연구보고서 2016-24

원격탐사기법 기반 강우추정 데이터를 이용한 실시간 도시유역 침수 예측 시스템 개발

Development of Real-time Urban Inundation Prediction System using Estimated Precipitation data based on Remote Sensing Technology

이승수

APCC
APEC CLIMATE CENTER

연구보고서 2016-24

원격탐사기법 기반 강우추정 데이터를 이용한 실시간 도시유역 침수 예측 시스템 개발

Development of Real-time Urban Inundation Prediction System using Estimated Precipitation data based on Remote Sensing Technology

이승수

APCC
APEC CLIMATE CENTER

발간사

최근 급격한 기후변화로 인하여 전 세계적으로 지금까지 경험하지 못한 극한홍수, 가뭄, 폭염, 산사태 등과 같은 자연재해의 발생 빈도가 증가하고 있습니다. 특히, 지구 온난화로 기인한 슈퍼태풍과 극한 강우로 인한 홍수와 침수 피해는 많은 인적·물적 피해를 발생시키고 있습니다. 이러한 홍수와 침수 재난피해를 예방·저감시키기 위해서는 재난 발생 원인을 사전에 파악하여 재난 유발 원인을 제거하고 대응 계획을 수립하는 사전 예방이 무엇보다 중요하다고 할 수 있습니다.

특히 인적·물적 자원이 집중되어 있는 도시 유역에서 발생하는 침수 피해를 저감시키기 위한 노력은 사회경제적 안정을 위한 필수 조건 중 하나라 할 수 있을 것입니다.

본 연구에서는 도시 유역에서 발생하는 침수 피해의 원인을 사전에 파악하기 위하여 다양한 수치해석 기법에 대해 알아보고 침수 유발 원인에 대한 분석을 수행할 수 있는 기법을 제안하였습니다. 이러한 기법은 도시 유역의 침수 취약성을 파악하여 침수로부터 안전한 도시를 확립하는데 많은 도움이 될 수 있을 것으로 판단됩니다. 또한 본 연구의 결과는 원격탐사 기법을 활용한 강우추정과 이를 활용한 실시간 침수 피해 예측 시스템을 구축하여 도시유역에서 발생 가능한 침수 피해를 사전에 예측하여 도시민들의 생명과 재산을 보호하는데도 적극 활용 가능할 것으로 판단됩니다.

마지막으로 연구결과가 나오기까지 본 연구를 수행해 주신 이승수 박사의 노고에 감사드립니다. 또한 본 연구에 많은 도움을 주신 센터 응용사업본부의 박경원 박사, 이성규 박사, 장상민 박사께 감사의 말씀을 드립니다.

2017년 1월

APEC 기후센터

원장 **정 홍 상**

ABSTRACT

In recent years, we are suffering from abnormal weather conditions due to global climate change. The abnormal weather conditions intensify extreme rainfall events, so that urban flooding and inundation caused by extreme rainfall events are occurring frequently. Once urban flooding and inundation take place, the damages are very huge and severe because there is a concentration of properties and populations in urbanized areas. Therefore, the development of countermeasures for flood defence is urgent. These potential countermeasures can be divided into two types: (1) structured, and (2) non-structured.

Structured countermeasures is defined as construction of hydraulic structures such as levee reinforcement, increase in sewerage capacities, installation of detention ponds, and flood control dams. Non-structured countermeasures involve the optimization of a dam operation system, preparing of a flood hazard map, and the development of a flood warning system and evacuation map. Structured countermeasures, although very clear in its impacts, require large amounts of funding and time to build. On the contrary, the impacts of non-structured countermeasures are difficult to quantify, but can minimize the damages caused by flooding and inundation with a low budget if we are able to predict damages with an acceptable level of accuracy.

This study develops a real-time urban inundation prediction system utilizing predicted precipitation data based on remote sensing technology. In order to select an appropriate numerical technique to simulate 2 dimensional (2D) surface flow, numerical methods are investigated. The cartesian coordination system model,

general curvature coordinate model polygon grid model, and grid mesh refinement model are selected and investigated to be appropriate models for the study. In addition, the 1 dimensional (1D) sewerage system analysis model which was introduced by Lee et al. (2015) is used to simulate inlet and overflow phenomena by interacting with surface flow. The cartesian coordination system model and grid mesh refinement model are selected and combined with the 1D sewerage analysis model. Also parallel computing method, OpenMP, is applied to reduce the calculation time. The selected models were testede against the 25 August 2014 extreme rainfall event, which caused severe inundation damages in the Busan area in Korea. The Oncheoncheon basin is selected as the study basin and the observed radar data are assumed to be the predicted rainfall data. A 10m×10m resolution grid is used for the cartesian coordination model and a 10m×10m resolution grid mixed with a 5m×5m resolution grid is used for the mesh refinement model. A 5m×5m grid was used to depict road network in urban areas. The total grid number of the cartesian coordination model is 556,009, and is 899,575 for the mesh refinement model.

The High Performance Computer (HPC), located at the APEC Climate Center (APCC) in Busan, is used to conduct numerical simulations. Intel Xeon X5690 CPU is equipped, and the clock count is 3.46GHz, and the 12 cores are equipped into 1 node. Calculation speed was estimated by increasing the number of cores and finally, 12 cores was determined to be the best number to optimize the calculation speed.

Approximately 14 minutes of calculation are required to simulate a 3 hour prediction using the cartesian coordination model, and meaning that the model is able to secure a 166 minute lead time. Also, it takes 36 minutes of calculation to complete a 3 hour prediction using the mesh refinement model, meaning that the model is able to secure a 144 minute lead time.

When validating the models using observed data, each simulation result shows

acceptable maximum inundation depth with propagation phenomena. In addition, the mesh refinement model shows more reasonable inlet effect into storm drain in mountainous areas, and an overflow effect onto surfaces in urbanized areas due to the mesh refinement models ability to depict the distribution of storm drain on the road. On the other hand, the cartesian coordination model is able to secure a longer lead time than the mesh refinement model.

Through this research, 1D-2D coupled urban inundation models are developed for real time inundation forecasting using remote sensing techniques. Both models show acceptable calculation speed with accuracy. Therefore, it is expected that both models can be used for the real time urban inundation forecasting, which has the potential to minimize damages.

목 차

1. 서론 ---- 1
1.1 연구배경 및 필요성 ---- 1
1.2 도시유역 침수실태 및 문제점 ---- 2
1.3 선행연구 조사 ---- 5
1.4 연구목적 및 내용 ---- 8

2. 대상유역 ---- 10
2.1 대상유역의 일반현황 ---- 10
2.2 과거 주요 홍수사상 ---- 12

3. 연구자료 및 방법 ---- 15
3.1 지형 데이터 ---- 15
3.1.1 지상부 고도데이터 ---- 15
3.1.2 도로망 자료 ---- 15
3.2 하수관망 데이터 ---- 16

4. 도시유역 침수해석 기법 ---- 18
4.1 2차원 지표면 침수해석 기법 ---- 18
4.1.1 데카르트 좌표계를 이용한 기법 ---- 18

4.1.2 일반 곡선좌표계를 이용한 기법 ---- 24
4.1.3 다각형 격자를 이용한 기법 ---- 33
4.1.4 메쉬 세분화 기법 ---- 39
4.2 1차원 하수관망 해석 모형 ---- 45
4.2.1 지배방정식 ---- 48
4.2.2 차분화 ---- 50
4.3 2차원 지상부 모형의 선정 ---- 52
4.4 모형의 연계 ---- 53
4.4.1 메쉬 세분화 ---- 53
4.4.2 집수구의 분포 ---- 54

5. 연구내용 ---- 56
5.1 강우자료 ---- 56
5.1.1 모의 시간의 결정 ---- 56
5.1.2 레이더 관측자료 ---- 57
5.2 모형의 적용 ---- 59
5.2.1 메쉬 구축 ---- 59
5.2.2 초기값 및 경계조건 설정 ---- 60
5.2.3 데카르트 좌표계 모형 ---- 61
5.2.3.1 모의 결과 ---- 61
5.2.4 메쉬 세분화 모형 ---- 65
5.2.4.1 모의결과 ---- 65
5.3 침수 해석 모의 결과 검증 및 비교 ---- 68
5.3.1 계산 소요시간의 비교 ---- 68

5.3.2 해석 결과의 검증 및 비교 ---------- 70

6. 결론 및 토론 ---------- 72

6.1 결론 ---------- 72

6.2 연구 활용 방안 ---------- 74

REFERENCE ---------- 76

1. 서론

1.1 연구배경 및 필요성

최근 급격한 기후변화로 인하여 전 세계적으로 이상기후 현상을 겪고 있다. 이러한 이상기후 현상의 일환으로 지금까지 경험해 보지 못한 극한 강도의 강우가 빈번히 발생하고 있으며, 이로 인한 홍수와 침수 등과 같은 피해가 빈번히 발생하고 있다. 기존의 강우 사상을 초과하는 극한 강우 현상(Extreme rainfall event)로 인해 발생하는 홍수(Flooding)와 침수(Inundation) 피해는 전 세계적으로 발생하고 있으며, 기존의 강우 사상을 초과하는 극한 강우 현상은 더 이상 이례적 현상이 아닌 일반적 현상이 되어 가고 있다. 이러한 홍수나 침수 피해가 도시유역에 발생할 경우 많은 자원과 인력이 집중되어 있는 도시의 특성상 그 규모가 상당할 뿐만 아니라 거주지와 지하공간의 침수 등과 같은 직접적 피해와 더불어 사회 기반 시스템(교통, 통신 시설 등) 마비와 수인성 질병의 유행등과 같은 이차 피해가 발생하고 있다. 침수로 인한 직·간접적 피해는 극심한 사회·경제적 혼란을 유발하므로 이를 사전에 예방하기 위한 적극적 노력이 시급한 상황이다.

지금껏 홍수와 침수 피해를 줄이기 위한 대책으로는 기존의 강우 사상에 대하여 빈도 해석을 통해 산정된 설계 홍수량을 감당할 수 있도록 수공 구조물을 설계하거나(댐, 하천 제방, 우수 유하시설 등) 홍수 예경보 체제를 확립하여 사전에 대비할 수 있는 방안들이 활용되었다(Lee, 2013). 이러한 홍수 피해 저감 대책은 Table 1에서와 같이 구조적 대책과 비구조적 대책으로 구분 될 수 있으며 이는 전 세계적으로 많은 국가에서 매우 중요한 재난 대응 방안으로 여겨진다(Andjelkovic, 2001; Genovese, 2006). 구조적 대책과 비구조적 대책은 모두 홍수와 침수로 인한 피해를 저감시키기 위함을 목적으로 함에 있어서 그 목적성은 동일하다고 할 수 있으나 구조적 대책은 홍수 저감의 수단으로 수공 구조물을 건설하는 것이며 비구조적 대책은 법령 및 각종 제도를 운영하여 홍수를 저감시키는 방법으로써 그 특징이 구분되어 질 수 있다. 또한 구조적 대책은 비구조적 대책에 비하여 피해를 직접적으로 저감시킬 수 있는 효과를 볼 수 있다는 장점이 있으나 시설물 설치나 증축에 많은 비용과 시간이 소요되며, 대규모 토목공사가 수반되는 경우가 많아 지역 거주민들과의 사회적 갈등을 유발할 수

있다는 단점이 있다. 반면에 비구조적 대책은 구조적 대책에 비하여 상대적으로 적은 예산으로 홍수와 침수 피해를 저감 시킬 수 있는 시스템과 정책 등을 개발하여 피해를 저감시킬 수 있다는 장점이 있으나 효과를 정량적으로 계량하기 어렵다는 단점이 있다.

최근 급격한 기후변화로 인해 설계기준을 초과하는 극한강우의 발생 빈도가 증가하고 있는 상황에서 피해저감 효과를 단기간에 보기 어려운 구조적 대책만으로는 침수 피해를 예방하기 위한 적절한 방법이라 이야기 할 수 없다. 따라서 장기간의 구조적 대책을 마련하기 위한 계획과 더불어 비구조적 대책을 통해 도시 지역의 침수피해를 사전에 예방하기 위한 복합적 대책 마련이 시급한 상황이다.

Table 1 홍수 피해 저감을 위한 구조적·비구조적 대책의 구분

구 분	내 용
구조적 대책	하천정비(하도개수 굴착, 준설)
	저류지 건설(홍수조절지, 유수지, 저류조 건설)
	제방보강(홍수벽, 수제설치)
	홍수조절용 댐 (다목적 댐 건설)
	우수 유하 시설 정비 (하수관거, 방수로 등)
비구조적 대책	댐, 저류지의 운영체제 최적화
	홍수예보 및 경보 체제 최적화
	홍수 위험 지도(Hazard map) 작성 및 배포
	피난 경로도 작성 (Evacuation map)
	유역관리 및 토지이용 조정

1.2 도시유역 침수실태 및 문제점

최근 국내외에서 일어난 대표적인 피해 사례를 살펴보면, 2005년 8월에서 9월 사이에 미국을 강타한 허리케인 카트리나(Hurricane Katrina)는 뉴올리언의 80%에 침수 피해를 발생시켰으며 이로 인하여 적어도 1,200명 이상의 목숨을 앗아 갔다. 또한 1,500만 명 이상의 사람들에게 영향을 주었으며 1,080억 달러 이상의 경제적 손실을 일으켰다(Knabb et al., 2005). 2011년 태국에서는 최소 50년 동안 최악의 홍수피해가 발생한 연도로 기록되고 있을 만큼 홍수 피해가 컸다. 당해 연도에만 884명의 인명피해가 있었으며 백만 명 이상의 사람들이 심각한 홍수로 인하여 집을 잃거나 이주

하였다. 7월부터 12월에 걸쳐 발생한 홍수로 인하여 77개의 지방 중 65개의 지방이 영향을 받았고, 이로 인한 경제적 손실은 465억 달러로 집계되었다(Haraguchi and Lall, 2015). Figure 1에서는 Chao Pharya 유역에서의 홍수 이후의 피해상황을 이전과 비교하여 볼 수 있다. 2010년 9월 21일 서울 광화문 일대에서 발생한 침수는 당시 제 12호 태풍 말라카스가 북태평양 고기압을 확장 시킨 상태에서 북쪽으로부터 시베리아 기단이 남하하면서 중부지방에서 일어난 충돌로 인해 북쪽 찬기단과 남쪽의 따듯한 기단사이에서 좁고 강한 정체 전성이 서울을 중심으로 동서 방향으로 띠 모양을 이루며 정체하며 발생한 집중호우로 인하여 발생하였다. 당시 시우량 최대 98mm가 넘는 강우가 기록되었으며 주택이 침수되거나 지하철 운행이 중단되는 등 많은 피해가 발생하였다. 특히 서울 쪽 관측 기록은 하루 239.5mm에 달해 9월 하순 강수량으로는 관측시작 이래 가장 많은 비가 내린 것으로 기록되었다. 피해의 원인으로는 하수도의 설계유량이 집중호우로 인해 발생한 강수량에 미치지 못하는 것과 서울 도심 일대의 침수원인은 광화문 광장 조성 시 배수를 제대로 고려하지 않은 탓이 지적되었다(재해연보, 2010).

(a) 홍수 전 (b) 홍수 후

Figure 1 Chao Phraya 강 홍수 전·후 비교 (Source, NASA)

2011년 강남일대 침수는 7월 25일 저녁 소나기를 시작으로 28일까지 내린 집중호우로 인하여 발생하였다. 집중호우의 원인으로는 북태평양고기압과 대기 중·하층의 건조한 공기사이의 대기 불안정이 강한 비구름 대를 발달 시켰고, 우리나라 북동쪽 고기압으로 인해 비구름 대가 정체되어 중부지방에 강한 집중호우를 발생시켰다. 26일에서 27일 사이에 경기도 동두천 449.5mm, 서울 301.5mm의 집중호우가 내렸으며 이로 인하여 산사태, 하천범람, 우수역류 등으로 서울 도심에 많은 침수피해가 발생하였다(재해연보, 2011). 특히 Figure 2 (a)에서와 같이 강남역 사거리가 침수되면서 이동통신이 일부 먹통이 되고 범람수에 의해 고립되는 사태가 발생하였다. 또한 우면산 산사태가 발생하여 18명의 인명피해가 발생하기도 하였다(Kim et al., 2013). 2014년 8월 25일 발생한 집중호우는 24일경 서해에서 발생한 저기압이 남해안을 거쳐 동해 쪽으로 빠져나가면서 창원, 양산, 부산지역에 각각 248, 177, 116.5mm의 강우량을 발생 시켰다. 특히 창원과 부산 일대에 피해가 집중되었는데 인구가 밀집한 부산 금정구의 온천천 유역에서는 집중호우로 인하여 시간당 최대 125mm가 넘는 호우가 발생하였다. 이로 인하여 동래역을 비롯한 일부 지하철 역사가 침수되고 인명피해가 발생하였으며 고리 원자력 발전소가 가동 중단되는 등 심각한 도시 기능 마비가 발생하였다. 당시 발생한 집중 호우로 인하여 총 7개 시도 43개 시군구 지역에서 이재민 3,348세대 7,761명, 재산피해 1,341억 5,800만 원을 발생시켰으며(재해연보, 2014) Figure. 2 (b)에서는 당시 온천천 유역에서 발생한 침수피해 위치와 사진을 보여주고 있다. 이들의 피해원인은 설계빈도를 초과한 호우와 지역특성(경사도)에 의한 집중호우 취약, 도시화·토지피복 등에 따른 홍수량 증가, 선행강우에 이은 집중호우로 인한 도로, 하천 등의 피해, 구조물 통수단면 부족 등으로 인한 피해, 하수단면 부족 등 기록적인 집중호우로 인한 도시침수를 들 수 있다. 2009년 환경부 배수분구 샘플링 조사결과 하수관로 설계기준을 상회하는 통수능 부족 관거의 비율은 최대 40%에 이르렀다(류재나 등, 2015). 이와 관련한 보다 자세한 기상, 일반 수문, 홍수피해, 강우 및 수위 관측망 등에 대한 사항은 부산대 수영강 온천천 홍수예경보 시스템 (http://pnuhydro.pusan.ac.kr)에서 확인할 수 있다.

(a) 2011년 강남역 일대 침수 모습 (b) 2014년 부산시 일대 침수 모습

Figure 2 최근 국내 침수 피해 사례 모습

1.3 선행연구 조사

홍수와 침수피해를 저감시킬 수 있는 비구조적 대책은 실제 발생 가능한 현상을 컴퓨터 수치모의를 통해 재현하고, 발생 원인을 분석하여 대책을 마련하는 방식이 주를 이루고 있으며, 이와 관련한 해외 선행 연구사례는 다음과 같다. Hsu et al.(2000)은 도시유출 해석 모형인 Storm Water Management Model(SWMM)과 2차원 확산파 해석 모형을 결합하여 배수펌프장의 배수능 부족으로 인한 침수해석을 실시한 바 있다. Choi and Ball(2002)는 분포형 유출 해석 모형에서 공간적으로 다양한 값을 갖는 변수들을 정확하게 산정하는 것에 대한 어려움을 지적하고 hydroinformatic 시스템 안에서 의사결정 시스템 적용 기반 파라메터 평가를 위한 기법을 제시한 바 있다. Horritt and Bates(2002)는 1차원과 2차원 수리학적 홍수 모형들(HEC-RAS, LISFLOOD-FP, TELEMAC-2D)을 이용하여 영국 Severn강 60km 구간에서 발생한 1998년과 2000년도 홍수 이벤트에 적용하여 각 모형에 필요한 변수의 보정을 수행하였다. Bates and Roo(2000)는 1차원 운동파 방정식을 이용한 하천 수리해석과 Digital Elevation Model(DEM) 기반 2차원 확산파 방정식 해석을 통한 침수해석을 통해 네덜란드 Meuse강 유역에 적용하였다. Amaguchi et al.(2012)은 벡터 기반 분포형 도시침수 해석 모형인 Tokyo Storm Runoff(TSR) 모형을 개발하여 검증을 수행한 바 있다. Zhang et al.(2014)은 복잡한 지형에서의 침수 해석의 효율을 증가시키기 위해 flood-connected domain calculation(FCDC) method 방법을 제안하였다. FCDC 방법은 DEM source와 지형적 관계를 정의하기 위해 삼

각메쉬를 이용하며 침수와 연결된 지역을 찾기 위해 구성되었다. Yu and Coulthanrd(2015)는 FloodMap-HydroInundation2D 모형을 이용하여 도시 침수 해석에 있어서 유역 수문학적 파라메터들의 역할을 조사하는 연구를 통해 표면 조도계수 등과 같은 내부 파라메터 뿐만 아니라 연구 대상 유역의 외부에서 유입되어 입력 자료로 쓰이는 지역의 외부 파라메터들도 침수 해석에 막대한 영향을 미치는 점을 밝혔다. Zhang and Pan(2014)은 기후변화로 인한 홍수와 침수 피해의 발생빈도가 증가함을 지적하고 기존의 수리·수문학 기반의 침수 해석 모형이 요구하는 방대한 양의 입력 데이터(고해상도의 지형 자료와 도시유역의 하수관망 자료)를 사용하지 않고도 Geographic Information System(GIS) 기반의 도시 우수침수 해석 방법(Urban Storm-Inundation Simulation Method, USISM)을 제안한 바 있다. Saksena and Merwade(2015)는 DEM 자료의 정확도가 침수 해석 결과에 중요한 영향을 미치나 고해상도 자료를 얻을 없는 지역이 다수 존재함을 이야기 하였다. 따라서 DEM 자료의 수평 수직 해상도가 침수 모형의 결과와 맵핑에 미칠 수 있는 영향을 지적하고 저해상도 DEM 자료 이용 시 그 정확도를 향상 시킬 수 있는 관계식을 제안하였다. Change et al.(2015)는 도시침수에서 나타나는 독특한 현상인 지상부 흐름(2D)과 하수관거 흐름(1D) 사이의 상호작용을 지표면 상태(투수층, 불투수층)에 따라서 각기 다른 방식을 적용하여 모델링 하는 기법을 제안하였으며, 제안된 방식으로 수행된 연구 결과를 기존의 연구 기법과 비교하여 새롭게 제안된 방식이 도시유역의 환경을 더욱 잘 반영함을 나타내었다. Leandro et al.(2016)은 도시화된 지역의 강우유출 해석의 가장 어려운 점을 지상부와 하수관거 사이의 복잡한 상호작용과 도시의 주요 특성의 공간적 이질성으로 특정하여 지표면의 공간적 이질성과 건물 타입의 다양성을 고려할 수 있는 방법론에 대한 연구를 수행하여, 1) 도시의 공간적 이질성은 평가된 지표면 침수심의 높은 영향 대비 중간 정도의 영향을 미치며 2) 복합적으로 도시의 특성을 더하는 것은 모델에 의해 모의된 동역학적 영향으로 인해 더욱 축적된 영향을 가지고 3) 건물로부터 하수관거로 우수흐름을 연결하는 것은 지표면 침수심에 비선형적 영향을 미치며 4) Open Street Maps 자료는 자연적 투수층의 흐름 방향과 물이 고이는 지역을 정의하는데 효과적임을 보였다.

Cho et al.,(2011)은 홍수파 흐름에 큰 영향을 미치는 도시지역 건물과 도로의 영향을 지적하고 GIS tool을 이용하여 도시지역의 도로와 건물을 고려한 지형자료를

구축하여 2차원 침수해석을 실시하였으며 도로와 건물을 고려한 경우(83.24%)가 그렇지 않은 경우(63.99%)보다 정확도가 높음을 강조하였다. Shin et al.,(2012)은 도시지역 지하공간의 침수피해 가능성이 높아짐을 강조하고 EPA SWMM모형을 이용하여 유출해석을 수행하고 그 결과를 복합지하공간에 대한 침수유량으로 이용하여 모의를 수행하였다. 또한 지하저류시설, 모래주머니, 차수벽 등의 침수방지대책을 고려한 시나리오를 구축하여 수리모형실험을 통해 지하 공간의 침수위험도를 분석하였다. Kim et al.,(2012)은 침수위험도가 높은 지역을 사전에 예측하고 침수저감 사업을 통한 침수발생 가능성 최소화의 중요성을 언급하고 도시 유역 내 소유역별 침수저감 사업 우선순위 결정을 위한 소유역별 상대적 침수 위험도를 산정하는 방안을 자료포락분석 모형의 교차 효율값을 활용하여 제시하였다. Joo et al.(2013)은 평균고도, 평균경사, 불투수면적, 우수관거시스템 지수 등을 이용하여 도시지역에서의 내수배제 불량으로 인한 침수위험도를 평가하기 위한 회귀식을 산정하여 과거 침수 이력과 비교하는 연구를 수행하였다. Yoon et al.(2014)은 예측 강우정보를 활용한 사전 홍수 및 침수 발생 가능성 예측의 중요성을 지적하고 레이더 예측 강우를 이용하여 2010년 9월 21일 발생한 삼성배수분구의 침수현황 모의를 수행하였다. Yoo et al.(2015)은 2011년 7월 경기도에서 발생한 침수피해 원인을 명확히 규명하고자 해당지역의 관측강우를 이용하여 수리·수문학적 분석을 수행하고 침수지역 주변의 우수배제 계획과 노면배수 계획의 적절성을 분석하였다. 수리·수문학적 분석을 위해 EPA-SWMM을 이용하였으며 도로 배수량 및 우수받이의 차집효율을 분석하기 위해서는 FHWA Hydraulic Toolbox모형을 이용하였다. Son et al.(2015)은 도시지역의 침수해석 시간 단축을 위하여 도로네트워크를 활용한 2차원 침수해석의 효용성에 관한 연구를 수행하기 위해 침수 발생 조건을 도로만 침수되는 경우, 도로와 건물이 모두 침수되는 경우로 구분하여 모의 시간을 비교하였다. Song et al.(2016)은 도시지역 하수관거 설계를 위한 지상부 유역 설계에 있어서 자연적, 구조적, 행정적 구분으로 인해 설계자 임의의 판단에 의한 유역경계 설정의 문제점을 지적하고, 지구단위 내배수시설 기준의 배수구역 경계 재설정을 통해 효과적이고 정량적으로 내수침수 피해를 줄일 수 있도록 관망의 구성에 따른 배수구역 결정에 있어서의 설계기법을 제안하였다.

지금까지 살펴본 바와 같이 침수 피해를 저감하기 위한 연구들은 대부분 유역의

수문학적 인자를 효과적이고 효율적으로 산정하기 위한 연구(Choi and Ball, 2002; Horritt and Bates, 2002; Yu and Coulthanrd, 2015), 침수해석에 소요되는 시간을 단축하기 위해 기법을 간략화 하는 방법(Joo et al., 2013; Amaguchi et al., 2012; Zhang and Pan, 2014, Saksena and Merwade, 2015), 또는 침수해석 결과의 정확도를 향상시키기 위해 모의 수행에 소요되는 시간에 대한 고려를 하지 않은 경우(Cho et al., 2011; Leandro et al., 2016)등이 대부분이다. 이러한 연구 결과들은 향후 구조적 대책을 세우기 위한 근거자료로써 적극 활용될 수 있으나, 강우의 시간적 공간적 분포가 다양하게 변하는 실제 강우현상에 의한 침수 피해의 발생 위치와 범위를 각 상황에 맞게 예측하기에는 무리가 따른다. 실제 국지적 호우에 의해 침수 피해가 예상될 경우 지자체 단위의 재난 상황본부에서 즉각적인 상황에 따라 도로 통제, 피난 경보 등과 같은 대책을 수립하기 위해서는 실시간 침수 정보가 필요하다. 따라서 실제 침수 피해가 예상되는 강우 이벤트에 대하여 실시간으로 예측된 강우자료를 이용한 실시간 침수 예측 시스템을 활용할 수 있다면 강우의 시간적·공간적 분포를 고려한 침수 예측정보를 활용한 즉각적인 대응이 가능하며, 이는 침수의 발생을 원천적으로 방지하는 구조적 대책이 완료되기 이전이라도 침수 피해의 규모를 상당부분 저감할 수 있는 대안이 될 수 있을 것이다.

실시간 홍수 또는 침수 예측 모형과 관련된 연구는 침수 발생 가능성을 확률론적 분석기법(Romanowicz et al., 1996; Romanowicz and Beben, 1998; Aronica et al., 1998; Aronica et al., 2002; Bate et al., 2004)과 수치해석 모형을 이용한 결정론적 기법(Young, 2002, Pappenberger et al., 2005, Vieux et al., 2005) 등으로 구분 할 수 있다. 그러나 실시간 침수 예측 모형과 시스템 개발에 관한 연구는 활발하게 수행되지 못하고 있으며 그 원인으로는 모형 해석에 필요 강우 입력 자료와 하수관거 데이터 그리도 토지이용도 등과 같은 데이터 획득의 어려움, 고해상도 지형 데이터 사용에 따른 계산 용량의 부족 등이 지적되고 있다(Rene et al., 2014).

1.4 연구목적 및 내용

따라서 본 연구에서는 침수피해를 실시간으로 예측하여 충분한 리드타임을 확보할 수 있도록 하기 위하여 원격탐사 기법 기반의 강우 예측 데이터를 이용하여 실시

간으로 침수 예측 정보를 생산할 수 있는 시스템 개발에 관한 연구를 수행한다. 본 연구에서 언급된 실시간 침수해석이라 함은 현재시간을 기준으로 실제 시간의 흐름보다 빠르게 침수 해석 결과를 확인할 수 있음을 의미한다. 실시간 침수 해석을 수행하기 위해서는 모의 수행 이전에 예측된 강우 자료가 필요하며, 예측된 강우자료를 이용한 침수해석에 소요되는 시간이 가능한 한 적게 소요되어야 한다. 그러나 본 연구에서는 강우예측 정보 생산에 관해서는 연구의 범위에 포함시키지 않는다. 따라서 Jang et al.(2015)이 제안한 레이더 관측자료 기반 예측정보를 이용할 수 있다는 가정을 기반으로 하여, 2014년 8월 25일 부산시 온천천 유역에서 발생한 침수 이벤트에 대하여 레이더 강우 관측자료를 예측 강우 데이터로 가정하여 연구를 수행한다.

더불어 도시유역 침수 해석에 이용되고 있는 기법들에 대해 알아보고, 그 중 도시유역 실시간 침수 해석에 적합한 기법을 선정한다. 침수 해석에 적합한 모형의 선정에 중요한 요소로써는 지형자료 구축의 용이성, 건물과 도로 등과 같은 인공 구조물 표현의 편리성 등이 고려된다. 또한 도시유역 침수 해석에 있어서 가장 중요하다고 할 수 있는 하수관망 해석 모형과의 결합을 통하여 지표면 수심과 하수관거 내의 피에조 수위 변화에 의한 하수관망으로의 유입과 지표면으로의 역류를 종합적으로 고려할 수 있는 모형을 개발한다. 개발된 모형은 레이더 관측 자료를 예측 강우를 가정하여 입력 자료로 이용하며, 강우의 공간적·시간적 분포를 고려한 실시간 도시유역 침수 예측 시스템 개발에 관한 연구를 수행한다.

향후 본 연구에서 개발된 원격탐사 기법 기반 실시간 침수 예측 시스템이 현업이 적용될 경우 침수 발생 위치와 정보를 사전에 인지하여 도로 통제, 위험 경보, 피난 알람등과 같은 대응책을 선제 적용함으로써 침수로 인한 인명피해와 재산상의 피해를 상당부분 저감할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 대상유역

2.1 대상유역의 일반현황

본 연구의 대상지역인 온천천은 대한민국의 동남단에 위치하고 있는 수영강의 제1지류로서 수영강 하구로부터 약 3.1㎞ 상류지점에서 수영강의 우안 측으로 유입하는 지방2급 하천이다. 유역의 위치는 동경 129˚02′40″~129˚07′00″, 북위 35˚09′20″~35˚17′30″ 사이에 위치하고 있으며, 북쪽방향으로는 양산시와 경계를 이루며 양산천 유역과 접하고 있고, 서쪽으로는 부산광역시 북구 및 부산진구와 경계를 이루면서 덕천천 및 동천유역과 접해 있으며 동쪽으로는 수영강 본류 유역과 접하고 있다. 또한 유역의 최북단부에는 금정산(EL. 801.5m) 및 계오봉(EL. 601.5m)이 위치하며 이곳을 정점으로 하여 서측으로 내리 뻗은 능선은 금정산성을 따라 금정봉(EL. 387m), 금용산(EL. 152.3m), 황령산(EL. 427.9m), 금연산(EL. 400m), 배산(EL. 254.9m)로 연결되어 있고 동측으로 내리 뻗은 능선은 구월산(EL. 317.4m)으로 연결되어 있다. 본 연구의 대상지역인 온천천의 유역면적은 56.28㎢, 유로연장은 14.85㎞로서 수영강 전체 유역면적(전체 유역면적 : 199.57㎢, 유로연장 : 28.4㎞)의 약 28.2%를 점하고 있다(하천정비기본계획 2004). 수영강과의 합류점을 유역출구로 한 온천천 유역의 위치와 경계는 Figure 3과 같으며, 지형의 지반고는 Figure 4와 같다.

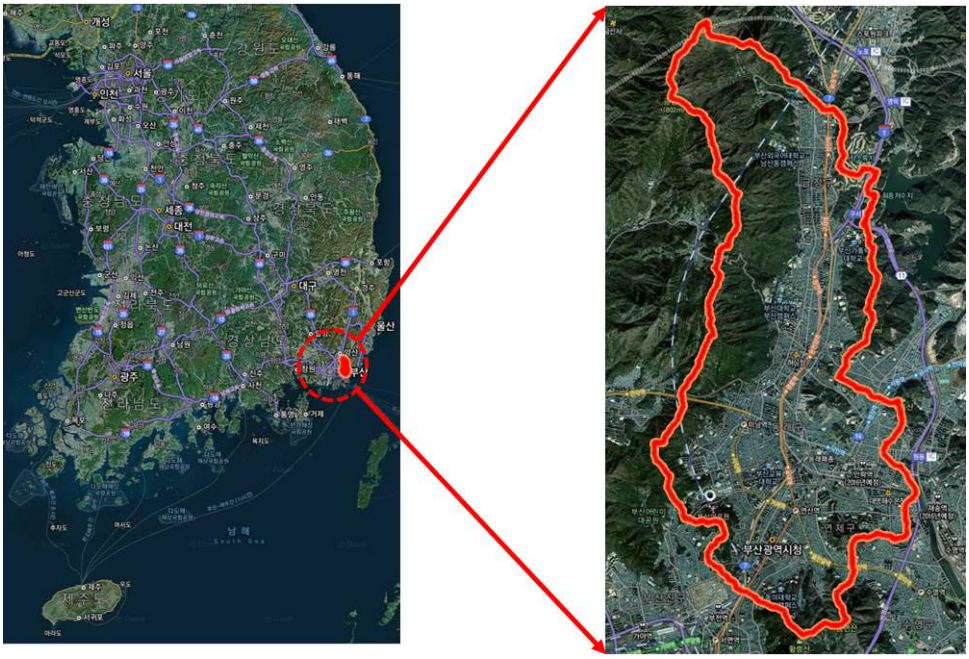


Figure 3 온천천 유역의 위치와 유역 경계

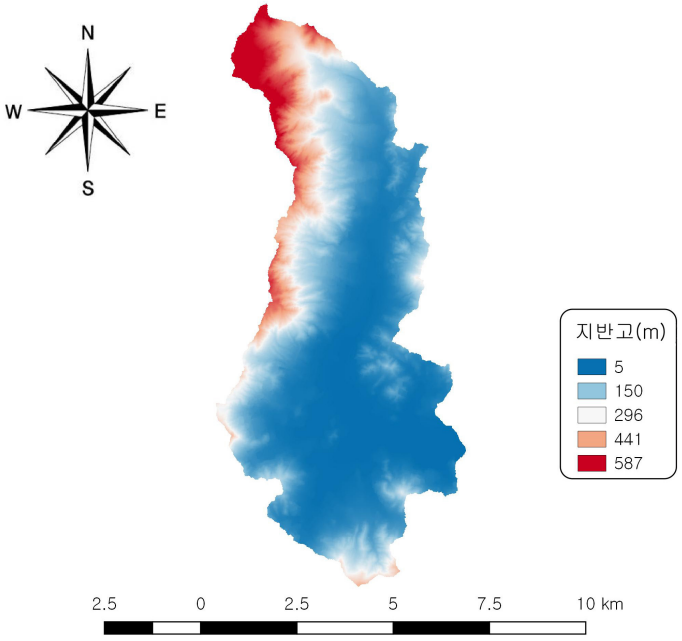


Figure 4 온천천 유역의 지형도

2.2 과거 주요 홍수사상

대상 유역인 온천천 유역이 위치하고 있는 부산은 태풍의 주경로에 위치하고 있어 태풍의 이동속도에 풍속이 더해지는 위험반경에 위치하고 있어 태풍으로 인한 피해가 많이 발생하고 있다. 이러한 기상, 지리적 요인에 의하여 과거 온천천의 홍수피해는 대부분이 태풍이 동반한 집중호우에 의해 발생되었다. 또한 최근에는 기후변화로 인한 게릴라성 집중호우의 발생 빈도가 증가하여 서쪽 해상에서 유입된 수증기로 인하여 단시간에 발생한 적란운 형태의 집중호우에 의한 피해가 2014년 8월에 발생한 바 있다.

과거 발생한 태풍 중에서 1959년의 9월 사라, 1981년의 9월 에그니스, 1987년 7월 셀마 및 8월 다이너, 1989년 7월 쥬디, 1991년 8월 글래디스, 2002년 9월 루사, 2003년 9월 매미, 2006년 7월 에위니아, 2010년 9월 태풍 곤파스, 2012년 8월 태풍 볼라벤(온천천 하천정비기본계획, 2004; 재해연보, 2006; 재해연보, 2010; 재해연보 2012) 등이 부산 경남지역에 피해를 많이 입히고 지나간 대형 태풍들이며, 특히 올해 10월에 부산 경남 및 울산 지역에 막대한 피해를 발생시킨 태풍 차바는 10월 태풍으로는 특이하게 한반도에 직접적인 영향을 주어 막대한 피해를 발생시켰다. 주요 태풍의 개요 및 피해 현황은 Table 2과 같다.

Table 2 주요 태풍 개요 및 피해현황

발생연도	이름	영향시기	피해현황	
1959	사라 (SARAH)	9월15일 ~ 9월 18일	사망·실종	849명
			이재민	37만명
			재산피해	2,043억원
1981	애그니스 (AGNES)	8월 31일 ~ 9월 4일	사망·실종	139명
			이재민	1,436명
			재산피해	1,314억원
1987	셀마(THELMA)	7월 21일	사망·실종	178명
			이재민	·
			재산피해	4,960억원
1987	다이너(DINAH)	8월 28일 ~ 8월 31일	사망·실종	81명
			이재민	11,235명
			재산피해	1,301억원

발생연도	이름	영향시기	피해현황	
1989	쥬디(JUDY)	7월 28일 ~ 7월 29일	사망·실종	20명
			이재민	2만 여명
			재산피해	1,709억원
1991	글래디스 (GLADYS)	8월 22일 ~ 8월 26일	사망·실종	103명
			이재민	2만여명
			재산피해	2,630억원
1998	예니 (YANNI)	9월 29일 ~ 10월 1일	사망·실종	57명
			이재민	4827명
			재산피해	2,749억원
2002	루사 (RUSA)	8월 31일 ~ 9월 1일	사망·실종	246명
			이재민	6만 3천여명
			재산피해	5조원
2003	매미 (MAEMI)	9월 11일	사망·실종	131명
			이재민	6만 1844명
			재산피해	4조 2225억
2006	에위니아 (EWINIAR))	7월 10일 ~ 7월 13일	사망·실종	40명
			이재민	2,481명
			재산피해	1조 8344억원
2010	곤파스	9월 2일 ~ 9월 3일	사망·실종	18명
			이재민	1,339명
			재산피해	1,673억
2012	볼라벤 (BOLAVEN)	8월 28일	사망·실종	11명
			이재민	3,830명
			재산피해	6,364억

Table 2에서 보는 바와 같이 태풍으로 인한 피해는 많은 인명과 재산상의 피해를 가져오고 있으나, Table 3에서와 같이 2015년 기준 최근 10년간 원인별 피해액 현황(재해연보, 2015)을 살펴보면 호우로 인한 피해액이 전체 피해액의 58%를 차지하고 있다. 또한 가뭄이 심했던, 2007년과 2012년, 2015년을 제외하면 호우로 인한 피해액이 전체 피해액에서 차지하는 비율이 79%를 상회하는 것을 볼 수 있으며 이는 국내에 발생하는 풍수해중 호우에 의한 피해 발생 비율이 대단히 높음을 의미한다.

따라서, 태풍과 집중호우로 인한 피해를 예방하기 위해서는 구조적 대책의 일환인 하천제방의 보강, 하천정비를 통한 통수능의 확충, 도시유역 하수관거 용량의 확대 등과 같은 사전 대비책이 매우 중요하다 할 수 있다. 그러나 막대한 재정이 소요될 뿐만 아니라 장기간의 공사 기간 소요와 더불어 사업 대상 지역의 거주민들과의 갈등을 유발 할 수 있는 구조적 대책의 단점으로 인하여 구조적 대책만으로는 홍수와 침수피해에 완벽하게 대비할 수는 없다. 그러므로 재난 발생이 예상되는 경우, 사전에 피해 발생 가능 지역과 규모를 파악하여 침수 발생 예상 지역을 통제하고, 거주민들을 대비시키는 등의 비구조적 대책과의 적절한 병행을 통하여 홍수·침수 피해 저감 대책을 마련하는 방식이 더욱 효과적이라고 할 수 있다.

Table 3 최근 10년간 원인별 피해액 현황 (단위: 백만원)

구분	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	평균
태풍	13,592	182,613	897	-	174,145	206,530	942,997	1,613	5,079	13,404	154,087
호우	2,195,035	49,371	60,749	267,130	182,479	499,132	36,106	150,980	136,505	1,213	357,870
대설	5,959	8,447	3,808	13,392	66,933	45,386	19,121	10,829	31,120	13,021	21,802
강풍	16,166	7,810	1,166	7,373	176	-	25,096	890	91	3,891	6,266
풍랑	6,549	37,606	-	25,245	7,103	283	-	42	-	333	7,716
계	2,237,301	285,847	66,620	313,140	430,836	751,331	1,023,320	164,354	172,795	31,862	547,741

3. 연구자료 및 방법

3.1 지형 데이터

3.1.1 지상부 고도데이터

지상부 입력 자료를 구축하기 위해서는 먼저 대상 유역을 선정한 후 대상 유역을 포함하고 있는 DEM을 수집하여야 한다. 대상 유역의 DEM 자료를 구축하기 위한 기초 자료는 국토교통부 산하 국토지리정보원 홈페이지(http://www.ngii.go.kr/kor/main/main.do?rbsIdx=1) 에서 무료로 다운로드 받을 수 있으므로 모형 해석에 적합한 수준의 해상도를 가지는 자료를 다운로드 받아 이용할 수 있다. 본 연구에서는 2014년 8월 25일 국지성 집중 호우에 의해 침수 피해가 발생했던 부산광역시 온천천 유역을 대상으로 지상부 2차원 침수해석 모형과 1차원 하수관거 모형을 결합한 침수 해석 모형을 개발하여 강우 예측 자료를 입력 자료로 한 실시간 침수해석 시스템 개발에 관한 연구를 수행한다. 지상부 DEM 자료는 국토지리정보원 홈페이지에서 다운받은 1:5,000 등고선 수치지도를 이용하여 10m×10m 해상도를 가지는 격자기반 DEM 자료를 생성하였다. 온천천과 수영강이 만나는 지점을 유역의 출구로 지정하여 유역 분할을 수행하였다.

3.1.2 도로망 자료

실제 도시 유역에 강우가 발생하여 지표면 유출이 일어나는 경우 표면 유출은 상대적으로 고도가 낮은 도로를 따라 흐르다 집수구를 통해 하수관망으로 배수된다. 그러나 하수관망의 유하능력을 초과하는 유량이 유입되는 경우에는 다시 집수구나 맨홀을 통한 역류 현상이 발생하게 된다. 이러한 유입과 역류 현상은 한 유역에 있어서 동시 다발적으로 일어날 수 있기 때문에 지표면의 수심과 하수관거의 피에조 수위를 비교하여 각 상황에 맞는 유입과 역류 현상을 고려하여야 한다(Lee et al., 2015; Leandro et al., 2016). 따라서 본 연구에서는 지상부에서 지하 하수관망 시스템으로의 우수 유입·역류가 일어나는 지점은 도로와 인도가 인접한 부분에 설치되어 있는 집수구로 선정하였다. 모형 내에서 집수구를 표현하기 위한 방법은 실제 집수구의 x, y좌표를 확인하여 모형 내에 반영하여야 하나, GIS 형태로 구축되어 있는 데이터의

수집된 집수구 정보에는 누락된 자료가 많아 직접 이용하기에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 $0.5m \times 0.5m$ 크기의 집수구가 $100m^2$ 면적의 도로위에 일정 간격으로 분포되어 있다고 가정하고 모의를 수행한다. 집수구를 유역 내에 분포시키기 위해서 유역 내에 위치하고 있는 도로망 자료가 필요하며 이를 위하여 온천천 유역의 토지이용도가 이용되었다. 대상유역의 도로망 정보를 알 수 있는 토지이용도는 Figure 5에서와 같이 국토 지리정보원에서 다운 받은 수치 등고선 자료를 활용하였다.

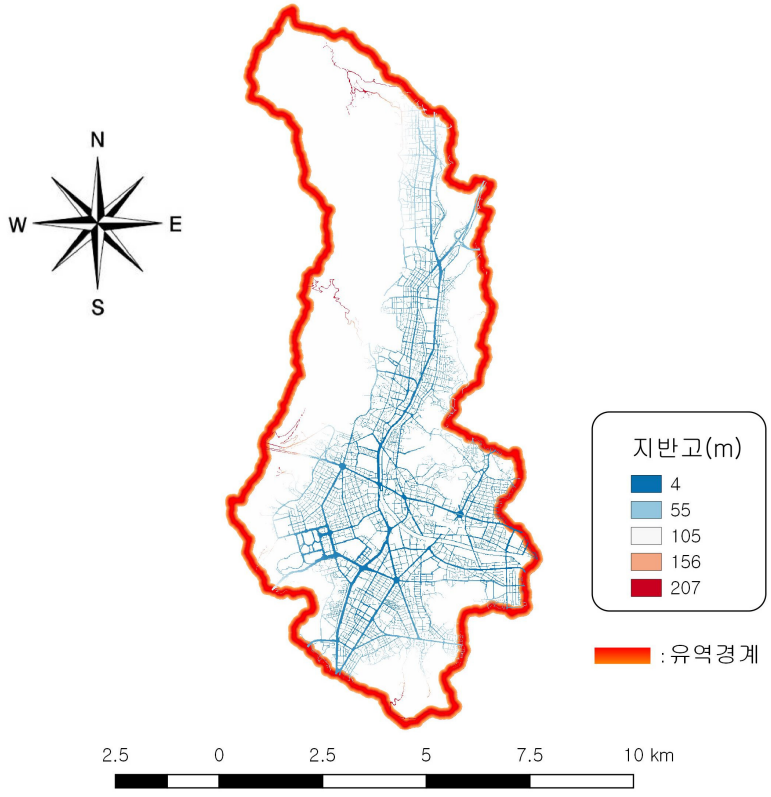


Figure 5 도로망 DEM

3.2 하수관망 데이터

Figure 6는 대상유역인 온천천 유역에 설치되어 있는 하수관망(하수관거, 맨홀 등)의 분포를 보여주고 있다. 자표 분석결과 온천천 유역의 하수관거는 총 595개의 파이프로 이루어져 있으며, 이 중 41개는 온천천을 표현하고 있다. 온천천 유역의 하수

관거 554개의 파이프 중 사각형 단면을 가지는 관거는 427개 이며, 원형 단면을 가지는 관거는 127개이다. 하수관거의 길이는 최소 15.44m부터 815m까지 다양하게 분포 하고 있으며 관경은 최소 0.35m에서 27m의 크기를 가진다. 하수관거의 경사는 0.00013에서부터 0.70503까지 분포하고 있다. 또한, 온천천 유역에 설치되어 있는 멘홀의 개수는 총 511개 이며, 멘홀의 높이는 최대 7.5m에서부터 0.7m까지 고르게 분포되어 있다.

온천천 유역 하수관망 데이터의 특이점으로는 하수관거를 통해 배출되는 유량이 Figure 6에서 파란색으로 표시되어 있는 지점에서 온천천으로 배수펌프장을 거치지 않고 중력에 의해 자연 배수된다는 점이다. 이는 하수관거의 설계를 비교적 쉽게 할 수 있다는 장점이 있으나 온천천의 수위가 높아짐으로써 지상부의 우수가 온천천으로 유입되지 못하거나 온천천으로부터 유량이 유입되어 침수가 발생할 수 있다는 단점이 있다.

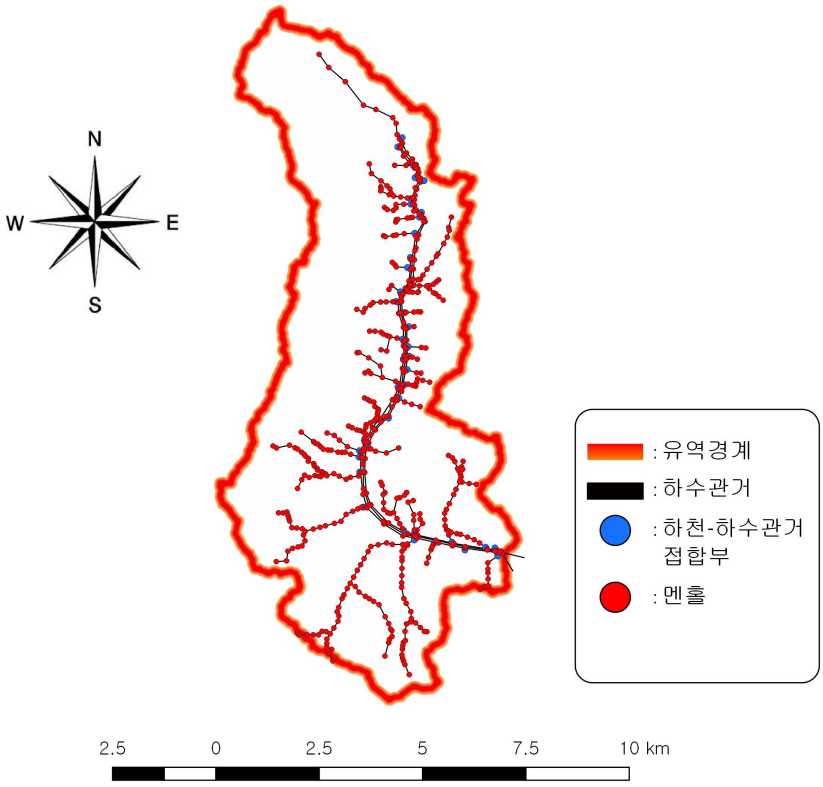


Figure 6 온천천 유역 하수관망

4. 도시유역 침수해석 기법

본 보고서에서는 2차원 지표면의 침수 해석에 이용되는 川池健司 (2002)에 의해 제시된 세 가지 수치해석 기법과 메쉬세분화 기법(Berger and Phillip, 1989)에 대하여 알아보고, 각 기법이 가진 장단점에 대해 기술한다. 침수 해석을 하기 위한 기초방정식으로는 2차원 연속방정식과 운동량방정식이 이용되며, 각 기법별 기본 가정, 차분화 기법 등에 대해 알아본 후 도시 유역 침수 해석에 적합한 기법을 선정한다. 또한, 도시유역 침수 해석에 필수적인 요소인 하수관거 해석에 관한 기법에 대하여 알아본 후 실제 도시유역에서 일어나는 침수해석을 재현할 수 있는 방법에 대해 고찰한다.

4.1 2차원 지표면 침수해석 기법

4.1.1 데카르트 좌표계를 이용한 기법

데카르트 좌표계에서의 범람해석기법에서는 식(3.1)~(3.3)에서와 같이 2차원 연속방정식과 운동량 방정식을 기초식으로 이용한다.

〈연속 방정식〉

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial N}{\partial y}=0 \tag{3.1}$$

〈운동량 방정식〉

$$\frac{\partial M}{\partial t}+\frac{\partial (uM)}{\partial x}+\frac{\partial (vM)}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial x}-\frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \tag{3.2}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial (uN)}{\partial x}+\frac{\partial (vN)}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial y}-\frac{\tau_{by}}{\rho_w} \tag{3.3}$$

여기에서, h는 수심, u, v는 x, y방향의 유속, M, N은 x, y방향의 유량 플럭스($M=uh$, $N=vh$, H는 수위($H=h+z$, z는 지반고), τ_{bx}, τ_{by}는 x, y방향의 전단응력이며 각각 식(3.4)와 식(3.5)를 이용하여 구한다.

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \tag{3.4}$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \tag{3.5}$$

여기에서, ρ_w는 물의 밀도, g는 중력가속도, n은 Manning의 조도계수, t는 시간, x, y는 수평/수직 방향으로 취한 데카르트 좌표계의 좌표값이다.

이들의 이산화에 대해서는 시간항은 전진차분, 이류항에서는 Donor Cell scheme (Van, 2006), 저면마찰항은 Vasiliev의 불안정을 피하기 위해 국소적인 implicit 형태를 이용한 중앙차분, 그 외 항목에서는 중앙 차분을 각각 적용한다.

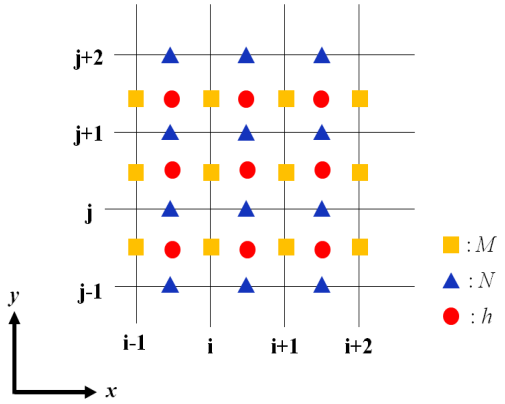


Figure 7 격자내의 미지량 배치

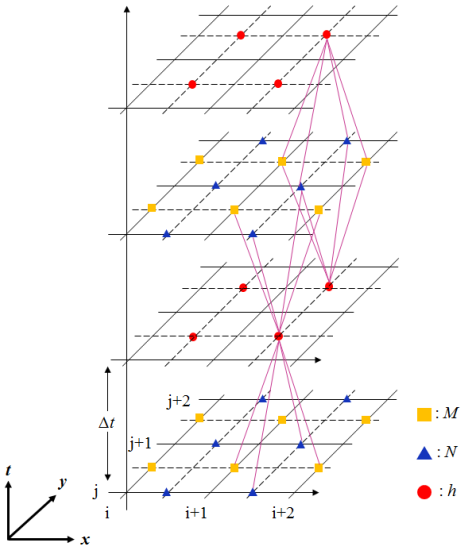


Figure 8 Leap-Frog 기법

지배방정식의 해석을 위해 필요한 미지량은 Figure 7에 표시된 것처럼 staggered (엇갈림 격자)에 배치하고 계산은 Figure 8에 표시된 것처럼 Leap-Frog기법을 사용한다. 아래에는 해석에 사용한 차분법을 표시한다. 단, 아래첨자 i, j는 차분격자 번호를, 위첨자 n은 시간스텝을 의미한다.

〈연속식 방정식의 차분화〉

$$\frac{h_{i,j}^{n+3}-h_{i,j}^{n+1}}{2\Delta t}+\frac{M_{i+1/2,j}^{n+2}-M_{i-1/2,j}^{n+2}}{\Delta x}+\frac{N_{i,j+1/2}^{n+2}-N_{i,j-1/2}^{n+2}}{\Delta y}=0 \tag{3.6}$$

〈x방향 운동량식의 차분화〉

$$\begin{aligned}
&\frac{M_{i-1/2,j}^{n+2}-M_{i-1/2,j}^{n}}{2\Delta t}+\frac{u_{i,j}^{n}\cdot\frac{M_{i-1/2,j}^{n}+M_{i+1/2,j}^{n}}{2}+\left|u_{i,j}^{n}\right|\cdot\frac{M_{i-1/2,j}^{n}-M_{i+1/2,j}^{n}}{2}}{\Delta x}\\
&-\frac{u_{i-1,j}^{n}\cdot\frac{M_{i-3/2,j}^{n}+M_{i-1/2,j}^{n}}{2}+\left|u_{i-1,j}^{n}\right|\cdot\frac{M_{i-3/2,j}^{n}-M_{i-1/2,j}^{n}}{2}}{\Delta x}\\
&+\frac{v_{i-1/2,j+1/2}^{n}\cdot\frac{M_{i-1/2,j}^{n}+M_{i-1/2,j+1}^{n}}{2}+\left|v_{i-1/2,j+1/2}^{n}\right|\cdot\frac{M_{i-1/2,j}^{n}-M_{i-1/2,j+1}^{n}}{2}}{\Delta y}\\
&-\frac{v_{i-1/2,j-1/2}^{n}\cdot\frac{M_{i-1/2,j-1}^{n}+M_{i-1/2,j}^{n}}{2}+\left|v_{i-1/2,j-1/2}^{n}\right|\cdot\frac{M_{i-1/2,j-1}^{n}-M_{i-1/2,j}^{n}}{2}}{\Delta y}\\
&=-g\frac{h_{i,j}^{n+1}+h_{i-1,j}^{n+1}}{2}\cdot\frac{\left(h_{i,j}^{n+1}+z_{i,j}\right)-\left(h_{i-1,j}^{n+1}+z_{i-1,j}\right)}{\Delta x}\\
&-\frac{g\left(\frac{n_{i,j}+n_{i-1,j}}{2}\right)^{2}\cdot\frac{M_{i-1/2,j}^{n+2}+M_{i-1/2,j}^{n}}{h_{i,j}^{n+1}+h_{i-1,j}^{n+1}}\sqrt{(u_{i-1/2,j}^{n})^{2}+(v_{i-1/2,j}^{n})^{2}}}{\left(\frac{h_{i,j}^{n+1}+h_{i-1,j}^{n+1}}{2}\right)^{1/3}}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

〈y방향 운동량식의 차분화〉

$$\begin{aligned}
&\frac{N_{i,j-1/2}^{n+2}-N_{i,j-1/2}^{n}}{2\Delta t}\\
&+\frac{u_{i+1/2,j-1/2}^{n}\cdot\frac{N_{i,j-1/2}^{n}+N_{i+1,j-1/2}^{n}}{2}+\left|u_{i+1/2,j-1/2}^{n}\right|\cdot\frac{N_{i,j-1/2}^{n}-N_{i+1,j-1/2}^{n}}{2}}{\Delta x}\\
&-\frac{u_{i-1/2,j-1/2}^{n}\cdot\frac{N_{i-1,j-1/2}^{n}+N_{i,j-1/2}^{n}}{2}+\left|u_{i-1/2,j-1/2}^{n}\right|\cdot\frac{N_{i-1,j-1/2}^{n}-N_{i,j-1/2}^{n}}{2}}{\Delta x}
\end{aligned}$$

$$+\frac{v_{i,j}^{n}\cdot\frac{N_{i,j-1/2}^{n}+N_{i,j+1/2}^{n}}{2}+\left|v_{i,j}^{n}\right|\cdot\frac{N_{i,j-1/2}^{n}-N_{i,j+1/2}^{n}}{2}}{\Delta y}$$

$$-\frac{v_{i,j-1}^{n}\cdot\frac{N_{i,j-3/2}^{n}+N_{i,j-1/2}^{n}}{2}+\left|v_{i,j-1}^{n}\right|\cdot\frac{N_{i,j-3/2}^{n}-N_{i,j-1/2}^{n}}{2}}{\Delta y} \tag{3.8}$$

$$=-g\frac{h_{i,j}^{n+1}+h_{i,j-1}^{n+1}}{2}\cdot\frac{\left(h_{i,j}^{n+1}+z_{i,j}\right)-\left(h_{i,j-1}^{n+1}+z_{i,j-1}\right)}{\Delta y}$$

$$-\frac{g\left(\frac{n_{i,j}+n_{i,j-1}}{2}\right)^{2}\cdot\frac{N_{i,j-1}^{n+2}+N_{i,j-1/2}^{n}}{h_{i,j}^{n+1}+h_{i,j-1}^{n+1}}\sqrt{(u_{i-1/2,j}^{n})^{2}+(v_{i-1/2,j}^{n})^{2}}}{\left(\frac{h_{i,j}^{n+1}+h_{i,j-1}^{n+1}}{2}\right)^{1/3}}$$

Figure 7에서와 같이 데카르트 좌표계를 이용한 침수 해석에서 지배방정식의 미지량은 각각 수심은 격자의 중앙에, 유량플럭스는 격자의 경계에 위치하기 때문에 식 (3.7)과 (3.8)에 나타내어진 차분식을 이용하기 위해서는 격자 중간과 경계에 위치한 유속 u와 v를 계산하여야 한다. 기본적으로 유속은 플럭스를 수심으로 나눠 구할 수 있으나 플럭스와 수심의 배치가 각각 격자의 경계, 격자의 중앙이기 때문에 단순히 해당 격자의 플럭스를 수심으로 나누는 경우 격자상 위치의 불일치로 인한 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 $u_{i-1/2}^{n}$와 $v_{i,j-1/2}^{n}$를 구하기 위해서 플럭스의 위치를 기준으로 식 (3.9)와 (3.10)에서와 같이 좌우의 수심으로 보간한 격자 경계의 수심을 구한다.

$$u_{i-1/2,j}^{n}=\frac{2M_{i-1/2,j}^{n}}{h_{i,j}^{n+1}+h_{i-1,j}^{n+1}} \tag{3.9}$$

$$v_{i,j-1/2}^{n}=\frac{2N_{i,j-1/2}^{n}}{h_{i,j}^{n+1}+h_{i,j-1}^{n+1}} \tag{3.10}$$

$u_{i,j-1/2}^{n}$와 $v_{i-1/2,j}^{n}$는 x방향의 유속을 y축 격자 경계에서, y방향 유속을 x축 격자의 경계에서 구해야 하므로 식 (3.9)와 (3.10)에서 이용한 방법과는 다른 기법이 요구된다. 따라서 $u_{i,j-1/2}^{n}$을 구하는 경우는 식 (3.11)과 같이 식 (3.9)와 (3.10)를 이용하여 구한 i기준 좌우의 유속과 좌우 상단의 유속의 평균값을 이용한다. $v_{i-1/2,j}^{n}$을 구하는

경우도 식 (3.12)와 같이 앞서 설명한 방법과 동일한 방법을 이용한다.

$$u_{i,j-1/2}^{n} = \frac{u_{i-1/2,j}^{n} + u_{i+1/2,j}^{n} + u_{i-1/2,j-1}^{n} + u_{i+1/2,j-1}^{n}}{4} \tag{3.11}$$

$$v_{i-1/2,j}^{n} = \frac{v_{i,j-1/2}^{n} + v_{i-1,j-1/2}^{n} + v_{i,j+1/2}^{n} + v_{i-1,j+1/2}^{n}}{4} \tag{3.12}$$

이외에 각 격자의 중심과 경계에서 필요한 x, y방향 유속 u와 v를 구하기 위해서 식 (3.13) ~ (3.20)을 이용한다.

$$u_{i,j}^{n} = \frac{u_{i-1/2,j}^{n} + u_{i+1/2,j}^{n}}{2} \tag{3.13}$$

$$u_{i-1,j}^{n} = \frac{u_{i-3/2,j}^{n} + u_{i-1/2,j}^{n}}{2} \tag{3.14}$$

$$v_{i,j}^{n} = \frac{v_{i,j-1/2}^{n} + v_{i,j+1/2}^{n}}{2} \tag{3.15}$$

$$v_{i,j-1}^{n} = \frac{v_{i,j-3/2}^{n} + v_{i,j-1/2}^{n}}{2} \tag{3.16}$$

$$u_{i+1/2,j-1/2}^{n} = \frac{u_{i+1/2,j}^{n} + u_{i+1/2,j-1}^{n}}{2} \tag{3.17}$$

$$u_{i-1/2,j-1/2}^{n} = \frac{u_{i-1/2,j}^{n} + u_{i-1/2,j-1}^{n}}{2} \tag{3.18}$$

$$v_{i-1/2,j+1/2}^{n} = \frac{v_{i,j+1/2,}^{n} + v_{i-1,j+1/2}^{n}}{2} \tag{3.19}$$

$$v_{i-1/2,j-1/2}^{n} = \frac{v_{i,j-1/2}^{n} + v_{i-1,j-1/2}^{n}}{2} \tag{3.20}$$

범람해석을 수행하는 경우 물이 없는 상태의 격자(dry condition)에 플럭스가 전파되는 경우가 발생을 할 수 있으며 이런 경우 두 격자 간에 수심이 연속적으로 생성되지 않아 2차원 천수방정식의 기본 가정에 부합하지 않는 문제가 발생하여 수치진동이 발생할 수 있다. 이런 문제점을 방지하기 위해 Kawaike(2002)는 지반고와 수위의 관

계를 이용하여 Figure 9와 같은 경우에는 낙차식을, Figure 10과 같은 경우에는 월류식을 이용하였다. 즉, 지반고가 높은 격자의 수위가 지반고가 낮은 격자의 수위보다 높은 경우와 지반고가 낮은 격자의 수위가 지반고가 높은 격자의 수위보다 높은 경우를 구분하여 플럭스 M_0를 다음 식을 이용하여 구한다.

1) 지반고가 높은 격자의 수위가 지반고가 낮은 격자의 수위보다 높은 경우에는 식 (3.21)을 이용한다.

$$M_0 = \mu h_h \sqrt{g h_h} \tag{3.21}$$

여기서, $\mu = (2/3)^{3/2}$를 사용한다.

2) 지반고가 낮은 격자의 수위가 지반고가 높은 격자의 수위보다 높은 경우에는 식 (3.22)를 이용한다.

$$M_0 = \mu' h_1 \sqrt{2 g h_1} \tag{3.22}$$

여기서, $\mu' = 0.35$를 사용한다.

또한 범람수의 이동한계 수심은 0.001m로 정하였다. 즉, 수심이 0.001m 이하인 경우는 수심이 없다고 가정한다.

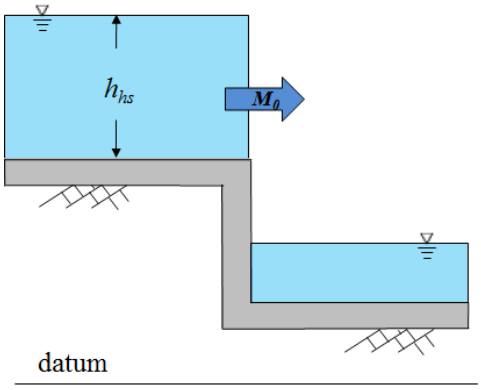


Figure 9 낙차식을 이용하는 경우 (Lee, 2013)

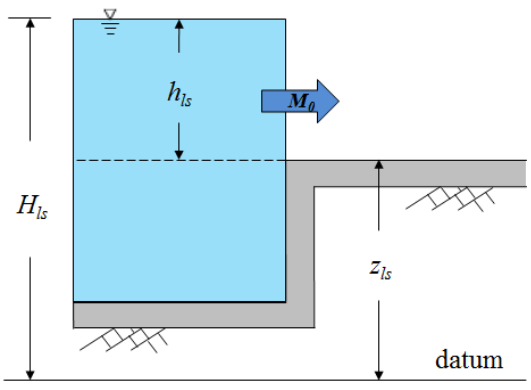


Figure 10 월류식을 이용하는 경우 (Lee, 2013)

4.1.2 일반 곡선좌표계를 이용한 기법

데카르트 좌표계에서 이용되는 격자의 형태는 직사각형이기 때문에 시가지의 도로와 그 이외의 영역을 실제 형상과 유사하게 표현하기 위해서는 상당히 세밀한 격자의 분할이 필요하다. 따라서 만곡부를 비롯한 개수로에서의 수치해석(高橋保 등, 1989; 井上和自 등, 1996) 등에 의해 이용된 일반 곡선 좌표계를 이용하면, 주요 도로를 타고 좌표축을 생성할 수 있기 때문에 도로와 그 이외의 부분에 있어서 정밀한 격자를 구현하지 않아도 어느 정도 실제와 유사한 묘사가 가능하다. 본 연구에서 소개되는 일반 곡선 좌표계 모델은 Figure 11에서와 같이 물리평면(x,y)계에서 계산평면(η)계에 변수변환을 수행함으로써 다음의 식 (3.23~3.25)처럼 표현된다(高棹琢馬 등, 1995).

〈연속방정식〉

$$\frac{\partial h}{\partial t}+J\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{M^{\xi}}{J}\right)+J\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{M^{x}}{J}\right)=0 \tag{3.23}$$

〈운동량방정식〉

(ξ 방향)

$$\begin{aligned}\frac{\partial M^{\xi}}{\partial t} = & -J^2 y_{\eta}\left\{\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{u^{\xi}M^{x}}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{u^{\eta}M^{x}}{J}\right)\right\} \\ & +J^2 x_{\eta}\left\{\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{u^{\xi}M^{y}}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{u^{\eta}M^{y}}{J}\right)\right\} \\ & -J^2 gh\left\{(x_{\eta}^2+y_{\eta}^2)\frac{\partial H}{\partial \xi}-(x_{\xi}x_{\eta}+y_{\xi}y_{\eta})\frac{\partial H}{\partial \eta}\right\} \\ & -gn^2 M^{\xi}\frac{\sqrt{(M^{x})^2+(M^{y})^2}}{h^{7/3}}\end{aligned} \tag{3.24}$$

(η 방향)

$$\begin{aligned}\frac{\partial M^{\eta}}{\partial t} = & -J^2 y_{\xi}\left\{\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{u^{\xi}M^{x}}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{u^{\eta}M^{x}}{J}\right)\right\} \\ & +J^2 x_{\xi}\left\{\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{u^{\xi}M^{y}}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{u^{\eta}M^{y}}{J}\right)\right\} \\ & -J^2 gh\left\{-(x_{\xi}x_{\eta}+y_{\xi}y_{\eta})\frac{\partial H}{\partial \xi}+(x_{\xi}^2+y_{\xi}^2)\frac{\partial H}{\partial \eta}\right\} \\ & -gn^2 M^{\eta}\frac{\sqrt{(M^{x})^2+(M^{y})^2}}{h^{7/3}}\end{aligned} \tag{3.25}$$

여기서, J는 자코비앙이며, 다음의 식 (3.26)로 정의된다.

$$J = \frac{1}{x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi} \tag{3.26}$$

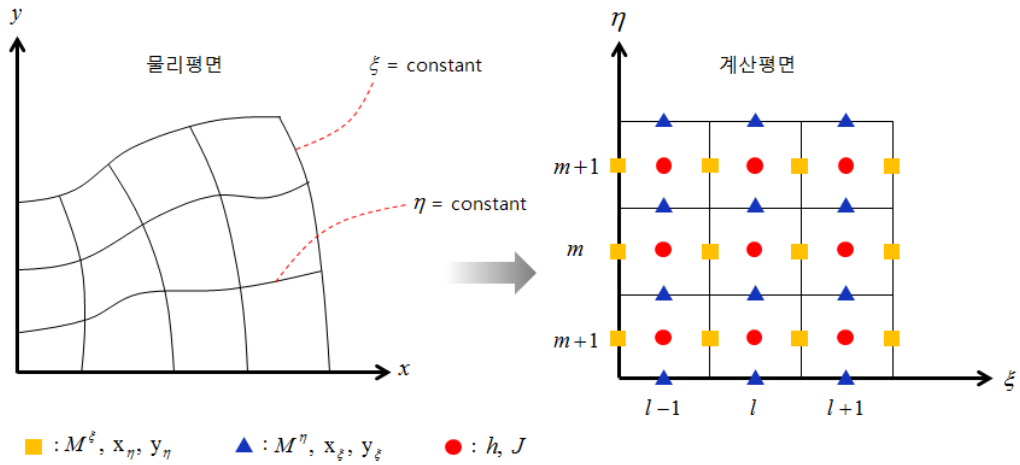


Figure 11 미지량의 정의 위치 (일반곡선좌표계 모델)

또한 위 식에서 상부 첨자는 변수의 방향의 속도 및 유량 플럭스를 표시하며, 아래 첨자는 이 변수에 의한 편미분을 나타낸다. 일반곡선 좌표계 모델의 경우, 데카르트 좌표계 모델과 마찬가지로 Leap-Frog기법으로 계산을 수행하며 미지량은 staggered 격자 위에 배치한다. 이산화 방법 역시 데카르트 좌표계 모델과 마찬가지며, 아래에 표시된 식을 이용하여 차분화 하고 이래첨자 (l,m)은 차분격자의 번호를 나타낸다.

〈연속방정식의 차분화〉

$$\frac{h_{(l,m)}^{n+3} - h_{(l,m)}^{n+1}}{2\Delta t} + J_{(l,m)} \frac{\frac{M_{(l+1/2,m)}^{\xi,n+2}}{J_{(l+1/2,m)}} - \frac{M_{(l-1/2,m)}^{\xi,n+2}}{J_{(l-1/2,m)}}}{\Delta\xi} + J(l,m) \frac{\frac{M_{(l,m+1/2)}^{\eta,n+2}}{J_{(l,m+1/2)}} - \frac{M_{(l,m-1/2)}^{\eta,n+2}}{J_{(l,m-1/2)}}}{\Delta\eta} = 0 \tag{3.27}$$

여기서,

$$J_{(l+1/2,m)} = \frac{J_{(l,m)} + J_{(l+1,m)}}{2} \tag{3.28}$$

$$J_{(l-1/2,m)} = \frac{J_{(l,m)} + J_{(l-1,m)}}{2} \tag{3.29}$$

$$J_{(l,m+1/2)} = \frac{J_{(l,m)} + J_{(l,m+1)}}{2} \tag{3.30}$$

$$J_{(l,m-1/2)} = \frac{J_{(l,m)} + J_{(l,m-1)}}{2} \tag{3.31}$$

로 표시한다.

〈ξ방향 운동량방정식의 차분화〉

$$\frac{M^{\xi,n+2}_{(l-1/2,m)} - M^{\xi,n}_{(l-1/2,m)}}{2\Delta t}$$

$$= -J^2_{(l-1/2,m)}\, y_{\eta(l-1/2,m)} \cdot$$

$$\left\{ \frac{u^{\xi,n}_{(l,m)} \left(\frac{M^{x,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}} + \frac{M^{x,n}_{(l+1/2,m)}}{J_{(l+1/2,m)}} \right) + \left| u^{\xi,n}_{(l,m)} \right| \left(\frac{M^{x,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}} - \frac{M^{x,n}_{(l+1/2,m)}}{J_{(l+1/2,m)}} \right) \right)}{2\Delta\xi}$$

$$- \frac{u^{\xi,n}_{(l-1,m)} \left(\frac{M^{x,n}_{(l-3/2,m)}}{J_{(l-3/2,m)}} + \frac{M^{x,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}} \right) + \left| u^{\xi,n}_{(l-1,m)} \right| \left(\frac{M^{x,n}_{(l-3/2,m)}}{J_{(l-3/2,m)}} - \frac{M^{x,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}} \right)}{2\Delta\xi}$$

$$+ \frac{u^{\eta,n}_{(l-1/2,m+1/2)} \left(\frac{M^{x,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}} + \frac{M^{x,n}_{(l-1/2,m+1)}}{J_{(l-1/2,m+1)}} \right) + \left| u^{\eta,n}_{(l-1/2,m+1/2)} \right| \left(\frac{M^{x,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}} - \frac{M^{x,n}_{(l-1/2,m+1)}}{J_{(l-1/2,m+1)}} \right)}{2\Delta\eta}$$

$$- \frac{u^{\eta,n}_{(l-1/2,m-1/2)} \left(\frac{M^{x,n}_{(l-1/2,m-1)}}{J_{(l-1/2,m-1)}} + \frac{M^{x,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}} \right) + \left| u^{\eta,n}_{(l-1/2,m-1/2)} \right| \left(\frac{M^{x,n}_{(l-1/2,m-1)}}{J_{(l-1/2,m-1)}} - \frac{M^{x,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}} \right)}{2\Delta\eta} \Bigg\}$$

$$+ J^2_{(l-1/2,m)}\, x_{\eta(l-1/2,m)} \cdot$$

$$\left\{ \frac{u^{\xi,n}_{(l,m)} \left(\frac{m^{y,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}} + \frac{m^{y,n}_{(l+1/2,m)}}{J_{(l+1/2,m)}} \right) + \left| u^{\xi,n}_{(l,m)} \right| \left(\frac{m^{y,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}} - \frac{m^{y,n}_{(l+1/2,m)}}{J_{(l+1/2,m)}} \right)}{2\Delta\xi} \right.$$

$$
- \frac{u^{\xi,n}_{(l-1,m)}\left(\frac{M^{y,n}_{(l-3/2,m)}}{J_{(l-3/2,m)}}+\frac{M^{y,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}}\right)+\left|u^{\xi,n}_{(l-1,m)}\right|\left(\frac{M^{y,n}_{(l-3/2,m)}}{J_{(l-3/2,m)}}-\frac{M^{y,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}}\right)}{2\Delta\xi}
$$

$$
+ \frac{u^{\eta,n}_{(l-1/2,m+1/2)}\left(\frac{M^{y,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}}+\frac{M^{y,n}_{(l-1/2,m+1)}}{J_{(l-1/2,m+1)}}\right)+\left|u^{\eta,n}_{(l-1/2,m+1/2)}\right|\left(\frac{M^{y,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}}-\frac{M^{y,n}_{(l-1/2,m+1)}}{J_{(l-1/2,m+1)}}\right)}{2\Delta\eta}
$$

$$
- \frac{u^{\eta,n}_{(l-1/2,m-1/2)}\left(\frac{M^{y,n}_{(l-1/2,m-1)}}{J_{(l-1/2,m-1)}}+\frac{M^{y,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}}\right)+\left|u^{\eta,n}_{(l-1/2,m-1/2)}\right|\left(\frac{M^{y,n}_{(l-1/2,m-1)}}{J_{(l-1/2,m-1)}}-\frac{M^{y,n}_{(l-1/2,m)}}{J_{(l-1/2,m)}}\right)}{2\Delta\eta}\Bigg\}
$$

$$
- J^2_{(l-1/2,m)}\, g \frac{h^{n+1}_{(l,m)}+h^{n+1}_{(l-1,m)}}{2}\cdot
$$

$$
\Bigg\{(x^2_{\eta(l-1/2,m)}+y^2_{\eta(l-1/2,m)})\frac{\left(h^{n+1}_{(l,m)}+z_{(l,m)}\right)-\left(h^{n+1}_{(l-1,m)}+z_{(l-1,m)}\right)}{\Delta\xi}
$$

$$
-\left(x_{\xi(l-1/2,m)}x_{\eta(l-1/2,m)}+y_{\xi(l-1/2,m)}y_{\eta(l-1/2,m)}\right)\cdot
$$

$$
\frac{\left(h^{n+1}_{(l-1/2,m+1/2)}+z_{(l-1/2,m+1/2)}\right)-\left(h^{n+1}_{(l-1/2,m-1/2)}+z_{(l-1/2,m-1/2)}\right)}{\Delta\eta}\Bigg\}
$$

$$
- \frac{g\left(\frac{n_{(l,m)}+n_{(l-1,m)}}{2}\right)^2 \frac{M^{\xi,n+2}_{(l-1/2,m)}+M^{\xi,n}_{(l-1/2,m)}}{2}\sqrt{\left(M^{x,n}_{(l-1/2,m)}\right)^2+\left(M^{y,n}_{(l-1/2,m)}\right)^2}}{\left(\frac{h^{n+1}_{(l,m)}+h^{n+1}_{(l-1,m)}}{2}\right)^{7/3}} \quad (3.32)
$$

여기서,

〈자코비앙의 보간〉

$$
J_{(l-3/2,m)} = \frac{J_{(l-1,m)}+J_{(l-2,m)}}{2} \quad (3.33)
$$

$$
J_{(l-1/2,m-1)} = \frac{J_{(l,m-1)}+J_{(l-1,m-1)}}{2} \quad (3.34)
$$

$$
J_{(l-1/2,m+1)} = \frac{J_{(l,m+1)}+J_{(l-1,m+1)}}{2} \quad (3.35)
$$

〈유속의 보간〉

$$u_{l,m}^{\xi,n} = \frac{u_{l+1/2,m}^{\xi,n} + u_{l-1/2,m}^{\xi,n}}{2} = \frac{\dfrac{2M_{l+1/2,m}^{\xi,n}}{h_{l,m}^{n+1} + h_{l+1,m}^{n+1}} + \dfrac{2M_{l-1/2,m}^{\xi,n}}{h_{l-1,m}^{n+1} + h_{l,m}^{n+1}}}{2} \tag{3.36}$$

$$u_{l-1,m}^{\xi,n} = \frac{u_{l-1/2,m}^{\xi,n} + u_{l-3/2,m}^{\xi,n}}{2} = \frac{\dfrac{2M_{l-1/2,m}^{\xi,n}}{h_{l-1,m}^{n+1} + h_{l,m}^{n+1}} + \dfrac{2M_{l-3/2,m}^{\xi,n}}{h_{l-2,m}^{n+1} + h_{l-1,m}^{n+1}}}{2} \tag{3.37}$$

$$u_{l-1/2,m+1/2}^{\eta,n} = \frac{u_{l,m+1/2}^{\eta,n} + u_{l-1,m+1/2}^{\eta,n}}{2} = \frac{\dfrac{2M_{l,m+1/2}^{\eta,n}}{h_{l,m}^{n+1} + h_{l,m+1}^{n+1}} + \dfrac{2M_{l-1,m+1/2}^{\eta,n}}{h_{l-1,m}^{n+1} + h_{l-1,m+1}^{n+1}}}{2} \tag{3.38}$$

$$u_{l-1/2,m-1/2}^{\eta,n} = \frac{u_{l,m-1/2}^{\eta,n} + u_{l-1,m-1/2}^{\eta,n}}{2} = \frac{\dfrac{2M_{l,m-1/2}^{\eta,n}}{h_{l,m}^{n+1} + h_{l,m-1}^{n+1}} + \dfrac{2M_{l-1,m+1/2}^{\eta,n}}{h_{l-1,m-1}^{n+1} + h_{l-1,m+1}^{n+1}}}{2} \tag{3.39}$$

〈유량플럭스의 보간〉

$$M_{(l-1/2,m)}^{x,n} = x_{\xi(l-1/2,m)} M_{(l-1/2,m)}^{\xi,n} + x_{\eta(l-1/2,m)} M_{(l-1/2,m)}^{\eta,n} \tag{3.40}$$

$$M_{(l+1/2,m)}^{x,n} = x_{\xi(l+1/2,m)} M_{(l+1/2,m)}^{\xi,n} + x_{\eta(l+1/2,m)} M_{(l+1/2,m)}^{\eta,n} \tag{3.41}$$

$$M_{(l-3/2,m)}^{x,n} = x_{\xi(l-3/2,m)} M_{(l-3/2,m)}^{\xi,n} + x_{\eta(l-3/2,m)} M_{(l-3/2,m)}^{\eta,n} \tag{3.42}$$

$$M_{(l-1/2,m+1)}^{x,n} = x_{\xi(l-1/2,m+1)} M_{(l-1/2,m+1)}^{\xi,n} + x_{\eta(l-1/2,m+1)} M_{(l-1/2,m+1)}^{\eta,n} \tag{3.43}$$

$$M_{(l-1/2,m-1)}^{x,n} = x_{\xi(l-1/2,m-1)} M_{(l-1/2,m-1)}^{\xi,n} + x_{\eta(l-1/2,m-1)} M_{(l-1/2,m-1)}^{\eta,n} \tag{3.44}$$

$$M_{(l-1/2,m)}^{y,n} = y_{\xi(l-1/2,m)} M_{(l-1/2,m)}^{\xi,n} + y_{\eta(l-1/2,m)} M_{(l-1/2,m)}^{\eta,n} \tag{3.45}$$

$$M_{(l+1/2,m)}^{y,n} = y_{\xi(l+1/2,m)} M_{(l+1/2,m)}^{\xi,n} + y_{\eta(l+1/2,m)} M_{(l+1/2,m)}^{\eta,n} \tag{3.46}$$

$$M_{(l-3/2,m)}^{y,n} = y_{\xi(l-3/2,m)} M_{(l-3/2,m)}^{\xi,n} + y_{\eta(l-3/2,m)} M_{(l-3/2,m)}^{\eta,n} \tag{3.47}$$

$$M_{(l-1/2,m+1)}^{y,n} = y_{\xi(l-1/2,m+1)} M_{(l-1/2,m+1)}^{\xi,n} + y_{\eta(l-1/2,m+1)} M_{(l-1/2,m+1)}^{\eta,n} \tag{3.48}$$

$$M_{(l-1/2,m-1)}^{y,n} = y_{\xi(l-1/2,m-1)} M_{(l-1/2,m-1)}^{\xi,n} + y_{\eta(l-1/2,m-1)} M_{(l-1/2,m-1)}^{\eta,n} \tag{3.49}$$

또한,

$$M^{\eta,n}_{(l-1/2,m)} = \frac{M^{\eta,n}_{(l-1,m-1/2)} + M^{\eta,n}_{(l,m-1/2)} + M^{\eta,n}_{(l,m+1/2)} + M^{\eta,n}_{(l-1,m+1/2)}}{4} \tag{3.50}$$

$$M^{\eta,n}_{(l+1/2,m)} = \frac{M^{\eta,n}_{(l,m-1/2)} + M^{\eta,n}_{(l+1,m-1/2)} + M^{\eta,n}_{(l+1,m+1/2)} + M^{\eta,n}_{(l,m+1/2)}}{4} \tag{3.51}$$

$$M^{\eta,n}_{(l-3/2,m)} = \frac{M^{\eta,n}_{(l-2,m-1/2)} + M^{\eta,n}_{(l-1,m-1/2)} + M^{\eta,n}_{(l-1,m+1/2)} + M^{\eta,n}_{(l-2,m+1/2)}}{4} \tag{3.52}$$

$$M^{\eta,n}_{(l-1/2,m+1)} = \frac{M^{\eta,n}_{(l-1,m+1/2)} + M^{\eta,n}_{(l,m+1/2)} + M^{\eta,n}_{(l,m+3/2)} + M^{\eta,n}_{(l-1,m+3/2)}}{4} \tag{3.53}$$

$$M^{\eta,n}_{(l-1/2,m-1)} = \frac{M^{\eta,n}_{(l-1,m-3/2)} + M^{\eta,n}_{(l,m-3/2)} + M^{\eta,n}_{(l,m-1/2)} + M^{\eta,n}_{(l-1,m-1/2)}}{4} \tag{3.54}$$

로 한다. x_ξ, y_ξ에 대해서는, 위쪽의 $M^{\eta,n}$을 각각 x_ξ, y_ξ로 교환한 식으로 보간한다.

〈수심의 보간〉

수심은 다음의 식을 이용하여 보간한다.

$$h^{n+1}_{(l-1/2,m+1/2)} = \frac{h^{n+1}_{(l-1,m)} + h^{n+1}_{(l-1,m+1)} + h^{n+1}_{(l,m+1)} + h^{n+1}_{(l,m)}}{4} \tag{3.55}$$

$$h^{n+1}_{(l-1/2,m-1/2)} = \frac{h^{n+1}_{(l-1,m-1)} + h^{n+1}_{(l-1,m)} + h^{n+1}_{(l,m)} + h^{n+1}_{(l,m-1)}}{4} \tag{3.56}$$

〈η방향 운동량방정식의 차분화〉

$$\frac{M^{\eta,n+2}_{(l,m-1/2)} - M^{\eta,n}_{(l,m-1/2)}}{2\Delta t}$$

$$= -J^2_{(l,m-1/2)}\, y_{\xi(l,m-1/2)} \cdot$$

$$\left\{ u^{\xi,n}_{(l+1/2,m-1/2)} \left(\frac{M^{x,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}} + \frac{M^{x,n}_{(l+1,m-1/2)}}{J_{(l+1,m-1/2)}} \right) + \left| u^{\xi,n}_{(l+1/2,m-1/2)} \right| \left(\frac{M^{x,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}} - \frac{M^{x,n}_{(l+1,m-1/2)}}{J_{(l+1,m-1/2)}} \right) \right\}$$

$$- \frac{u^{\xi,n}_{(l-1/2,m-1/2)} \left(\frac{M^{x,n}_{(l-1,m-1/2)}}{J_{(l-1,m-1/2)}} + \frac{M^{x,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}} \right) + \left| u^{\xi,n}_{(l-1/2,m-1/2)} \right| \left(\frac{M^{x,n}_{(l-1,m-1/2)}}{J_{(l-1,m-1/2)}} - \frac{M^{x,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}} \right)}{2\Delta\xi}$$

$$+\frac{u^{\eta,n}_{(l,m)}\left(\frac{M^{x,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}}+\frac{M^{x,n}_{(l,m+1/2)}}{J_{(l,m+1/2)}}\right)+\left|u^{\eta,n}_{(l,m)}\right|\left(\frac{M^{x,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}}-\frac{M^{x,n}_{(l,m+1/2)}}{J_{(l,m+1/2)}}\right)}{2\Delta\eta}$$

$$-\frac{u^{\eta,n}_{(l,m-1)}\left(\frac{M^{x,n}_{(l,m-3/2)}}{J_{(l,m-3/2)}}+\frac{M^{x,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}}\right)+\left|u^{\eta,n}_{(l,m-1)}\right|\left(\frac{M^{x,n}_{(l,m-3/2)}}{J_{(l,m-3/2)}}-\frac{M^{x,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}}\right)}{2\Delta\eta}\Bigg\}$$

$$+J^2_{(l,m-1/2)}\,x_{\xi(l,m-1/2)}\cdot$$

$$\Bigg\{\frac{u^{\xi,n}_{(l+1/2,m-1/2)}\left(\frac{M^{y,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}}+\frac{M^{y,n}_{(l+1,m-1/2)}}{J_{(l+1,m-1/2)}}\right)+\left|u^{\xi,n}_{(l+1/2,m-1/2)}\right|\left(\frac{M^{y,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}}-\frac{M^{y,n}_{(l+1,m-1/2)}}{J_{(l+1,m-1/2)}}\right)}{2\Delta\xi}$$

$$-\frac{u^{\xi,n}_{(l-1/2,m-1/2)}\left(\frac{M^{y,n}_{(l-1,m-1/2)}}{J_{(l-1,m-1/2)}}+\frac{M^{y,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}}\right)+\left|u^{\xi,n}_{(l-1/2,m-1/2)}\right|\left(\frac{M^{y,n}_{(l-1,m-1/2)}}{J_{(l-1,m-1/2)}}-\frac{M^{y,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}}\right)}{2\Delta\xi}$$

$$+\frac{u^{\eta,n}_{(l,m)}\left(\frac{M^{y,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}}+\frac{M^{y,n}_{(l,m+1/2)}}{J_{(l,m+1/2)}}\right)+\left|u^{\eta,n}_{(l,m)}\right|\left(\frac{M^{y,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}}-\frac{M^{y,n}_{(l,m+1/2)}}{J_{(l,m+1/2)}}\right)}{2\Delta\eta}$$

$$-\frac{u^{\eta,n}_{(l,m-1)}\left(\frac{M^{y,n}_{(l,m-3/2)}}{J_{(l,m-3/2)}}+\frac{M^{y,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}}\right)+\left|u^{\eta,n}_{(l,m-1)}\right|\left(\frac{M^{y,n}_{(l,m-3/2)}}{J_{(l,m-3/2)}}-\frac{M^{y,n}_{(l,m-1/2)}}{J_{(l,m-1/2)}}\right)}{2\Delta\eta}\Bigg\}$$

$$-J^2_{(l,m-1/2)}\,g\frac{h^{n+1}_{(l,m)}+h^{n+1}_{(l,m-1)}}{2}\cdot$$

$$\Bigg\{(x^2_{\xi(l,m-1/2)}+y^2_{\eta(l,m-1/2)})\frac{\left(h^{n+1}_{(l,m)}+z_{(l,m)}\right)-\left(h^{n+1}_{(l,m-1)}+z_{(l,m-1)}\right)}{\Delta\xi}$$

$$-\left(x_{\xi(l,m-1/2)}x_{\eta(l,m-1/2)}+y_{\xi(l,m-1/2)}y_{\eta(l,m-1/2)}\right)\cdot$$

$$\frac{\left(h^{n+1}_{(l+1/2,m-1/2)}+z_{(l+1/2,m-1/2)}\right)-\left(h^{n+1}_{(l-1/2,m-1/2)}+z_{(l-1/2,m-1/2)}\right)}{\Delta\xi}\Bigg\}$$

$$-\frac{g\left(\frac{n_{(l,m)}+n_{(l,m-1)}}{2}\right)^2\frac{M^{\eta,n+2}_{(l,m-1/2)}+M^{\eta,n}_{(l,m-1/2)}}{2}\sqrt{\left(M^{x,n}_{(l,m-1/2)}\right)^2+\left(M^{y,n}_{(l,m-1/2)}\right)^2}}{\left(\frac{h^{n+1}_{(l,m)}+h^{n+1}_{(l,m-1)}}{2}\right)^{7/3}} \quad (3.57)$$

여기서,

〈자코비앙의 보간〉

$$J_{(l+1,m-1)} = \frac{J_{(l+1,m)} + J_{(l-1,m-1)}}{2} \tag{3.58}$$

$$J_{(l-1,m-1/2)} = \frac{J_{(l-1,m)} + J_{(l-1,m-1)}}{2} \tag{3.59}$$

$$J_{(l,m-3/2)} = \frac{J_{(l,m-1)} + J_{(l,m-2)}}{2} \tag{3.60}$$

〈유속의 보간〉

$$u^{\xi,n}_{l+1/2,m-1/2} = \frac{u^{\xi,n}_{l+1/2,m} + u^{\xi,n}_{l+1/2,m-1}}{2} = \frac{\dfrac{2M^{\xi,n}_{l+1/2,m}}{h^{n+1}_{l,m} + h^{n+1}_{l+1,m}} + \dfrac{2M^{\xi,n}_{l+1/2,m-1}}{h^{n+1}_{l,m-1} + h^{n+1}_{l+1,m-1}}}{2} \tag{3.61}$$

$$u^{\xi,n}_{l-1/2,m-1/2} = \frac{u^{\xi,n}_{l-1/2,m} + u^{\xi,n}_{l-1/2,m-1}}{2} = \frac{\dfrac{2M^{\xi,n}_{l-1/2,m}}{h^{n+1}_{l-1,m} + h^{n+1}_{l,m}} + \dfrac{2M^{\xi,n}_{l-1/2,m-1}}{h^{n+1}_{l,m-1} + h^{n+1}_{l-1,m-1}}}{2} \tag{3.62}$$

$$u^{\eta,n}_{l,m} = \frac{u^{\eta,n}_{l,m-1/2} + u^{\eta,n}_{l,m+1/2}}{2} = \frac{\dfrac{2M^{\eta,n}_{l,m-1/2}}{h^{n+1}_{l,m} + h^{n+1}_{l,m-1}} + \dfrac{2M^{\eta,n}_{l,m+1/2}}{h^{n+1}_{l,m} + h^{n+1}_{l,m+1}}}{2} \tag{3.63}$$

$$u^{\eta,n}_{l,m-1} = \frac{u^{\eta,n}_{l,m-1/2} + u^{\eta,n}_{l,m-3/2}}{2} = \frac{\dfrac{2M^{\eta,n}_{l,m-1/2}}{h^{n+1}_{l,m} + h^{n+1}_{l,m-1}} + \dfrac{2M^{\eta,n}_{l,m-3/2}}{h^{n+1}_{l,m-1} + h^{n+1}_{l,m-2}}}{2} \tag{3.64}$$

〈유량플럭스의 보간〉

$$M^{x,n}_{(l,m-1/2)} = x_{\xi(l,m-1/2)} M^{\xi,n}_{(l,m-1/2)} + x_{\eta(l,m-1/2)} M^{\eta,n}_{(l,m-1/2)} \tag{3.65}$$

$$M^{x,n}_{(l+1,m-1/2)} = x_{\xi(l+1,m-1/2)} M^{\xi,n}_{(l+1,m-1/2)} + x_{\eta(l+1,m-1/2)} M^{\eta,n}_{(l+1,m-1/2)} \tag{3.66}$$

$$M^{x,n}_{(l-1,m-1/2)} = x_{\xi(l-1,m-1/2)} M^{\xi,n}_{(l-1,m-1/2)} + x_{\eta(l-1,m-1/2)} M^{\eta,n}_{(l-1,m-1/2)} \tag{3.67}$$

$$M^{x,n}_{(l,m+1/2)} = x_{\xi(l,m+1/2)} M^{\xi,n}_{(l,m+1/2)} + x_{\eta(l,m+1/2)} M^{\eta,n}_{(l,m+1/2)} \tag{3.68}$$

$$M^{x,n}_{(l,m-3/2)} = x_{\xi(l,m-3/2)} M^{\xi,n}_{(l,m-3/2)} + x_{\eta(l,m-3/2)} M^{\eta,n}_{(l,m-3/2)} \tag{3.69}$$

$$M^{y,n}_{(l,m-1/2)} = y_{\xi(l,m-1/2)} M^{\xi,n}_{(l,m-1/2)} + y_{\eta(l,m-1/2)} M^{\eta,n}_{(l,m-1/2)} \tag{3.70}$$

$$M^{y,n}_{(l+1,m-1/2)} = y_{\xi(l+1,m-1/2)} M^{\xi,n}_{(l+1,m-1/2)} + y_{\eta(l+1,m-1/2)} M^{\eta,n}_{(l+1,m-1/2)} \tag{3.71}$$

$$M^{y,n}_{(l-1,m-1/2)} = y_{\xi(l-1,m-1/2)} M^{\xi,n}_{(l-1,m-1/2)} + y_{\eta(l-1,m-1/2)} M^{\eta,n}_{(l-1,m-1/2)} \tag{3.72}$$

$$M^{y,n}_{(l,m+1/2)} = y_{\xi(l,m+1/2)} M^{\xi,n}_{(l,m+1/2)} + y_{\eta(l,m+1/2)} M^{\eta,n}_{(l,m+1/2)} \tag{3.73}$$

$$M^{y,n}_{(l,m-3/2)} = y_{\xi(l,m-3/2)} M^{\xi,n}_{(l,m-3/2)} + y_{\eta(l,m-3/2)} M^{\eta,n}_{(l,m-3/2)} \tag{3.74}$$

또한,

$$M^{\xi,n}_{(l,m-1/2)} = \frac{M^{\xi,n}_{(l-1/2,m-1)} + M^{\xi,n}_{(l+1/2,m-)} + M^{\xi,n}_{(l+1/2,m)} + M^{\xi,n}_{(l-1,m)}}{4} \tag{3.75}$$

$$M^{\xi,n}_{(l+1,m-1/2)} = \frac{M^{\xi,n}_{(l+1/2,m-1)} + M^{\xi,n}_{(l+3/2,m-1)} + M^{\xi,n}_{(l+3/2,m)} + M^{\xi,n}_{(l+1/2,m)}}{4} \tag{3.76}$$

$$M^{\xi,n}_{(l-1,m-1/2)} = \frac{M^{\xi,n}_{(l-2/3,m-1)} + M^{\xi,n}_{(l-1/2,m-1)} + M^{\xi,n}_{(l-1/2,m)} + M^{\xi,n}_{(l-2/3,m)}}{4} \tag{3.77}$$

$$M^{\xi,n}_{(l,m+1/2)} = \frac{M^{\xi,n}_{(l-1/2,m)} + M^{\xi,n}_{(l+1/2,m)} + M^{\xi,n}_{(l+1/2,m+1)} + M^{\xi,n}_{(l-1/2,m+1)}}{4} \tag{3.78}$$

$$M^{\xi,n}_{(l,m-3/2)} = \frac{M^{\xi,n}_{(l-1/2,m-2)} + M^{\xi,n}_{(l+1/2,m-2)} + M^{\xi,n}_{(l+1/2,m-1)} + M^{\xi,n}_{(l-1/2,m-1)}}{4} \tag{3.79}$$

로 한다. x_η, y_η에 대해서는, 위쪽의 $M^{\xi,n}$을 각각 x_η, y_η로 교환한 식으로 보간한다.

〈수심의 보간〉

수심은 다음의 식을 이용하여 보간한다.

$$h^{n+1}_{(l-1/2,m+1/2)} = \frac{h^{n+1}_{(l-1,m)} + h^{n+1}_{(l-1,m+1)} + h^{n+1}_{(l,m+1)} + h^{n+1}_{(l,m)}}{4} \tag{3.80}$$

$$h_{(l-1/2,m-1/2)}^{n+1} = \frac{h_{(l-1,m-1)}^{n+1} + h_{(l-1,m)}^{n+1} + h_{(l,m)}^{n+1} + h_{(l,m-1)}^{n+1}}{4} \tag{3.81}$$

인접한 격자의 수면이 불연속이 되는 경우에는 상기의 운동량방정식의 기본 가정에 어긋나므로 수치진동이 발생할 수 있다. 따라서, 인접한 격자의 수면이 불연속이 되는 경우에는 낙차식과 월류식을 이용하여 유량 플럭스를 계산한우 다음 식을 이용하여 물리평면상의 플럭스로 치환한다.

$$M^{\xi} = \frac{M_o}{\sqrt{x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2}} \tag{3.82}$$

$$M^{\eta} = M_o \sqrt{x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2} \tag{3.83}$$

4.1.3 다각형 격자를 이용한 기법

일반 곡선 좌표 모델에서의 해석 격자는 반드시 직사각형일 필요는 없다. 왜냐하면 도로의 형상이 물리 평면(x, y)와 평형을 이루지 않는 경우에는 도로를 따라 좌표계를 회전시킨 후 격자를 형성할 수 있기 때문이다. 그러나 독립적인 좌표축은 원래 2개에 한정되어 있기 때문에, 고려할 수 있는 도로의 개수에는 자연적으로 한계가 생긴다. 또한 도시유역에 불규칙하게 분포되어 있는 건물과 주차장, 공터와 같은 인공 구조물들을 복합적으로 고려하기에도 적절하지 못한 경우가 발생한다. 따라서 계산 영역을 임의의 형상으로 분할한 비구조 격자를 적용해야 할 필요가 발생하며 본 장에서는 비구조적 격자를 활용한 침수해석 모형의 기법에 대해서 알아본다.

본 연구에서는 일단 영역을 다각형의 비구조 격자(형상 및 배열에 한계성을 갖지 않는 해석 격자)로 분할하다. 다음에 모든 영역에 대해서 직교(데카르트)좌표 축(x, y 축)을 설정하고, Figure 12와 같이 이 좌표계의 각 방향의 유량 플럭스(M, N), 및 속도(u, v)를 비구조 격자의 경계(다각형의 변의 중점)에서, 수심(h)을 비구조 격자의 도심(다각형의 중심)에서 정의하고 Leap-Frog법을 이용하여 계산을 진행한다. 비구조 격자 모델을 이용한 범람 해석에 이용되는 기초식은 데카르트 좌표계를 이용한 침수해석과 동일하게 식(3.1)과 식(3.2)의 2차원 연속방정식과 운동량방정식이다. 또한, 범람수가 불연속이 되어 있는 경우에는 식(3.21), (3.22)를 이용하여 유량 플럭스를 계산한다.

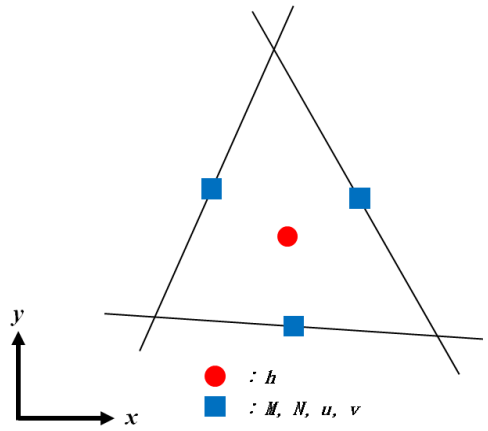


Figure 12 미지량의 정의 위치

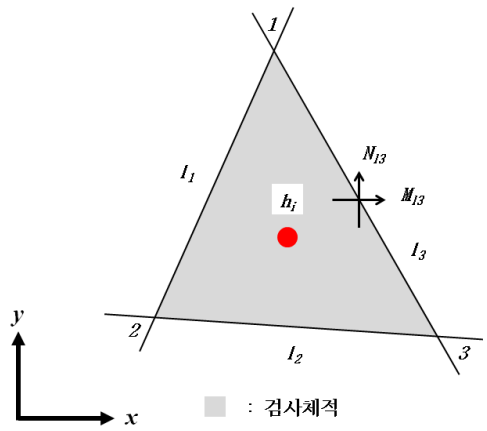


Figure 13 연속식의 검사체적

〈연속식의 차분화〉

연속식은, Figure 13에 표시되어 있는 검사체적에 대해서 계산하며, 다음 식(3.84)와 같이 차분화된다.

$$\frac{h_i^{n+3}+h_i^{n+1}}{2\Delta t}+\frac{1}{A_i}\sum_{l=1}^{m_i}\left\{M_l^{n+2}(\Delta y)_l-N_l^{n+2}(\Delta x)_l\right\}=0 \tag{3.84}$$

여기서, h_i는 격자 i의 수심, m_i는 격자 i를 둘러싼 변의 수, A_i는 검사체적이며 i번째 격자의 면적을 의미한다. M_l, N_l은 각각 격자 i를 이루고 있는 변 l위의 x, y방향의 유량플럭스를 표시한다. $(\Delta x)_l$, $(\Delta y)_l$는 변 l의 양 끝단의 점 x, y 좌표의 차를 나타낸다. 예를 들어 Figure 13의 정점 1, 2, 3의 x, y 좌표를 각각 $(x_1,\ y_1)$, $(x_2,\ y_2)$, $(x_3,\ y_3)$라고 하면,

$$(\Delta x)_{l1}=x_2-x_1 \tag{3.85}$$

$$(\Delta y)_{l1}=y_2-y_1 \tag{3.86}$$

$$(\Delta x)_{l2}=x_3-x_2 \tag{3.87}$$

$$(\Delta y)_{l2}=y_3-y_2 \tag{3.88}$$

$$(\Delta x)_{l3} = x_1 - x_3 \tag{3.89}$$

$$(\Delta y)_{l3} = y_1 - y_3 \tag{3.90}$$

으로 표현된다.

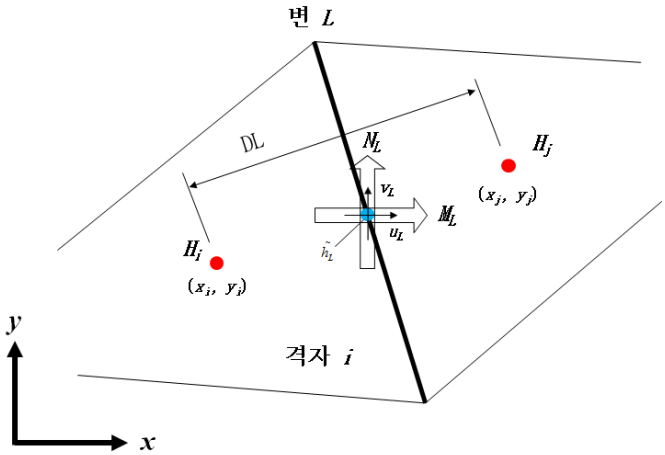


Figure 14 운동량 방정식의 계산

〈운동량 방정식의 차분화〉

운동량 방정식은, 격자의 각 변 위에서 계산된다. 예를 들어 격자 i, j에 낀 격자의 변 L의 계산은 Figure 14에 표시된 값을 이용하여 식 (3.2), (3.3)을 차분화한다.

〈x방향 차분식〉

$$\frac{M_L^{n+2} - M_L^n}{2\Delta t} + M1 + M2 = -g\tilde{h}_L^{n+1}(\nabla H)_x - g\tilde{n}_L^2 \frac{M_L^{n+2} + M_L^n}{2} \frac{\sqrt{(u_L^n)^2 + (v_L^n)^2}}{(\tilde{h}_L^{n+1})^{4/3}} \tag{3.91}$$

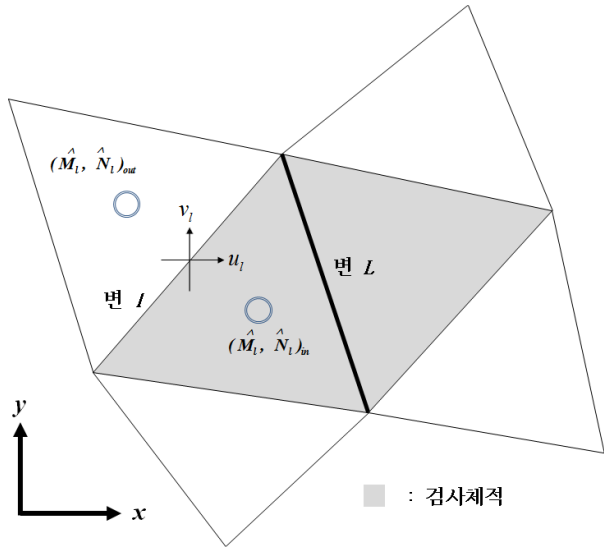


Figure 15 이류항의 계산

〈y방향 차분식〉

$$\frac{N_L^{n+2}-N_L^n}{2\Delta t}+N1+N2=-g\tilde{h}_L^{n+1}(\nabla H)_y-g\tilde{n}_L^2\frac{N_L^{n+2}+N_L^n}{2}\frac{\sqrt{(u_L^n)^2+(v_L^n)^2}}{(\tilde{h}_L^{n+1})^{4/3}} \qquad (3.92)$$

여기서, M_L, N_L은 격자의 변 L위의 x와 y방향의 유량 플럭스, u_L, v_L은 격자 변 L위에서의 x와 y방향의 유속이다.

$M1$, $M2$는 각각 식 (3.2)의 이류향의 좌변 제 2항과 제 3항을, $N1$, $N2$는 각각 식 (3.3)의 이류항의 좌변 제 2항과 제 3항의 차분식을 표시하고, Figure 15에 표시된 검사체적에 대해서 아래와 같이 기술할 수 있다.

$$M1+M2=\frac{1}{A_{cv}}\sum_{l=1}^{m'}\left\{(u_l\widehat{M}_l)(\Delta y)_l-(v_l\widehat{M}_l)(\Delta x)_l\right\} \qquad (3.93)$$

$$N1+N2=\frac{1}{A_{cv}}\sum_{l=1}^{m'}\left\{(u_l\widehat{N}_l)(\Delta y)_l-(v_l\widehat{N}_l)(\Delta x)_l\right\} \qquad (3.94)$$

여기서, A_{cv}는 검사체적의 면적, m'은 검사체적을 둘러싸고 있는 변의 수, u_l, v_l은 변 l위에서의 유속, $(\Delta x)_l$, $(\Delta y)_l$은 변 l의 끝단 점 x의 좌표, y좌표의 차이다. $\widehat{M}$, $\widehat{N}$은 격자의 중심상의 유량플럭스이며, 격자의 변 위의 유량 플럭스로부터 보간하여 구한다. Figure 16에 표시되어 있는 것처럼 m각형의 격자에 대해서, 각 변위의 유량 플

럭스를 각각 M_1, M_2, $\cdots$, M_m, N_1, N_2, $\cdots$, N_m 그리고 각 변의 중심점과 그 격자의 중심과의 거리를 d_1, d_2, $\cdots$, d_m이라고 정의하면, 보간유량 플럭스 $\hat{M}$, $\hat{N}$은,

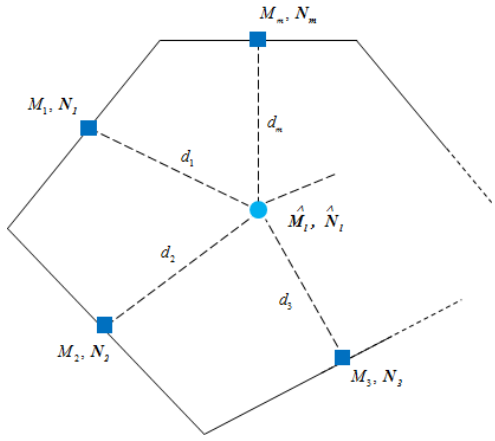


Figure 16 유량 플럭스의 계산

$$\hat{M} = \frac{\frac{1}{d_1}M_1 + \cdots + \frac{1}{d_m}M_m}{\frac{1}{d_1} + \cdots + \frac{1}{d_m}} \tag{3.95}$$

$$\hat{N} = \frac{\frac{1}{d_1}N_1 + \cdots + \frac{1}{d_m}N_m}{\frac{1}{d_1} + \cdots + \frac{1}{d_m}} \tag{3.96}$$

로 구한다.

격자의 변 위의 $\hat{M}$, $\hat{N}$을 유속 (u_l, v_l)의 방향으로 하기 위해 $\hat{M}$, $\hat{N}$에는 상류측의 보간유량 플럭스를 이용하는 것으로 한다. 즉, Figure 15의 변 l에 대해서, 식 (3.93), (3.94)의 우변 각 항의 $\hat{M}$, $\hat{N}$은 각각,

$u_l\hat{M}_l$, $u_l\hat{N}_l$에 대해서

$$\hat{M}_l = (\hat{M}_l)_{in},\ \hat{N}_l = (\hat{N}_l)_{in}\ \ (u_l \cdot (\Delta y)_l \geq 0 \text{ 인 경우}) \tag{3.97}$$

$$\hat{M}_l = (\hat{M}_l)_{out},\ \hat{N}_l = (\hat{N}_l)_{out}\ \ (u_l \cdot (\Delta y)_l < 0 \text{ 인 경우}) \tag{3.98}$$

$u_l\hat{M}_l$, $u_l\hat{N}_l$에 대해서

$$\widehat{M}_l = (\widehat{M}_l)_{out},\ \widehat{N}_l = (\widehat{N}_l)_{out}\ \ (v_l \cdot (\Delta x)_l \geq 0\ \text{인 경우}) \tag{3.99}$$

$$\widehat{M}_l = (\widehat{M}_l)_{in},\ \widehat{N}_l = (\widehat{N}_l)_{in}\ \ (v_l \cdot (\Delta x)_l < 0\ \text{인 경우}) \tag{3.100}$$

을 이용한다. 여기서 그림 Figure 15에 표시된 것처럼, $(\widehat{M}_l)_{in}$, $(\widehat{N}_l)_{in}$은 변 l로부터 검사체적의 안쪽에, $(\widehat{M}_L)_{out}$, $(\widehat{N}_l)_{out}$은 검사면의 바깥쪽에 있는 보간 유량 플럭스이다.

$(\nabla H)_x$, $(\nabla H)_y$는 각각 격자 i, j간의 수면 구배 ∇H의 x, y 방향성분이며, 아래의 식을 이용하여 계산한다.

$$(\nabla H)_x = \frac{(h_j + z_j) - (h_i + z_i)}{DL} cos\theta \tag{3.101}$$

$$(\nabla H)_y = \frac{(h_j + z_j) - (h_i + z_i)}{DL} sin\theta \tag{3.102}$$

여기서, h_i, h_j는 격자 i, j의 수심, z_i, z_j는 격자, i, j의 지반고, DL은 격자 i, j의 도심간 거리차이며, $(x_i,\ y_i)$, $(x_j,\ y_j)$을 각각 격자, i, j의 도심의 좌표라 하며,

$$DL = \sqrt{(x_j - y_j)^2 + (y_j - y_i)^2} \tag{3.103}$$

으로 표현할 수 있다.

θ는 ∇H가 x축과 이루는 각도이므로,

$$\cos\theta = \frac{x_j - x_i}{DL} \tag{3.104}$$

$$\sin\theta = \frac{y_j - y_i}{DL} \tag{3.105}$$

로 표시할 수 있다.

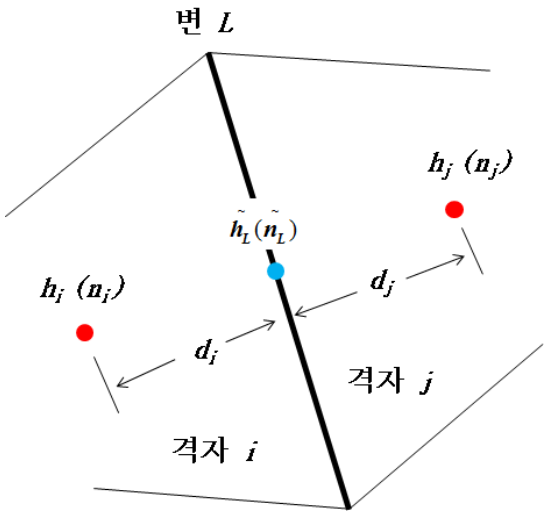


Figure 17 수위와 조도계수의 보간

$\hat{h}_L$, $\hat{n}_L$은 각각 격자경계상의 수심, 조도계수이며, 도심에서의 값에 따라 보간하여 구할 필요가 있다. 본 연구에서는 Figure 17의 경우, 격자 i, j에서의 수심, 조도계수를 각각 h_i, h_j, n_i, n_j, 격자 i, j의 도심과 경계 L의 중점과의 거리를 각각 d_i, d_j라 하면, 보간 수심 $\hat{h}_L$, 보간 조도계수 $\hat{n}_L$을 각각 d_i, d_j의 역수에 비례하여 보간하였다. 즉,

$$\hat{h}_L = \frac{\frac{1}{d_i}h_i + \frac{1}{d_j}h_j}{\frac{1}{d_i}+\frac{1}{d_j}} = \frac{d_j h_i + d_i h_j}{d_i + d_j} \tag{3.106}$$

$$\hat{n}_L = \frac{\frac{1}{d_i}n_i + \frac{1}{d_j}n_j}{\frac{1}{d_i}+\frac{1}{d_j}} = \frac{d_j n_i + d_i n_j}{d_i + d_j} \tag{3.107}$$

로 구한다.

4.1.4 메쉬 세분화 기법

지금까지 살펴본 침수 해석을 위한 다양한 해법들은 각각 고유의 장단점을 가지고 있다. 유한 차분법 기반의 데카르트 좌표계 모델은 그리드 형태로 되어 있는 지형 자

료를 직접 이용할 수 있다는 장점이 있으나, 도시유역의 복잡한 지형을 묘사하기 위해서는 매우 고해상도의 격자 분할이 필요 하므로 계산용량의 증가로 인해 모형 해석에 소요되는 시간이 증가한다는 단점을 가지고 있다. 곡선좌표계를 이용한 모델은 데카르트 좌표계 모형에 비하여 상대적으로 곡선을 표현하기가 수월하다는 장점을 가지고 있으나 도시유역과 같이 여러 방향으로 도로가 위치하고 있는 경우에는 역시 표현할 수 있는 도로의 개수에 한계가 생긴다. 마지막으로 다각형을 이용한 비구조적 격자 모형은 앞선 두 가지 모델에 비하여 복잡한 지형을 실제와 유사하게 표현할 수 있다는 장점을 가지고 있으나 지형자료 구축에 소요되는 시간이 상당할 뿐만 아니라 지형을 구축하는 연구자들의 주관적인 성향이 지형을 외곡 시킬 수 있다는 점과 지표면 메쉬의 크기를 임의로 조절하기가 어렵다는 단점을 가지고 있다.

자세한 지형의 표현과 계산 용량의 저감이라는 상반되는 목적을 달성하기 위한 방법으로 적응형 메쉬 세분화 기법(Adaptive Mesh Refinement method, AMR) (Bierger and Phillip, 1989)이 제안되었다. AMR의 기본 개념은 자세한 묘사 혹은 정보가 필요한 부분은 세분화된 격자를 이용하고 상대적으로 정확도가 중요하지 않은 영역은 거친 격자를 이용하여 복잡한 지형의 묘사를 가능하게 함과 동시에 계산 시간을 줄여주는 것이다. Figure 18에서는 정사각형 격자 기반의 ARM 기법의 개념도를 설명한다.

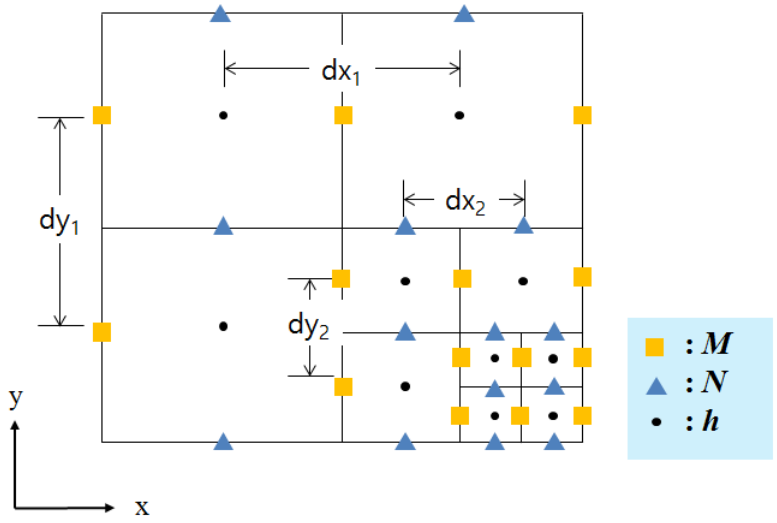


Figure 18 메쉬 세분화 기법을 이용한 수치해석 기법 개념도

Figure 18에서 볼 수 있는 바와 같이 개별 격자들은 정확도의 중요성에 따라서 여러 단계(Level)로 구분되어 질 수 있고, 개별 격자가 가진 속성 Level에 따라서 세분화 되는 Level을 지정한다. 예를 들어, 가장 거친 셀의 Level을 0이라 하면 한번 세분화 된 셀의 Level=1, Level=1인 셀이 다시 세분화 되면 Level=2 가 된다.

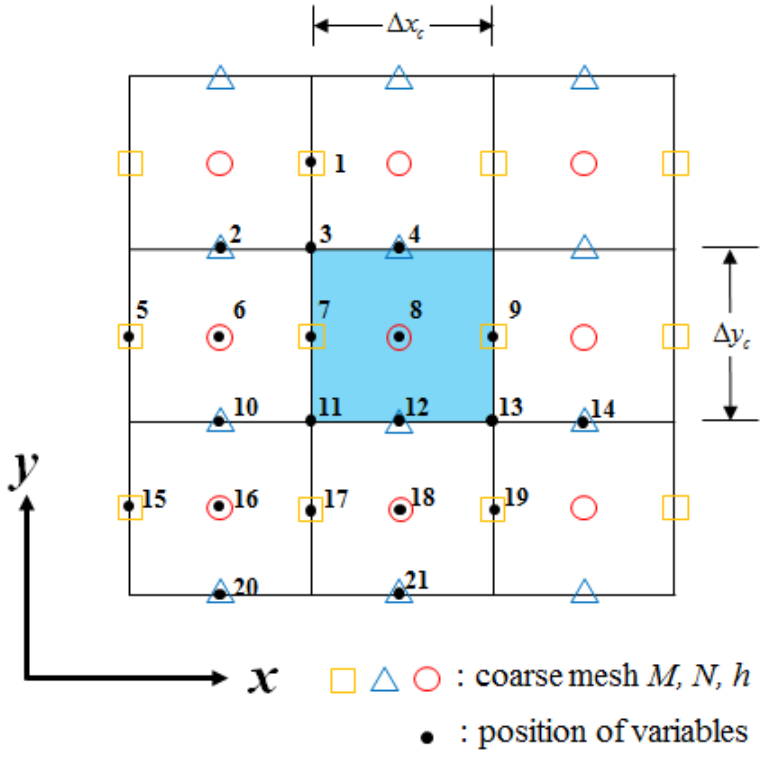


Figure 19 메쉬 세분화 기법 적용시 각 변수들의 배치

본 연구에서는 Figure 19와 같이 엇갈림 격자위에 미지수를 배치하고 Leap-Frog 기법을 이용하여 해석을 수행한다. 메쉬 세분화 기법을 이용하는 경우 데카르트 좌표계에서의 수치해석기법과 유사하게 계산하고자 하는 셀을 기준으로 상하좌우 격자와의 위치 관계를 이용하여 수치해석을 수행 할 수 있으나, 거친메쉬(coarse mesh)와 세밀한 메쉬(fine mesh)가 인접하는 경우(각 셀의 Level이 다른 경우)에는 인접 격자와의 위치관계를 다시 정의 해줘야 한다. 따라서, 먼저 메쉬 세분화가 적용되지 않은 정방형 격자에서의 수치해석 기법을 알아보고 인접한 셀의 Level이 다른 경우 위치관계의 정의에 대해서 알아본다.

ARM을 이용한 수치해석 모형의 지배방정식은 다음 식 (3.108) ~ (3.110)에서 나타내어지는 2차원 연속방정식과 운동량 방정식을 이용한다.

〈연속방정식〉

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial M}{\partial y}=0 \tag{3.108}$$

〈운동량방정식〉

$$\frac{\partial M}{\partial t}+\frac{\partial (uM)}{\partial x}+\frac{\partial (vM)}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial x}-\frac{gn^2M\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}=0 \tag{3.109}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial (uN)}{\partial x}+\frac{\partial (vN)}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial y}-\frac{gn^2N\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}=0 \tag{3.110}$$

Figure 19에서 파란색으로 표시된 격자를 기준 격자로 하면 식 (3.108) ~ (3.110)은 다음과 같이 차분화 될 수 있다.

〈연속방정식의 차분화〉

$$\frac{h_8^{n+3}-h_8^{n+1}}{2\Delta t}+\frac{M_9^{n+2}-M_7^{n+2}}{\Delta x}+\frac{N_4^{n+2}-N_{12}^{n+2}}{\Delta y}=0 \tag{3.111}$$

〈x 방향 운동량방정식의 차분화〉

$$\begin{aligned}&\frac{M_7^{n+2}-M_7^n}{2\Delta t}+\frac{u_8^n\cdot\frac{M_9^n+M_7^n}{2}+\left|u_8^n\right|\cdot\frac{M_7^n-M_9^n}{2}}{\Delta x}-\frac{u_6^n\cdot\frac{M_7^n+M_5^n}{2}+\left|u_6^n\right|\cdot\frac{M_5^n-M_7^n}{2}}{\Delta x}\\&+\frac{v_3^n\cdot\frac{M_1^n+M_7^n}{2}+\left|v_3^n\right|\cdot\frac{M_7^n-M_1^n}{2}}{\Delta y}-\frac{v_{11}^n\cdot\frac{M_7^n+M_{17}^n}{2}+\left|v_{11}^n\right|\cdot\frac{M_{17}^n-M_7^n}{2}}{\Delta y}\\&=-g\frac{h_8^{n+1}+h_6^{n+1}}{2}\cdot\frac{\left(H_8^{n+1}\right)-\left(H_6^{n+1}\right)}{\Delta x}-\frac{g\left(\frac{n_8+n_6}{2}\right)^2\cdot\frac{M_7^{n+2}+M_7^n}{2}\sqrt{(u_7^n)^2+(\widetilde{v_7^n})^2}}{\left(\frac{h_8^{n+1}+h_6^{n+1}}{2}\right)^{4/3}}\end{aligned} \tag{3.112}$$

〈y 방향 운동량방정식의 차분화〉

$$\frac{N_{12}^{n+2}-N_{12}^{n}}{2\Delta t}+\frac{u_{13}^{n}\cdot\frac{N_{14}^{n}+N_{12}^{n}}{2}+\left|u_{13}^{n}\right|\cdot\frac{N_{12}^{n}-N_{14}^{n}}{2}}{\Delta x}-\frac{u_{11}^{n}\cdot\frac{N_{12}^{n}+N_{21}^{n}}{2}+\left|u_{11}^{n}\right|\cdot\frac{N_{21}^{n}-N_{12}^{n}}{2}}{\Delta x}$$

$$+\frac{v_{8}^{n}\cdot\frac{N_{4}^{n}+N_{12}^{n}}{2}+\left|v_{8}^{n}\right|\cdot\frac{N_{12}^{n}-N_{4}^{n}}{2}}{\Delta y}-\frac{v_{18}^{n}\cdot\frac{N_{12}^{n}+N_{21}^{n}}{2}+\left|v_{18}^{n}\right|\cdot\frac{M_{21}^{n}-M_{12}^{n}}{2}}{\Delta y} \tag{3.113}$$

$$=-g\frac{h_{8}^{n+1}+h_{16}^{n+1}}{2}\cdot\frac{\left(H_{8}^{n+1}\right)-\left(H_{16}^{n+1}\right)}{\Delta x}-\frac{g\left(\frac{n_{8}+n_{18}}{2}\right)^{2}\cdot\frac{N_{12}^{n+2}+N_{12}^{n}}{2}\sqrt{(\widetilde{u_{12}^{n}})^{2}+(\widetilde{v_{12}^{n}})^{2}}}{\left(\frac{h_{8}^{n+1}+h_{18}^{n+1}}{2}\right)^{4/3}}$$

여기서,

$$u_{7}^{n}=\frac{2M_{7}^{n}}{h_{6}^{n+1}+h_{8}^{n+1}} \tag{3.114}$$

$$v_{12}^{n}=\frac{2N_{12}^{n}}{h_{8}^{n+1}+h_{18}^{n+1}} \tag{3.115}$$

$$\tilde{u}_{12}^{n}=\frac{u_{7}^{n}+u_{9}^{n}+u_{17}^{n}+u_{19}^{n}}{4} \tag{3.116}$$

$$\tilde{v}_{7}^{n}=\frac{v_{12}^{n}+v_{10}^{n}+v_{4}^{n}+v_{2}^{n}}{4} \tag{3.117}$$

$$u_{8}^{n}=\frac{u_{7}^{n}+u_{9}^{n}}{2} \tag{3.118}$$

$$u_{16}^{n}=\frac{u_{15}^{n}+u_{17}^{n}}{2} \tag{3.119}$$

$$v_{3}^{n}=\frac{v_{2}^{n}+v_{4}^{n}}{2} \tag{3.120}$$

$$v_{11}^{n}=\frac{v_{10}^{n}+v_{12}^{n}}{2} \tag{3.121}$$

$$u_{18}^{n} = \frac{u_{12}^{n} + u_{21}^{n}}{2} \tag{3.122}$$

$$u_{16}^{n} = \frac{u_{10}^{n} + u_{20}^{n}}{2} \tag{3.123}$$

$$v_{6}^{n} = \frac{v_{5}^{n} + v_{7}^{n}}{2} \tag{3.124}$$

$$v_{16}^{n} = \frac{v_{15}^{n} + v_{17}^{n}}{2} \tag{3.125}$$

$$\Delta x_c = \frac{\Delta x_c}{2^{c_lev}} + \frac{\Delta x_{c_nei}}{2^{c_nei_lev}} \tag{3.126}$$

$$\Delta y_c = \frac{\Delta y_c}{2^{c_lev}} + \frac{\Delta y_{c_nei}}{2^{c_nei_lev}} \tag{3.127}$$

여기서, c_lev는 해당 격자의 Level, c_nei_lev는 인접 격자의 Level이다.

식 (3.111) ~ (3.113)에 표시되어 있는 차분식은 인접한 격자간의 Level이 다른 경에도 적용가능하며, 중심 격자(푸른색 격자)를 기준으로 상(N)·하(S)·좌(W)·우(E) 좌측상단(NW), 우측하단(SE) 인접셀의 정의는 Figure 20, 21에 표시된 바와 같다.

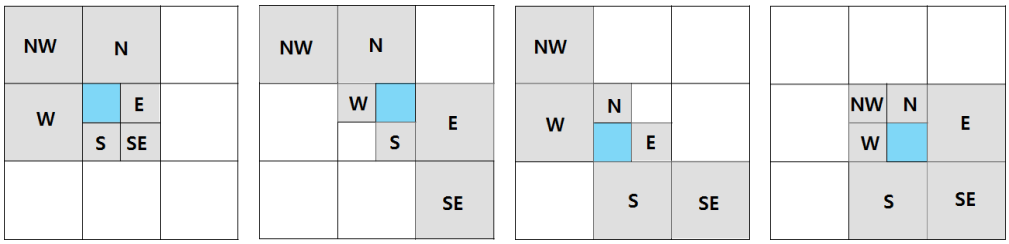


Figure 20 Fine 메쉬를 기준으로 한 Coarse 메쉬와의 연결 관계

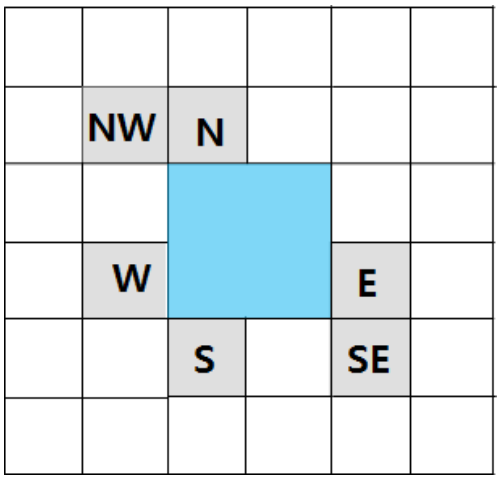


Figure 21 coarse 메쉬를 기준으로 한 fine 메쉬와의 연결 관계

4.2 1차원 하수관망 해석 모형

도시유역의 침수 해석에 있어서 하수관망 안에서의 우수의 흐름은 지표면에서 흐르는 우수를 직접 배수시키는 역할 뿐 만 아니라, 하수관거가 감당할 수 있는 유량을 초과하는 경우 집수구나 맨홀을 통해 역류하는 현상을 나타내므로 하수관망 안에서 흐르는 우수의 움직임에 대한 복합적인 이해를 하는 것은 대단히 중요하다. 관거 안에서 흐르는 유체의 경우 자유수면의 존재 유무에 따라서 수리학적으로 자유수면 흐름과 압축류 흐름과 같이 개별적인 흐름으로 구분할 수 있다. 따라서 자유수면 흐름을 가지는 유체의 흐름과 관거 안에서 자유수면을 가지지 않는 압축류 흐름은 식 (3.128)에서 (3.131)에서 보여지는 바와 같이 개별적인 지배방정식을 이용하여 해석을 수행한다.

〈자유수면 흐름〉

$$\frac{\partial h}{\partial t}+v\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{A}{B}\frac{\partial v}{\partial x}=0 \tag{3.128}$$

$$g\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial t}+v\frac{\partial v}{\partial x}=g(S_0-S_f) \tag{3.129}$$

〈압축류 흐름〉

$$\frac{\partial H}{\partial t}+V\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{a^2}{g}\frac{\partial v}{\partial x}=0 \tag{3.130}$$

$$g\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial t}+v\frac{\partial v}{\partial x}=g(S_0-S_f) \tag{3.131}$$

여기서, v는 x방향 유속, h는 수심, S_0는 관거의 경사, S_f는 관거의 마찰경사, g는 중력가속도, A는 관거내에서 우수가 차지하고 있는 단면적, B는 수면폭, a는 압력전파속도, H는 피에조 수두이다.

하수관거내의 흐름은 수리학적 조건에 따라서 자유수면 흐름, 압축류 흐름 혹은 자유수면과 압축류 흐름의 천이영역에 속할 수 있기 하나의 방정식으로 해석하는 것이 상당히 어려울 뿐만 아니라 서로 다른 흐름에 대해서 적합한 두 개의 지배방정식을 이용하는 경우라 할지라도 천이영역의 흐름을 어떻게 처리 하느냐에 따라서 수치불안정이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 Preissmann(Chaudhry, 1979)은 자유수면 흐름과 압축류 흐름뿐만 아니라 천이영역의 흐름을 하나의 방정식으로 해석할 수 있는 Slot 모델을 개발하였다. Preissmann이 제안한 방식은 Figure 22에서 보여지는 것처럼 하수관거 위에 가상의 좁고 긴 슬롯이 위치하고 있다는 가정에서부터 출발한다. 이 방식은 하수관거 내의 유체를 해석함에 있어서 유체의 수리학적 조건이 자유수면 흐름에서 압축류 흐름으로 바뀌는 경우도 증가된 관거의 압력이 가상의 슬롯을 통해 관거 위쪽으로 이동함에 따라서 지속적으로 자유수면을 가지는 흐름으로 해석할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 Pressimann slot-model의 기본 가정은 존재하지 않는 가상의 슬롯을 하수관거의 위쪽에 위치시켜 압축류 흐름 역시 자유수면 흐름으로 가정하여 해석하는 방법이기 때문에 기본가정으로부터 발생하는 유의점이 존재한다. 가상의 슬롯이 하수관거 위에 위치하고 있다는 가정을 이용한 Pressimann slot-model을 이용하기 위한 유의점으로는 1) 우수의 체적을 과도하게 가상의 슬롯에 위치시켜 파이프 흐름을 변형시키지 않을 정도로 충분히 좁아야 하지만, 역으로 너무 좁은 슬롯의 폭은 과도하게 빠른 압력파의 전달을 초래하므로 2) 수치해석적 에러를 발생시키지 않을 정도로 넓어야 한다.

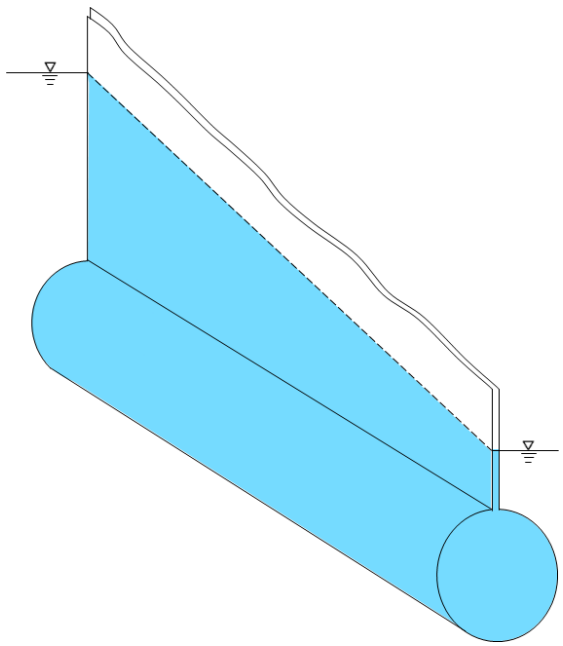


Figure 22 Pressimann slot 모델의 개념도 (Lee, 2013)

Pressimann slot-model 모형을 이용하기 위해서는 위에 언급한 두 가지 조건을 만족시켜야 하며, 슬롯의 폭을 결정하기 위한 이론적 기반은 실제 탄성을 가지고 있는 파이프 안에서 흐르는 압축유체의 surge 전파속도와 같은 전파속도를 슬롯내에 적용시켜야 한다.

따라서, 파이프 위에 위치하는 가상의 슬롯의 폭은 다음의 식을 이용해 결정한다.

$$B_s = \frac{gA_o}{a^2} \tag{3.132}$$

여기서, A_0는 파이프의 단면적이며, a는 압력 전파속도이다.

그러나 경우에 따라서 매우 관경을 가지는 파이프에 대해서는 식 (3.132)를 통해 결정되는 슬롯의 폭은 극도로 작은 슬롯의 폭을 계산하게 되는 경우가 있으며 이는 위에서 언급한 수치불안정을 유발 할 수 있으므로 슬롯의 폭을 결정하는 경우에는 수치해석적 불안정을 제거함과 동시에 파이프 내에서 흐르는 유체의 체적을 과도하게 슬롯의 내부로 이동시켜 관거 흐름의 특성을 잃지 않도록 적정 수준의 슬롯폭을 결정해야 한다.

또한 자유수면 흐름과 압축류 흐름의 중간 상태인 천이영역(transition regime)흐름은 수치해석적으로 매끈하게 해석하기 쉽지 않은 영역이다(Cunge and Mazadou, 1984). Jun(1985)는 하수관거망의 각 관거가 다수의 부분으로 나눠지고 하수관거 내의 우수 흐름이 자유수면을 가진다면 일반적인 자유수면 흐름 해석을 적용하는게 수치해석에 소요되는 시간을 줄일 수 있다고 지적한 바 있다. 그러나 만약 자유수면 흐름영역과 압축류 흐름의 중간 단계인 천이영역 흐름이 빈번하게 발생한다면 천이영역 흐름을 안정화 시키는 방식이 대단히 중요하며 이때 Pressimann slot-model 이 적합하다고 언급한 바 있다. 그럼에도 불구하고 1차원 Pressimann slot-model은 현재 하수관거 흐름 해석과 관련된 분야에서 널리 이용되고 있으며, 국내에서 도시유출 흐름 해석에 광범위 하게 사용되고 있는 Storm Water Management Model(SWMM)에서도 동일한 개념이 적용되어 있다.

SWMM은 도시영역에 넓게 분포되어 있는 하수관망의 구성요소인 멘홀과 관거를 하나의 노드와 링크로 연결하여 해석한다(Mark et al., 2004). 이는 관망해석에 소요되는 시간을 상당부분 줄일 수 있다는 장점이 있으나 실제 관거내에 흐르는 흐름을 하나의 대표 수위로 취급한다는 단점을 가지고 있다. 다시 말하면 실제 도시유역에서 발생하는 침수의 경우 짧은 기간에 지표면에서 발생한 유출수가 집수구를 통해 하수관거로 유입되며, 하수관거의 통수능을 초과하는 유량이 역으로 집수구나 멘홀을 통해 역류하는 현상을 모의하기에는 적합하지 않다고 이야기 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Lee(2013)이 제안한 바 있는 Pressimann-slot 개념을 적용한 격자기반 1차원 하수관거 해석 모형에 대해서 알아본다.

4.2.1 지배방정식

Pressimann-slot model 모델은 하수관망 내의 파이프와 맨홀 사이의 흐름 해석을 위해 이용되며 그 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=q \tag{3.133}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial (uQ)}{\partial x}=-gA\frac{\partial H_P}{\partial x}-gn^2\frac{|Q|Q}{R^{4/3}A} \tag{3.134}$$

여기서, A는 하수관거 내에서 우수가 차지하고 있는 단면의 넓이, Q는 유량, q는 단위 면적당 외부 유입 유량, u는 유속, R은 동수반경, H_p는 피에조수두 ($H_p = z_p + h$), z_p는 파이프 바닥의 지반고, h는 수심이다.

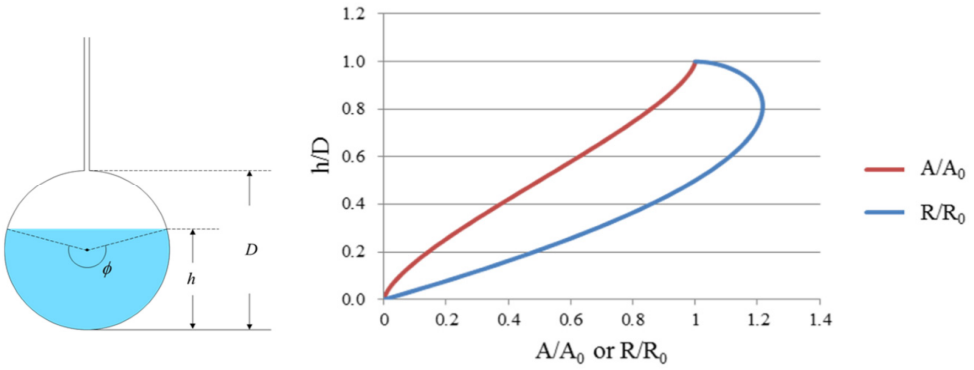


Figure 23 원형관에서의 중심각과 수심의 관계와 수리특성 곡선 (Lee, 2013)

일반적으로 하수관거는 원형이며, 수심을 구하는 경우 면적과 반지름의 관계를 이용하여 식 (3.135)에서와 같이 수심을 구한다.

$$h = \begin{cases} f(A) & : A \le A_o \\ D + \dfrac{(A - A_o)}{B_s} & : A < A_0 \end{cases} \tag{3.135}$$

여기서, f는 우수가 차지하고 있는 단면적의 넓이와 수심과의 관계를 나타내는 함수, A는 수치해석에서 얻어진 우수가 차지하고 있는 단면적, A_0는 하수관거의 단면적, D는 하수관거의 직경, B_s는 슬롯폭이다.

Figure 23에서 나타내어진 수리학적 특성곡선은 식 (3.136) ~ (3.138)을 이용하여 계산한다.

$$\phi = 2\cos^{-1}(1 - 2\frac{h}{d}) \tag{3.136}$$

$$\frac{A}{A_0} = \frac{\phi - \sin\phi}{2\pi} \tag{3.137}$$

$$\frac{R}{R_0}=1-\frac{\sin\phi}{\phi} \tag{3.138}$$

4.2.2 차분화

식 (3.133)과 (3.134)에 나타내어진 1차원 연속방정식과 운동량 방정식은 Figure 24에서와 같이 격자의 중심과 경계면에서 차분화 되어지며, 시간에 따른 계산 순서는 Figure 25에서 보여지는 것과 같다.

즉, 미지량 A와 h는 격자의 중심에서, 유량 Q는 격자의 경계에 위치한다. 또한 단위면적당 외부 유입량 q는 격자의 측면에 위치한다. 시간에 따른 계산 순서는 $n-2$의 타임스텝 상에서의 유량과 $n-1$타임스텝 상에서의 수심을 이용하여 타임스텝 n에서의 유량을 구하고, $n-1$ 타임스텝 상에서의 수심과 타임스텝 n에서의 유량을 이용하여 타임스텝 $n+1$에서의 수심을 구한다.

〈1차원 연속방정식〉

$$\frac{A_{j+1/2}^{n+3}-A_{j+1/2}^{n+1}}{2\Delta t}+\frac{Q_{j+1}^{n+2}-A_j^{n+2}}{\Delta x_j}=q_{j+1/2}^{n+2} \tag{3.139}$$

〈1차원 운동량방정식〉

$$\frac{Q_j^{n+2}-Q_j^n}{2\Delta t}=\begin{cases}\dfrac{u_{j+1/2}^*\cdot Q_j^*-u_{j-1/2}^*\cdot Q_{j-1}^*}{\Delta x_j} & ;\quad u_{j+1/2}^*>0,\ u_{j-1/2}^*>0\\ \dfrac{u_{j+1/2}^*\cdot Q_j^*-u_{j-1/2}^*\cdot Q_j^*}{\Delta x_j} & ;\quad u_{j+1/2}^*>0,\ u_{j-1/2}^*\le 0\\ \dfrac{u_{j+1/2}^*\cdot Q_{j+1}^*-u_{j-1/2}^*\cdot Q_{j-1}^*}{\Delta x_j} & ;\quad u_{j+1/2}^*\le 0,\ u_{j-1/2}^*>0\\ \dfrac{u_{j+1/2}^*\cdot Q_{j+1}^*-u_{j-1/2}^*\cdot Q_j^*}{\Delta x_j} & ;\quad u_{j+1/2}^*\le 0,\ u_{j-1/2}^*\le 0\end{cases} \tag{3.140}$$

$$=-g\cdot\frac{A_{j+1/2}^{n+1}+A_{j-1/2}^{n+1}}{2}\cdot\frac{H_{j+1/2}^{n+1}-H_{j-1/2}^{n+1}}{\Delta x_j}-gn^2\frac{\left|Q_j^n\right|\left(\dfrac{Q_j^{n+2}+Q_n^n}{2}\right)}{\left(\dfrac{R_{n+1/2}^{n+1}+R_{n-1/2}^{n+1}}{2}\right)\left(\dfrac{A_{j+1/2}^{n+1}+A_{n-1/2}^{n+1}}{2}\right)}$$

〈이류항의 계산〉

비선형성을 가지는 이류항의 안정적인 계산을 위해 井上和自(1986)에 의해 제안된 시간 평균값을 사용한다. 즉, 식 (3.134)의 좌측 두 번째 항인 이류항의 계산을 수행함에 있어 Q_j^*는 타임스텝 n과 $n+2$의 평균값을 취한다.

$$Q_j^* = \frac{Q_j^{n+2} + Q_j^n}{2} \tag{3.141}$$

u_j^*의 경우 연속식 $Q = Au$에 기반하여 유량을 단면적으로 나눈 형태의 식으로 나타낼 수 있다. 그러나 단순히 유량을 단면적으로 나누는 경우 격자 중심의 값을 취하는 단면적 A와 격자의 경계에서 값을 취하는 유량 Q 사이에 격자의 불일치 문제가 발생한다. 따라서 식 (3.142)에서와 같이 격자의 위치를 Q_j^*에 고정시킨 후 $A_{j-1/2}$와 $A_{j+1/2}$를 이용하여 보간된 단면적 A_j를 구한 후 u_j^*를 구한다.

$$u_j^* = \frac{Q_j^*}{\frac{A_{j-1/2} + A_{j+1/2}}{2}} \tag{3.142}$$

동일한 방식으로 $u_{j-1/2}^*$와 $u_{j+1/2}^*$를 구하는 경우 먼저 Q_{j-1}^*, Q_j^*, Q_{j+1}^*를 식 (3.141)를 이용하여 구한 후 $A_{j-3/2}$, $A_{j-1/2}$, $A_{j+1/2}$, $A_{j+3/2}$의 값을 이용하여 u_{j-1}^*, u_j^*, u_{j+1}^*를 구한 후 식 (3.143)과 (3.144)을 이용한다.

$$u_{j-1/2}^* = \frac{u_{j-1}^* + u_j^*}{2} = \frac{Q_{j-1}^*}{A_{j-3/2} + A_{j-1/2}} + \frac{Q_j^*}{A_{j-1/2} + A_{j+1/2}} \tag{3.143}$$

$$u_{j+1/2}^* = \frac{u_j^* + u_{j+1}^*}{2} = \frac{Q_j^*}{A_{j-1/2} + A_{j+1/2}} + \frac{Q_{j+1}^*}{A_{j11/2} + A_{j+3/2}} \tag{3.144}$$

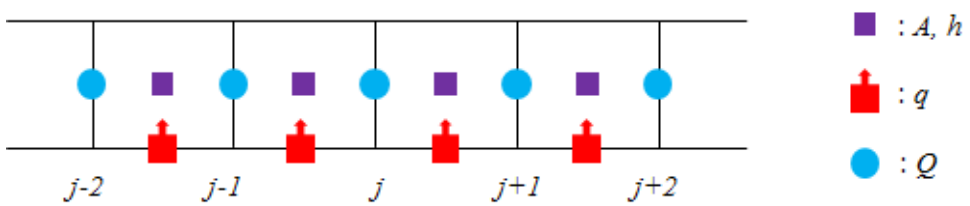


Figure 24 각 변수의 배치

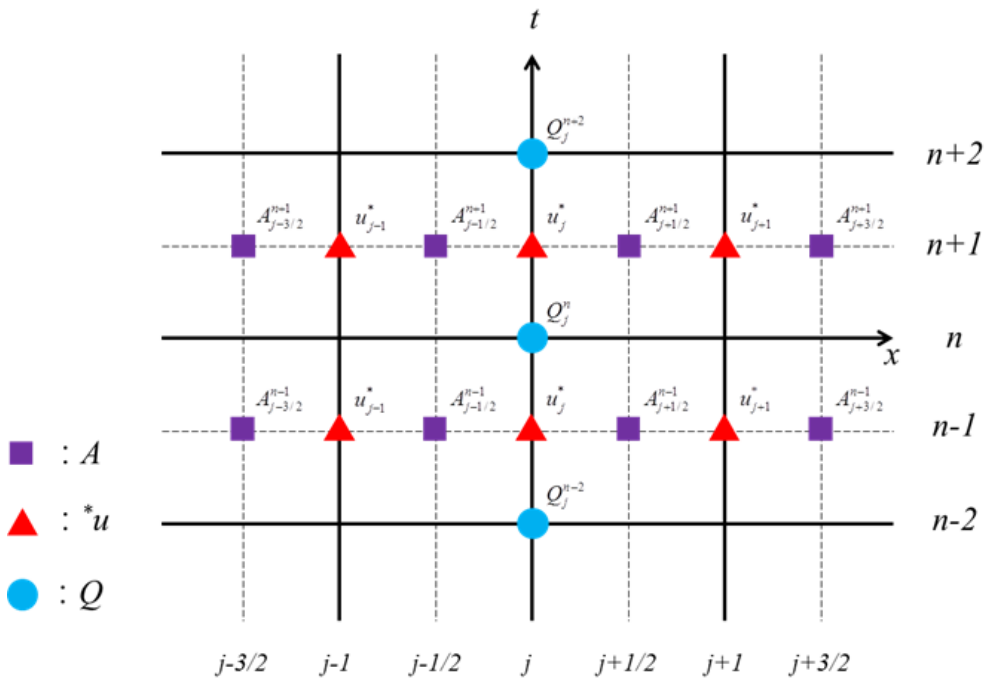


Figure 25 변수의 배열과 시간에 따른 수치계산 순서

4.3 2차원 지상부 모형의 선정

지금까지 알아 본 바와 같이 2차원 지상부 침수해석 모형은 격자를 구성하는 형태에 따라서 데카르트 좌표계를 이용한 해석 기법과, 일반 곡선좌표계를 이용한 방법 그리고 다각형을 이용한 기법 등이 있다. 도시유역의 침수해석을 위해서는 도로와 건물 등과 같은 인공 구조물들을 실제와 유사하게 묘사하여 유출수의 흐름이 지형의 높낮이와 인공구조물들의 배치를 따라서 흘러갈 수 있도록 하여야 한다. 다시 말하면 도시 침수 해석 모형의 개발에 있어서 도시유역의 특성을 잘 반영할 수 있는 기법의 선택이 무엇보다 중요하다고 할 수 있으며, 실시간 침수 해석 시스템의 구축을 위해서는 계산 시간의 단축이 우선되어 한다.

데카르트 좌료계를 이용한 수치해석 기법은 x, y축을 따라 일정간격으로 격자를 분할하여 계산을 수행하므로 일반적으로 얻을 수 있는 DEM자료를 직접 이용하여 입력 자료를 구축할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 도시유역의 대부분을 차지하고

있는 인공구조물을 표현하기 위해서는 격자를 상당히 작은 수준으로 분할하여야 하므로 전체 계산에 소요되는 시간이 과도하게 소요되어 실시간 침수해석에 적용하기에는 무리가 따른다.

곡선좌표를 이용한 수치해석 기법은 도로나 건물 등과 같은 인공구물의 설치 방향을 기준으로 데카르트 좌표계를 회전시켜 격자를 구성할 수 있으므로 상대적으로 큰 격자를 이용하여 세밀한 지형의 묘사가 가능하다는 장점을 가진다. 그러나 도시유역에 분포하고 있는 도로의 형상이 일정한 방향을 유지하고 있는 것이 아니기 때문에 표현할 수 있는 도로망의 형태에 제약이 생기게 된다.

다각형을 이용한 수치해석 기법은 상기에 언급된 두 가지 수치해석 기법에 비하여 상대적으로 쉽게 지형을 표현할 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 모형의 수행을 위한 지형자료를 구축하기 위해 소요되는 시간이 과도할 뿐만 아니라 입력 자료를 구축하는 각 연구자들의 주관에 따라서 형태가 달라질 수 있다는 단점이 있다. 또한 일관된 비율로 격자를 늘이거나 줄이는 것이 거의 불가능 하므로 자세한 지형의 묘사를 위해서는 상당히 많은 격자의 구축이 필수적이어서 계산시간의 단축에도 불리할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 지형자료의 구축이 편리한 데카르트 좌표계를 기본으로 하여 자세한 지형의 표현이 가능한 메쉬세분화 기법을 적용한 방식을 선택하였다. 메쉬세분화 기법의 장점으로는 앞서 설명한 바와 같이 DEM 자료를 직접 이용하기 때문에 연구자의 주관을 상당부분 배제한 지형자료의 생성이 가능하다는 점과 연구자가 요구하는 정확도 수준에 따라 메쉬의 간격을 변화 시킬 수 있기 때문에 전체 계산에 소요되는 절대 계산량을 획기적으로 줄일 수 있다. 즉, 상대적으로 높은 정확도가 요구되는 지역(도로와 건물 밀집지역)은 고해상도의 격자를 이용하고 상대적으로 정확도가 낮아도 문제가 없는 지역(산지 또는 공터)은 저해상도의 격자를 이용한다.

4.4 모형의 연계

4.4.1 메쉬 세분화

메쉬세분화 기법을 적용한 침수해석 모형은 격자를 세분화 하는 정도에 따라서 전

체 계산에 소요되는 시간과 획득할 수 있는 정보에 차이가 생긴다. 즉, 어떤 부분을 얼마나 자세하게 묘사하느냐에 따라서 전체 계산 격자수에 차이가 생기며, 가장 세밀한 격자의 크기에 따라서 계산 시간간격 Δt가 결정이 된다.

본 연구에서는 기본 격자 크기를 $10m \times 10m$로 고정하고 도시유역에서 우수의 흐름에 가장 큰 영향을 미치는 도로망을 $5m \times 5m$로 세분화 하여 모의를 수행한다. 또한 모의 수행에 소요되는 시간과 정확도 향상에 대한 비교를 수행하기 위해 데카르트 좌표계 모형을 이용하여 전체 유역을 $10m \times 10m$로 분할한 모의 결과의 비교 연구를 수행한다.

4.4.2 집수구의 분포

2차원 지표면 해석 모형과 1차원 하수관망 해석 모형의 결합을 위해서는 각 모형에서 해석된 수리학적 특성에 따라서 각 모형 간에 유량 교환이 일어 날 수 있어야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 지표면에서의 하수관망으로 유입과, 하수관망에서 지표면으로의 역류는 집수구에서 일어난다고 가정한다. 이를 위해서는 지표면에 위치하고 있는 집수구의 위치를 특정해주고, 적절한 가정을 통해 해수관거와 연결해 주는 작업이 필요하다. 따라서 지상부 격자위에 집수구를 분포시키기 위해서는 실제 현지 조사를 통해 집수구의 개수와 크기 그리고 정확한 위치를 확인하는 작업이 필수적이라 할 수 있다. 그러나 실제 조사에 소요되는 시간과 예산에 비하여 모형의 결과값이 미치는 효율이 낮다고 판단되어 본 연구에서는 지표면 격자 중 도로가 분포되어 있는 격자로 지정된 곳에 $100m^2$ 당 $0.5m \times 0.5m$ 크기의 집수구가 도로 양 끝단에 한 개씩 분포 되어 있다고 가정하여 지상부 격자위에 집수구를 분포 시킨다.

지상부의 도로 격자위에 일정한 간격으로 분포된 집수구는 Figure 26에서와 같이 도로에 인접한 하수관거 격자 중 거리가 가장 가까운 격자를 선택하여 연결 정보를 생성한다.

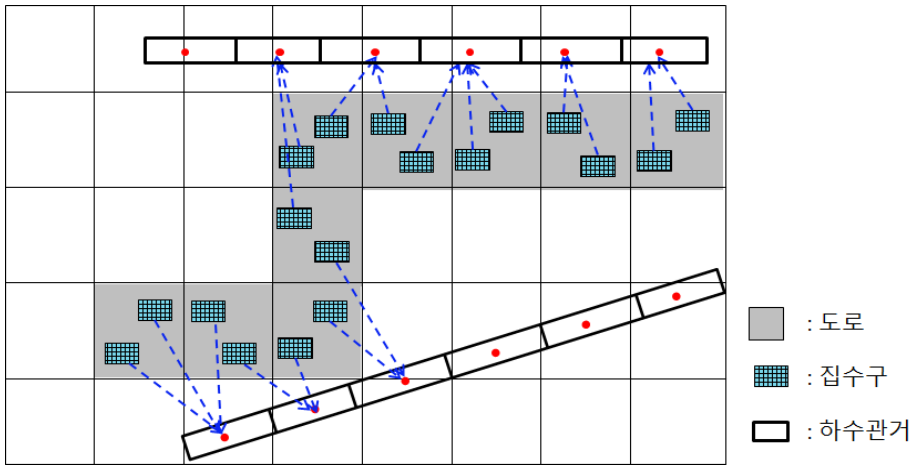


Figure 26 집수구와 하수관거 연결 개념도

또한 집수구 통의 부피를 계산하기 위해서는 Figure 27에서와 같이 집수구로부터 연결된 하수관거까지의 거리를 계산한 후 상호간에 $0.2m$의 관경을 가지는 원형의 파이프로 연결되어 있다고 가정하여 부피를 산정한 후 집수구 면적으로 나누어 집수구의 높이를 결정한다.

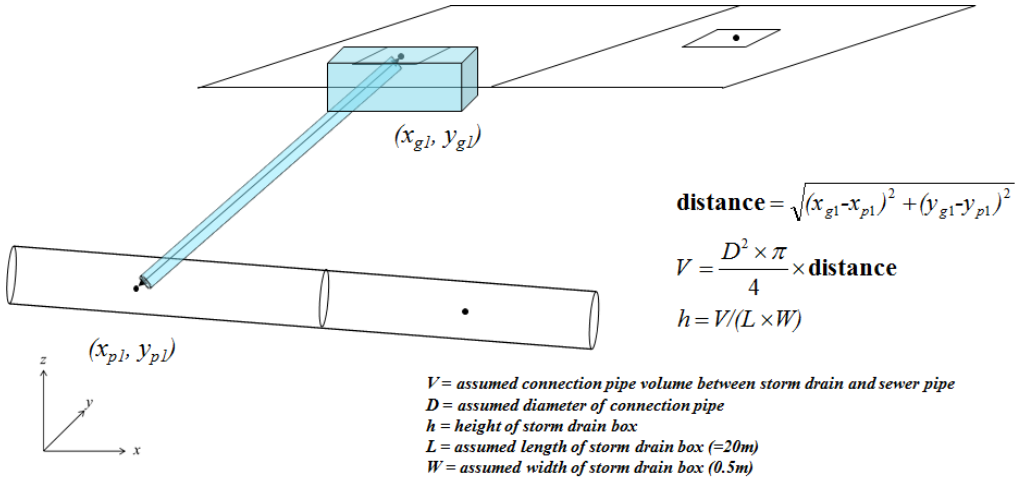


Figure 27 집수구 높이를 산정하기 위한 개념도 (Lee et al., 2015)

5. 연구내용

5.1 강우자료

본 연구에서는 2014년 8월 25일 부산과 경남 지역에 큰 피해를 유발했던 국지성 집중호우 이벤트를 대상으로 하여 침수해석 모의를 수행한다. 본 연구에서 적용된 침수해석 모형은 메쉬 세분화 기법이 적용된 2차원 지표면 흐름 해석 모형과 1차원 하수관망 해석 모형을 결합하여 지표면으로부터 하수관망으로의 우수 유입과 하수관망에서 지표면으로 역류를 각 부분의 흐름 상태 조건에 따라 고려 할 수 있도록 하였다. 모형의 입력 자료로는 구덕산 레이더에서 관측된 강우 자료를 예측 데이터로 가정하여 이용하였다.

5.1.1 모의 시간의 결정

Figure 28에서는 대상유역인 온천천 유역 주변에 분포하고 있는 무인 자동기상관측장비(Automatic Weather Station, AWS)의 위치와 관측값을 보여주고 있다. 대상유역 인근의 주요 AWS는 동래, 금정, 부산진, 해운대, 영도 등이 있으며, 침수에 직접적인 영향을 준 강우는 오후 1시부터 4시까지의 강우로 분석되었다.

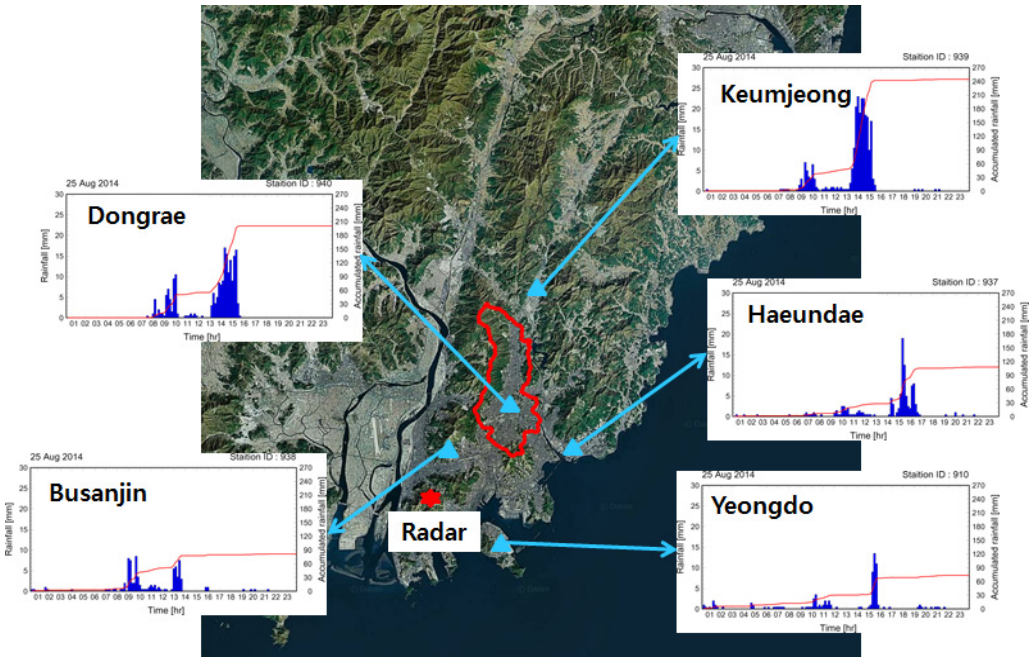


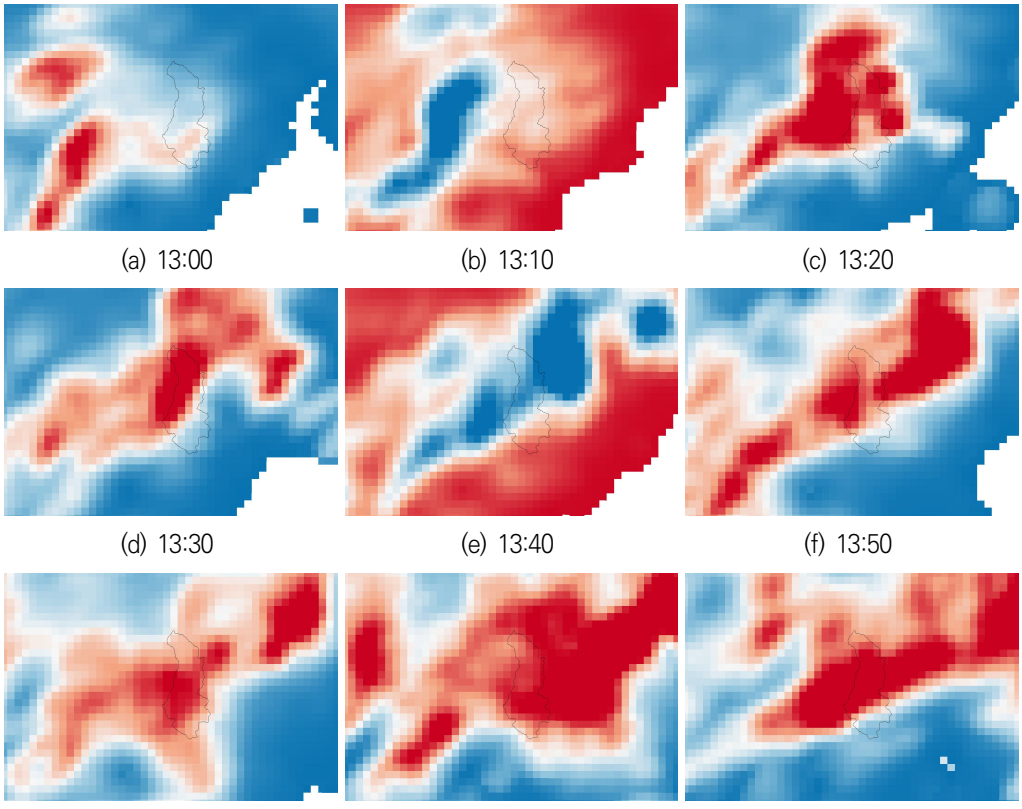
Figure 28 온천천 유역 주변 AWS 관측자료 분포도

5.1.2 레이더 관측자료

우리나라는 위험기상 감시 및 예보를 위하여 기상청의 기상레이더 11대(연구용제외)와 국토교통부의 강우 레이더 7대(4대는 설치 중)를 운영하고 있으며, 이중 본 연구에서는 기상청에서 운영되고 있는 기상레이더 자료를 범정부 레이더자료 공동활용 시스템(http://download.kma.go.kr)으로부터 제공받아 사용하였다. 기상청에서 제공되는 자료 중 부산과 경남 지역을 관측할 수 있는 구덕산, 오성산, 면봉상 레이더 중 본 연구의 대상 유역인 온천천 유역과 가장 근접한 구덕산 레이더 관측소에서 획득된 자료를 이용하였다. 구덕산 기상레이더의 주요제원은 S-band 단일편파 도플러 레이더(Doppler Radar)로서, 해발고도 518m에 위치하고 있으며, 안테나 높이 545m, 관측반 경은 약240km, 유효반경은 약120km이다. 또한 관측 고도각은 총13개로 설정되어 있으며, 최저 고도각은 약0.05도, 최고 고도각은 약15.8도이다. 본 연구에서는 복잡한 지형과 건물 등의 영향으로 발생할 수 있는 지형에코(ground echo)가 광범위하게 발생할 수 있는데, 이러한 지형에코는 강수예측에 있어서 심각한 오차를 발생시킬 수 있으므로, 지형에코를 제거한 corrected reflectivity(CZ) 자료를 사용하

였다(Jang et al. 2016). 구덕산 레이더 관측소에서 관측된 레이더 자료의 공간 해상도는 1km×1km이며, 시간 해상도는 10분이다. 관측자료의 시간에 따른 변화는 Figure 29와 같다.

2014년 8월 25일 13시 이전부터 연구대상 지역인 온천천 유역에 영향을 주던 비구름대는 13시 10분 경 부터 그 강도가 증가하기 시작하여 약 20여 분 간 최대 강우강도 104.4mm/h를 기록하였다. 그 후 약 10여 분 간 온천천 유역 하류단 부분에 집중된 강우는 13시 50분부터 14시 30분까지 약 40여 분 간 온천천 유역에 집중적으로 강우를 발생시켰으며 당시 기록된 최대 강우 강도는 111.9mm/h로 측정되었다. 이후 14시 40여분에 다시 한 차례 약해졌던 강우 강도는 14시 50분과 15시 20분에 온천천 유역에 강한 강도의 강우를 발생시키고 서서히 소멸 하였다. 또한 본 연구에서 수행된 수치해석 모의는 13시부터 16시까지 이므로 16시에 관측된 자료는 모의에 입력 자료로 이용되지 않으므로 표시에서 제외하였다.



(a) 13:00 (b) 13:10 (c) 13:20

(d) 13:30 (e) 13:40 (f) 13:50

(g) 14:00 (h) 14:10 (i) 14:20

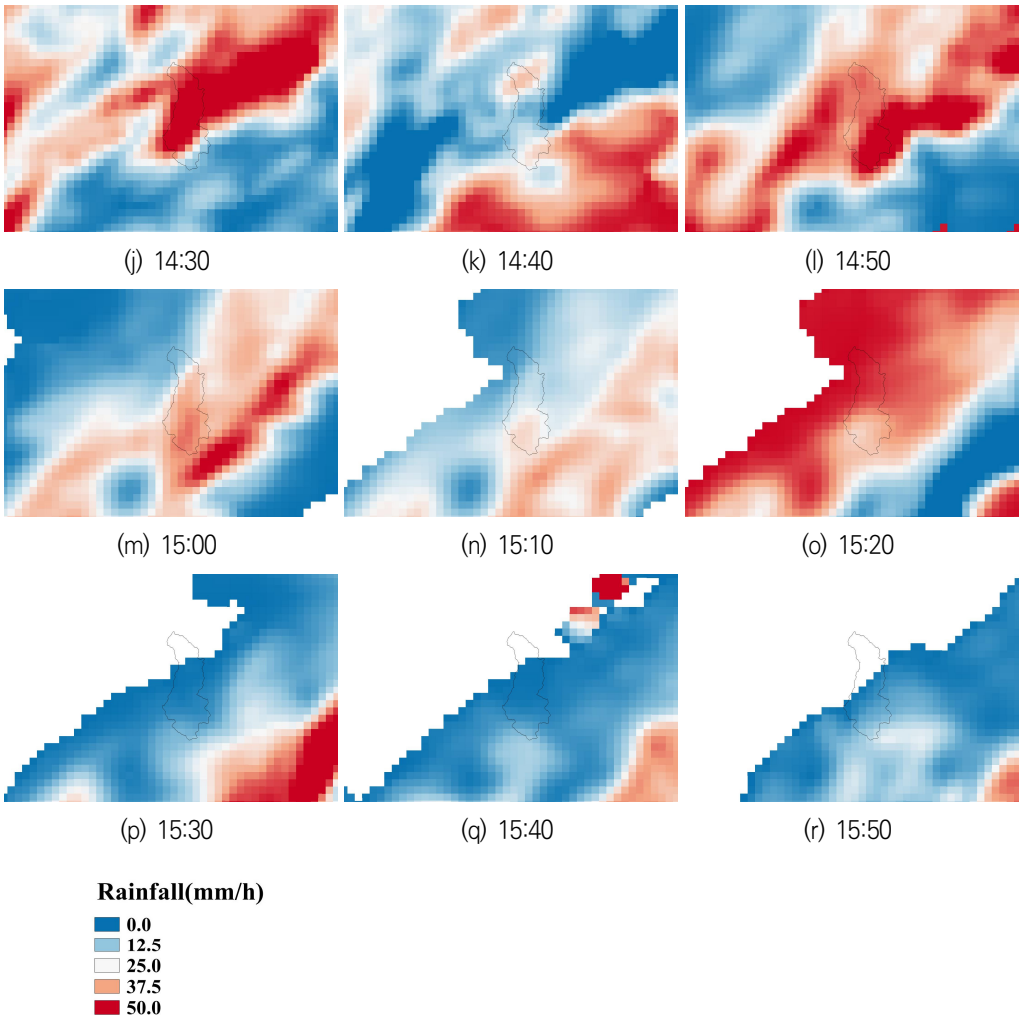


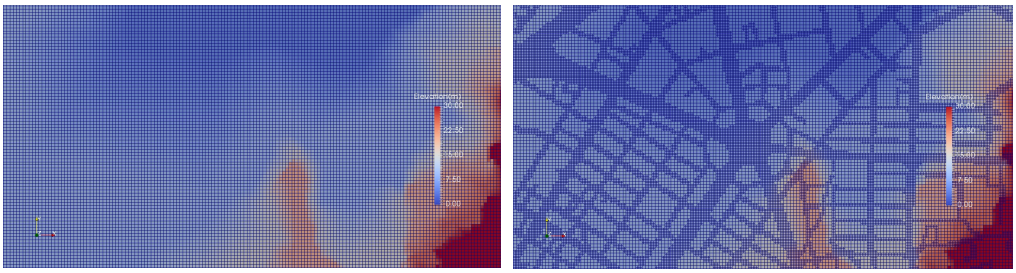
Figure 29 시간에 따른 레이더 관측자료

5.2 모형의 적용

5.2.1 메쉬 구축

데카르트 좌표계를 이용한 모형과 메쉬세분화 기법을 이용한 모형의 수행에 앞서 지형을 묘사하기 위한 메쉬의 구축이 필요하다. 앞서 설명한 바와 같이 데카르트 좌표계를 이용한 모형은 전체 유역을 10m×10m 크기의 정방형 격자를 이용하여 메쉬를

구축하였으며, 메쉬세분화 기법을 이용한 모형은 전체 유역을 10m×10m 크기의 정방향 격자로 구축한 뒤 도로가 포함되어 있는 격자는 한번 더 분할하여 5m×5m 크기의 격자를 이용한다. Figure 30에는 대상 유역에 포함되어 있는 부산시 연산 교차로에 대하여 데카르트 모형을 이용한 경우와 메쉬 세분화 모형을 이용하여 메쉬를 세분화한 경우의 차이점을 보여주고 있다.



(a) 10m×10m 정방형 격자를 이용한 경우 (b) 메쉬 세분화 기법을 이용한 경우

Figure 30 데카르트 좌표계 모형과 메쉬세분화 모형을 위한 메쉬 구축 자료의 비교

5.2.2 초기값 및 경계조건 설정

침수해석을 위한 모형의 수행을 위해서는 최초 수심과 플럭스의 설정과 같은 초기조건을 설정하고, 유역 내에서 유출을 발생시키는 강우자료의 종류와 시간간격, 그리고 유역 출구점에서의 수심과 하수관망 최하류단에서의 수심을 설정해 주어야 한다. 따라서 모형의 수행에 앞서 관측값을 이용할 수 있다면 관측값을 초기조건으로 하여 모의를 수행하는 것이 가장 적절한 방법이라고 이야기 할 수 있으나, 2014년 8월 25일 발생한 강우에 의한 피해 조사 자료 중 침수심과 유속의 정보를 확인할 수 있는 자료가 존재하지 않아 본 연구에서는 초기 수심과 유량을 모두 0m로 가정하여 모의를 수행하였다. 또한 온천천과 수영강의 합류부를 유역의 출구로 하여 유역을 설정하였기 때문에 합류부에서의 시간에 따른 수심 변화값을 유역 출구에서의 경계조건으로 사용함이 타당하다고 할 수 있겠으나 온천천 하류단에 수위 관측소가 존재하지 않아 본 연구에서는 온천천 최하류단에서 수영강으로 자유수면 흐름에 의해 유출이 일어난다는 가정(Open boundary condition)을 기반으로 모의를 수행하였다. 또한 앞서 설명한 바와 같이 유출을 일으키는 강우는 1km×1km의 공간 해상도와 10분 간격의 시간 해상도를 가지는 레이더 자료를 예측 강수자료로 가정하여 모의에 이용하였다. 마지막으로 계산 시간 간격은 Noh et al.(2016)등이 사용한 기법을 참고하여

최소격자의 크기가 10m인 데카르트 좌표계 모형은 0.3초를 사용하였으며, 5m 크기의 최소격자 크기를 가지는 메쉬세분화 모형은 0.2초를 Δt로 사용하였다. 초기값 및 경계조건에 대한 요약 정보는 Table 4에 정리하였다.

Table 4 모의 수행을 위한 초기값 및 경계조건

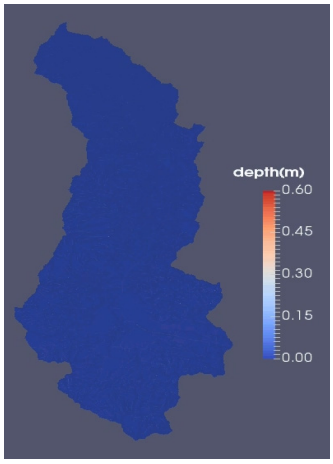
구분		데카르트 좌표계 모형	메쉬세분화 모형
강우입력자료		레이더 자료	
계산시간간격(Δt)		0.3 (sec)	0.2 (sec)
공간해상도		$1km \times 1km$	
시간해상도		10분	
초기 수심	지표면	0m	
	하수관거		
	맨홀		
하류단 경계조건		Open boundary condition	

5.2.3 데카르트 좌표계 모형

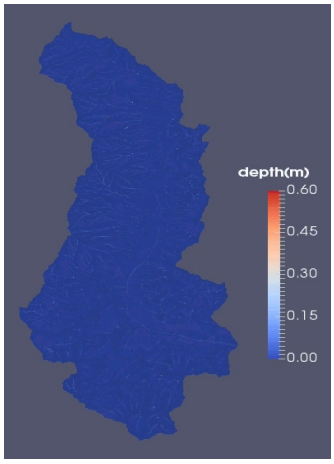
5.2.3.1 모의 결과

데카르트 좌표계 모형에 레이더 강우 자료를 입력 자료로 이용하여 모의 해석을 수행한 결과는 Figure 31에서 보이는 바와 같으며, 모의 결과를 10분 간격으로 표시하였다. 강우에 따른 침수는 13시 10분부터 확인을 할 수 있으며 점차적으로 침수심이 증가하여 13시 20분부터는 지형에 따라 유출이 발생한 것을 확인할 수 있다. 또한 13시 30분에는 대상유역의 북서쪽에 위치하고 있는 산지의 영향으로 인하여 시가지가 분포하고 있는 대상유역의 중앙부분에 비하여 보다 많은 유출이 발생하는 것을 알 수 있다. 시간이 증가함에 따라 점진적으로 발생한 지표면 흐름은 지형의 높낮이에 따라 높은 곳에서부터 낮은 곳으로 흐르는 것을 알 수 있다. 강우발생 후 1시간 후인 14시 부터는 산지에서 흘러 내려온 우수가 온천천과 만나 온천천 내의 수위 상승에 기여하는 모습을 확인할 수 있으며 산지지역의 침수심이 점점 높아지는 것을 볼 수 있다. 이는 다시 말하면 시가지 지역의 침수심이 상대적으로 낮다는 것을 의미하는데 이러한 현상의 원인으로는 시가지 지역에 분포하고 있는 집수구를 통해 상당량의 우

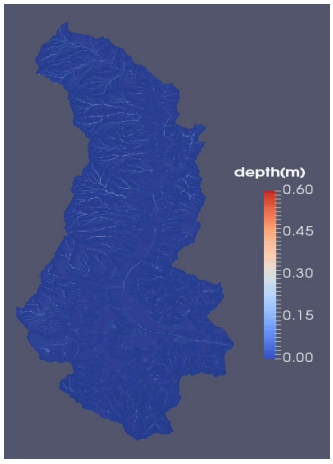
수가 배수된 것으로 판단된다. 시가지 부분의 침수는 강우 발생 약 2시간 30분 후부터 10cm정도의 침수심을 발생시키는 것으로 모의 되었으며 이는 점진적으로 증가하여 15시 40분경에는 최대 침수심이 30cm에 근접하는 것을 확인할 수 있다. 이후 강우강도가 약해짐에 따라 침수 면적은 산지와 시가지 모두에서 점진적으로 줄어들었으나 모의 종료시간인 16시까지 온천천 유역 인근에 저류된 우수는 전부 배수되지 않는 것으로 모의 되었다. 이는 강우에 의해 발생한 지표면 흐름이 지형의 고도에 따라 점차 낮은 지역으로 흘러내렸으며 시가지 지역을 통과하며 일부는 도로 위에 분포하고 있는 집수구를 통해 하수관망을 통해 유하하고 일부는 온천천의 유출에 기여를 하는 과정에서 하수관망과 온천천의 배수 능력이 한계치에 도달하여 시가지와 온천천에 유입된 우수를 빠르게 배수시키지 못한 것으로 판단된다. 즉, 시가지 지역과 온천천 내에 유입되는 유량 대비 배수 용량이 더 작았기 때문에 강우 강도가 감소하여도 이미 지상부에 저류된 유량을 배수 할 수 없어 침수면적의 변화는 상대적으로 적은 현상이 발생한 것으로 분석되었다.



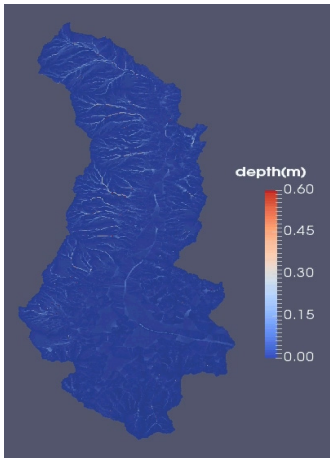
(a) 13:10



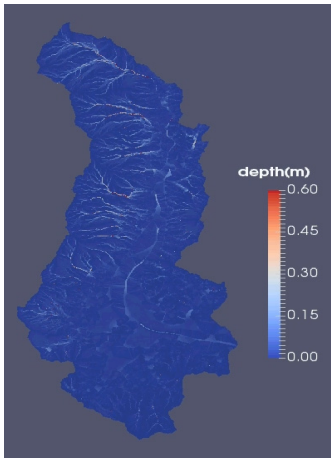
(b) 13:20



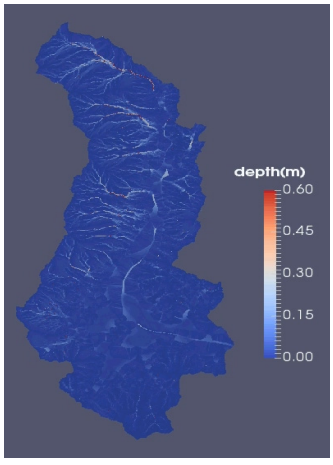
(c) 13:30



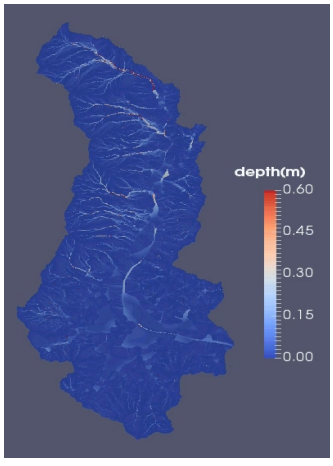
(d) 13:40



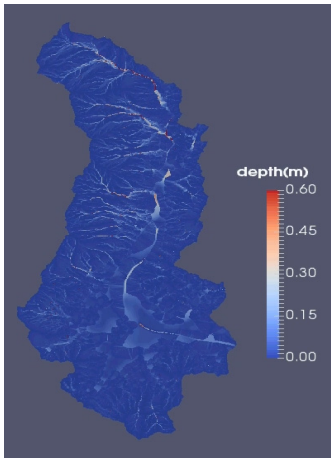
(e) 13:50



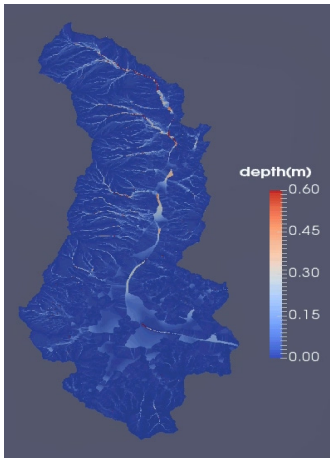
(f) 14:00



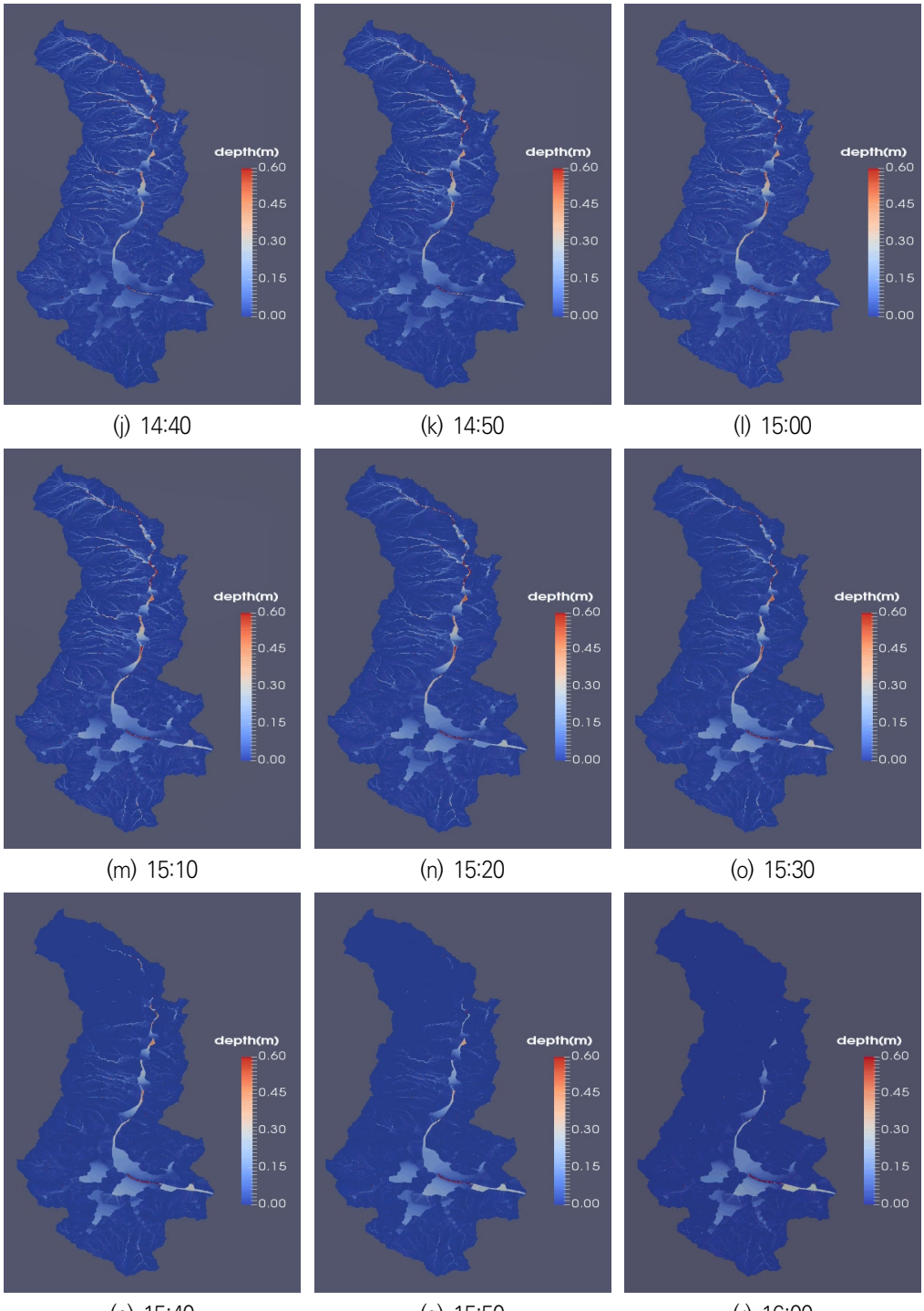
(g) 14:10



(h) 14:20



(i) 14:30



(j) 14:40 (k) 14:50 (l) 15:00

(m) 15:10 (n) 15:20 (o) 15:30

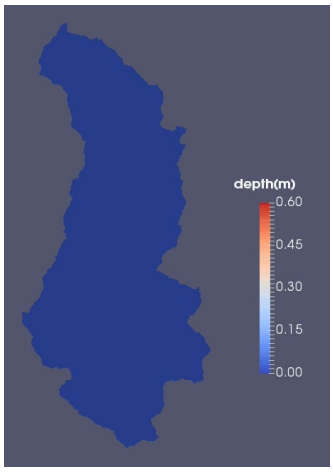
(p) 15:40 (q) 15:50 (r) 16:00

Figure 31 레이더 강수 자료 이용시 시간에 따른 침수심 변화 (10m)

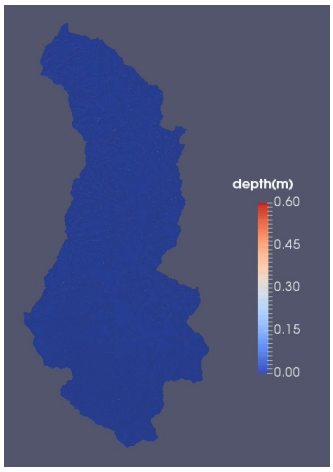
5.2.4 메쉬 세분화 모형

5.2.4.1 모의결과

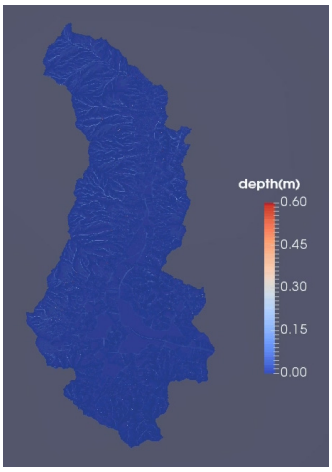
메쉬 세분화 모형에 레이더 자료를 이용한 침수 해석 모의 결과는 Figure 32과 같다. 본 연구에서는 도로가 분포되어 있는 지역은 5m×5m 크기의 격자로 분할하고 그 이외의 지역은 10m×10m 크기의 격자를 이용하여 모의를 수행하였다. 모의수행 결과 강우 발생 후 약 1시간 이내에는 도로가 분포되어 있는 격자의 수심이 주변 격자의 수심보다 낮음을 확인할 수 있으며, 이는 도로 위에 집수구를 분포시켜 하수관망으로의 유입이 일어나도록 모형을 설계한 본 연구의 의도가 잘 반영된 것이라 할 수 있다. 전반적인 침수의 전파 양상은 데카르트 좌표계 모형과 유사한 것으로 판단되나 시가지 영역(온천천 유역의 중앙 하단 부분)에서 메쉬세분화 모형의 해석 결과가 더 높은 침수심 값을 보여주는 것을 확인할 수 있다. 시가지 유역에서의 침수심이 더 높게 나타나는 이유는 지상부에 저류된 우수의 전체 체적이 더 높음을 의미한다. 따라서 대상 유역에 내린 강우의 절대량은 데카르트 좌표계 모형과 메쉬세분화 모형의 값이 동일하므로 이는 하수관거에서 지표면으로 역류한 유량이 더 많다는 것을 의미한다. 이는 강우 유출이 시작되는 산지 유역 도로의 분포 형태를 메쉬세분화 모형이 더욱 잘 묘사하였기 때문에 산지지역에서 도로 위의 집수구에 의해 하수관망으로 유입된 유량이 데카르트 좌표계 모형보다 메쉬세분화 모형이 더 많음을 의미한다. 따라서 고도가 높은 지역에서 유입된 유량이 시가지 지역이 분포되어 있는 저지대 하수관망의 압력 상승을 유발하여 하수관거에서 지표면으로의 역류량을 증대시켰기 때문으로 판단된다.



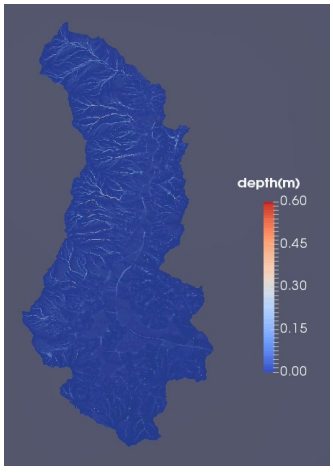
(a) 13:10



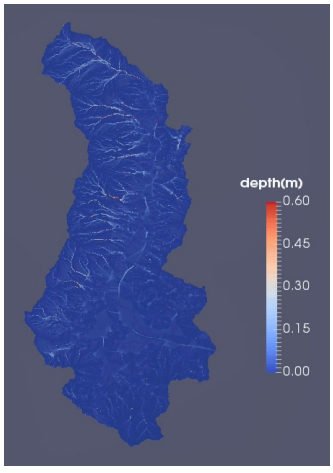
(b) 13:20



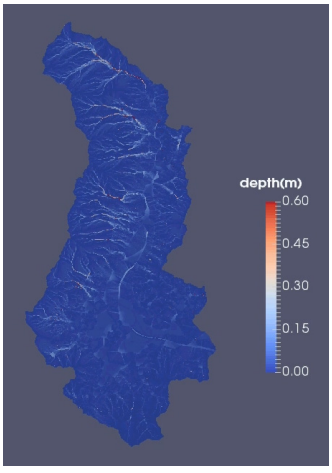
(c) 13:30



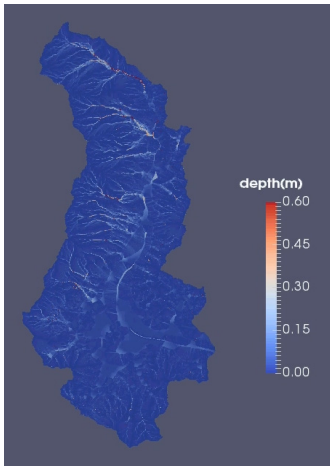
(d) 13:40



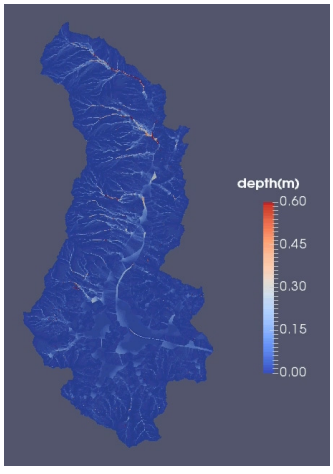
(e) 13:50



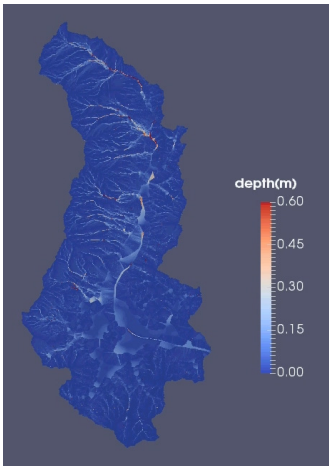
(f) 14:00



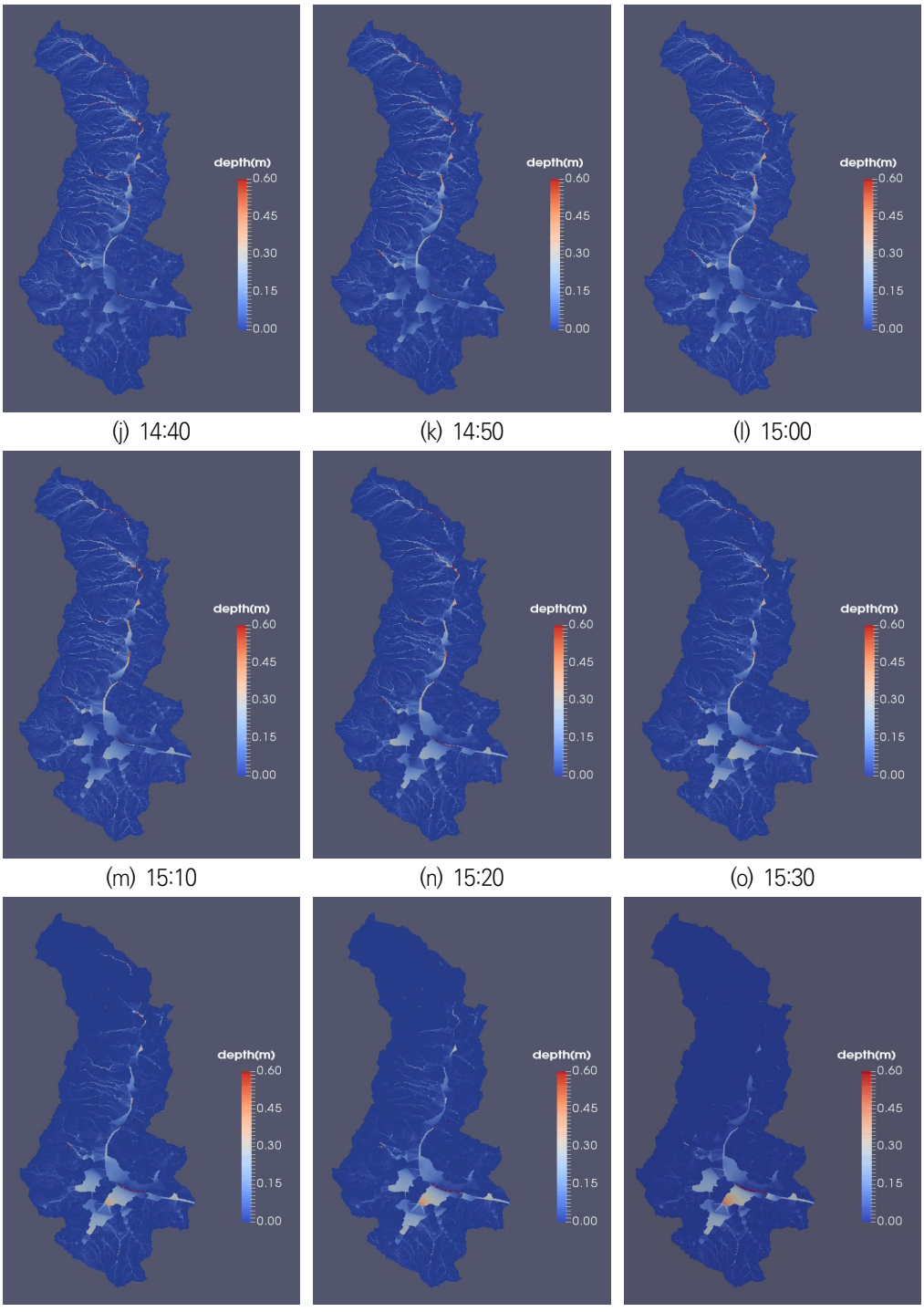
(g) 14:10



(h) 14:20



(i) 14:30



(j) 14:40 (k) 14:50 (l) 15:00

(m) 15:10 (n) 15:20 (o) 15:30

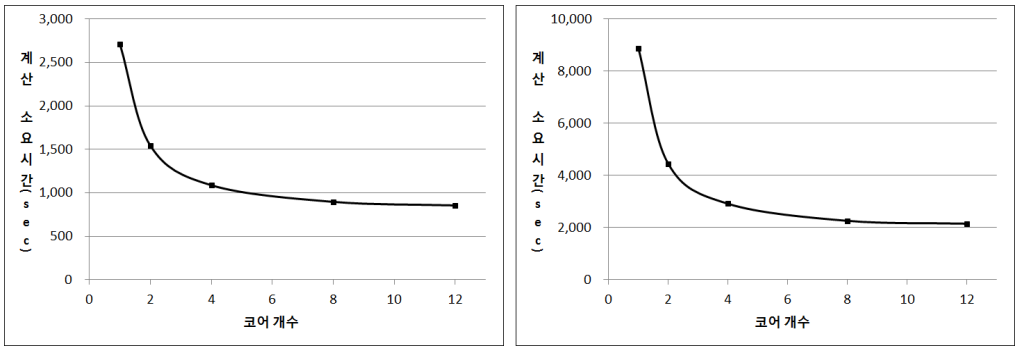
(p) 15:40 (q) 15:50 (r) 16:00

Figure 32 레이더 강수 자료 이용시 시간에 따른 침수면적의 변화 (ARM)

5.3 침수 해석 모의 결과 검증 및 비교

5.3.1 계산 소요시간의 비교

본 연구에서는 부산시 해운대구에 위치하고 있는 APEC 기후센터(APCC)의 High Performance Computer(HPC)를 이용하여 도시유역의 실시간 침수해석 시스템 개발을 위한 수치해석 모형을 개발하여 모의를 수행하였다. 모의에 수행된 HPC는 Intel Xeon X5690 CPU가 장착되어 있으며 클럭 수는 3.46GHz이다. 한 개의 CPU에 장착되어 있는 코어의 수는 각 12개 이며 총 계산 노드 수는 104개, 전체 CPU 개수는 208개로서 총 1,248개의 노드를 가지고 있다. 본 연구에서는 한 개의 노드에 장착되어 있는 12개의 코어에서 OPenMP 기반의 병렬 계산이 가능하도록 모형을 설계하였다. 각 모형별 계산에 이용된 코어의 개수에 따른 계산 속도의 변화는 Figure 33에서와 같다. 기본적으로 데카르트 좌표계 모형에서 사용된 최소 격자의 크기가 메쉬세분화 모형보다 크기 때문에 수치모의에 필요한 Δt가 클 뿐만 아니라 유역을 포현하는데 이용된 전체 격자의 개수도 적기 때문에 모의에 수행된 시간이 메쉬세분화 모형보다 짧았다.



(a) 데카르트 좌표계 모형 (b) 메쉬세분화 모형

Figure 33 모형별 이용된 코어의 개수에 따른 계산시간 변화

Table 5에서는 지금까지 수행된 수치해석 기법에 따른 해석격자의 개수와 최대 · 최소 격자의 크기, 계산 시간 간격, 집수구의 개수, 실제시간 3시간 모의에 소요된 계산시간의 비교를 계산에 사용된 코어의 개수에 대하여 나타내었다. 기본 적인 수치해석 조건에 관해서는 메쉬세분화 모형에서 이용된 전체 격자의 개수는 데카르트 모형에서 쓰인 격자의 개수보다 약 1.62배 많았으며 계산 시간 간격은 2/3배 짧았다. 또한

도로위에 분포되어 있는 집수구를 표현하기 위해 형성된 지점의 개수는 메쉬세분화 모형이 약 3배 가량 많았다.

계산에 이용된 코어의 개수에 따른 계산 시간의 변화에 대해서 살펴보면, 데카르트 좌표계 모형을 1개의 코어를 이용하여 계산한 경우 3시간 모의에 소요된 시간은 2,710초(약 45분) 이었으며 2개의 코어를 사용한 경우는 1,542초(약 26분)가 소요되었다. 그 후 점진적으로 코어의 개수를 늘려 계산 해 본 결과 총 12개의 코어를 사용하는 경우 3시간 계산에 856초(약 14분)가 소요되었다. 이는 1개의 코어를 이용하는 것 대비 계산 시간이 약 3.2배 빠른 계산 속도의 향상을 의미하며, 실시간(3시간) 대비 약 12.9배 빠른 계산 속도로써 166분의 리드타임을 확보 할 수 있는 계산 속도를 의미한다.

메쉬세분화 모형의 경우 1개의 코어를 이용하여 계산을 하는 경우 전체 계산에 8,877초(약 148분)가 소요되었으며, 2개의 코어를 사용하는 경우에는 4,447초(약 74분)으로 약 2배의 계산속도 향상을 확인할 수 있었다. 또한 총 12개의 코어를 사용하여 계산을 수행하는 경우에는 2,152(약 36분)이 소요되어 1개의 코어를 사용한 경우 대비 약 4.1배의 계산속도 향상을 확인할 수 있었다. 총 12개의 코어를 이용하여 계산을 수행하는 경우 실시간(3시간) 대비 약 5배 빠른 계산 속도로써 144분의 리드타임을 확보 할 수 있는 계산 속도를 의미한다.

Table 5 침수해석 조건 및 결과 비교

구분		① 데카르트 좌표계 모형	② 메쉬 세분화 모형	비율 (②/①)
모의 면적		$55.6km^2$		1.0
격자 개수		556,009	899,575	1.62
최대격자 크기(m)		10	10	1
최소격자 크기(m)		10	5	0.5
계산 간격 (Δt)		0.3	0.2	0.67
집수구 개수		114,522	353,878	3.09
3시간 모의 소요시간(초)	1 core	2,710	8,877	3.28
	2 core	1,542	4,447	2.88
	4 core	1,088	2,917	2.68
	8 core	897	2,263	2.52
	12 core	856	2,152	2.51

5.3.2 해석 결과의 검증 및 비교

침수해석에 이용된 모형의 검증을 위해서는 당시 침수 피해가 발생한 지역의 침수 범위와 최대 침수심을 관측한 자료를 이용하는 것이 가장 신뢰도 높은 방법이라 할 수 있으나, 도시침수의 특성상 관측이 쉽지 않을 뿐만 아니라 관측데이터가 있다 하더라도 외부 공개가 허용되지 않는 경우가 많아 부득이하게 당시 인터넷에 공개된 자료를 이용하여 모형의 검증을 수행하였다. Figure 34에는 침수 발생당시 언론과 사회관계망(SNS)등에 보도된 자료를 취합하고 위치가 확인 가능한 사진만을 선택하여 비교 검증을 수행한 결과를 보여준다.

Figure 34에서 볼 수 있듯이 모형의 해석 결과 데카르트 좌표계 모형과 메쉬세분화 모형 모두 정확도 측면에서는 만족할만한 결과를 보여주었다. 모형의 침수해석 결과 메쉬세분화 모형이 도로 위의 집수구를 더욱 적절하게 표현할 수 있기 때문에 저지대 침수에 기여하는 하수관망으로부터의 지표면으로의 역류를 보다 잘 모의 하는 것으로 나타났다. 또한 실시간 침수 해석 시스템에서 가장 중요하다고 할 수 있는 리드타임 확보에 있어서 3시간(180분)을 예측하는 경우 12개의 코어를 이용하는 경우 데카르트 모형은 166분(모의 수행시간 14분), 메쉬세분화 모형은 144분(모의 수행시간 36분)을 확보할 수 있어 데카르트 좌표계모형과 메쉬세분화 모형의 소요시간에 있어서 약 18분의 시간차이를 보여주었다.

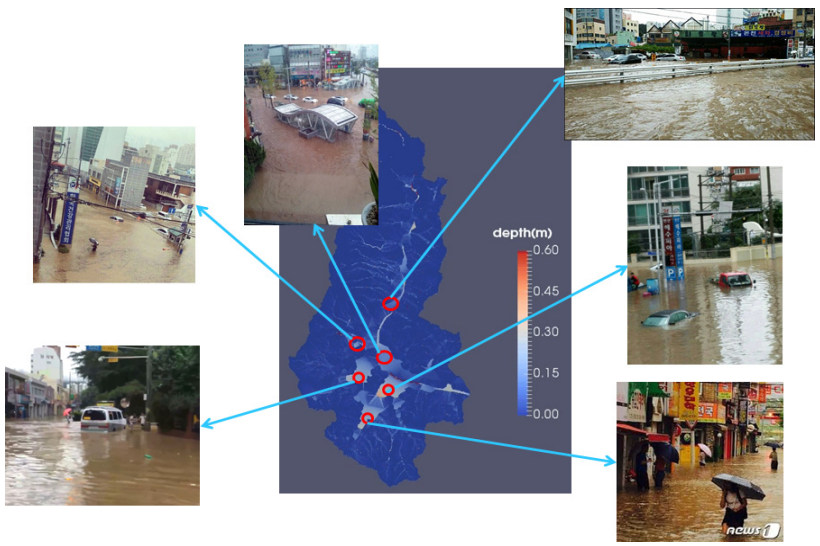


Figure 34 해석 결과의 검증

데카르트 좌표계 모형의 장점으로는 메쉬세분화 모형보다 더 빠르게 계산수행이 가능하여 리드타임 확보에 유리한 점이 있으며, 메쉬세분화 모형은 데카르트 좌표계 모형보다 계산 시간이 조금 더 소요되는 단점이 있으나 도로와 건물등과 같은 지표면의 위의 인공 구조물을 표현하는데 유리하므로 보다 자세하고 정확한 침수 예측 정보를 생산할 수 있다는 장점을 가진다. 따라서 본 연구에서 개발된 데카르트 좌표계 모형과 메쉬세분화 모형이 현업에 적용될 경우 두 모형 모두 모의 결과 침수가 예측 된다면 사전에 침수 우려 영역에 대한 도로 봉쇄와 거주민 대피 경고 안내 등과 같은 사전 대비책을 수행하기 위한 리드타임을 확보 할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론 및 토론

6.1 결론

최근 급격한 기후변화로 인하여 도시유역의 침수 피해가 급격히 증가하고 있으며 본 연구에서는 이러한 피해를 저감하기 위한 비구조적 대책의 일환으로 원격탐사 기법 기반의 실시간 침수 예측 시스템 개발에 관한 기초연구를 수행하였다. 실시간으로 제공되는 강수관측 데이터를 이용하여 미래의 강수를 예측하고 예측된 강수데이터를 이용하여 앞으로 발생 가능한 침수에 대한 예측을 할 수 있다면 효과적으로 재난에 대응하여 그 피해를 상당부분 줄일 수 있다. 이러한 실시간 침수 해석 시스템을 개발하기 위해서는 먼저 강수예측 기술이 선행되어야 하겠으나 본 연구에서는 강수예측 기술은 논외로 하고 관측된 레이저 자료를 예측자료로 가정한 후 도시유역 침수 해석 모형에 관한 연구만을 수행하였다.

기존에 수행된 대부분의 침수 예측 관련 연구는 대부분 유역의 수문학적 인자를 효과적이고 효율적으로 산정하거나 침수해석에 소요되는 시간을 단축하기 위하여 대상유역의 해석에 필요한 입력 자료를 간소화 하는 방법 또는 계산에 소요되는 시간에 대한 고려 없이 정확도를 향상시키기 위한 연구가 대부분이었다. 그러나 실시간 침수 해석 시스템에서 가장 중요한 요소는 적절한 정확도와 충분한 리드타임을 확보할 수 있는 계산 시간을 결정하는 것이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 적절한 계산의 정확도를 담보할 수 있으며 충분한 리드타임을 확보할 수 있도록 계산에 소요되는 시간을 단축시키기 위한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 도시유역의 침수해석에 이용되는 침수해석 기법을 1) 2차원 데카르트 좌표계 모형, 2) 2차원 일반 곡선 좌표계 모형, 3) 2차원 다격형 격자를 이용한 기법, 4) 2차원 메쉬세분화 기법 그리고 5) 1차원 하수관망 해석 시스템 등으로 구분하여 각 기법에서 이용되는 지배방정식과 차분화 기법 등에 대하여 알아보았다.

데카르트 좌표계를 이용한 수치해석 기법은 일반적으로 얻을 수 있는 DEM자료를 직접 이용하여 입력 자료를 구축할 수 있다는 장점이 있으나 도시유역의 대부분을 차지하고 있는 인공구조물을 표현하기 위해서는 격자를 상당히 작은 수준으로 분할하여야 하므로 전체 계산에 소요되는 시간이 과도하게 소요될 수 있다는 단점이 있다.

곡선좌표를 이용한 수치해석 기법은 도로나 건물 등과 같은 인공구물의 설치 방향을 기준으로 데카르트 좌표계를 회전시켜 격자를 구성할 수 있으므로 상대적으로 큰 격자를 이용하여 세밀한 지형의 묘사가 가능하다는 장점이 있으나 도시유역에 분포하고 있는 도로의 분포 방향이 모두 일정한 것이 아니므로 표현 할 수 있는 도로의 개수에 제한이 생긴다.

다각형을 이용한 수치해석 기법은 상기에 언급된 두 가지 수치해석 기법에 비하여 상대적으로 쉽게 지형을 표현할 수 있다는 장점을 가지나 모형의 수행을 위한 지형자료를 구축하기 위해 소요되는 시간이 과도할 뿐만 아니라 입력 자료를 구축하는 각 연구자들의 주관에 따라서 형태가 달라질 수 있다는 단점이 있고 일관된 지형을 표현 할 수 있는 격자의 개수를 임으로 조정하는 것이 거의 불가능하다.

메쉬세분화 기법은 사용자의 필요에 따라 격자의 해상도를 다양하게 변화 시킬 수 있어 계산용량을 줄일 수 있다는 장점이 있으나 모델 구축이 상대적으로 복잡할 뿐만 아니라 적절한 격자크기와 정확도를 확보하기 위해서는 다양한 테스트가 필요하다는 단점이 있다.

1차원 하수관망 해석 모형은 Pressimann-slot 개념을 이용하여 1차원 연속방정식과 운동량 방정식을 지배방정식으로 이용하였으며 지상부의 도로위에 분포하고 있는 집수구의 수심과 하수관거의 각 격자간의 피에조 수위를 이용하여 유량교환이 일어날 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 지형자료의 구축이 편리한 2차원 데카르트 좌표계모형과 자세한 지형의 표현이 가능한 메쉬세분화 기법을 적용한 방식을 선택하여 1차원 하수관망 해석 모형과의 결합을 통한 모형을 개발하였다. 개발된 각 모형은 2014년 8월 25일 부산시 온천천 유역에 침수 피해를 발생시킨 집중호우에 적용하여 실시간 침수해석 시스템 개발에 적합한 모형과 기법을 선정하고자 비교 모의를 수행하였다. 데카르트 좌표계는 $10m \times 10m$ 크기의 격자를 이용하였으며, 메쉬세분화 모형은 $10m \times 10m$의 격자를 기본으로 하여 도로가 포함된 격자는 $5m \times 5m$ 크기의 격자를 이용하였다. 모형의 입력자료로는 $1km \times 1km$의 공간 해상도와 10분의 시간 해상도를 가지는 구덕산 레이더 자료가 이용되었다.

데카르트 좌표계 모형과 메쉬 세분화 모형의 비교 모의 수행결과 최대 침수심 결

과 값에서는 두 모형에서 큰 차이를 보이지 않았으나 침수의 발생 양상에 있어서는 메쉬세분화 모형이 보다 실제와 유사한 결과를 보여주었다. 또한 실시간 침수예측 시스템에서 가장 중요하다고 할 수 있는 충분한 리드타임의 확보 측면에서는 데카르트 좌표계 모형의 경우가 3시간 예측에 14분이 소요되어 36분이 소요되는 메쉬세분화 기법과 큰 차이를 보이지는 않았으나 리드타임 확보 측면에서는 데카르트 좌표계 모형이 더 유리한 것으로 확인되었다. 예측 계산에 소요되는 시간의 차이는 전체 격자 개수뿐만 아니라 메쉬의 크기에 따라 결정되는 계산 시간 간격에서 기인한 것으로 분석되었다.

6.2 연구 활용 방안

최근 급격한 기후변화로 인하여 전 세계적가 경험하고 있는 이상기후 현상은 지금까지 경험해 보지 못한 극한 강도의 강우 발생을 유발하고 있다. 이러한 극한 강도의 강우로 인한 홍수와 침수 등과 같은 피해가 증가하고 있으며 이를 사전에 예방하기 위한 노력이 필요하다. 또한 이러한 홍수나 침수 피해가 도시유역에 발생할 거주지와 지하공간의 침수 등과 같은 직접적 피해와 더불어 사회 인프라 시스템(교통, 통신 시설 등) 마비와 수인성 질병의 유행등과 같은 이차 피해가 발생할 수 있으므로 침수로 인한 직·간접적 피해는 극심한 사회·경제적 혼란을 유발하므로 이를 사전에 예방하기 위한 적극적 노력이 시급한 상황이다.

침수피해를 예방하기 위한 방법으로는 수리 구조물의 설치와 보강을 통해 강우 발생으로 인한 범람이나 침수 피해를 원천적으로 예방하는 구조적 대책과 침수 피해 발생이 예측되는 경우 사전에 그 정보를 인지하여 위험구역 통제와 피난 경로 안내 등과 같은 정보를 거주민들에게 제공함으로써 피해를 최소화 시킬 수 있는 비구조적 대책으로 구분할 수 있다. 구조적 대책의 경우 피해를 원천적으로 예방할 수 있다는 장점을 가지는 반면 수리 구조물 설계와 설치에 소요되는 시간적·예산적 부담이 과중하여 급변하는 기후변화에 대응하기에는 무리가 따른다. 따라서 본 연구에서는 피해저감 효과를 정량적으로 판단하기 어렵다는 단점을 가지나 발생 가능한 침수에 대해서 그 피해를 최소화 할 수 있다는 장점을 가지는 비구조적 대책의 일환으로 원격탐사기반 실시간 침수해석 시스템 개발에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 도시유역 지표면 침수 해석에 활용될 수 있는 침수 해석 기법을 데카르트 좌표계모형, 일반곡선 좌표계 모형, 다각형 격자를 사용한 모형 등에 대하여 알아보고 각각의 장단점에 대하여 알아보았다. 또한 데카르트 좌표계 모형의 단점을 보완할 수 있는 메쉬세분화 기법에 대하여 알아보고 두 가지 모형을 1차원 하수관망 해석 모형과 결합한 도시침수 해석 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 2014년 8월 25일에 부산 경남 지역에 극심한 침수 피해를 유발한 강우 이벤트에 적용하여 관측 레이더 자료를 예측된 강수정보로 가정하여 실시간 침수해석 시스템 개발의 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 데카르트 좌표계 모형과 메쉬세분화 모형 모두 만족할만한 침수 예측 결과를 보여주었으며 데카르트 좌표계 모형은 메쉬세분화 모형 대비 짧은 계산시간으로 인하여 보다 긴 리드타임 확보에 유리함을 알 수 있었으며 메쉬세분화 모형은 데카르트 좌표계 모형 대비 계산에 소요되는 시간은 조금 더 길었으나 도시유역에 위치하고 있는 지형지물을 보다 자세히 묘사하는데 유리함을 알 수 있었다. 또한 3시간 예측에 소요되는 시간 데카르트 모형의 경우 약 14분, 메쉬세분화 모형은 36분 이었으며, 이는 각각 166분과 144분의 리드타임이 확보 가능함을 의미한다.

향후 본 연구에서 개발된 원격탐사 기법 기반 실시간 침수 예측 시스템이 현업이 적용될 경우 침수 발생 위치와 정보를 사전에 인지하여 도로 통제, 위험 경보, 피난 알람등과 같은 대응책을 선제 적용함으로써 침수로 인한 인명피해와 재산상의 피해를 상당부분 저감할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCE

국민안전처, 2014: 재해연보, 발간등록번호 11-1750000-000031-10

_____, 2015: 재해연보, 발간등록번호 11-1750000-000031-10

부산광역시, 2004: 온천천 하천정비 기본계획

소방방재청, 2006: 재해연보, 발간등록번호 11-1660000-000032-10.

_____, 2010: 재해연보, 발간등록번호 11-1660000-000032-10.

_____, 2011: 재해연보, 발간등록번호 11-1660000-000032-10.

_____, 2012: 재해연보, 발간등록번호 11-1660000-000032-10

류재나, 김태현, 김민아, 2015: 15. 기본연구보고서 2015-15: 기후변화를 고려한 환경인프라-사고대응체계 개선방안 연구. 기본연구보고서, 2015(단일호), 1-296.

高橋保, 中川一, 東山基, 1989: 洪水氾濫水の動態を考慮した避難システムの評価に関する研究. 京都大学防災研究所年報, (32), 757-780.

井上和自, 戸田圭一, 栗原哲, 武田誠, 谷野知伸, 1996:洪水ハザードマップの作成についての一考察 , 京都大学防災研究所年報 , 第 39 号 B-2 , 459-482

高棹琢馬, 椎葉充晴, 堀智晴, 1995: 水害避難行動のミクロモデルシミュレーションと制御に関する研究. 土木学会論文集, (509), 15-25.

川池健司, 2002: 都市における氾濫解析法とその耐水性評価への応用に関する研究 (Doctoral dissertation, University of Kyoto).

Amaguchi, H., Kawamura, A., Olsson, J., and T. Takasaki, 2012: Development and testing of a distributed urban storm runoff event model with a vector-based catchment delineation. Journal of Hydrology, 420, 205-215.

Andjelkovic, A.I., 2001: Guidelines on Non-structural Measures in Urban Flood Management. International Hydrological Programm

Aronica, G., Hankin, B., and K. Beven, 1998: Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data. Advances in Water Resources, 22(4), 349-365.

_____, Bates, P.D., and M.S. Horritt, 2002: Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE. Hydrological Processes, 16(10), 2001-2016.

Bates, P.D., and A.P.J. De Roo, 2000: A simple raster-based model for flood inundation simulation. Journal of hydrology, 236(1), 54-77.

_____, Horritt, M.S., Aronica, G., and K. Beven, 2004: Bayesian updating of flood inundation likelihoods conditioned on flood extent data. Hydrological Processes, 18(17), 3347-3370.

Berger, M.J., and C. Phillip, 1989: Local adaptive mesh refinement for shock hydrodynamics. Journal of computational Physics, 82(1) 64-84.

Chang, T.J., Wang, C.H., and A.S. Chen, 2015: A novel approach to model dynamic flow interactions between storm sewer system and overland surface for different land covers in urban areas. Journal of Hydrology, 524, 662-679.

Chaudhry, M.H., 1979: Applied hydraulic transients (No. 627 C4). New York: Van Nostrand Reinhold.

Cho, W.H., Han, K.Y., Hwang, T.J., and A.L. Son, 2011: 2-d inundation analysis in urban area considering building and road. Journal of korean society of hazard mitigation, 11(5), 159-168.

Choi, K.S., and J.E. Ball, 2002: Parameter estimation for urban runoff modelling. Urban water, 4(1), 31-41.

Cunge, J.A., and B. Mazaudou, 1984: Mathematical modelling of complex surcharge systems: Difficulties in computation and simulation of physical situations. In Int. Conf. on Urban Storm Drainage, 363-374.

Genovese, E., 2006: A methodological approach to land use-based flood damage assessment in urban areas: Prague case study. Technical EUR Reports, EUR, 22497.

Haraguchi, M., and U. Lall, 2015: Flood risks and impacts: A case study of Thailand's floods in 2011 and research questions for supply chain decision making. International Journal of Disaster Risk Reduction, 14, 256-272.

Horritt, M.S., and P.D. Bates, 2002: Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. Journal of hydrology, 268(1), 87-99.

Hsu, M.H., Chen, S.H., and T.J. Chang, 2000: Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system. Journal of Hydrology, 234(1), 21-37.

Inoue, K., 1976: Study on Its Application to Water Engineering and Numerical Analysis of Open Channel Unsteady Flow (Doctoral dissertation, University of Kyoto).

Jang, S., Park, K., and S. Yoon, 2016: A Multi-sensor basedVery Short-term Rainfall Forecasting using Radar and Satellite Data-A Case Study of the Busan and

Gyeongnam Extreme Rainfall in August, 2014. Korean Journal of Remote Sensing, 32(2), 155-169.

Joo, J.G., Yang, J.M., and J.H. Kim, 2013: Assessment of inundation risk degree for urban areas. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 13(1), 129-136.

Jun, B.H., 1985: Dynamic Wave Simulation of Unsteady Open Channel and Surcharge Flows in Sewer Networks (saint-Venant Equations, Four-Point Implicit Finite Difference, Storm Sewer Drainage, Urban Hydrology) (Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign).

Kim, J., Park, M., Lee, J., and H. Jun, 2012: An evaluation of inundation risk of urban watershed using data envelopment analysis. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 12(4), 179-186.

Kim, S.W., Chun, K.W., Kim, K.N., Kim, M.S., Kim, M.S., Lee, S.H., and J.I Seo, 2013: Significance and future direction for designation and management of landslide-prone zones. Journal of Forest and Environmental Science, 29(3), 237-248.

Knabb, R., Rhome, J., and D. Brown, 2005: Hurricane Katrina: August 23-30, 2005 (tropical cyclone report). United States National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA) National Weather Service. National Hurricane Center.

Leandro, J., Schumann, A., and A. Pfister, 2016: A step towards considering the spatial heterogeneity of urban key features in urban hydrology flood modelling. Journal of Hydrology, 535, 356-365.

Lee, S.S, 2013: Study on development of integrated urban inundation model incorporating drainage systems, (Doctoral dissertation, University of Kyoto).

_____, Nakagawa, H., Kawaike, K., and H. Zhang, 2015: Urban inundation simulation considering road network and building configurations. Journal of Flood Risk Management.

Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S. B., and S. Djordjević, 2004: Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. Journal of Hydrology, 299(3), 284-299.

Noh, S.J., Lee, S.S., An, H.W., Kawaike, K., and H. Nakagawa, 2016: Ensemble urban flood simulation in comparison with laboratory-scale experiments: Impact of interaction models for manhole, sewer pipe, -and surface flow. Advances in Water Resources, 97, 25-37.

Pappenberger, F., Beven, K.J., Hunter, N.M., Bates, P.D., Gouweleeuw, B.T., Thielen, J., and A.P.J. De Roo, 2005: Cascading model uncertainty from medium range weather

forecasts (10 days) through a rainfall-runoff model to flood inundation predictions within the European Flood Forecasting System (EFFS). Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 9(4), 381-393.

René, J.R., Djordjević, S., Butler, D., Madsen, H., and O. Mark, 2014: Assessing the potential for real-time urban flood forecasting based on a worldwide survey on data availability. Urban Water Journal, 11(7), 573-583.

Romanowicz, R., and K. Beven, 1998: Dynamic real-time prediction of flood inundation probabilities. Hydrological Sciences Journal, 43(2), 181-196.

_____, Beven, K.J., and J. Tawn, 1996: 10 Bayesian Calibration of Flood Inundation Models.

Saksena, S., and V. Merwade, 2015: Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. Journal of Hydrology, 530, 180-194.

Shin, D.S., Park, J.B., Shon, T.S., and D.J. Jo, 2012: Preventive measures assessment to prevent flooding complex underground space through hydraulic model experiment. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 12(4), 59-65.

Son, A.L., Kim, B., and K.Y. Han, 2015: A Study on Prediction of Inundation Area considering Road Network in Urban Area. Journal of The Korean Society of Civil Engineers, 35(2), 307-318.

Song, Y.H., Park, M.J., and J.H. Lee, 2016: Analysis on the Effects of Inundation Mitigation according to Revise the Border for Urban Drainage System. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 16(1), 213-220.

Vieux, B.E., Bedient, P.B., and E. Mazroi, 2005: Real-time urban runoff simulation using radar rainfall and physics-based distributed modeling for site-specific forecasts. In 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen/Denmark (pp. 21-26).

Yoo, D.G., Choi, H.S., and J.H. Kim, 2015: Applications of EPA-SWMM and FHWA Hydraulic Toolbox to Analyze Cause of Urban Inundation. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 15(1), 169-180.

Yoon, S.S., Bae, D.H., and Y. Choi, 2014: Urban inundation forecasting using predicted radar rainfall: case study. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 14(3), 117-126.

Young, P.C., 2002: Advances in real-time flood forecasting. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 360(1796), 1433-1450.

Yu, D., and T.J. Coulthard, 2015: Evaluating the importance of catchment hydrological parameters for urban surface water flood modelling using a simple hydro-inundation model. Journal of Hydrology, 524, 385-400.

Zhang, S., and B. Pan, 2014: An urban storm-inundation simulation method based on GIS. Journal of Hydrology, 517, 260-268.

_____, Wang, T., and B. Zhao, 2014: Calculation and visualization of flood inundation based on a topographic triangle network. Journal of Hydrology, 509, 406-415.

연구보고서 2016-24

원격탐사기법 기반 강우추정 데이터를 이용한
실시간 도시유역 침수 예측 시스템 개발

Development of Real-time Urban Inundation Prediction System using Estimated Precipitation data based on Remote Sensing Technology

이승수

APEC CLIMATE CENTER

APEC 기후센터
48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12
Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

www.apcc21.org

93550
9 791156 981756
ISBN 979-11-5698-175-6