Journal of Convergence for Information Technology
Vol. 11. No. 12, pp. 115-126, 2021
e-ISSN 2586-4440
DOI : https://doi.org/10.22156/CS4SMB.2021.11.12.115

유한요소법을 적용한 내수 및 외수 침수해석 모형 개발

남명준[1], 이재영[2], 이창희[3*]
[1](주)신우엔지니어링 과장, [2](주)신우엔지니어링 연구소장, [3*]중원대학교 소방방재전공 부교수

Development of Urban and River Flood Simulation Model Using FEM

Myeong-Jun Nam[1], Jae-Young Lee[2], Chang-Hee Lee[3*]
[1]Manager, Fusion Research Institute, Sinwoo CO., LTD.
[2]Research Director, Fusion Research Institute, Sinwoo CO., LTD.
[3*]Associate Professor, Department of Fire and Disaster Prevention Engineering, Jungwon University

요 약 본 연구에서는 내외수 범람을 동시에 고려하여 침수해석을 수행하는 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 외수 침수해석을 위해 제방 월류 및 파제에 의한 하천범람 유입량을 고려할 수 있도록 하였고, 내수 침수해석을 위해서 이중배수체계 개념을 반영하도록 구성하였다. 지표면 침수해석과 관련하여 하천의 유동해석과 제내지의 유동해석을 통합적으로 수행하기 위해 유한요소법(FEM)을 적용하여 침수확산 해석을 수행할 수 있도록 하였다. 모형의 검증을 위해 우선 개념모델에 대해서 적용하였고, 이어서 실제 유역에 대해서 적용하였다. 본 연구를 통해 홍수로 인한 피해를 줄이고 홍수 피해를 저감하기 위한 효과적인 대책을 마련하기 위해 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 침수해석 모형, 내수범람, 외수범람, 유한요소법, 이중배수

Abstract This study develops a simulation model that performs flood analysis considering both urban and river flood. For the analysis of river flood, this study considers river overflow by levee breach, and reflects the concept of the dual drainage systems for the analysis of urban flood. In relation to the surface flood analysis, FEM technique is applied to the flood diffusion analysis in order to conduct the flow analysis of urban and river flood simultaneously. For the verification of the model, it is first applied to the conceptual model, and then applied to the actual watershed. It is expected that this study will be able to reduce flood damage and to prepare effective countermeasures to reduce flood damage.

Key Words : Flood Simulation Model, Urban Flood, River Flood, FEM, Dual-Drainage

1. 서론

홍수는 광범위한 피해와 사회·경제적 손실이 발생시키고, 가장 빈번하게 발생하는 자연 재해이다[1,2]. 도시지역의 홍수는 사회·경제적 손실을 일반 농촌 지역보다 더 크게 발생시키며, 경제 발전에 따른 도시화에 따라 이상기후로 인한 홍수 피해는 미래에 더 증가할 것으로 예상된다 [3-5]. 도시지역의 주요 기반 시설의 경우 침수 피해로 인하여 직접적인 손실과 시설 침수로 인한 생산 마비 등의 간접적인 손실을 발생시킨다. 실제로 집중호우로 인하여 지난 2011년에는 경안천과 곤지암천 인근의 광주, 곤지암 등 하수처리장이 침수되어 미처리수가 팔당호로 유입되어 수질오염과 같은 간접피해가 발생된 바가 있고, 2017년에는 청주 공공폐수

*This work was supported by Korea Environment Industry & Technology Institute(KEITI) through Environmental R&D Project on the Disaster Prevention of Environmental Facilities Program(or Project), funded by Korea Ministry of Environment(MOE)(2019002850006)

*Corresponding Author : Chang-Hee Lee(chlee@jwu.ac.kr)

Received November 11, 2021
Revised November 29, 2021
Accepted December 20, 2021
Published December 28, 2021

처리장이 침수되어 폐수처리장을 사용하는 산업단지 공장들의 가동이 중단되는 상황이 발생하였다. 홍수로 인한 피해를 줄이고 홍수 피해를 저감하기 위한 효과적인 대책을 마련하기 위해서는 홍수 해석 모델의 개발이 중요하다.

홍수 해석 모델에는 1차원 및 2차원을 연계한 해석 모델이 이용되어 왔으며[6], 이를 이용하여 돌발 홍수 및 침수 예상 지역 분석이 수행되어왔다[7]. 내수 범람 모형은 건물, 관망 및 중요한 기반 시설로 인하여 복잡한 배수체계가 고려되어야 한다. 따라서 내수 범람 해석을 위해서는 지표수와 배수 관망 흐름의 상호 작용을 재현하는 내수 범람 모형을 필요로 한다[8].

외수 범람 모형과 관련하여 미국 육군 공병단(U.S. Army Corps of Engineers, USACE)의 하천분석시스템(HEC-RAS)이 홍수 추정을 위해 1차원 하천 홍수량 분석에 일반적으로 사용되어 왔으며, 홍수 범위 예측을 위한 지표면 흐름 해석 시뮬레이션 모형과 연계하여 활용되어 왔다[9]. MIKE FLOOD는 1차원 및 2차원 유체역학 모델을 결합하여 하천 범람 및 제방붕괴 시나리오에 따른 위험지역 분석 및 시각화를 지원한다[10].

주거시설, 제조업 및 산업시설들이 하천을 중심으로 발달되어 왔고, 도시화로 인하여 하천 주변에 밀집되어 왔기 때문에 하천 범람에 대한 영향을 해석하는 외수 범람 해석 모형과 배수관망의 영향을 고려한 내수 범람 해석모형을 각각 모의하기에는 홍수해석에 있어서 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 내외수에 의한 홍수 범람을 동시에 고려할 수 있는 침수해석 모형을 개발하였다. 또한 하천의 유동해석과 제내지의 유동해석을 통합적으로 수행하기 위해 하천 및 제내지 영역을 경계면 처리기법을 도입하였고, 수치격자인 유한요소법(FEM)을 적용하여 침수확산 해석을 수행할 수 있는 계산모듈을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 모형을 활용하여 기후변화에 대비한 홍수해석을 수행하는데 이용함으로써 홍수 예상도 작성 및 효과적인 대책을 마련하기 위해 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 기본이론

내수 침수해석을 위해 도시의 이중배수체계 개념을 반영한 복합적인 수치모델링 기법을 고려할 필요가 있다[11,12]. 도시유역의 배수체계 구성을 위해 직접 유출이 발생하는 영역으로 지형을 반영한 다양한 지표면 2D 격자망으로 구성되는 영역과 1차원 1D 배수로망으로 구성되는 영역으로 구분하였다.

외수 침수해석을 위해 하천과 제내지간의 경계조건을 반영하여 제방 월류 및 파제에 의한 하천범람 유입량을 고려하여 1차원 하천수리해석 결과와 연계한 2차원 침수해석 알고리즘을 구성하고[13] 이를 바탕으로 외수범람을 고려한 2차원 침수확산 해석모듈을 개발하였다[14]. 또한, 외수범람 기반의 침수해석 모델을 구축하기 위해서는 제방의 월류/붕괴 유출수문곡선을 산정하여 이를 2차원 침수해석 모듈의 경계조건으로 연동하기 위한 수치 경계조건 해석모듈을 개발함으로써 1차원 하천수리해석을 통해 제방구간의 월류 및 파이핑 취약구간을 선정한 후 제방의 월류 및 파제 시나리오별 2D 침수확산 해석을 수행함으로써 하천과 연계한 외수범람 기반의 2차원 침수피해 해석이 가능하도록 하였다[15].

2차원 지표류(overland flow)에 대한 지배방정식은 수체의 질량 및 비선형 운동량에 대한 보존법칙에 근거하여 유도될 수 있으며 Eq (1)과 같은 동역학파 모델의 연속 방정식으로 기술할 수 있다[16].

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (uh)}{\partial x}+\frac{\partial (vh)}{\partial y}- =S_S+S_R-S_E+S_I \quad (1)$$

여기서 h는 수심[m], u는 x방향의 유속성분(L/t), v는 y방향의 유속성분(L/t), S_S는 인위적 유입량$(L^3/t/L^2)$, S_R은 강우에 의한 유입량$(L^3/t/L^2)$, S_E는 증발산량에 의한 유출량$(L^3/t/L^2)$, S_I는 침투에 의한 지표면 유출량(L/t), $uh=q_x$는 x방향의 유동량$(L^3/t/L^2)$, $vh=q_y$는 y방향의 유동량$(L^3/t/L^2)$, L은 길이, t는 시간을 나타낸다.

확산파 접근법에 의하면 운동량 방정식의 관성항은 다른 항에 비해 그 영향력을 무시할 수 있으며 운동량 방정식을 Eq. 2와 같이 단순화 시킬 수 있다[17].

$$V=\frac{(h)^{2/3}}{n}\frac{1}{[1+(\nabla Z_0)^2]^{2/3}}\frac{1}{\sqrt{|\ \nabla H|}}\nabla H \quad (2)$$

여기서, V는 유속벡터, Z_o는 지표면의 바닥표고, H는 수위$(H=h+Z_o)$, 그리고 n은 Mainning 조도계

수를 나타낸다.

Eq. 1과 2에 의한 2차원 지표편 흐름은 Eq. 3과 4로 나타낼 수 있으며[17], 수치해석기법은 2차원 Galerkin FEM 기법을 이용한 행렬방정식의 해를 구함으로써 부정류 해석이 수행되었다.

$$\frac{\partial H}{\partial t}-\nabla\cdot\left[\mathrm{K}\left(\nabla H+\frac{h}{2\rho}\nabla(\Delta\rho)-\frac{\tau^s}{\rho g h}\right)\right]=S_R-S_E \tag{3}$$

$$\mathrm{K}=\frac{ah^{5/3}}{n}\frac{1}{\left[1+(\nabla Z_o)^2\right]^{2/3}} \times\frac{1}{\sqrt{\left|-\nabla H-\frac{h}{2\rho}\nabla(\triangle\rho)+\frac{\tau^s}{\rho g h}\right|}} \tag{4}$$

본 모델은 내수침수 모형과 외수범람 해석모형을 각각 개발하고 이른 연계하여 내·외수 통합해석이 가능하도록 구성하였다. 따라서 내수침수해석과 외수범람해석의 각 각의 독립적인 해석이 가능할 뿐만 아니라, 외수범람과 내수침수가 동시에 발생하는 상황까지 모의가 가능하도록 개발하였다.

3. 모형의 적용 및 검증

3.1 개념모델을 활용한 내수 침수해석 모형의 검증

Chen, et al.(2016)는 도시 지역의 강우 유출 프로세스에 의한 유출량 및 침수심을 계산하기 위해 1D모델을 사용하여 배수 네트워크의 수위 및 흐름조건을 고려하여 홍수유출량을 산정하고, 2D모델과 연계하여 확산되는 알고리즘 개발하였다[18]. 하수도 모델은 SIPSON 하수도 모델을 사용하였는데, 연속 방정식을 동시에 해결하는 1D 하수도 네트워크 모델과 함께 네트워크 노드의 경우 노드 및 pipe/channel 끝의 에너지 방정식 및 흐름에 대한 Saint Venant 방정식 사용하였다. 2차원 모델은 P-DWave 모델을 사용하였고 맨홀을 통해 유출되는 유출량을 위어, 오리피스 방정식으로 산정하고 산정된 유량을 2D해석모듈과 시간-동기화 하여 지표유출량 및 유출범위를 계산하게 된다. 본 연구에서는 2차원 내수 범람유동해석을 검증과 관련하여 개념모델을 활용한 Chen, et al(2016) 수치해석 결과와 본 연구에서 개발된 내수침수 해석모델의 해석결과를 비교하여 모델의 신뢰성을 검증하였다.

해당 개념모델은 Fig. 1과 같이 하수도 네트워크와 육로 간의 양방향 상호 작용을 고려하기 위해 구성되었고, 1500 x 1000m^2으로 3개의 경사로 구성되었으며, 지표면 기울기는 x방향으로 0.002, -0.002 및 y방향으로 0.002, 에서 0.001로 구성되었다.

맨홀에서 유출되는 유출수를 배수하기 위한 10개의 맨홀과 10개의 파이프가 설치된 구조로 이루어졌고, 맨홀 1의 표고가 가장 낮으므로 맨홀 1에서 전부 배출되는 시스템이며, 맨홀3은 출구 표고보다 0.4m 낮은 국부 함몰부로 고려되었다. 배수 시스템의 설계 강우강도는 10mm/hr이고 지속시간은 6시간으로 총 시뮬레이션 시간은 12시간이다. 강우강도는 0에서 시작하여 처음 1시간 동안 20mm/hr로 증가하고 4시간 동안 일정하게 유지되고 여섯 시간째 0로 되는 시나리오로 구성하였다.

Fig. 2와 Fig 3은 개발모델의 검증을 위해 개발모형과 상용모형인 Flo-2D를 이용한 해석 결과를 비교한 것이며, 시간대별 확산된 침수면적 및 침수심 비교결과 두 모델의 거의 동일하게 나타났다.

Fig. 2의 개발모델의 유출수문곡선에 의한 시간별 침수예측해석결과를 Chen, et al(2015)의 결과(Fig. 3)과 비교한 결과 저지대 맨홀인 Node3 부근에서 침수심이 가장 높게 나타나는 형태와 최대침수심이 각각 0.42m, 0.41m로 상당히 유사한 결과값을 나타내었다.

Fig. 4는 개념모델에서 물이 집중적으로 저류되어 결과값의 비교가 가장 유의미한 지역인 맨홀1과 저지대 지점인 맨홀3의 침수심결과를 비교한 결과이며 개발모델과 Flo-2D의 내수침수 해석결과를 비교한 결과 최소 오차율 0.1% ~ 최대 오차율 2% 이내로 두 모델의 해석결과가 상당히 일치함을 확인하였다.

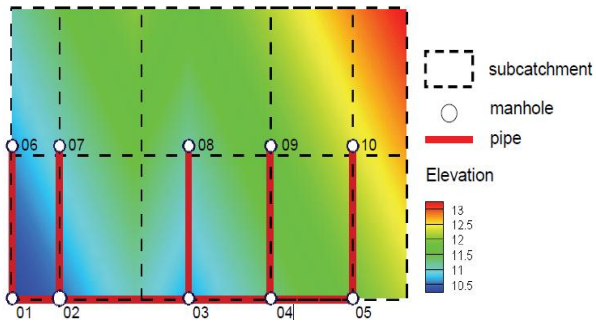


Fig. 1. Urban Flood Conceptual Model[18]

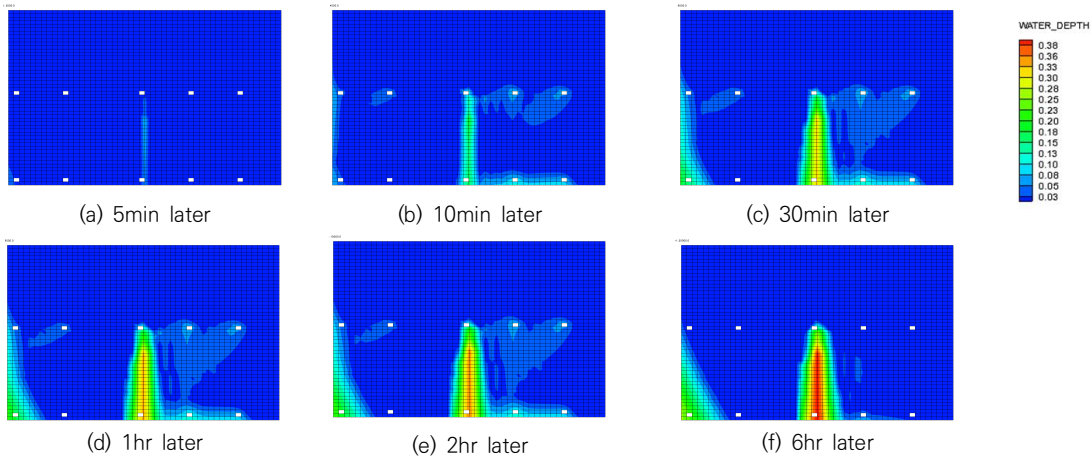


Fig. 2. Simulated Depth of Urban Flood from Conceptual Model(Development Model)

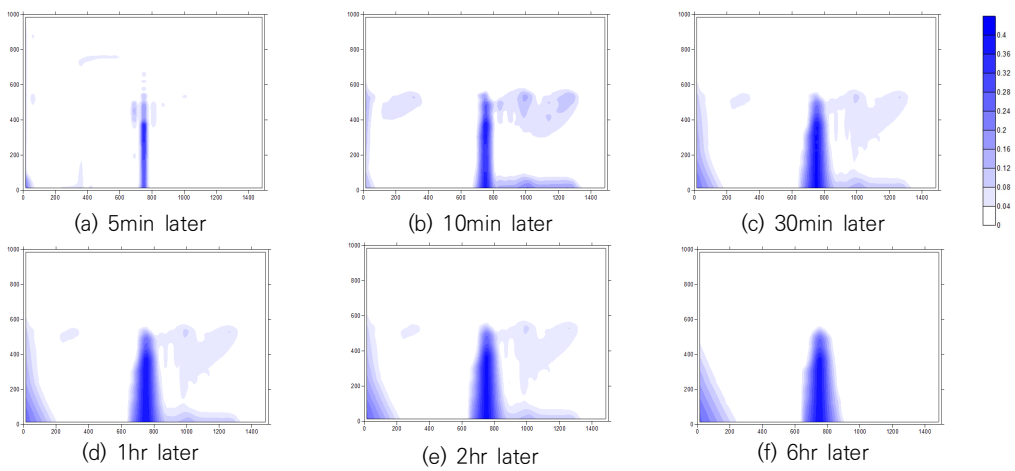
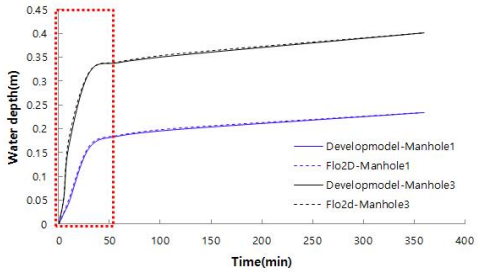
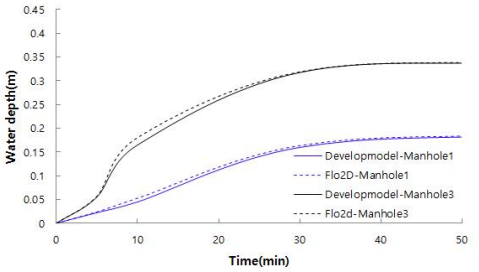


Fig. 3. Simulated Depth of Urban Flood from Conceptual Model(Flo-2D)



(a) Depth(Manhole 1)
침수심(맨홀 1)



(b) Depth(Manhole 3)
침수심 (맨홀 3)

Fig. 4. Simulated Depth Comparison at Overflow Manhole Point

3.2 개념모델을 활용한 외수 범람해석 모형의 검증

Islam et al(2015)는 제방붕괴에 의한 제내지 침수심 예측을 위한 2D 침수해석 시뮬레이터를 개발하고, 제방의 붕괴넓이와 붕괴깊이에 따른 제내지 유입량을 물리적 해석 알고리즘 개발 후 적용하였다[19].

본 연구에서는 2차원 외수 범람유동해석을 검증과 관련하여 Fig. 5와 같이 개념모델을 활용한 Islam et al(2015) 수치해석 결과와 본 연구에서 개발된 외수범람 해석모형을 같은 개념모델에 적용하고 그 해석결과를 비교하여 모델의 신뢰성을 검증하였다.

Fig. 5와 같이 제내지 침수해석을 위한 경계조건으로 하천의 홍수량은 $900m^3/s$으로 적용하였고, 하천폭은 하단 $86m$, 최상단 $108m$이며 제방고는 $6m$로 적용하였으며, 제방폭은 100m로 제방 중앙에서 붕괴되는 것으로 고려하였다. 2D 영역은 1085개 요소와 1196개 절점으로 이산화되었고 각 단면적은 사각형요소로 구성하였다. 조도계수는 전체 0.01로 고려하였고 초기수심은 하천수심을 고려하여 하천은 5m이고 그 외 제내지 지표면은 마른하도 조건으로 지정하였다. 이산화된 가상모델의 Main channel의 좌측에서 유입되며 5개 절점에서 홍수량 $900m^3/s$는 유량종속유동경계조건(Flux-dependent flux boundary condition)이 지정하였으며 하류단 5개 절점에서는 zero-수심의 Dirichlet 경계조건이 지정하였다.

Fig. 6은 제방파제에 의한 하천-제내지간의 상호유동의 동적 거동으로부터 발생한 2차원 제내지 범람해석 결과 중 침수심에 대한 결과를 시간별 양상으로 나타내었으며 파제부에서 제내지로 확산되는 형상을 효과적으로 묘사하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7는 제방파제에 의한 하천-제내지 침수확산 모의를 내수범람과 마찬가지로 상용모형인 FLO-2D를 통해 수행하였으며 시간별 침수확산 양상에 대해 도시하였다.

Fig. 8과 같이 본 연구의 개발모델과 비교결과 해석시간 초반인 침수발생 10분 후에는 Flo-2D에서 확산이 약간 빠르게 진행되었으나 그 이후 시간대에서는 확산양상이 상당히 유사하게 나타났으며, 침수심 또한 거의 유사하였다. 일부 시간대에서는 최대 오차율이 7%로 나타났으며, 최대오차율 7%는 FLO-2D와 본 개발모델의 경계조건에 대한 입력자료의 차이에서 나타난 것으로 해석된다. 외수범람해석에서는 수치해석의 안정화를 위해 Dry bed조건의 발산을 제어하는 것이 중요하며 이에 적정 초기수심(initial depth)의 적용이 필요로 한다. 초기수심은 0에 수렴할수록 수치해석결과의 신뢰성이 상승하나 FLO-2D에서 초기수심은 $1\times10^{-4}m$가 해석상 오류가 없는 최대치로 그 이하로 적용할 경우 수치해석 상 발산된다, 개발모델의 초기수심은 $1\times10^{-5}m$로 적용하였다. 이에 FLO-2D의 수심이 더 높게 계산되었으며, 이러한 절대적 수심편차를 제거한 오차율은 최대 오차율 2.2%로 나타났다.

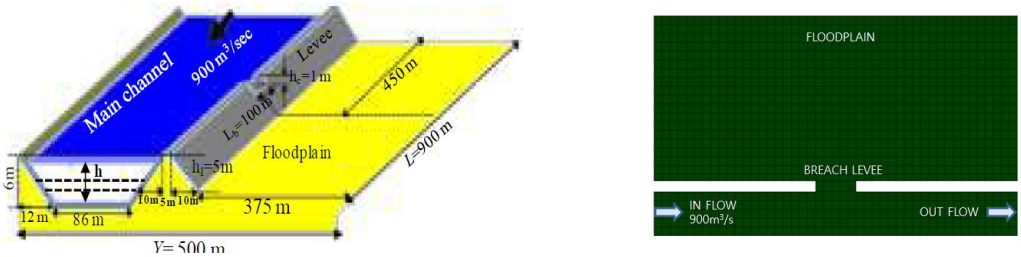


Fig. 5. River Breach Flood Conceptual Model[19]

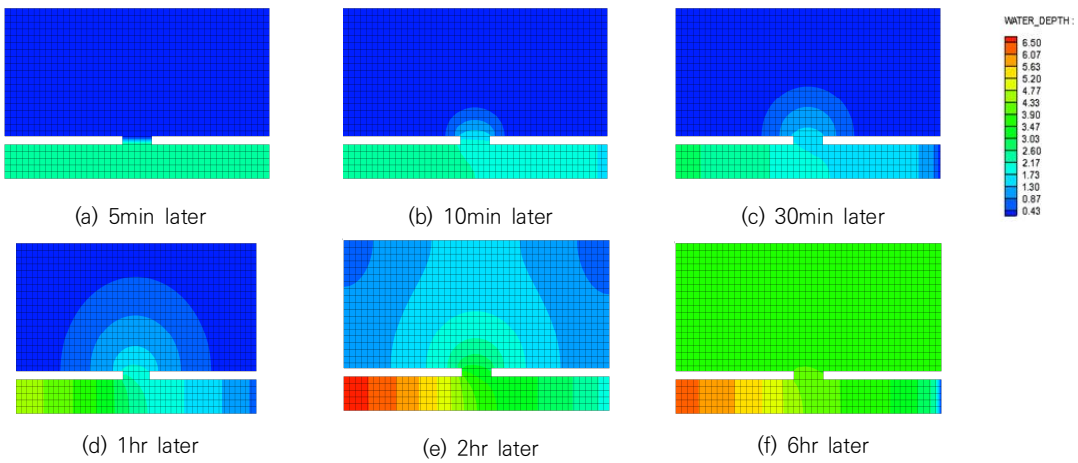


Fig. 6. Simulated Depth of River Flood from Conceptual Model(Development Model)

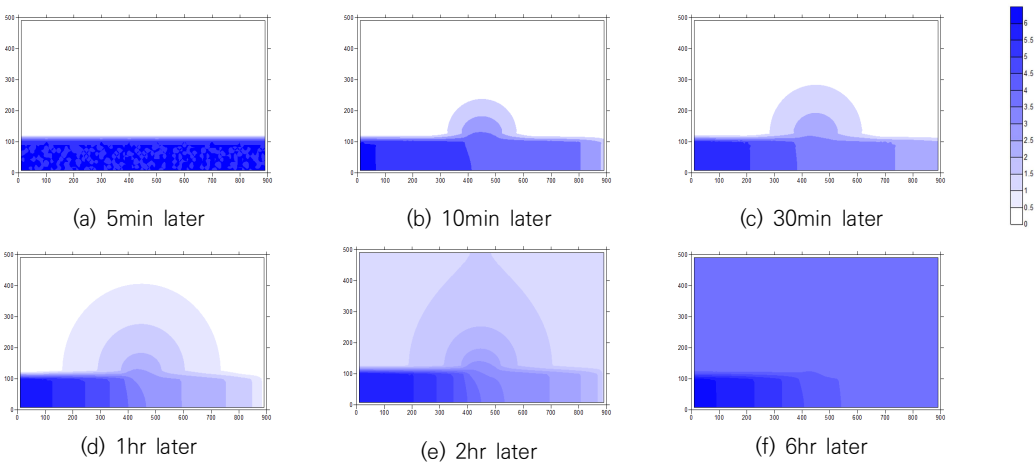


Fig. 7. Simulated Depth of River Flood from Conceptual Model(FLO-2D)

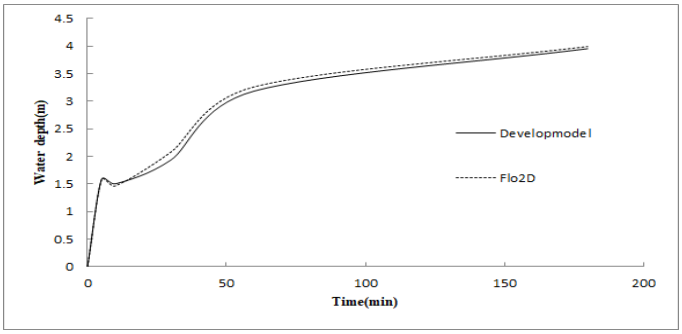


Fig. 8. Simulated Depth Comparison at River Breach Point

3.3 실제 유역 적용을 통한 내·외수 침수해석 모형의 검증

내·외수 범람해석을 위한 대상지역으로 집중호우로 인한 침수피해를 입었고, 침수당시의 침수흔적도가 작성되어 있으며, 내외수 모의를 위한 유역 내 하천정보와 우수관거 등 지하매설물, 시설배치도 등의 자료 획득이 가능한 경기광주하수처리장 일대에 대해서 적용하였다. 경기광주하수처리장 일 처리용량은 25,000 m^3/day이며, 2011년 7월 26~27일 집중호우로 인해 침수 피해가 발생되어 하수처리장내 하수처리시설이 침수되었고, 일 처리용량의 일부를 처리하지 못하는 사태가 발생하기도 하였다.

개발모델의 적용 및 검증을 위해 Fig. 9 (a)는 대상유역의 경계 및 각 건물정보에 대한 경계와 외수범람부를 나타내었고, (b)는 해당유역의 관로 및 맨홀정보자료로써 수치해석을 위한 입력자료 및 지형정보 DB로 구축되었고, 해당지역의 2011년 7월 26~28일경 침수당시 강우 및 수문자료를 구축하였다.

Fig. 10과 같이 해당 강우사상에 대한 홍수위 결과로 경안천(경안교)의 홍수위와 곤지암천(섬뜰교)의 모니터링 자료를 습득하였고, 강우사상 2일차인 11월 27일 오후 2시~3시 사이에 최대홍수위가 발생해 월류가 발생했으며, 오후 2시와 3시 시간별 월류 홍수위는 각각 0.59m, 0.26m 발생하였다. 이러한 시계열 홍수위는 외수범람해석의 경계조건으로 Fig 9(a)의 Overflow point에 Dirichlet Boundary로 적용되었으며, 내수침수 경계조건으로는 당시 강우사상을 적용하였다. 이러한 점을 고려하여 내수침수 및 하천 외수범람에 대한 시설물을 포함한 제내지 침수심 예측을 수행하였다.

(a) Target Area Boundary

(b) Pipe and Manhole Data

Fig. 9. Establishment of Input Data for Target Area

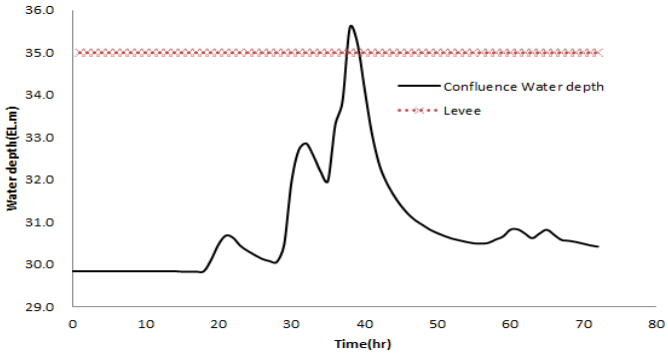


Fig. 10. Flood Level at River Junction

강우량 및 하천의 홍수위 변화에 의한 1차원 관로의 맨홀부와 2차원 제내지 영역간의 유동교환은 상호작용을 고려하여 1차원 절점과 2차원 절점을 연결하여 하나의 유출입으로써 유동에 기여하도록 하였다.

제내지 침수해석을 위한 수치해석 2차원 불규칙격자망 구성을 고려하여 경기도 광주하수처리장 일대의 1:1000 수치지도를 이용하였고, 수치해석을 위하여 모의 지역을 Fig. 11과 같이 유한요소망 격자로 구성하였다. 맨홀이 되는 40개의 1차원 노드를 지하부로 구성하였으며, 2차원 제내지 영역은 5,820개의 불규칙 유한요소격자로 이산화 하였다. 맨홀은 Link와 연결되어 1차원으로 구성되며 2차원 불규칙 하도간의 간격은 5~15m 간격으로 구성하였다. 제내지 영역의 불규칙 격자망 중 건물은 no flux boundary로 설정하여 건물의 영향을 고려하였으며, 각 제내지의 조도계수는 건물 및 도로등 포장면은 0.015, 농지 등은 0.025로 분할하여 각각 고려하였다.

대상지역에 대한 침수심에 대한 수치해석 결과를 Fig. 12에 나타내었다. Overflowpoint에서 최초 월류발생 시간부터 수치해석이 수행되었으며, 최초 월류발생 시간부터 10분, 20분, 60분 120분, 180분 동안 제내지의 확산되는 형상을 모의하였다.

Fig. 13은 대상지역의 월류에 대한 침수해석결과 중 유속에 대한 결과로써 Fig. 12와 마찬가지로 각 시간대별 시계열 자료를 바탕으로 도시되었다. 최초 월류 발생시점부터 도시 되었으며 건물의 영향을 받아 확산되는 형태가 나타나는 것을 확인하였다.

경기광주하수처리장은 합류부에 위치하고 있어 월류나 제방파제에 의한 침수피해에 취약한 것으로 나타나며, 해석결과의 유속을 고려하면 침수가 상당히 빨리 진행되었음을 파악할 수 있었다. 해석 초기시간에는 월류에 의한 제내지침수가 빠르게 확산되며, 120분 이후에는 높아진 하천수위로 인해 배수가 원활하지 않으므로 맨홀부에서 역류가 발생하며 이로 인해 맨홀부 주변으로 침수심이 높게 나타나는 것으로 내수침수와의 연계결과를 확인하였다.

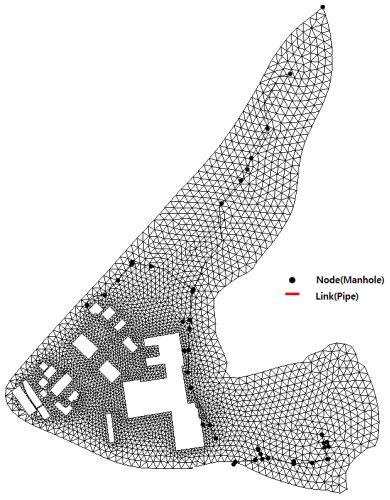
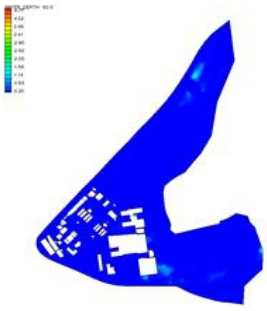
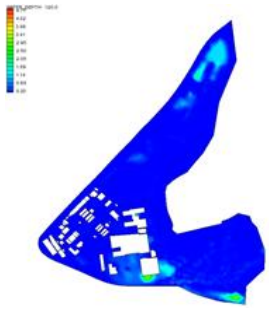


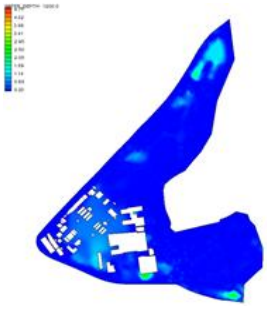
Fig. 11. Construction of Irregular Grid Network



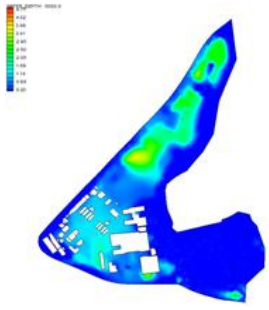
(a) 10 minutes after overflow



(b) 20 minutes after overflow

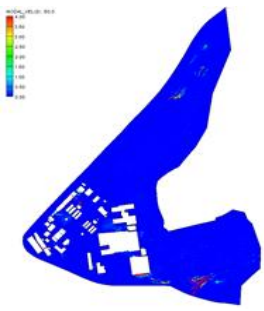


(c) 60 minutes after overflow

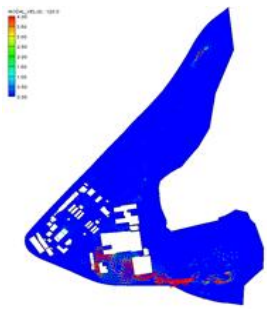


(d) 120 minutes after overflow

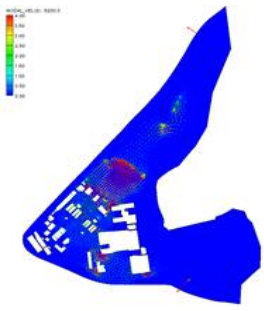
Fig. 12. Simulated Flood Depth for Target Area



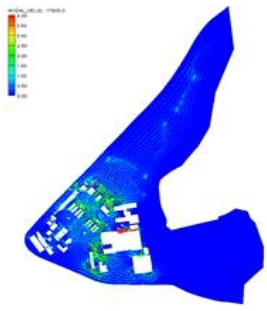
(a) 10 minutes after overflow



(b) 20 minutes after overflow

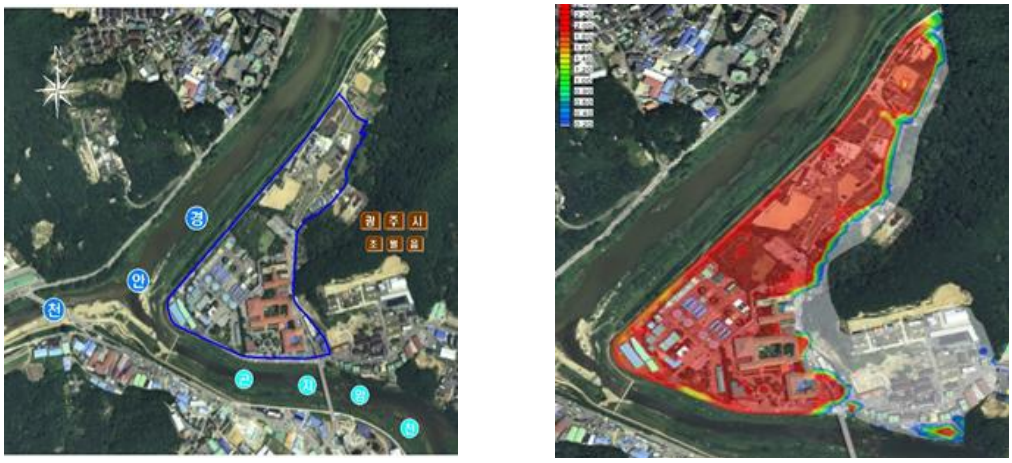


(c) 60 minutes after overflow



(d) 120 minutes after overflow

Fig. 13. Simulated Flood Velocity for Target Area



(a) Flood Trace Map (b) Maximum Flood Area from Simulation

Fig. 14. Comparison between Flood Trace Map and Simulation Result

2011년 7월 27일 침수흔적도는 침수지점의 세부 침수심이나 침수당시 유속등의 데이터는 제공 받을 수 없으므로 침수심의 직접적인 비교에 어려움이 있으나 제내지의 침수범위는 Fig. 14와 같이 상당부분 일치하는 것으로 나타났다. 또한 분석결과 피해 당시 경기광주하수처리장의 건물부를 제외하고 침전조 등 각종 시설물에 침수피해가 발생하는 것으로 모의 되었다. Fig. 14의 침수흔적도에 의한 침수면적은 약 131,090.2m^2이며 개발모델의 계산결과에서 0.1m 이상의 침수가 발생한 침수지역의 면적은 120,115.0m^2으로 나타나 약 10,975.2m^2의 오차를 보였으며, 오차율은 8.37%로 나타났으며, 내수침수와 외수범람 동시해석으로 침수흔적도와 거의 유사한 침수범위가 예측되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구의 목적은 유한요소법을 이용하여 내수 및 외수에 영향을 고려할 수 있는 침수해석 모형 개발하는 것으로 본 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 내수와 외수 영향을 분리 또는 동시에 고려할 수 있는 침수해석 모형을 개발하고, 개념모델 및 광주하수처리장 일대에 적용함으로써 개발모형의 검증을 수행하였다.

2) 내수침수와 외수 범람 해석 모형의 검증을 위해 Islam et al(2015)과 Chen, et al(2015)이 개발한 개념모델에 각각 적용하고 비교한 결과, 시계열 침수예측해석결과와 상당히 유사한 결과값을 나타내었으며, 상용모형인 Flo-2D와의 비교에서도 두 모델이 거의 동일하게 나타난 것을 확인할 수 있었다.

3) 실제 피해가 발생했었던 광주하수처리장 주변 지역에 대한 적용결과 내수와 외수를 동시에 고려함으로 인하여 침수흔적도와 거의 유사한 침수범위를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

4) 본 연구의 모델 개발 과정 및 개발된 침수해석 모형은 향후 도시지역에서 내수 및 외수 영향에 의한 침수위험지역분석에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

[1] J. I. Barredo. (2009). Normalised flood losses in Europe: 1970-2006. *Natural Hazards And Earth System Sciences, 9,* 97-104.
DOI : 10.5194/nhess-9-97-2009

[2] J. Teng, A. J. Jakeman, J. Vaze, B. F. W. Croke, D. Dutta & S. Kim. (2017). Flood Inundation Modelling: A Review of Methods, Recent Advances and Uncertainty Analysis. *Environmental Modelling & Software, 90,* 201-216.
DOI : 10.1016/j.envsoft.2017.01.006

[3] D. B. Bernet et al. (2019). Characterizing precipitation events leading to surface water flood damage over large regions of complex terrain. *Environmental Research Letters,* 14(6). 064010.

DOI : 10.1088/1748-9326/ab127c

[4] Q. Zhou, T. E. Panduro, B. J. Thorsen & K. Arnbjerg-Nielsen. (2013). Verification of flood damage modelling using insurance data. *Water Sci. Technol., 68(2),* 425-432.
DOI : 10.2166/wst.2013.268

[5] D. Moncoulon, D. Labat, J. Ardon, E. Leblois, T. Onfroy & C. Poulard & S. Aji1 & A. Rémy & A. Quantin. (2014). Analysis of French insurance market exposure to floods : a stochastic model combining river overflow and surface runoff. *Natural Hazard and Earth System Science, 14,* 1469-1485.
DOI : 10.5194/nhess-14-2469-2014

[6] J. Leandro, S. Djordjević, A. S. Chen, D. A. Savić & M. Stanić. (2009). Calibration of 1D/1D urban flood models with 1D/2D model results in the absence of real 1 data. *Journal of Hydraulic Engineering, 135(6),* 495-504.
DOI : 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000037

[7] S. D. Seyoum, Z. Vojinovic, R. K. Price & S. Weesakul. (2011). Coupled 1D and Noninertia 2D Flood Inundation Model for Simulation of Urban Flooding. *Journal of Hydraulic Engineering, 138(1),* 23-34.
DOI : 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000485

[8] P. H. Bazin & H. Nakagawa & K. Kawaike & A. Paquier. (2014). Modeling Flow Exchanges between a Street and an Underground Drainage Pipe during Urban Floods. *Journal of Hydraulic Engineering, 140(10),* 04014051.
DOI : 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000917

[9] S. Ogras & F. Onen. (2020). Flood Analysis with HEC-RAS: A Case Study of Tigris River, *Advances in Civil Engineering*, Article ID 6131982.
DOI : 10.1155/2020/6131982

[10] S. Patro & C. Chatterjee & S. Mohanty & R. Singh & N. S. Raghuwanshi. (2009). Flood inundation modeling using MIKE FLOOD and remote sensing data, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 37(1),* 107-118.
DOI : 10.1007/s12524-009-0002-1

[11] C. H. Lee & K. Y. Han & J. W. Noh. (2006). Development of urban inundation analysis model using dual-drainage concept. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 26(4B)*, 379-387.

[12] C. H. Lee & K. Y. Han. (2007). GIS-based urban flood inundation analysis model considering building effect. *Journal of Korea Water Resource Association, 40(3)*, 223-236.
DOI : 10.3741/JKWRA.2007.40.3.223

[13] J. Y. Lee & M. J. Nam & H. H. Kwon, & K. Y. Kim. (2016). Flood risk estimation with scenario-based, coupled river-overland hydrodynamic modeling. *Journal of Korean Water Resources Association, 49(9),* 773-787.
DOI : 10.3741/JKWRA.2016.49.9.773

[14] M. J. Nam & J. Y. Lee & C. H. Lee. (2019). Development of Probabilistic Flood Risk Map Considering Uncertainty of Levee Break. *Journal of Convergence for Information Technology, 9(11), 1*25-133.
DOI : 10.22156/CS4SMB.2019.9.11.125

[15] M. J. Nam & J. Y. Lee & C. W. Lee & K. Y. Kim. (2017). Estimating the compound risk integrated hydrological/hydraulic/geotechnical uncertainty of levee systems. *Journal of Korean Water Resources Association, 50(4),* 277-288.
DOI : 10.3741/JKWRA.2017.50.4.277

[16] J. D. Wang & J. J. Connor. (1975). *Mathematical Modeling of Near Coastal Circulatioin*, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Cambridge, Massachusetts 02109.

[17] G. Huang & G. T. Yeh. (2009). Comparative study of coupling approaches for surface water and subsurface interactions. *J. Hydrol. Eng., 14(5),* 453-462.
DOI : 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000017

[18] A. S. Chen & J. Leandro & S. Djordjević. (2016). Modelling sewer discharge via displacement of manhole covers during flood events using 1D/2D SIPSON/P-DWave dual drainage simulations, *Urban Water Journal, 13(8).* 830-840.
DOI : 10.1080/1573062X.2015.1041991

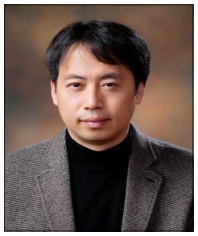
[19] M. S. Islam & T. Tsujimoto. (2015). Levee Breaching Process of a River and Disaster Risk on Floodplain, American. *Journal of Civil Engineering and Architecture, 3(2),* 39-44,
DOI : 10.12691/ajcea-3-2-1

남 명 준 (Myeong-Jun Nam) [정회원]

· 2015년 2월 : 강릉원주대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
· 2017년 12월 : 인시티 인프라연구소 연구원/대리
· 2018년 1월 ~ 현재 : (주)신우ENG 융합기술연구소 선임연구원/과장

· 관심분야 : 수자원, 전산유체공학
· E-Mail : nmj1938@daum.net

이 재 영 (Jae-Young Lee) [정회원]



· 1997년 2월 : 경북대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
· 2001년 2월 : 경북대학교 공과대학 토목공학과 (공학박사)
· 2005년 3월 ~ 2010년 12월 : 플로리다 주립대(UCF) 연구교수

·2012년 3월 ~ 현재 : ㈜신우ENG 융합기술연구소 소장
·관심분야 : 수자원, 전산유체공학, 수문지질공학
·E-Mail : vennard386@gmail.com

이 창 희 (Chang-Hee Lee) [정회원]

· 2006년 2월 : 경북대학교 공과대학 토목공학과 (공학박사)
· 2006년 4월 ~ 2007년 9월 : 서울시정개발연구원 부연구위원
· 2007년 10월 ~ 2012년 1월 : 국립환경과학원 수질총량과 전문위원

· 2012년 2월 ~ 2014년 2월 : 한국방재협회 정책연구실 실장
· 2014년 3월 ~ 현재 : 중원대학교 소방방재공학전공 부교수
· 관심분야 : 수자원, 방재, 수질환경
· E-Mail : chlee@jwu.ac.kr