



2차원 동수역학 모형을 이용한 지하공간 침수모의



송 창 군

인천대학교 안정공학과 교수
baybreeze119@incheon.ac.kr

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 계절성 폭우의 빈도와 강도가 증가함에 따라 도심지 지하 침수피해가 발생하여 도시 기능이 마비되고, 복합적인 인적·물적 피해를 수반할 가능성이 높아졌다. 도심지에 내린 강우는 중력에 의해 저지대로 이동하며, 노면을 따라 유하하는 우수는 다양한 경로를 통해 지하로 침투하게 된다. 이 가운데 지하출입계단을 통해 다량의 빗물이 지하로 유입되어 침수피해가 발생하는 경우 저지대로 향하는 물이 급류를 형성하여 낮은 수심에서도 매우 빠른 유속이 발생하고, 이에 따라 수압과 운동량이 증가하여 인명피해나 재산손실을 야기할 수 있다.

지하공간 침수 현상을 수치모의하는 경우 종횡방향으로 퍼져나가는 흐름에 의한 유속과 침수심 등을 계산하기 위해서는 2차원 이상의 모형이 필요하나,

상부층과 하부층의 표고차가 큰 지형을 3차원 모형으로 모의하는 경우 많은 계산격자가 필요하며, 이에 따라 모의에 소요되는 시간이 길고 결과 분석 과정에 번거로움이 존재하여 수평 2차원 모형을 적용하는 것이 바람직하다.

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 등¹⁾의 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 침수해석 모형

본 연구에서는 지하공간 침수모의를 위해 Song²⁾의 천수흐름 해석 모형에 임계마름수심 알고리즘을 탑재하여 계단을 유하하는 유체의 흐름특성을 해석하기 위한 유한요소모형을 개발하였다. 비보존형 천수방정식을 SU/PG 기법으로 이산화하여 선형대수방정식을 구성하였. SU/PG 기법은 홍수량이 유입되거나 급격하게 흐름조건이 변화하는 경우, Bubnov Galerkin보다 안정적으로 해를 계산하는 것으로 알려져 있다³⁾. 이는 SU/PG 기법의 가중함수에 의해 유속과 형상함수 편미분의 내적에 의해 가중된 섭동함수가 유체의 흐름방향으로 작용하게 되어, 천수방정식의 비선형 이송항의 불안정성을 감

소시키고, 이송항에 의한 가속도의 영향을 보다 정확하게 반영하기 때문이다.

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 천이되는 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(hdry)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. 임계마름수심 기법은 점처리 (point treatment) 기법, 박막(thin film) 기법, 또는 플럭스 저지(flux blocking) 기법이라고 칭하기도 하며, 지하공간 침수 모의를 위한 임계 마름 수심값의 범위는 일반적으로 수 cm에서 수 mm정도의 값을 입력한다.

지하공간 침수 모의

지하공간의 다양한 침수형태 중 계단을 유하하는 흐름을 분석하기 위하여 그림 1과 같이 Ishigaki 등¹⁾이 실내 수리실험을 수행한 높이 3 m, 폭 1 m, 20 단(발판 길이 0.3 m, 층높이 0.15 m)으로 이루어진 영역을 제작하여 수치모의를 수행하였다. Ishigaki et al.¹⁾의 수리실험에서는 고수조의 평탄부 수심을 지상 수심 조건으로 설정하였으므로, 본 연구에서도 $H=0.1\text{ m}$, 0.3 m , 0.5 m 의 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. Ishigaki et al.¹⁾의 수리실험에서는 저수조로 유입된 물이 펌프를 통해 고수조로 순환하도록 실험장치를 설계하였으므로 그림 1에 표시된 바와 같이 $x=-2.5\text{ m}$ 의 측선에 수심 H 가 일정하게 유지되도록 경계조건을 구성하였다. 임계마름수심으로는 $\text{hdry}=1\text{ mm}$ 의 값을 입력하였다. 수차레의 예비수치모의를 통해 계단을 유하하는 흐름을 안정적으로 모의하는 매개변수인 조도계수 0.013, 점성계수 $0.01\text{ m}^2/\text{s}$ 를 적용하였다.

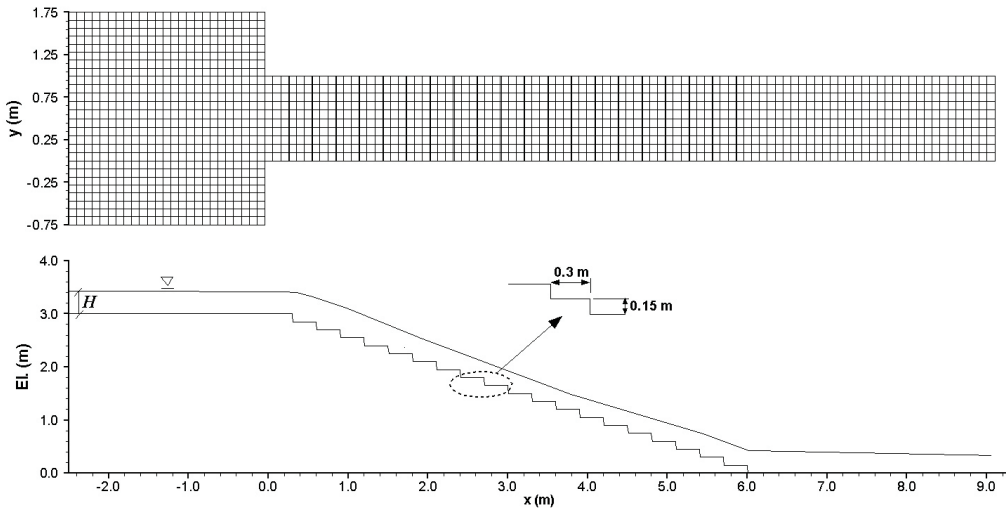


그림 1. 단층 계단 지형 정보와 유한요소망

그림 2에 지상 평탄부의 수심(H)과 계단을 낙하하기 이전 지점에서의 유량(Q) 관계를 나타내었다. 해당 측선에서의 유속과 수심을 기준으로 유량을 산정하였으며, 수리실험 측정값은 수심에 따른 단위폭당 유량 산정을 위한 단락식 $q=1.703H^{1.5}$ 에 근사하였다. H 가 0.4 m 보다 커지는 경우 수리실험 결과와 단락식이 차이가 점점 크게 발생하였지만, $H=0.5$ m인 경우 그 오차는 8% 정도이므로 함

께 도시하였다. H 에 따른 Q 값을 비교한 결과 본 연구에서 고려한 $H=0.1$ m, 0.3 m 및 0.5 m에서 기존 수리실험 및 단락식과 잘 일치하였으며, 특히 Ishigaki et al.¹⁾의 실측값과 매우 근사하였다. 이는 계단 낙하 이전의 수치모의 조건이 수리 실험환경과 동일하게 유지되고 있음을 보여주는 결과이며, 질량플럭스 및 운동량 보존과도 관련된 것으로 간주할 수 있다.

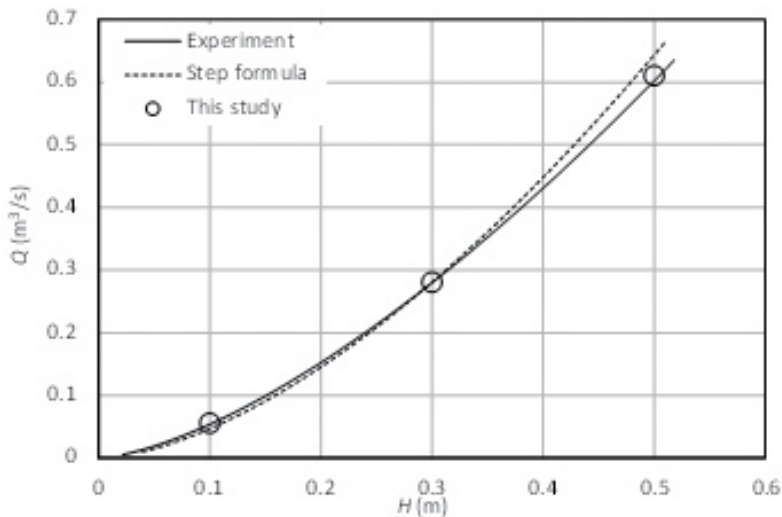


그림 2. 모의 결과의 검증

계단을 낙하하는 물의 흐름은 다량의 기포를 함유한 채로 흐름이 빠른 특성을 가지므로 기존의 실험실에서 쓰이는 계측기를 사용하여 유속을 실측하기 어렵다. 따라서 Ishigaki et al.¹⁾은 자외선 램프를 조명으로 사용하고 형광색 테니스공을 추적자로 하여 비디오 촬영을 한 뒤, 미리 설정해 둔 측선을 통과하는 시간을 확인하는 가시화 방법을 활용하여 유속을 측정하였다. Fig 4는 본 연구에서 고려한 $H=0.1$ m, 0.3 m 및 0.5 m 조건에서 계단을 낙하하는 흐름(v)이 가속되다가 일정 값으로 수렴하는 종방향 범위

인 $1.0 \text{ m} \leq x \leq 5.0 \text{ m}$ 에서의 유속값을 도시한 것이다. 모든 수심에서 수치모의에 의한 유속 분포가 다이스케의 실측값과 잘 일치하였다. $H=0.3$ m인 경우 하부 평탄 저면에 도달하기 전의 최대 유속은 약 4.2 m/s 였으며, $H=0.5$ m인 경우에는 계단 중앙부($x=3$ m)에서의 유속이 5 m/s를 초과하여 최대 6.2 m/s까지 도달하였다. 이와 같은 고유속은 피난자에게 공포감을 유발하게 되며, 특히 어린이나 노약자, 임산부 등의 재해 취약계층에게 물리적 위해나 심리적 압박감을 야기할 수 있다.

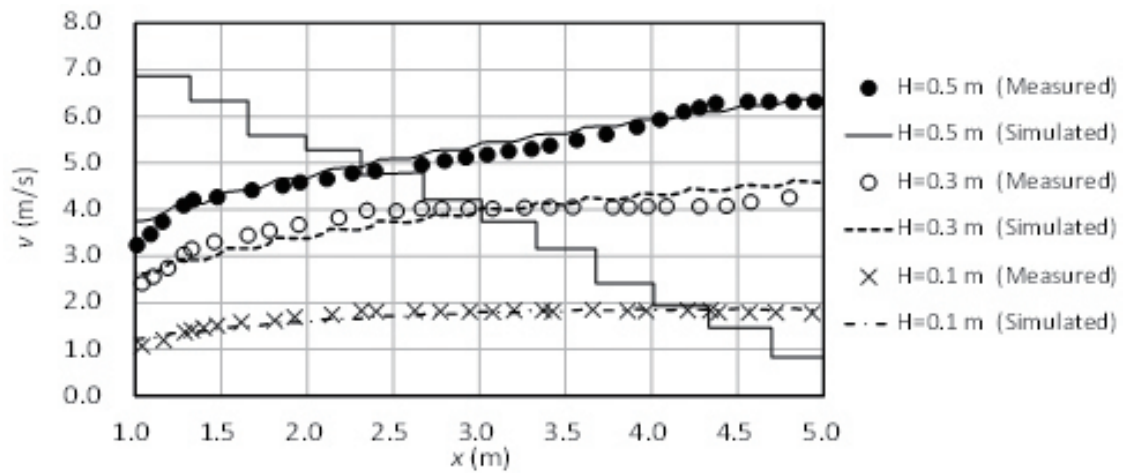


그림 3. 수리실험결과와의 유속 비교

복층 연결 공간 침수 모의

지하공간이 침수구조로 되어 있는 경우 상부층과 하부층을 잇는 층간 연결 구조물이 설치되어 있으므로 본 장에서는 그림 4와 같이 복층 층간연결 계단 지형을 제작하여 $H=0.3\text{ m}$ 의 초기 수심을 가지는 질량이 상부층을 유하한 후 흐름 방향이 180도 우회

하여 하부층으로 낙하하는 흐름을 분석하였다. 지형 격자망의 크기나 시간간격, 매개변수 및 임계마름수심 등의 수치모의 조건은 앞 장에서 이용한 조건과 동일한 값을 적용하였다.

그림 5는 복층 연결 계단을 흐르는 물의 시간에 따른 수면형상과 유속크기를 나타낸 것이다. 상부층 평탄부로부터 유하되는 물은 2.3 s 후 9번째 계

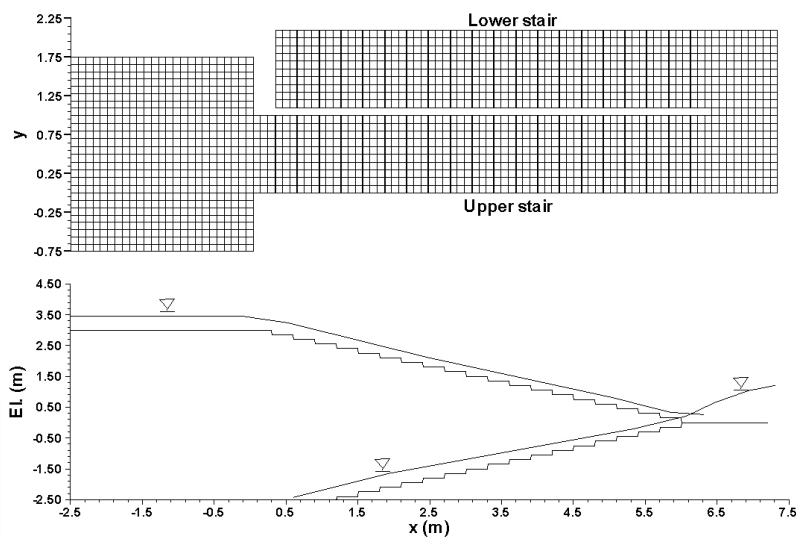


그림 4. 복층 계단 지형 정보 및 유한요소망

단까지 전파되고, 최대 유속은 2.1 m/s를 나타냈다. 이후 4.6 s에 상하층 연결 평탄부까지 물의 선단부가 이동하였으며, 최대 처오름 수심은 0.6 m 였다. 또한 선단부의 유속은 2 m/s로 후미부의 최대유속 3.5 m/s보다 느렸다. 따라서 첨예한 고유속 선단부를 가지고 수심은 선단부에서 급격히 블록해 지는 형상의 충격파가 발생하였다. 그림 5(c)는 연결부를 돌아 하부층으로 빠져나가는 수면 형상을 나타낸 것으로 연결부 벽면에 충돌한 유체의 소통이 정체되어 흐름방향 기준으로 우측에 해당하는 $y=0$ 부근에서 1 m 이상의 높은 수심이 나타났다. 같은 시간 하부층으로는 10단까지 유하하였고, 좌측의 수심이 우측

에 비해 깊었으나, 선단부에서는 원심력에 의해 우측의 수심이 0.4 m 정도로 더 높게 발달된 채 전파되었다. 그림 5(c)와 같이 하부층의 최대 유속은 3.2 m/s로 상부층 최대유속인 3.8 m/s에 비해 완화된 양상을 보였다. 이는 복층 연결부 벽면에 의해 흐름이 정체되고 운동에너지가 감소하였기 때문이다. 하부층에서의 횡방향 유속분포를 살펴보면 상부층을 유하한 후 흐름 방향이 180도 우회하여 하부층으로 낙하하는 흐름에 의해 원심력이 작용하여 외측의 유속이 내측에 비해 1 m/s 높게 나타났다. 이후 9.4 s에서는 하부층 경계면까지 유사한 양상으로 흐름이 전달되었다.

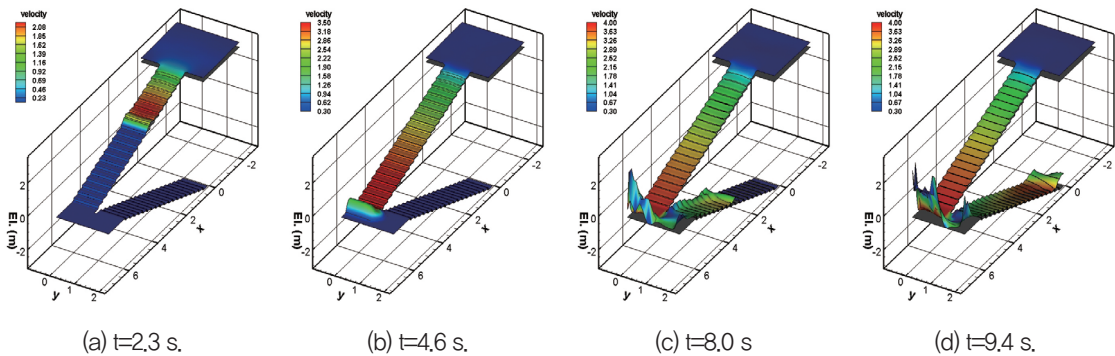


그림 5. 복층 계단 유하 양상

감사의 글

본 연구는 2016년도 실용화학 융합연구단사업인 ‘개방형 플랫폼 기반 초고층·복합시설 재난/재해 대응 통합 CPS 구축 - 지하시설 침수피해 분석 및 예측 기술 개발’ 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Reference

1) T. Ishigaki, K. Toda, Y. Baba, K. Inoue, H. Nakagawa (2005) “Experimental Study of

Evacuation from Underground Space by Using Real Size Model”, Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.48B, pp. 639-649.

2) 송창근 (2011) A Finite Element Model for Shallow Water Flow Incorporating Dispersion Stresses and Generalized BCs, 서울대학교 박사 학위논문.

3) C. G. Song and T. K. Oh (2016) “Transient SU/PG Modeling of Discontinuous Wave Propagation” Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal, 16(3), pp. 146-162.