

임계 마름 수심기법을 이용한 지하공간 침수 모의

이동섭 · 김형준 · 송창근*

한국건설기술연구원 하천 · 해안연구실 · *인천대학교 안전공학과
(2015. 10. 6. 접수 / 2015. 10. 29. 수정 / 2015. 12. 1. 채택)

Inundation Simulation of Underground Space using Critical Dry Depth Scheme

Dong Sop Rhee · Hyung-Jun Kim · Chang Geun Song**

River and Coastal Research Division, KICT

*Department of Safety Engineering, Incheon National University

(Received October 6, 2015 / Revised October 29, 2015 / Accepted December 1, 2015)

Abstract : In this study, a 2D hydrodynamic model equipped with critical dry depth scheme was developed to reproduce the flow over staircase. The channel geometry of hydraulic experiment conducted by Ishigaki et al. was generated in the computational space, and the developed model was validated against flow properties such as discharge, velocity and momentum. In addition, the water surface profile and the velocity distribution evolved in flow over two layers staircases were analyzed. When the initial water depth at the upper floor was 0.3 m, the maximum velocity at lower floor was 4.2 m/s, and the maximum momentum was $1.2 \text{ m}^3/\text{s}^2$, and its conversion to force per unit width was 1.2 kN/m. This value was equivalent to the hydrostatic force with 50 cm water depth, and evacuation became difficult, as proposed by Ishigaki et al.¹⁾ For the flow over staircases connecting two layers, the maximum run-up height in flat part connecting two layers was approximately two times higher than the initial water depth in upper floor, and the rapid shock wave with sharp front and long tail was propagated.

Key Words : flow over staircase, 2D hydrodynamic model, critical dry depth, evacuation

1. 서론

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 게릴라성 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 침수 피해가 발생하는 경우 저지대로 향하는 물이 급류를 형성하여 낮은 수심에서도 매우 빠른 유속이 발생하고, 이에 따라 수압과 운동량이 증가하여 인명피해나 재산손실을 야기할 수 있다.

지하공간 침수와 관련하여 진행된 최근 연구를 살펴보면 다음과 같이 요약할 수 있다. 이창희 등²⁾은 격자 기반 지하공간 침수해석모형을 개발하고 Dual-Drainage 지표 침수해석모형과 GIS 환경에서 통합한바 있다. 조완희 등³⁾은 건물의 영향에 따른 침수심, 침수위 및 흐름양상 등을 2차원 침수해석을 통해 분석하였으며, 조완희 등⁴⁾은 건물과 도로를 고려한 지형자료를 GIS 툴을 이용하여 구축하여 실제 지형이 반영된 2차원 침수해석을 실시한 바 있다. 신동수 등⁵⁾은 침수위험 영역을

* Corresponding Author : Chang Geun Song, Tel : +82-32-835-8291, E-mail : baybreeze119@inu.ac.kr
Department of Safety Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea

대상으로 EPA SWMM 모형을 구축하여 유출해석을 수행하고 특정건물의 복합지하공간을 대상으로 축소 모형을 제작하여 저류시설 차수벽 등의 침수대책별 시나리오를 선정, 지하시설물의 침수영향을 분석하였다. 주재승 등⁶⁾은 지하공간 침수 상황 시 대피능력을 실제 상황에 따른 시나리오를 작성하여 실증실험을 통해 검토하고, 실규모 계단 및 출입로 모형을 통해 대피로 설정 및 침수대책 매뉴얼 작성에 대한 개선점을 제시하였다. 도시지역 침수해석기법으로는 대상구역의 지형고도 자료를 작성하고, 윗물체적을 산정하여 침수위에 대응하는 전체 구역의 침수 체적곡선을 도출하는 방법이나 하상경사와 마찰경사항만을 포함한 간략화된 운동량방정식을 바탕으로 한 확산과 모형을 DEM 기반 침수 시스템에 적용하는 방법, Link-Node로 구성된 요소가 각 격자의 경계면, 혹은 중심간의 길이에 대응하도록 하여 유량을 전송하는 통로 역할을 하도록 모형을 구축하고 각 격자에서의 수위와 격자간에 이동되는 유량은 연속방정식과 운동방정식에 의해 구하는 방법이 있다. 현재까지 진행된 지하공간 침수와 관련된 연구는 대부분 구역이나 지구 단위의 영역을 대상으로 침수해석모형을 개발하거나 이를 지표흐름 해석 결과와 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. 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 계산격자가 많이 필요하며, 이에 따라 모의에 소요되는 시간이 길고 결과분석과정의 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.

2. 지하공간 침수해석을 위한 마름/젖음 기법

지하공간의 침수해석을 위한 마름/젖음 알고리즘은 Fig. 1과 같이 크게 4가지 종류로 구분할 수 있다. 첫 번째로는 임계마름수심 기법, 박막(thin film) 기법 혹은 슬롯방식으로 불리는 것으로 측면 혹은 상하류 경계면 내부 영역을 모의영역으로 적용하여 모든 절점 및 요소들이 수치계산에 포함되도록 하는 방법이다. 일반적으로 모의 전 최소 기준 수심(임계마름수심)을 설정하여 모의 시 절점이 기준 수심 이하로 내려가는 영역은 마름으로 처리되어 얇은 막을 펼친 것처럼 처리하는 기법이다. 이 경우 요소제거(element removal) 기법에서 발생하

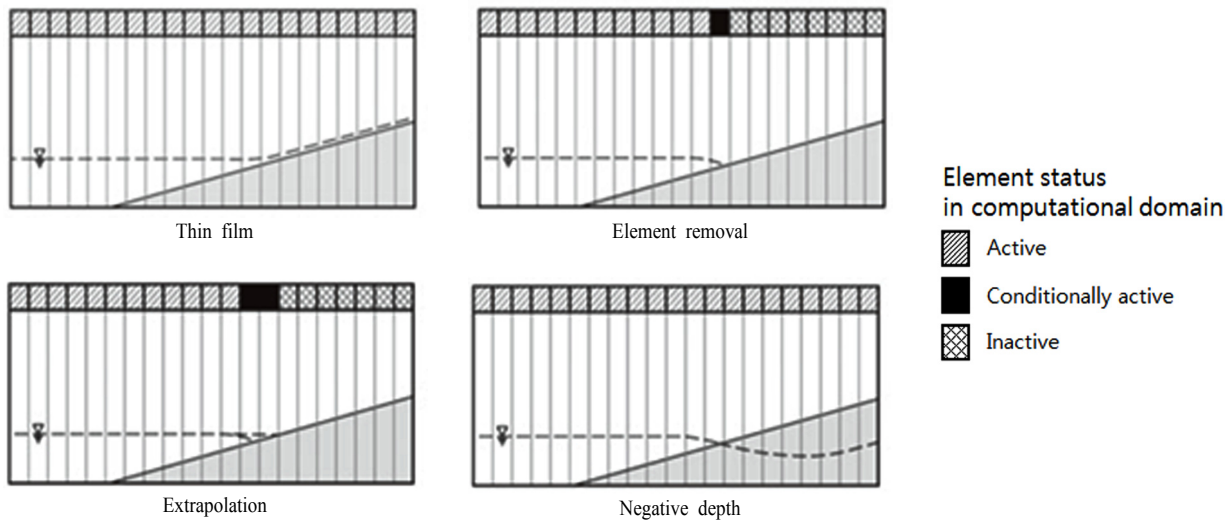


Fig. 1. Element treatment strategy for inundation modeling.

는 수심이 갑자기 0으로 변화하는 것에 따른 경계면의 불연속 문제를 해결할 수 있다. 요소가 전체 계산에서 제거되거나 추가되지 않으며 지배방정식의 변화를 통하여 요소 및 질점이 얇은 슬롯으로 표현될 수 있는 일종의 저 흐름 유역으로 전환된다. 이러한 방식은 유한 요소 모형에 있어서 요소의 제거를 통한 불규칙한 경계면을 방지할 수 있다. 또한 요소 제거를 통한 질량 보존의 법칙 위반을 피할 수도 있고 계산상의 안정성이 보장되거나 운동량 보존에는 영향이 미칠 수 있다.

두 번째 방법인 요소제거 기법에서는 모형별로 요소가 마름 상태인지 판별한 후, 모의 시 그 요소를 연산 영역에서 아예 제외하는 방식이다. 흐름의 유동성을 차단시키는 위의 방식과는 달리 경계면을 계산시마다 새로 정의하여 모의를 실행한다. 수면의 깊이가 지정된 값 이하로 떨어지면 각 요소 및 질점은 전체 계산에서 누락되며, 지정된 값 이상으로 다시 증가하면 계산상으로 다시 복귀한다는 특징이 있다. TELEMAC, EFDC, MIKE21 등의 모형에서 이러한 기법을 사용하였으며, 마름 구간이 확실히 정의되는 장점이 있으나, 경계면에서의 불연속 문제가 발생하여 계산에서 발산이 일어나는 확률이 증가되는 단점이 있다. 이 기법은 물의 경계를 정확하게 드러낼 수 있으나 해를 구하는데 있어서 수학적 계산이 복잡하고 수리적으로 발산할 확률이 증가한다. 또한 수면의 변화가 큰 경우 경계면에 있는 요소의 크기가 너무 증가하여 주변 요소와의 크기 격차가 커져 차후 계산에 지장을 줄 수 있다. 크기가 고정된 요소를 사용하며 마름/젖음을 통하여 요소의 생성과 제거가 이루어지고 크기와 위치는 변화하지 않는다.

세 번째 수심외삽(depth extrapolation) 기법에서는 마름/젖음이 발생하는 수면 경계면에서 젖음에 해당하는 요소에서 외삽법을 사용하여 수심을 마름에 해당하는 요소로 적용시키는 방식이다. 모의 시 우선 경계면의 위치를 구별하는 것이 중요하며 요소를 조건부 활성화를 통하여 마름 영역의 일부 구간을 마름 경계에 포함시켜 계산한다. 요소 자체가 수위에 변화에 맞추어 크기 및 위치가 조절된다. 이 경우 물의 경계와 동일하게 요소의 경계면이 증가하므로 수면과 동일한 선상에 놓이게 된다. 이 기법은 물의 경계를 정확하게 드러낼 수 있으나 해를 구하는데 있어서 수학적 계산이 복잡하고 수리적으로 발산할 확률이 증가한다. 또한 수면의 변화가 큰 경우 경계면에 있는 요소의 크기가 너무 증가하여 주변 요소와의 크기 격차가 커져 차후 계산에 지장을 줄 수 있다.

네 번째 음수심(negative depth) 기법에서는 모의구간

의 하상에 투수층이 있다는 것을 가정하고 물의 흐름이 이러한 투수층에 적용된다고 고려하는 방식이다. 이러한 기법을 사용하면 투수층의 존재로 수체 표면이 지형 자료 아래로 내려갈 수 있다고 볼 수 있어 음의 수심이 발생한다. 이러한 기법은 RMA2, RIVER-2D에서 사용하였으며, 과거 연구에서는 물의 흐름이 전 구간에 존재하기 때문에 박막기법의 한 종류로 분류되기도 하였다. 계산 후 질량 및 운동량 보존에 장점을 지니고 있으며, 늪지대 부근에서 조수를 모의하는 경우 좋은 결과를 보인다. 그러나 항상 모의구간의 하상이 일정한 투수계수를 가지는 등투과성(iso-permeability)의 특성을 가진다는 가정은 물리적으로 적합하지 않아 적용성에서 문제가 제기되고 있다.

상기에 제시된 네 가지 기법은 크게 이동경계법과 박막기법으로 양분할 수 있으며, 이동경계법은 좌우안의 최외곽 요소의 경계면이 변화하는 요소제거기법과 수심외삽기법을 의미한다. 본 연구에서는 이러한 기법들의 물리적 비적합성과 수치적 불안정성을 보완하고자, 모의 초기에 생성한 격자를 그대로 유지하면서 경계선을 변형시키지 않고 특정 입력값 이하의 수심인 경우 해당 절점의 유속을 0으로 부여하는 임계마름수심 기법을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 마름/젖음 해석 알고리즘은 임계점에서 마름이 발생하여 절점에서의 플럭스가 차단되면 마름 영역에서 고유속이 발생하여 비정상적인 유속 및 수심 모의 결과가 도출되는 것을 방지하여 원활한 지하공간 침수 모의가 가능하다는 장점이 있다.

3. 지하공간 침수 모의

3.1 수치모형

본 연구에서는 지하공간 침수모의를 위해 서일원 등⁷⁾의 천수흐름 해석 모형에 2장에 제시된 임계마름수심 알고리즘을 탑재하여 계단을 유하하는 유체의 흐름특성을 해석하기 위한 유한요소모형을 개발하였다. 비보존형 천수방정식을 SU/PG 기법으로 이산화하여 선형대수방정식을 구성하였다(송창근 등)⁸⁾. SU/PG 기법은 홍수량이 유입되거나 급격하게 흐름조건이 변화하는 경우, Bubnov Galerkin보다 안정적으로 해를 계산하는 것으로 알려져 있다. 이는 송창근 등⁹⁾에 제시된 바와 같이 SU/PG 기법의 가중함수에 의해 유속과 형상함수 편미분의 내적에 의해 가중된 섭동함수가 유체의 흐름 방향으로 작용하게 되어, 천수방정식의 비선형 이송항의 불안정성을 감소시키고, 이송항에 의한 가속도의 영향을 보다 정확하게 반영하기 때문이다.

계단을 유하하는 흐름을 모의하는 경우 침수가 진행 되는 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(h_{dry})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.

3.2 지하공간 침수 모의

지하공간의 다양한 침수형태 중 계단을 유하하는 흐름을 분석하기 위하여 Fig. 2와 같이 Ishigaki 등¹⁾이 실내 수리실험을 수행한 높이 3 m, 폭 1 m, 20단(발판 길이 0.3 m, 층높이 0.15 m)으로 이루어진 영역을 제작하여 수치모의를 수행하였다. Ishigaki 등¹⁾의 수리실험에서는 고수조의 평탄부 수심을 지상 수심 조건으로 설정하였으므로, 본 연구에서도 $H=0.1$ 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. Ishigaki 등¹⁾의 수리실험에서는 저수조로 유입된 물이 펌프를 통해 고수조로 순환하도록 실험장치를 설계하였으므로 Fig. 2에 표시된 바와 같이 $x=-2.5$ m의 측선에 수심 H 가 일정하게 유지되도록 경계조건을 구성하였다. 임계마름수심으로는 $h_{dry}=1$ mm의 값을 입력하였다. 수차례의 예비 수치모의를 통해 계단을 유하하는 흐름을 안정적으로

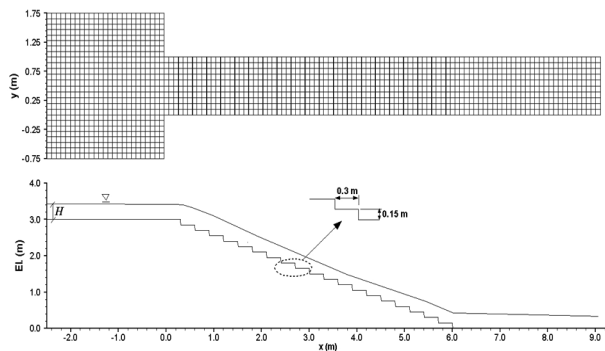


Fig. 2. Geometry and mesh layout for single staircase.

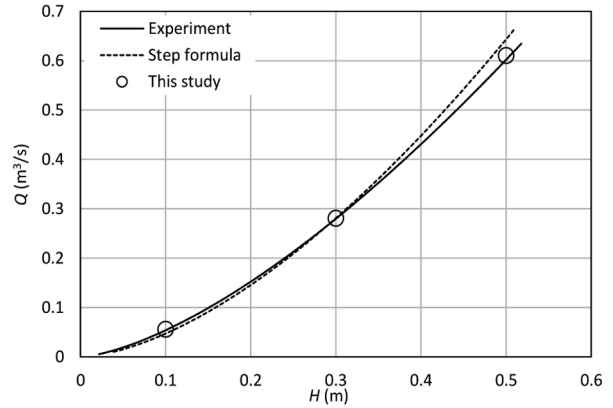


Fig. 3. Discharge verification with experimental data and empirical formula.

모의하는 매개변수인 조도계수 0.013, 점성계수 0.01 m^2/s 를 적용하였다.

Fig. 3에 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 함께 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 등¹⁾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.

계단을 낙하하는 물의 흐름은 다량의 기포를 함유한 채로 흐름이 빠른 특성을 가지므로 기존의 실험실에서 쓰이는 계측기를 사용하여 유속을 실측하기 어렵다. 따라서 Ishigaki 등¹⁾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 범위인 $1.0 \text{ m} \leq x \leq 5.0 \text{ m}$ 에서의 유속값을 도시한 것이다. 모든 수심에서 수치모의에 의한 유속 분포가 디스크의 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

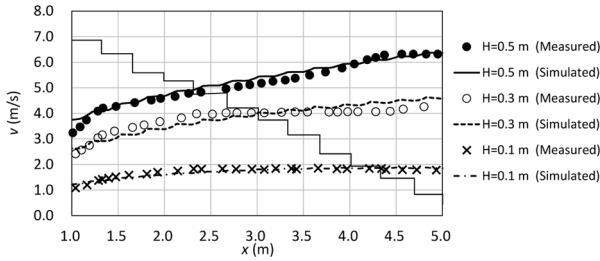


Fig. 4. Comparisons of velocity profiles for single staircase.

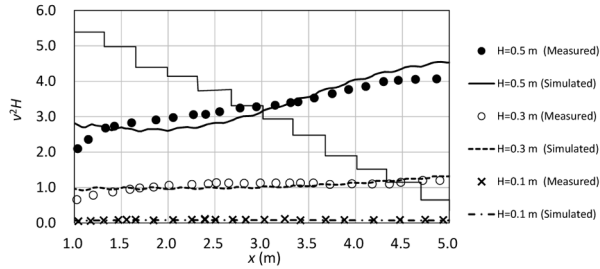


Fig. 5. Comparisons of momentum profiles for single staircase.

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.

Fig. 5는 계단을 따라 발생하는 유속(v)과 수심(H)을 바탕으로 운동량(v^2H)을 계산하여 도시한 것이다. ρ 의 밀도를 가지는 유체가 A 의 단면적을 통과하는 경우 발생하는 힘은 $F = \rho v^2 A$ 으로 나타낼 수 있으므로, Fig. 5의 운동량(v^2H)에 물의 밀도에 해당하는 $1,000 \text{ kg/m}^3$ 을 곱하면 흐르는 유체에 의해 작용하는 단위폭당 힘으로 간주할 수 있다. 이 그림에서 $H=0.1 \text{ m}$ 와 $H=0.3 \text{ m}$ 인 경우 x 에 따른 운동량의 변화는 두드러지지 않았으나, H 가 0.5 m 인 경우 낙하 초기 상태인 $x=1.0 \text{ m}$ 에서의 운동량과 낙하가 상당부분 진행된 $x=5.0 \text{ m}$ 에서의 운동량은 큰 차이를 보였다. 이는 계단을 낙하하는 유체의 부피가 증가하면 연직방향으로 더욱 가속되어 운동량이 급격히 증가하기 때문이다. $H=0.3 \text{ m}$ 에서 최대 운동량은 $1.2 \text{ m}^3/\text{s}^2$ 이므로, 단위폭당 힘으로 환산하면, 1.2 kN/m 이 된다. 이 값은 정수압 상태에서 수심 약 50 cm 의 물이 바닥에 작용하는 힘과 동일한 크기로서, Ishigaki 등¹⁾이 피난 수리실험 대상자를 바탕으로 분석한 설문조사 결과와 같이 대피가 곤란해지기 시작하는 시점에 해당한다.

4. 복층 연결 공간 침수 모의

3장에서는 20단으로 구성된 단층 계단을 통과하는

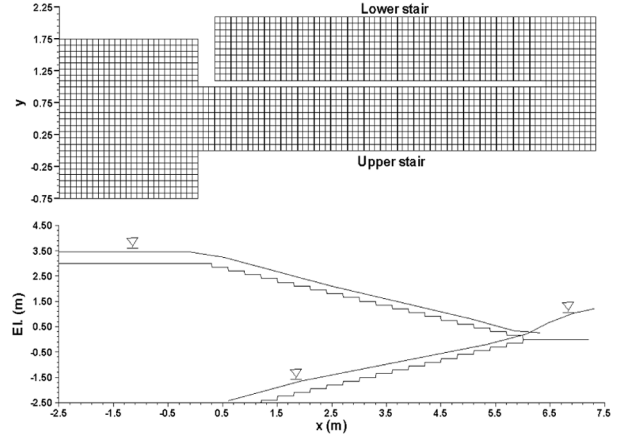


Fig. 6. Geometry and mesh layout for double staircase.

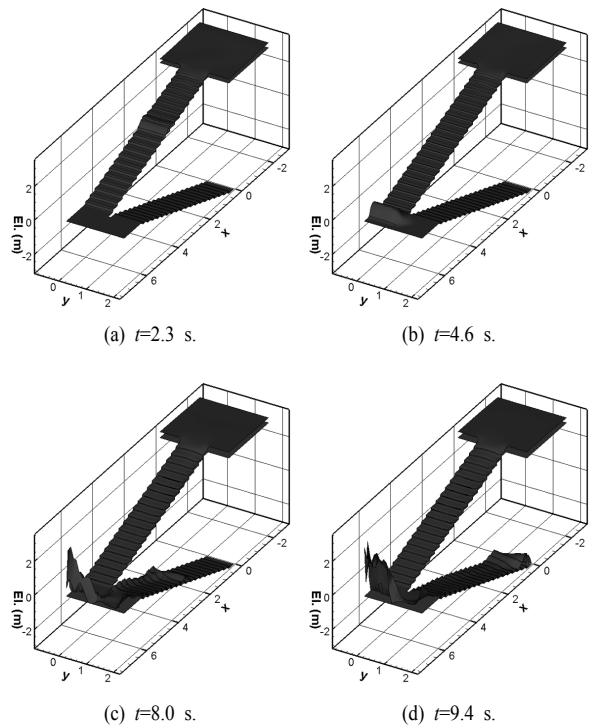


Fig. 7. Water surface variations for double staircase.

유체의 흐름을 분석하였으나, 지하공간이 침침구조로 되어 있는 경우 상부층과 하부층을 잇는 층간 연결 구조물이 설치되어 있다. 따라서, 본 장에서는 Fig. 6과 같이 복층 층간연결 계단 지형을 제작하여 $H=0.3 \text{ m}$ 의 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.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 복층 연결 계단을 흐르는 물의 시간에 따른 수면형상과 유속크기를 나타낸 것이다.

5. 결론

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 인명피해나 재산손실을 야기할 수 있다. 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.

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/s였다. 또한 최대 운동량은 1.2 m³/s²로 계산되어, 단위폭당 1.2 kN/m의 힘으로 작용하였다. 이 값은 정수압 상태에서 수심 약 50 cm의 물이 바닥에 작용하는 힘과 동일한 크기로, Ishigaki 등¹⁾이 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 침예한 고유속 선단부를 가지고 수심은 선단부에서 급격히 블록해지는 형상의 충격파가 발생되었다. 연결부를 돌아 하부층으로 빠져나가는 수면 형상의 경우 연결부 벽면에 충돌한 유체의 소통이 정체되어 흐름방향 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 운동에너지가 감소하였

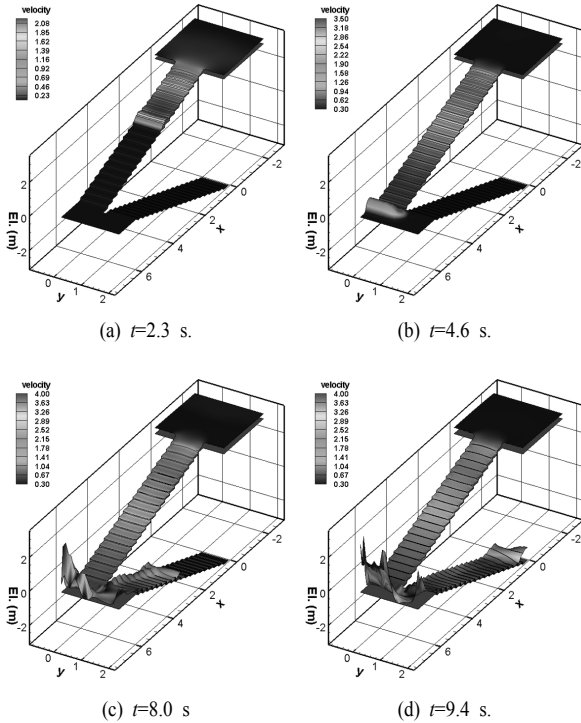


Fig. 8. Velocity distributions for double staircase.

상부층 평탄부로부터 유하되는 물은 2.3 s 후 9번째 계단까지 전파되고, 최대 유속은 2.1 m/s를 나타냈다. 이후 4.6 s에 상하층 연결 평탄부까지 물의 선단부가 이동하였으며, 최대 처오름 수심은 0.6 m였다. 또한 선단부의 유속은 2 m/s로 후미부의 최대유속 3.5 m/s보다 느렸다. 따라서 침예한 고유속 선단부를 가지고 수심은 선단부에서 급격히 블록해 지는 형상의 충격파가 발생하였다. Fig. 7(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 우측에 비해 깊었으나, 선단부에서는 원심력에 의해 우측의 수심이 0.4 m 정도로 더 높게 발달된 채 전파되었다.

Fig. 8(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.

기 때문이다.

감사의 글 : 본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 “도심지 홍수 예방(Smart Flood Management) 연구” 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) T. Ishigaki, K. Toda, Y. Baba, K. Inoue and H. Nakagawa, “Experimental Study of Evacuation from Underground Space by Using Real Size Model”, *Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, No.48B, pp. 639-649, 2005.
- 2) C. H. Lee and K. Y. Han, “Integration Model for Urban Flood Inundation Linked with Underground Space Flood Analysis Model”, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 4, pp. 313-324, 2007.
- 3) W. H. Cho, K. Y. Han and Y. J. Kim, “An Evaluation of Building Effect in 2-Dimensional Inundation Analysis Using GIS”, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 13, No. 2, pp. 119-132, 2010.
- 4) W. H. Cho, K. Y. Han, T. J. Hwang and A. L. Son, “2-D Inundation Analysis in Urban Area considering Building and Road”, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 5, pp. 159-168, 2011.
- 5) D. S. Shin, J. B. Park, T. S. Son and D. J. Jo, “Preventive Measures Assessment to Prevent Flooding Complex Underground Space through Hydraulic Model Experiment”, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 4, pp. 59-65, 2012.
- 6) J. S. Joo and T. H. Kim, “An experimental Study on Evacuation Ability During underground Space Inundation”, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 2, pp. 189-196, 2015.
- 7) I. W. Seo, Y. D. Kim and C. G. Song, “Validation of Depth-Averaged Flow Model using Flat-Bottomed Benchmark Problems”, *The Scientific World Journal*, Hindawi Publishing Corporation, Article ID 197539, 2014.
- 8) C. G. Song and T. K. Oh, “Transient SU/PG Modeling of Discontinuous Wave Propagation”, *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 2015 (In press).
- 9) C. G. Song and I. W. Seo, “Numerical Simulation of Convection-dominated Flow Using SU/PG Scheme”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 3, pp. 175-183, 2012.