층으로부터 우수가 유입되어 여러 객실로 구획화되어 있는 지하공간의 침수가 발생하는 경우를 고려하였다. 우수의 시공간적인 흐름 특성(2차원 유속 및 수심)을 수치모의를 통해 분석한 결과를 바탕으로 침수 위험도를 산정하였다. 세부적인 위험도 산정 방법과 결과는 뒷절에서 상술하였으며, 본 절에서는 위험도 분석을 위한 조건과 기본 가정 사항을 정리하였다. Fig. 1과 같이 지상 연결 계단으로부터 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m, 0.8 m, 1.0 m의 수심을 가지는 우수가 유입되는 5가지 케이스를 대상으로 각각 10초의 모의시간 간격으로 총 1800초까지 수치모의를 수행

하여 위험도를 산정하였다. 객실 분포를 기준으로 지하 공간을 총 30개의 구역으로 구획화했으며, 각 구역의 중심점에서 탈출구까지의 최소 거리를 기준으로 대피 곤란 정도를 산정하였다. 위험도와 대피 곤란 정도를 이용하여 각 구역의 위험도를 산정하였다.

Fig. 1. Flooding of Underground Due to Storm Inflow

각 케이스에 대하여 10초의 모의 시간 간격으로 총 1800초까지 수치모의된 흐름 해석 결과를 바탕으로 침수 피해가 가장 심한 대표 순간을 산정하기 위해 다음과 같은 분석을 수행하였다. 우수가 지상 연결 계단을 통해 지하 공간으로 유입되어 점차 퍼져 나가는 동안 침수심과 흐름 유속이 발달하게 되나, 우수가 지하 공간을 어느 정도 채우게 되면 흐름 정체에 의해 침수 유속은 0에 가까운 값을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 수치모의를 통해 계산된 침수심과 유속을 바탕으로 시공간적으로 확산되는 우수의 공간 평균 흐름에너지가 가장 큰 순간을 침수 위험도가 가장 높은 시간이라 가정하였다. 즉, 각 케이스별로 도출된 10초 간격 180개의 모의 결과에 대하여 각 요소에서의 운동량(침수심과 유속의 곱)을 계산하여 Table 1과 같이 공간 평균값이 가장 큰 순간을 대표 위험도 산정 시점으로 정하였다.

Table 1. Risk Calculation Time

Case	0.2 m	0.4 m	0.6 m	0.8 m	1.0 m
Time	370s	320s	1100s	1790s	1800s

Fig. 2에 Table 1에 제시된 순간에서의 침수심과 유속벡터를 도시하였다. 입력 수심이 0.2 m의 경우 전반적으로 낮은 수심을 보였지만 지하공간의 폐쇄성에 의해 입력수심이 0.6 m 이상일 경우 짧은 시간에 어린 아이 또는 성인 남성의 신장과 비슷한 높이의 수심이 나타났다. 유속의 경우 유입 침수심이 증가함에 따라 커졌으며, 특히 지상층 연결계단을 돌아 나와 주흐름 방향으로 퍼져나간 후 객실문을 통과하며 와류가 크게 발생하였다. 본 논문에서는 이러한 수치해석 결과와 구획화된 각 구역에서의 대피 곤란 정도를 이용하여 각 구역에서의 정량적인 지하 공간 침수 위험도를 분석하였다.

Fig. 2. Flow Characteristics at the Time of Risk Calculation Time

2.2 위험도 산정 방법

지상층 계단을 통해 지하로 유입되는 우수의 침수 위험도를 산정하기 위해서는 침수심과 흐름 유속에 의한 동수역학적 유체력에 대한 고려와 동시에 우수 유입구와 대피 출구, 객실 정보 등의 공간 정보가 반영되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 침수위험도 해석에 핵심이 되는 이 두 가지

항목을 포함하여 침수 위험도를 분석하였다.

일반적으로 위험도를 산정할 때에는 가로축을 위험 발생 확률(Probability)로 두고 세로축을 위험 발생 시의 피해 정도 (Consequence)로 정의한다(Shin et al., 2013). 이를 통해 구성되는 매트릭스를 바탕으로 위험 발생 확률이 가장 높고 위험 발생 시의 피해 정도가 가장 큰 위험도를 최대로 산정하

여 총 3단계 내지 5단계로 등급을 구분하게 된다.

본 연구에서는 이와 동일한 방법론을 적용하고자 지표면 으로부터 우수가 지하 공간으로 유입되었을 때의 위험도를 다음과 같이 산정하였다. 우수가 지하 공간에 지속적으로 유입되면 결국 수 분 혹은 수 시간 이내에 전체 공간에 침수가 발생하게 되므로 위험 발생 확률은 모두 1이 된다. 이 경우 가로축을 정의하기 어려우므로 본 연구에서는 지하 공간을 형상과 객실 분포를 바탕으로 Fig. 3과 같이 30개 구역으로 구획화하고, 우수 유입과 탈출 대피구 위치를 고려하여 위험도를 산정하였다. 각 구역 중앙점으로부터 탈출구 까지의 전향적 선형 거리를 합산하여 대피 거리를 산정하였으며, 이렇게 계산된 30개 구역의 대피 거리를 오름차순으로 정렬한 후 3분위로 구분하였다.

Fig. 3. Dividing the Area for Calculation of Difficultly of Evacuation

Table 2에 제시된 일본 건축방재학회(JBDPA, 2005) 기준에 따라 유입 우수심이 0.4 m 이하인 경우에는 대피 보행 속도를 0.7 m/s로, 유입 우수심이 0.6 m 이상인 경우에는 0.3 m/s로 지정하였다(Lee et al., 2003). 이상의 대피거리와 보행 속도를 바탕으로 대피 소요 시간을 산정한 후 대피 곤란 정도를 상, 중, 하로 구분하였다.

Table 2. Walking Speed According to Inflow Depth

Walking speed according to inflow depth	
• Inflow depth ≤ 0.4 m,	Walking speed=0.7 m/s
• Inflow depth ≥ 0.6 m,	Walking speed=0.3 m/s

위험도 매트릭스의 세로축에 해당하는 유체 흐름력에 의한 침수 위험도는 다음과 같이 고려하였다. 계산 영역을 9,671개의 요소로 구성하고 각 요소마다 정의되는 유체 흐름력을 계산하였으며, 상대 위험도의 경우 각 요소에서 침수심과 흐름 유속의 곱으로 그 크기를 오름차순으로 정렬한 후 3분위로 구분하여 흐름력에 의한 침수 위험 정도를 상,

중, 하로 부여하였다. 이 경우 위험도는 유출입구 위치와 흐름 유체력의 공간 상대분포를 기반으로 계산된 위험도라는 이점이 있으나, 흐름 유체력에 의해 실제로 발생할 수 있는 피해 정도를 파악하기는 어려운 단점이 있다. 따라서 Beffa (1998)가 제시한 홍수 위험도(FI) 개념을 도입하여 Fig. 4와 같이 유속이 1 m/s보다 작은 경우에는 FI를 수심으로 부여하고, 1 m/s보다 큰 경우에는 FI를 운동량으로 할당하여 절대적인 침수 피해 위험도를 3등급으로 구분하는 위험도를 산정하였다(Beffa, 1998).

Fig. 4. Flood Risk Classification According to flow Characteristics

이상에서 상술한 위험도 산정 매트릭스는 Fig. 5와 같다. 앞절에서 언급했듯이 세로축은 공간으로 유입되는 우수의 흐름특성(유속과 수심)을 이용하여 Beffa (1998)가 제시한 홍수 위험도(FI)를 적용한 것이고, 가로축은 30개로 구획화한 각 구역의 중심점에서 탈출구까지의 전향적 선형거리를 기반으로 한 대피 곤란 정도를 나타내었다.

Fig. 5. Inundation Risk Estimation Matrix

3. 침수 위험도 분석

3.1 유입 수심조건에 따른 위험도

앞 절에서 상술한 방법을 통해 0.2 m 간격의 유입 수심 조건에 따른 침수 위험도를 분석하였다. 수심과 유속을 가지고 시공간적으로 확산되는 우수의 공간 평균 운동량이 가장

큰 순간을 침수 위험도가 가장 높은 시간이라 가정할 바 있으므로, 각 케이스별로 위험도 분석 대표 시점과 각 시점에서의 운동량을 3분위로 구분하고, 각 분위에서의 평균 운동량을 정리하여 Table 3에 나타내었다.

우수 유입구 및 대피 출구와 구획화된 객실 공간 정보 등을 반영한 대피 곤란 정도와 침수심 및 흐름 유속을 고려한 동수역학적 운동량을 이용하여 Table 3에 제시된 시간에서의 침수 위험도를 산정하였다. 지상층 연결 계단 영역은 위험도 산정에서 제외하였다.

Table 3. Risk Calculation Time and Tertile Average Moment

Inflow depth	Time	1/3 tertile average $h \cdot v$	2/3 tertile average $h \cdot v$	3/3 tertile average $h \cdot v$
0.2 m	370s	0.005	0.013	0.078
0.4 m	320s	0.018	0.050	0.289
0.6 m	1100s	0.013	0.047	0.617
0.8 m	1790s	0.015	0.066	1.026
1.0 m	1800s	0.021	0.094	1.453

Fig. 6. Inundation Risk Considering flow Characteristic and Difficulty in Evacuation

Fig. 6과 같이 유입 수심에 따라 침수위험도가 매우 상이하게 도출되었다. 공통적으로 지상 연결 계단을 유하한 우수가 지하 공간을 돌아 흘러 나가는 부분에서 침수 위험도가 높게 계산되었다. 유입 수심이 낮은 $h = 0.2$ m인 경우 공간으로 퍼져나가는 우수의 유속과 수심이 크지 않아 FI값이 작게 산정되었다. 따라서 침수에 의한 피해 정도가 전 영역에 걸쳐 높지 않게 나타나 대피에 큰 어려움이 없는 것으로 나타났다. 그러나 $h = 0.4$ m인 경우 유입되는 우수가 흐름력을 상실하지 않고 전파되어 가는 $0 \leq x \leq 8$ m와 $10 \leq y \leq 15$ m로 둘러 쌓인 영역에서 $h = 0.2$ m인 경우보다 더 큰 에너지를 가지고 유하하여 침수 취약도가 4등급으로 높았다. $h = 0.6$ m인 케이스와 $h = 0.8$ m인 경우는 전반적으로 위험도가 3등급 이상인 높은 위험도를 보였으며 두 경우의 침수위험도가 매우 유사하게 나타났다. $h = 1.0$ m인 경우에는 대상 영역의 절반 이상이 4등급 이상인 높은 위험도를 보였으며, 특히 가장 높은 등급인 5등급에 해당하는 구역도 $0 \leq x \leq 8$ m 구간의 대부분을 차지하였다. 결과적으로 유입 수심이 0.4 m인 경우 유입구 근방의 공간에서만 위험도가 4등급 이상을 나타내었고, 유입 수심이 0.6 m 이상의 경우 전 구역의 대부분이 위험도 4~5등급 이상을 나타내었다. 따라서 유입 침수심이 1.0 m인 경우 우수 유입지점 인근에 사람이 위치해 있다면 신속한 대피가 이루어지지 않을 시 인명 피해가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 위험도 분석 결과

이상의 결과를 바탕으로 유입 수심조건에 따른 침수 위험도 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 지상층 연결 계단으로부터 유입되는 우수의 수심이 증가함에 따라 위험도가 높아졌다. 또한 유입부와 가까울수록, 출구와 멀수록 침수위험도는 크게 나타났다.
- (2) 위험도는 각 케이스마다 매우 상이하게 도출되었다. 공통적으로 지상 연결 계단을 유하한 우수가 지하 공간을 돌아 흘러 나가는 부분에서 침수 위험도가 높게 계산되었다.
- (3) $h = 0.4$ m인 경우 유입되는 우수가 흐름력을 상실하지 않고 전파되어 가는 영역에서 침수 취약도가 4등급으로 높았다. 특히 유입 수심이 0.8 m 이상인 경우 대상 영역의 대부분에서 침수 위험도가 매우 높았다. $h = 1.0$ m인 경우에는 대상 영역의 절반 이상이 4등급 이상인 높은 위험도를 보였으며, 특히 가장 높은 등급인 5등급에 해당하는 구역도 일부 존재하였다.
- (4) $h = 0.6$ m 이상인 경우 대상 영역의 대부분이 위험도 4~5등급을 나타내었다. 따라서 유입 침수심이 1.0 m인 경우 우수 유입지점 인근에 사람이 위치해 있다면

신속한 대피가 이루어지지 않을 시 큰 인명 피해가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

도시화와 동시에 급작스러운 기후변화가 진행됨에 따라 집중호우나 게릴라성 폭우의 빈도와 강도가 증가하였고 이로 인해 지하공간의 침수 빈도가 급격히 증가하고 있으므로 지하공간의 침수 위험도를 분석하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 수재해에 따른 지하공간의 침수 영향 정도를 정량화하기 위해 다음의 연구를 수행하였다.

- (1) 상층 계단을 통해 지하로 유입되는 우수의 침수 위험도를 올바르게 산정하기 위해서는 침수심과 흐름 유속에 의한 동수역학적 유체력에 대한 고려와 동시에 우수 유입구와 대피 출구, 객실 정보 등의 공간 배치 및 분포가 반영되어야 한다. 본 연구에서는 테스트베드를 지하 공간 형상과 객실 분포를 바탕으로 30개 영역으로 구체화하고, 우수 유입구와 탈출 대피구 위치를 고려하여 위험도를 산정하였다.
- (2) 지상 연결 계단으로부터 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m, 0.8 m, 1.0 m의 수심을 가지는 우수가 유입되는 5가지 케이스를 대상으로 각각 10초의 모의시간 간격으로 총 1800초까지 수치모의를 수행하여 위험도를 산정하였다.
- (3) 각 구역 중심점으로부터 탈출구까지의 전향적 선형 거리를 합산하여 대피 거리를 산정하였으며, 이렇게 계산된 30개 구역의 대피 거리를 오름차순으로 정렬한 후 3분위로 구분하고 대피 보행 속도를 바탕으로 대피 소요 시간을 산정한 후 대피 곤란 정도를 상, 중, 하로 구분하였다.
- (4) 홍수 위험도(FI) 개념을 도입하여 유속이 1 m/s보다 작은 경우에는 FI를 수심으로 부여하고, 1 m/s보다 큰 경우에는 FI를 운동량으로 할당하여 절대적인 침수 피해 정도를 3등급으로 구분하였다.
- (5) 상기 방법 개념으로 위험도 산정 매트릭스를 정의하였다. 세로축은 공간으로 유입되는 우수의 흐름특성(유속과 수심)을 이용하여 홍수 위험도(FI)로 구성하였으며, 가로축은 30개로 구체화한 각 구역의 중심점에서 탈출구까지의 전향적 선형거리를 기반으로 한 대피 곤란 정도를 3분위로 구분한 값으로 부여하였다.
- (6) 유입 수심이 0.8 m 이상인 경우 대상 영역의 대부분에서 침수 위험도가 매우 높았다. 유입 수심이 1.0 m인 경우에는 대상 영역의 절반 이상이 4등급 이상인 높은 위험도를 보였으며, 특히 가장 높은 등급인 5등급에 해당하는 구역도 일부 존재하였다. 따라서 유입 침수심이 1.0 m인 경우 우수 유입지점 인근에 사람이 위치해 있다면 신속한 대피가 이루어지지 않을 시 큰 인명

피해가 발생할 수 있다.

불특정 다수가 이용하는 지하시설의 수재해에 따른 침수 영향 정도를 정량적으로 평가함에 있어 본 연구에서 적용한 방법론을 이용하여 지하공간 침수 위험도를 분석하는 경우 생명손실과 재산피해를 미연에 방지하는데 도움이 될 수 있다. 탈출구의 위치나 개수에 따라 전체 대상 영역에서의 대피 곤란정도가 바뀌므로 향후에는 보다 넓은 실증 영역을 대상으로 다양한 우수 유입조건과 탈출구 위치 배치에 따른 위험도를 산정할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 2018년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회 융합연구단 사업(No. CRC-18-02-KICT)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- Beffa, C. (1998). Two-dimensional modelling of flood hazards in urban areas. *Proc. 3rd International Conference on Hydrosience and Engineering*, Cottbus, Germany.
- Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA). (2005). *Measure against water inundation*. Building Disaster Prevention, November, pp. 2-10.
- Joo, J.S., and Kim, T.H. (2015). An experimental study on evacuation ability during underground space inundation. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 2, pp. 189-196.
- Lee, Y.W., Kim, T.S., Ha, T.W., Kang, S.H., and Lee, S.H. (2003). Study on the assessment of refuge behavior and the derivation of critical inundation depth. *T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 17, No. 4, pp. 92-97.
- Rhee, D.S., Kim, H.J., and Song, C.G. (2015). Inundation simulation of underground space using critical dry depth scheme. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 30, No. 6, pp. 63-69.
- Shin, S.S., Lee, K.S., Cho, H.G. (2013). An objective method of risk assessment based on stochastic modelling. *J. Korean Soc. Qual. Manag.*, Vol. 41, No. 3, pp. 465-474.

Received	August 31, 2018
Revised	October 27, 2018
Accepted	November 27, 2018