

## 도심지 지하공간 침수 모의 Inundation Simulation in Urban Underground Space

오승명\* · 이동섭\*\* · 송창근\*\*\*

Oh, Seung-Myeong · Lee, Dong-Sop · Song, Chang-Geun

최근 들어 지하공간은 도시의 공간부족 문제를 해결하기 위한 중요한 대안으로 인식되고 있다. 이에 따라 층수가 11층 이상이거나 1일 수용인원이 5천명 이상인 건축물로서 지하부분이 지하역사 또는 지하도상가와 연결된 지하연계복합건축물이 2014년 기준 전국에 223개가 분포하고 있다. 도시 지하공간은 지하철, 지하도, 지하상가, 주차장, 지하변전소 등 다양한 용도로 고밀화되어 활용되고 있지만, 지하공간이 가지는 폐쇄적인 특성과 함께 집중호우나 계절라성 폭우의 빈도와 강도가 증가함에 따라 도심지 지하 침수피해가 발생하여 도시 기능이 마비되고, 복합적인 인적·물적 피해를 수반할 가능성이 높아졌다. 도심지에 내린 경우는 중력에 의해 저지대로 이동하며, 노면을 따라 유하하는 우수는 다양한 경로를 통해 지하로 침투하게 된다. 이 가운데 지하출입계단을 통해 다량의 빗물이 지하로 유입되어 침수 피해가 발생하는 경우 저지대로 향하는 물이 급류를 형성하여 낮은 수심에서도 매우 빠른 유속이 발생하고, 이에 따라 수압과 운동량이 증가하여 인명 피해나 재산손실을 야기할 수 있다. 현재까지 진행된 지하공간 침수와 관련된 연구는 대부분 유역이나 지구 단위의 영역을 대상으로 침수해석모형을 개발하거나 이를 지표흐름 해석결과와 통합하려는 노력이나 우수관망 해석 및 침수대책별 영향평가 등의 연구가 주를 이루고 있다. 따라서 정교한 동수역학 기반의 유동 모형을 이용하여 지하공간의 다양한 침수형태 중 미시적으로 지하 출입 계단을 유하하는 흐름을 해석하고, 지하공간이 심층구조로 되어 있는 경우 상부층과 하부층을 잇는 층간 연결 구조물을 통과하는 흐름 특성을 분석한 연구는 아직 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 지하출입계단을 통해 침수 피해가 발생하는 경우에 국한하여, 계단을 유하하는 흐름에 의해 침수가 진행되는 동안 마름 발생영역에서 해의 발산을 막기 위한 임계마름수심 기법이 탑재된 수평 2차원 동수역학 모형을 개발하였다. Ishigaki 등의 실내 수리실험 지형을 제작하여 유량, 유속 및 운동량에 대한 수치모의 결과를 검증하고, 나아가 복층 연결 계단을 흐르는 물의 시간에 따른 수면형상과 유속 구조를 분석하였다. 지하공간 침수모의를 위해 임계마름수심 알고리즘을 탑재하여 계단을 유하하는 유체의 흐름특성을 해석하기 위한 유한요소모형을 개발하였다. 비보존형 천수방정식을 SU/PG 기법으로 이산화하여 선형대수방정식을 구성하였다. 계단을 유하하는 흐름을 모의하는 경우 침수가 진행되는 동안 상류 경계면의 유량이 하류로 향하게 되어, 수치모의 영역은 물이 차 있는 영역, 흐름의 선단부에 의해 젖음과 마름이 천이 되는 영역, 마름이 발생하는 영역으로 구분된다. 이 경우 마름 발생영역에서 해의 발산을 막기 위해 수치적으로 특별한 알고리즘을 부여해야 한다. 본 연구에서는 임계마름수심 기법을 활용하여 수심에 대한 특정 경계값( $h_{crit}$ )을 설정하여 이 경계값보다 수심이 얇은 절점이나 영역에 일괄적으로 임계마름수심을 부여하고 해당 절점이나 영역의 유속값을 0으로 할당하여 마름/젖음 현상을 효과적으로 수치모의할 수 있도록 하였다. 지하공간의 다양한 침수형태 중 계단을 유하하는 흐름을 분석하기 위하여 Ishigaki 등이 실내 수리실험을 수

\* 인천대학교 안전공학과 석사과정 ohsmboy@inu.ac.kr  
\*\* 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 dsrhee@kict.re.kr  
\*\*\* 인천대학교 안전공학과 조교수 baybreeze119@inu.ac.kr

## 건설/해양 분과 발표

행한 높이 3 m, 폭 1 m, 20단(발판 길이 0.3 m, 층높이 0.15 m)으로 이루어진 영역을 제작하였고,  $H=0.1$  m, 0.3 m, 0.5 m의 수심이  $-2.5 \text{ m} \leq x \leq 0$ ,  $-0.75 \text{ m} \leq y \leq 1.75 \text{ m}$ 의 영역에 부여되도록 초기조건을 입력하였다. 수심  $H$ 가 일정하게 유지되도록 경계조건을 구성하였다. 임계마름수심으로는  $h_{cr}=1$  mm의 값을 입력하였다. 수차례의 예비수치모의를 통해 계단을 유하하는 흐름을 안정적으로 모의하는 매개변수인 조도계수 0.013, 점성계수  $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ 를 적용하였다. 복층 연결 공간 침수 모의의 경우 상부층과 하부층을 잇는 층간 연결 구조물이 설치되어 있다. 따라서, 본 장에서는 복층 층간연결 계단 지형을 제작하여  $H=0.3$  m의 초기 수심을 가지는 질량이 상부층을 유하한 후 흐름 방향이 180도 우회하여 하부층으로 낙하하는 흐름을 분석하였다. 지형 격자망의 크기나 시간간격, 매개변수 및 임계마름 수심 등의 수치모의 조건은 앞 장에서 이용한 조건과 동일한 값을 적용하였다.

수치모의 결과 지상 평탄부의 수심과 계단을 낙하하기 이전 지점의 유량 관계를 분석한 결과 기존 수리실험 및 단락식과 잘 일치하였다. 이는 계단 낙하 이전의 수치모의 조건이 수리 실험환경과 동일하게 유지되고 있음을 보여주는 결과이며, 질량플럭스 및 운동량 보존과도 관련된 것으로 간주할 수 있다. 지상 평탄부 수심이 0.3 m인 경우 하부 평탄 저면에 도달하기 전의 최대 유속은 약 4.2 m/s 였다. 또한 최대 운동량은  $1.2 \text{ m}^3/\text{s}^2$ 로 계산되어, 단위폭당 1.2 kN/m의 힘으로 작용하였다. 이 값은 정수압 상태에서 수심 약 50 cm의 물이 바닥에 작용하는 힘과 동일한 크기로, Ishigaki가 제시한 대피가 곤란해지기 시작하는 시점에 해당하였다. 지상 평탄부 수심이 0.5 m인 경우 최대 유속은 6.2 m/s까지 도달하였다. 복층 연결 계단을 유하하여 침수가 발생하는 경우 상하층 연결 평탄부에서 최대 처오름 수심은 상층 평탄부 초기 수심의 두 배에 달하였다. 또한 첨예한 고유속 선단부를 가지고 수심은 선단부에서 급격히 블록해 지는 형상의 충격파가 발생되었다. 연결부를 돌아 하부층으로 빠져나가는 수면 형상의 경우 연결부 벽면에 충돌한 유체의 소용돌이 정체가 흐름 방향 기준으로 우측에 높은 수심이 나타났다. 하부층에서는 좌측의 수심이 우측에 비해 깊었으나, 선단부에서는 원심력에 의해 우측의 수심이 더 높게 발달된 채 전파되었다. 하부층의 최대 유속은 3.2 m/s로 상부층 최대유속인 3.8 m/s에 비해 완화된 양상을 보였는데 이는 복층 연결부 벽면에 의해 흐름이 정체되고 운동에너지를 감소하였기 때문이다.

## 감사의 글

본 연구는 2014년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2014R1A1A1002204)을 받아 수행되었습니다.