Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 21(3) 2018, pp. 76-92 ISSN 1226-9719(Print)
https://doi.org/10.11108/kagis.2018.21.3.076 ISSN 2287-6952(Online)

강우자료와 연계한 도시 침수지역의 사전 영향예보*

금호준[1] · 김현일[1] · 한건연[1※]

Real-Time Forecast of Rainfall Impact on Urban Inundation*

Ho-Jun KEUM[1] · Hyun-Il KIM[1] · Kun-Yeun HAN[1※]

요 약

본 연구는 상습적으로 도시침수 피해를 입은 지역을 대상으로 도시 홍수 예·경보를 위한 강우 시나리오별 사전 침수면적 데이터베이스를 구축하고 강우강도에 따른 침수예상도를 작성하여 기상청 최대강우량 예보와 함께 홍수위험지역을 사전에 예보할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 데이터베이스 구축을 위하여 1D-2D 모형 구축을 실시하고 실제호우사상에 대한 검증을 완료한 다음 시나리오별 해석을 실시하였다. 2010년 9월 21일에 대상유역에 내린 강우사상에 대한 2D 해석 결과를 NDMS 자료와 비교 분석 하였다. NDMS 신고지점은 총 118지점에서 신고가 되었으며, 2D 침수해석 결과 82개 지점이 계산결과에 포함되었다. NDMS 신고 지점과 2D 침수해석 결과에 대하여 적합도를 계산한 결과 69.5%의 적합도로 분석되었다. 사전 침수 데이터베이스를 이용하여 침수예상도를 작성하였으며, 70㎜의 침수예상도의 경우 NDMS 신고 지점과 70.3%의 적합도를 가졌으며, 80㎜의 침수예상도의 경우 72.0%의 적합도를 가지는 것으로 분석되었다. 구축된 사전 침수면적 데이터베이스를 이용하여 기상예보와 함께 침수예상도 정보를 함께 제시할 수 있으며 침수 예·경보 시 선행시간을 확보할 수 있다.

주요어 : 도시홍수, 홍수 예·경보, SWMM, 침수예상도

ABSTRACT

This study aimed to establish database of rainfall inundation area by rainfall scenarios and conduct a real time prediction for urban flood mitigation. the data leaded model was developed for the mapping of inundated area with rainfall forecast data provided by korea meteorological agency. for the construction of data leaded model, 1d-2d modeling was applied to Gangnam area, where suffered from severe flooding event including

2018년 08월 20일 접수 Received on August 20, 2018 / 2018년 09월 11일 수정 Revised on September 11, 2018 / 2018년 09월 13일 심사완료 Accepted on September 13, 2018
* 본 연구는 환경부의 물관리 연구사업(18AWMP-B079625-05)에서 지원받았습니다.
1 경북대학교 건축, 토목, 환경, 에너지 공학부 Dept. of Civil, Environmental and Energy Engineering, Kyungpook National University
※ Corresponding Author E-mail : kshanj@knu.ac.kr

september, 2010. 1d-2d analysis result agree with observed in term of flood depth. flood area and flood occurring report which maintained by NDMS(national disaster management system). The fitness ratio of the NDMS reporting point and 2D flood analysis results was revealed to be 69.5%. Flood forecast chart was created using pre-flooding database. It was analyzed to have 70.3% of fitness in case of flood forecast chart of 70㎜, and 72.0% in case of 80㎜ flood forecast chart. Using the constructed pre-flood area database, it is possible to present flood forecast chart information with rainfall forecast, and it can be used to secure the leading time during flood predictions and warning.

KEYWORDS : Urban Flood, Flood Warning Services, SWMM, Forecast of Inundation Map

서 론

기후변화에 따라 전 세계적으로 태풍, 호우, 폭염 등 위험기상의 발생이 증가하고 있으며, 이로 인한 사회 · 경제적 피해도 증대되고 있다. 우리나라에서 최근 10년(2005~2014년)간 자연재해로 인해 발생한 피해액은 약 6조 9천억 원이며, 호우, 태풍, 대설 순으로 큰 피해가 발생하였다. 2011~2014년 기간 동안 우리나라에서 기상재해로 인한 연평균 재산 피해액은 약 5조 5천억 원으로 2001~2010년(약 2조 7천억 원) 대비 약 2배, 1991~2000년(약 7천억 원) 대비 약 7배 이상 증가하였다. 이는 현재 도시화로 인한 인구 밀집, 인구 고령화, 소득 불균형 등 사회구조변화로 재해에 대한 취약성이 증가하여 피해액이 증가한 것으로 보인다. 이로 인하여 호우로 인한 도시지역의 침수 재해 대응을 위한 효과적인 의사결정을 지원하기위한 도시홍수 예 · 경보 서비스에 대한 필요성이 증대되고 있다.

일반적으로 홍수피해를 줄이기 위한 방법으로는 하천제방이나 다목적 댐의 건설 등과 같은 구조적인 대책과 홍수 예 · 경보 시스템을 통한 시스템 운영과 같은 비구조적인 대책을 생각할 수 있다(Anderson and Burt, 1985). 다만, 도시지역의 경우 하천주변이 대부분 도로나 주택지로 이용되고 있어 구조적 대책보다 홍수 예 · 경보와 같은 비구조적 대책의 적용에 많은 관심을 기울이고 있는 추세이며, 국내에서도 이와 관련된 다양한 연구를 수행한 바 있다. Shin *et al.*(2007)은 부산시 온천천 유역을 대상으로 도시유출모형인 PC-SWMM(Storm Water Management Model)을 적용하고 유역이 해안도시임을 고려하여 조위영향을 고려하고 실시간 모니터링 시스템을 구축하여 모형의 적정 운영관리 방안을 평가한 바 있다. Bae *et al.*(2008)은 청계천 유역의 구조적 특수성을 고려하여 수문 열림과 저수호안의 산책로 침수를 홍수기준으로 설정하고, 이러한 기준을 바탕으로 강우, 수위, 수문 열림 및 산책로 침수 관측 자료를 기반으로 한 홍수예측모델의 구축방안을 제시한 바 있다. Oh *et al.*(2016)은 40분 내외의 집중시간을 가진 유역에 침수를 발생시키는 모든 강우량을 XP-SWMM 모형의 입력자료로 사용하여 침수면적을 GIS 데이터베이스로 구축하였으며 침수예 · 경보에 필요한 리딩타임을 줄이는 방안을 제시한 바 있다.

국외의 경우 현재 활용되고 있는 도시홍수예 · 경보시스템의 예를 살펴보면 Bedient *et al.*(2003)은 레이더 강우자료 기반의 시스템을 텍사스 휴스턴 의료지구에 대하여 구축하여 환자들의 긴급대피에 활용하고 있다. 레이더 강우자료를 활용하여 계측한 강우량을 수문모형의 입력자료로 활용하여 유역 내의 첨두홍수량을 예측하고, 이 홍수량이 임계치를 초과하면 대피경보를 발령하는 기본 구조를 가지고 있다. Hvidovre 시스템(Jensen *et al.* 2008)은 덴마

크의 22개 도시유역에 대하여 구축되었으며, 5분 단위의 레이더강우자료를 실시간으로 얻고, 이를 시뮬레이션 기반의 강우-침수면적 관계의 입력자료로 활용하여 침수면적을 얻는다. ESPADA시스템(Raymond *et al.* 2006)은 약 15만여 명의 인구가 거주하며 가을에 상습적인 홍수를 겪는 프랑스의 Nemes 지역에 대하여 구축되었으며, 레이더 강우자료와 10개의 지상강우 자료를 입력자료로 하는 실시간 수문모형을 활용하여 유량을 예측하고, 이를 기반으로 44개의 미리 정해 놓은 침수 시나리오 중 하나를 택하여 홍수경보를 발령한다. 우리나라의 경우, 국토교통부 하천운영과의 주관 하에 국가하천과 주요지천에 대하여 실시간으로 관측된 강우량과 첨단유량예측시스템을 활용하여 외수침수 위주의 홍수 예·경보를 실시하고 있으나(MOLIT, 2016), 서울을 비롯한 우리나라의 주요도시에서 침수모형을 기반으로 공식적으로 운영되는 예·경보시스템은 존재하지 않는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 다양한 강우 시나리오에 대해 사전에 모의된 침수면적 데이터를 활용하여 홍수위험지역의 예·경보를 위한 선생시간을 확보하여 기존의 침수모형 모의의 긴 수행시간을 극복할 수 있는 방법론을 제안하고자 한다. 사전 침수데이터베이스 구축을 위한 방법에서는 1시간 이내의 집중시간을 가진 유역에 침수를 발생시키는 가능한 모든 강우량의 범위를 10㎜ 간격으로 나누어 도시유출해석인 EPA-SWMM 5.1 모형의 입력자료로 활용하였으며, 모형의 해석 결과인 맨홀의 월류량을 2D 모형의 입력자료로 사용하여 분석을 실시하였고, 해석 결과를 ArcGIS를 이용하여 데이터베이스를 구축하였다. 제안한 방법론을 활용하면 침수를 발생시키는 강우량의 시간적 분포가 고려된 침수범위를 실시간 내수침수모의 없이도 침수구역 예측할 수 있어, 내수침수경보에 있어 충분한 선행예측 시간을 확보할 수 있다.

연구수행 방법

1. 연구개요

본 연구에서는 상습적으로 도시침수피해를 입은 지역에 대하여 도시홍수 예·경보를 위한 사전 침수면적 데이터베이스를 구축하여 기상청에서 예보하는 1시간 최대강우량을 내수침수 모의 없이 데이터베이스를 이용하여 도시지역의 홍수위험지역을 사전에 예측하려고 한다. 사전 침수면적 정보 데이터베이스를 구축하기 위해서 과거에 발생한 침수피해 자료를 이용하여 모형의 검·보정을 실시하고 이를 기초로 적절한 강우의 시나리오 구성을 실시하였다. 강우 시나리오는 1시간의 지속시간에 50㎜~100㎜까지 10㎜씩 증분 시켜서 강우의 시나리오를 구성하였다. 구성된 강우 시나리오의 시간분포는 국내 실무에서 많이 사용하고 있는 Huff 분포를 이용하였다. 현재 국내에서 수공구조물을 설계 시에는 첨두홍수량 산정을 위하여 Huff 3분위를 많이 이용하고 있으나, 도시침수 양상의 특성을 고려하기 위하여 하나의 특정 분위만 사용한 것이 아니라 전 분위별로 산정하였다. 도시지역의 내수침수 모의를 위하여 SWMM 모형과 2D 모형을 구축하였다. 대상 연구지역에 실제 침수가 발생한 2010년 9월 21일 호우사상을 이용하여 구축된 모형의 검증을 실시하였으며, 검증된 내수침수 모형에 입력값으로 강우 시나리오를 사용하여 사전 침수면적 데이터베이스를 구축하였다. 2010년에 내수침수로 조사된 NDMS 자료와 데이터베이스에서 구축된 사전 침수면적을 비교 하여 도시홍수 예·경보를 위한 적용성을 검토를 하였다. 그림 1은 본 연구의 흐름도이며 연구방법을 그림으로 나타내었다.

2. 강우조건별 시나리오 구성

도시홍수 예·경보 시스템을 위한 사전 침수면적 데이터베이스 구축 방법에서 강우의 시나리오 구성은 본 연구에서 중요한 요인 중 하나이다. 이는 기존에 이상기후로 인한 기상여건의 변화를 고려해야 한다. 그러나 집중호우, 강수량 증가, 역대 최장 장마 등 다양하게 변화하는 강

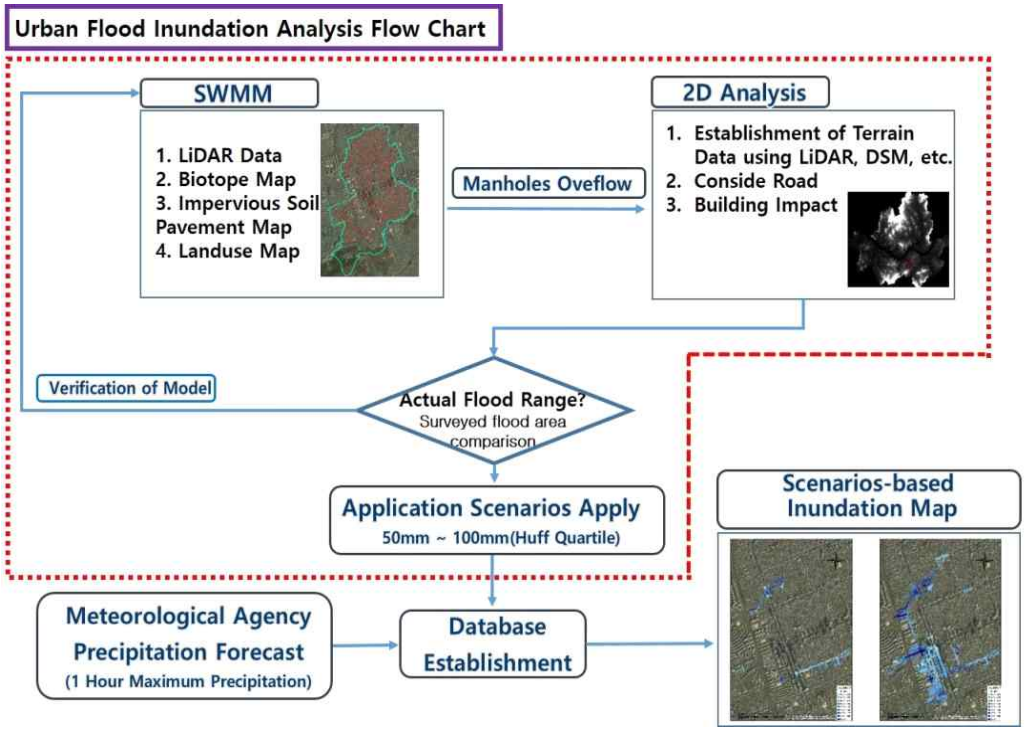


FIGURE. 1 Flow chart of the study

우량을 예측하기 쉽지 않다. 이에 강우량은 1시간 최대강우량으로 50㎜, 60㎜, 70㎜, 80㎜, 90㎜ 및 100㎜로 가정하여 구성하였다. 그리고 강우량을 시간분포 시켜 최종 강우의 시나리오를 구성하여야 한다. 강우의 시간적 분포는 합성의 형태로 나타내기에는 매우 어렵고 극한 조건을 가정하기 때문에 많은 학자들에 의해 여러 가지 방법이 개발되어 왔다. 확률강우량도 개선 및 보완 연구(MOLIT, 2011)에서는 이미 개발된 대부분의 방법들을 연도별로 분류하지 않고 방법별로 Mononobe, Alternating Block Method, Huff 4분위, Pilgrim & Cordery 방법 등 네 가지의 형태로 분류하였다. 이 중 Huff 4분위 방법은 강우계측기에 관측된 자료를 그대로 누가곡선을 이용하는 형태로 가장 많은 학자들에 의해 연구되어졌다. 일반적으로 여러 호우의 누가곡선을 평균하거나 지속시간의 제한 또는 강우크기의 제한을 두어 평균하는 것이다.

본 연구에서는 강우의 통계적 특성을 고려하여 강우량을 총 지속시간에 대하여 분포시킨 Huff의 4분위법을 적용하였다. Huff의 4분위법은 실제 호우사상을 근거로 유도되며 호우의 첨두 발생 위치와 상승부 및 감수부의 모양을 선택적으로 구성할 수 있다는 장점이 있다. 강우의 지속시간은 유역의 규모, 기상청에서 예보하는 1시간 최대강우량, 돌발강우대비 청계천 방재시스템 구축방안 등을 고려하여 도달시간을 1시간 이내로 고려하였다(SMFMC, 2005). 총 강우량 규모에 따라 10분 간격으로 10분~60분을 적용하였으며, 호우의 양상을 뚜렷이 나타낼 수 없기에 분위별로 분포 전부를 사용하여 각각의 특성을 고려하려 한다. 그림 2는 Huff의 1분위에서 4분위까지 50㎜~100㎜를 분포시킨 결과이다.

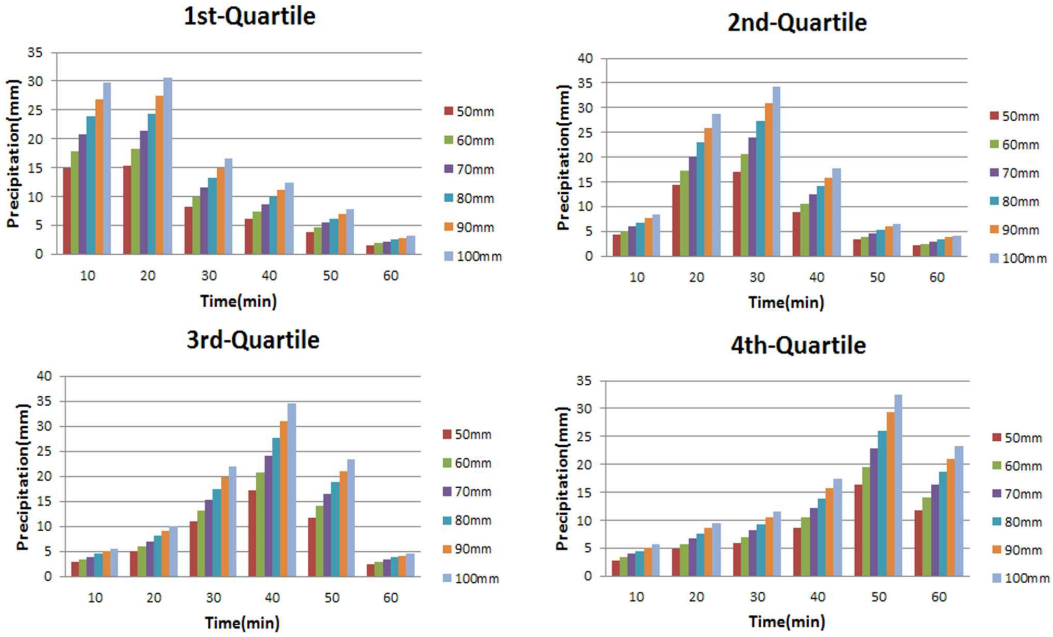


FIGURE. 2 Rainfall scenarios

3. 침수예상도 구축

현재 기상청에서 발표하는 기상예보는 예상 강수량으로써 시간당 최대강수량을 예보하고 있다. 이는 강수량을 직접 체감하기 어려워 도시 지역 내수침수로 인한 방재기관의 신속한 의사 결정에 도움이 되질 못하고 있다. 이를 사전에 방지하기 위하여 도시 홍수 예·경보 시스템을 위한 사전침수 데이터베이스를 구축하고자 한다. 강우시나리오는 50㎜~100㎜까지 10㎜씩 증분하고 Huff 1분위에서 4분위까지 달리하여

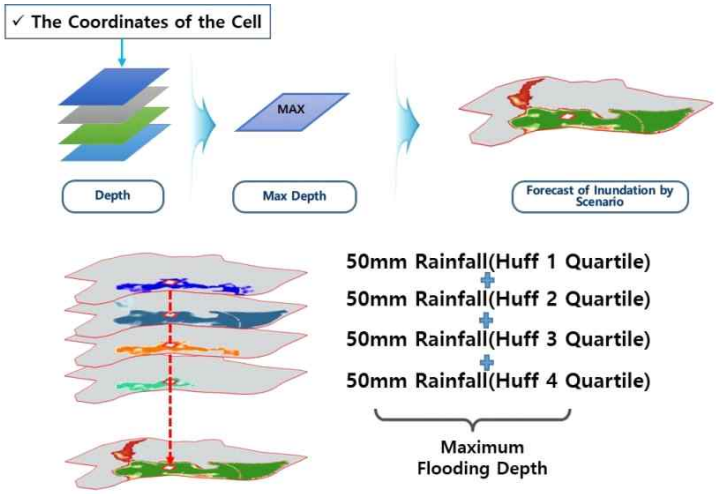


FIGURE. 3 Establishment process for inundation map

총 24개의 강우시나리오에 대하여 1D-2D 해석을 실시하여 사전 침수면적 데이터베이스를 구축하였다. 24개의 사전 침수면적 데이터베이스를 기반으로 강우량의 1분위에서 4분위 별 침수예상도를 최대 침수심만으로 이루어진 하나의 침수예상도로 재 작성하였다. 작성 방법으로는 먼저 각각의 시나리오별 맨홀의 월류량이 도심지에서 유량의 전파가 어디까지 이루어질지 모르는 상황이기에 100㎜ 시나리오 월류량을 기준으로 최대 범람 범위를 산정하여 도메인을 구성하였다. 구성된 도메인은 격자크기, 격자범위를 동일하게 구성하여 각 격자의 좌표 및 번호를 새롭게 지정한 다음 각 강우 시나리오별로 24번의 내수침수해석을 실시하였다. 그림 3에서 보여주듯이, 분석된 해석 결과를 ArcGIS를 이용하여 각 분위별로 동일한 위치의 침수심중에 최대 침수심만으로 이루어진 새로운 침수예상도를 작성하였다.

대상지역 적용 및 분석

1. 대상유역

서울시 배수구역은 총 16개의 배수구역으로 나눠지는데 한강의 지천 및 주요 배수체계별로 분할하여 강북에 10개 배수구역과 강남에 6개 배수구역이 있다. 이 16개의 배수구역들은 239개의소 배수분구로 나누어진다. 이번 연구의 대상유역은 반포배수구역에 속하며, 반포배수구역에는 반포1, 방배1, 동작 등 20개의 배수분구가 있다. 그 중 배수로 방류토구을 기준으로 하여 논현, 역삼, 서초3, 4, 5로 5개의 배수분구을 대상 배수구역으로 선정하였다. 5개 배수분구는 행정상으로 서초구와 강남구에 위치하고 있으며, 총면적은 739.21ha, 배수분구 최종 배수 말단부는 반포천을 거쳐 한강으로 유입되는 구역이다. 표1은 대상유역에 대한 상세정보를 나타내었다.

2. 1차원 도시유출해석

대상유역에서의 하수관망 시스템의 통수능을 초과한 월류량을 산정하기 위해서 SWMM을 구축하였다. 그림 4에서 보여주듯이, 대상유역을 83개의 소배수분구로 분할하였다. 도시유출해석에서 소유역의 개수가 많아질수록 가정해야 하는 유역 매개변수의 수가 증가하므로 그에 따른 불확실성이 증가하게 되어 오차도 더 증가하는 것으로 판단하였다. Ha(2017)는 소유역 분할 개수에 따라 시나리오를 구성하여 관망 수위 계측기 자료를 이용하여 기준관로에 대한 제안을 한 바 있다. 시나리오 1, 2, 3으로 소유역 개수를 각각 772개, 310개, 83개로 구분하여 2013년 7월 15일, 2013년 7월 22일, 2014년 8월 21일 등의 호우사상을 이용하여 하수관거의 수위에 대한 상관계수를 분석하였다. 분석 결과 시나리오 1에서는 0.7121, 시나리오 2에서는 0.7386, 시나리오 3에서는 0.7398로 시나리오 3의 경우가 가장 높게 나타난 것을 확인하였다. 본 연구에서는 각 소배수분구의 불투수율, 경사, 강우의 초기 지표 침투 계산을 위한 모델의 입력값으로 유출곡선지수(CN)을 포함하는 SWMM의 입력자료를 구성하였고, 하수관거와 맨홀은 서울시 도시안전실 물재생계획과에서 제공하는 하수관망네트워크 자료를 이용하였다. 그리고 유역의 불투수율과 CN 값을 산정하기 위해서 중분류 토지피복도와 서울시에서 제공한 도시생태현황도(Biotop Map)를 활용하였다. 서울시 전체 유역에는 34개소의 자동기상관측소(AWS)가 운영 중 이며, 이 중에서 서초, 강남 AWS가 대상유역 인근에 위치해 있다. 본 연구에서는 이 두개의 AWS에서 측정된 2010년 9월 21일 강우량을 사용하여 매개변수의 검 · 보정을 실시하고 내수침수해석에 대한 정확도를 비교하였다. 그림 5는 실제 모의에 적용한 강우사상을 나타내고 있으며, 그림 6은 2010년 9월 21일 호우를 입력자료로 활용하여 SWMM 모형 결과 맨홀의 월류 지점을 나타내고 있다. 2010년 강우기록은 서울의 대부분 지역에서 우수배수계통의 계획빈도 10년을 크게 상회하고 있다. 대상구역은 집중호우 등으로 반포천의 수위가 높아

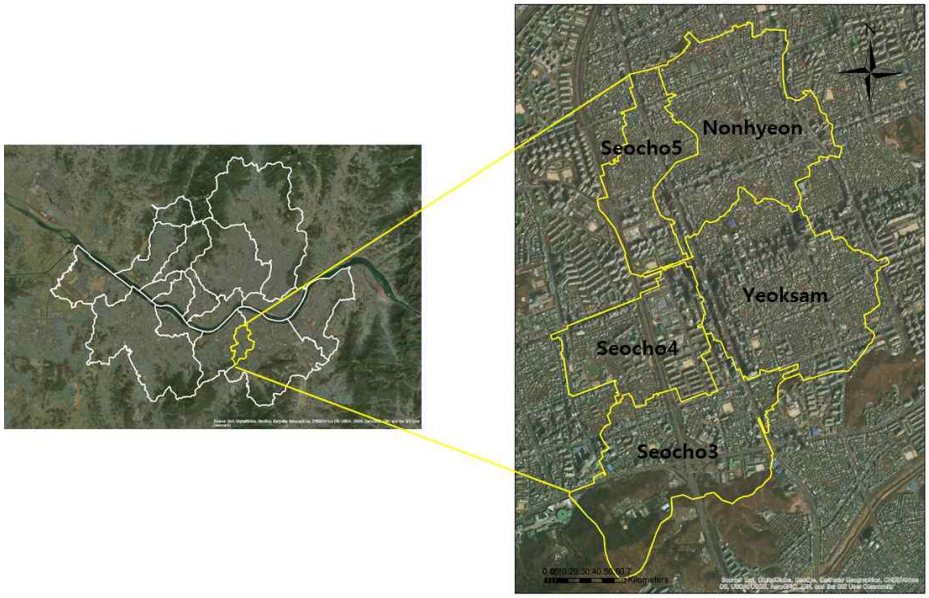
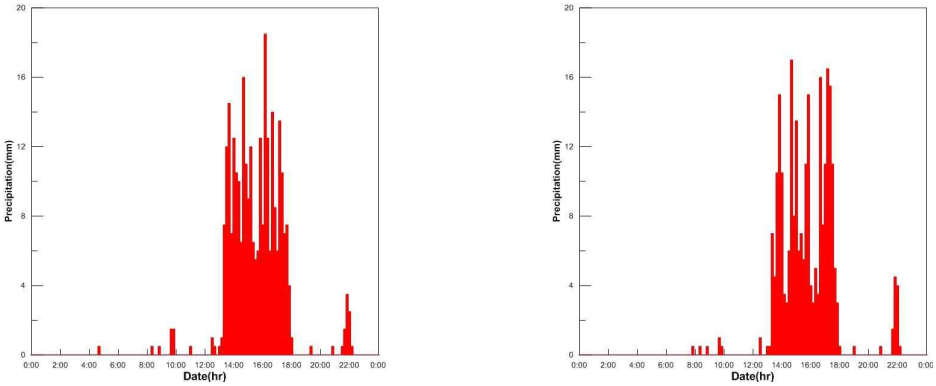


FIGURE. 4 Study area with 5 drainage basins

TABLE 1. Physical characteristics in study drainage area

Drainage Sector	Drainage Stream	Area(㎢)				
		Total	Residential Area	Commercial Area	Green Area	Industrial Area
Nonhyeon	Banpocheon	1.8036	1.6928	0.1109	0.0000	0.0000
Yeoksam	Banpocheon	1.9319	1.5010	0.4310	0.0000	0.0000
Seocho3	Banpocheon	1.7786	1.1393	0.1420	0.4974	0.0000
Seocho4	Banpocheon	1.0582	0.9246	0.1337	0.0000	0.0000
Seocho5	Banpocheon	0.8192	0.7792	0.0406	0.0000	0.0000



(a) Gangnam (b)Seocho

FIGURE. 5 Rainfall event (a) Gangnam, (b) Secho station (Sep. 21, 2010)

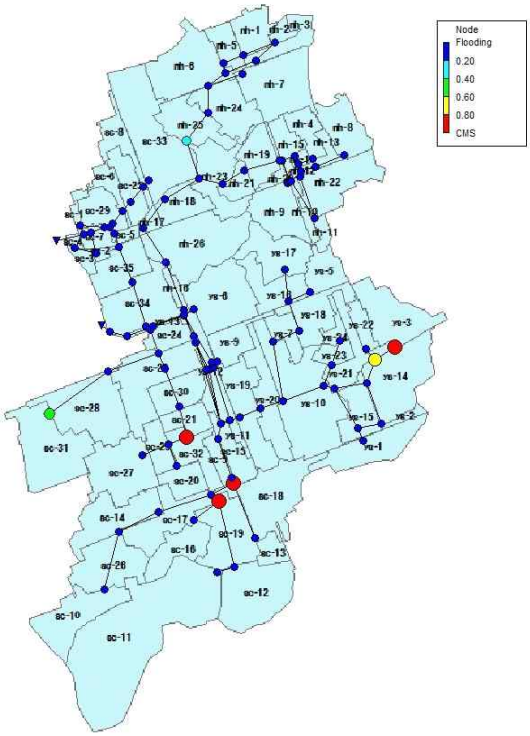


FIGURE. 6 Sewer network in study area

져 배수가 어려워지면 강남역 주변과 역삼 및 서초배수분구까지 침수피해가 발생한 것으로 파악이 된다. 서초구역 침수피해 현황으로는 침수면적 1,353,179㎡, 침수세대 119세대, 침수심 0.3~1.0m이며, 강남구역 침수피해 현황 침수면적 91,435.00㎡, 침수세대 87세대, 침수심 0.2~0.3m으로 파악된다(Seoul, 2011).

3. 2D 도시침수해석

2D 침수해석을 위한 지형자료는 서울시 LiDAR (Light Detection and Ranging) 자료를 이용하여 지형자료를 구축하였으며, 그림 7은 ArcGIS에서 대상유역의 LiDAR자료를 바탕으로 2m 간격의 지형자료와 건물 및 도로를 추출하여 생성된 지형자료이다. 도시 침수해석 시 침수해석의 정확도를 위해서는 건물 및 도로를 고려하여 지형자료를 구축 하였다. Cho *et al.*, (2011)은 건물 및 도로영향을 고려하여 도시지역에서의 도시 침수해석 연구결과 건물 및 도로를 고려하지 않은 것보다 고려했을 때보다 더 높은 적합도 결과를 보이고 있었다. 특히 서울과 같이 고밀도 도시공간에서는 건물 및 도로의 고려가 정확한 침수면적 및 침수심 산출에 중요한 영향을 미치게 된다. 조도계수는 Son (2016)이 서울시 도시침수해석에서 사용한 합성조도계수 산정방식인 식 (1)~(2)을 이용하여 0.025를 적용하였고, 본 연구에서 사용된 도시침수모형은 계산간격이 자동으로 조정이 되며, 계산 격자 간격은 5m를 적용하였다.

$$n^2 = n^{2_0} + 0.020 \times \frac{\theta}{100-\theta} \times h^{4/3} \qquad (1)$$

$$n_0^2 = \frac{n_1^2 A_1 + n_2^2 A_2 + n_3^2 A_3}{A_1 + A_2 + A_3} \qquad (2)$$

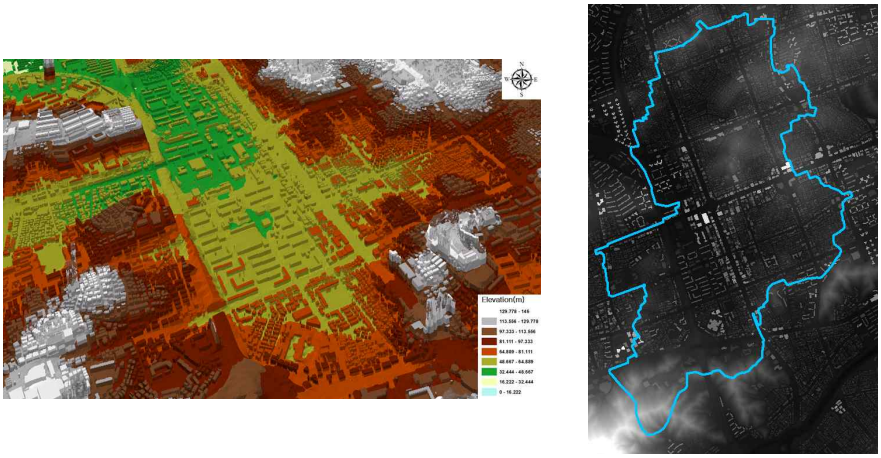


FIGURE. 7 Topography data in study area

4. 2D 해석 결과

2010년 09월 21일 강우사상에 대한 도시유출 해석을 실시하여 맨홀의 월류량을 산정하고 도시침수 해석을 실시하였다. 그림 8은 실제 강우조건 하에 모의된 맨홀의 월류지점을 ArcGIS로 나타내었으며, 총 6지점의 맨홀에서 월류가

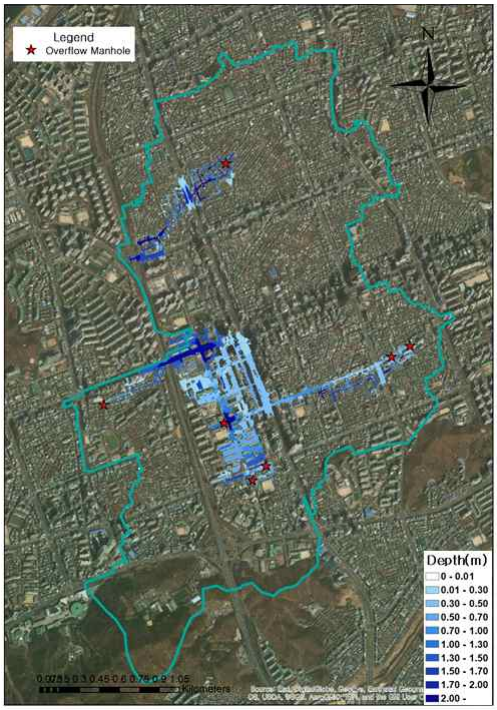


FIGURE. 8 Overflow from manhole

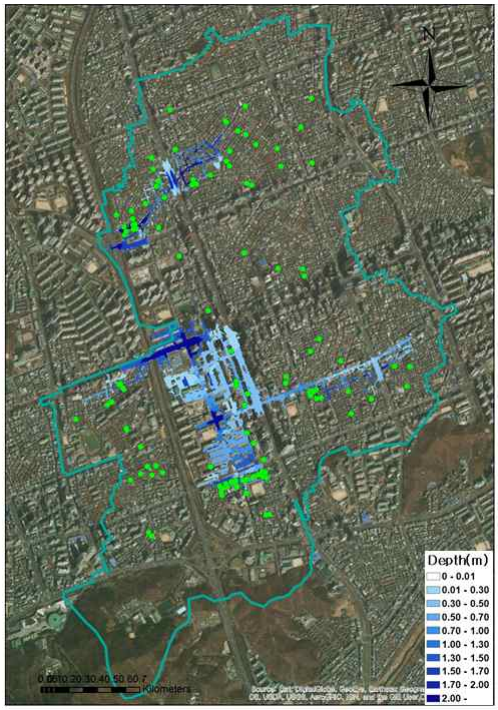


FIGURE. 9 Comparisons of NDMS data with 2D results

$$Goodness\,of\,Fit(\%) = \frac{Number\ of\ NDMS\ included\ in\ the\ calculated\ flood\ area}{Total\ number\ of\ NDMS} \times 100$$

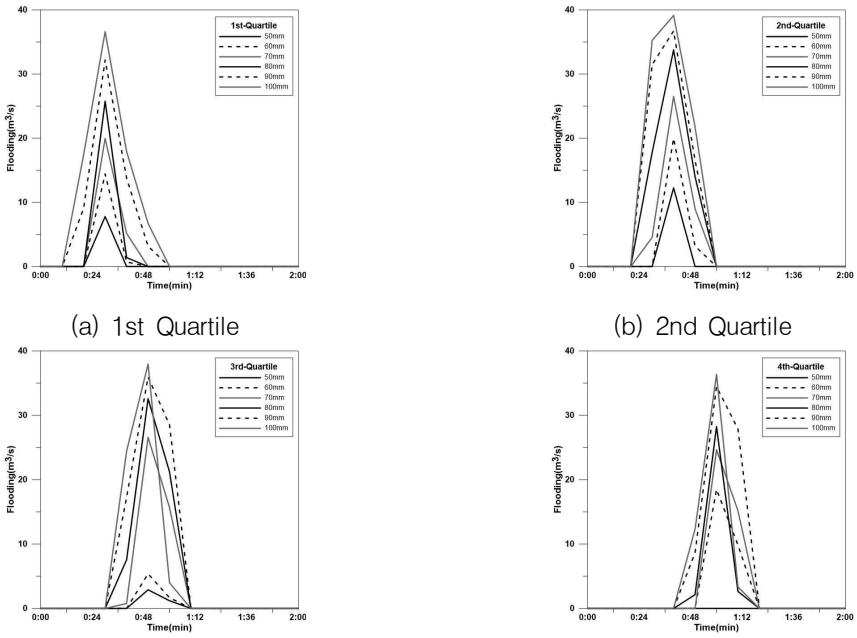
발생하였으며, 도시침수 해석을 위한 입력조건으로 사용하였다. 그림 9는 2010년 09월 21일 강우사상에 대하여 해석 결과값이며, 모의 결과의 검증을 위해 NDMS 신고 자료와 계산된 침수면적를 비교하여 적합도를 산정하였다. NDMS 신고 자료는 지점 자료로만 존재하여, 면적으로 비교를 하지 못하고 침수면적이 신고지점에 침수된 개수로 비교 · 분석 하여 산정하였다.

2010년 9월 21일에는 118지점에서 신고가 되었으며, 2D 침수해석 결과 82개 지점이 계산결과에 포함되었다. NDMS 신고 지점과 침수해석 결과에 대하여 적합도를 계산한 결과 69.5%의 적합도로 분석되었다. 지형자료 구축이 정방형 5m 격자로 구성되었기 때문에 좁은 도로나 건물 사이사이는 물이 퍼지지 못하여 위 결과 이상의 적합도는 얻지 못하였지만, 도시 유역에 대한 침수해석 결과에 대한 검증 데이터로 충분하다고 판단된다. 또한, NDMS의 경우에는 주민신고 자료이며, 이는 피해보상을 위한 기초자료로 활용되기 때문에 과도한 신고지점이 발생하는 특성이 있는 것으로 분석되었다.

침수지역의 선정

1. 시나리오별 도시침수해석

도시 홍수 예 · 경보를 위하여 연구 유역 내 도시 침수를 야기 시킨 실제 호우사상으로 검 · 보정을 완료한 SWMM 모형을 이용하여 강우의 시나리오별 맨홀의 월류량 분석을 실시하였다. 강우량이 증가 할수록 맨홀의 월류지점, 월류량이 증가하여 공통으로 월류하는 지점에 대해서



(a) 1st Quartile (b) 2nd Quartile

(c) 3rd Quartile (d) 4th Quartile

FIGURE. 10 Overflow from manhole for scenario(0074-100-1)

TABLE 2. Maximum flow of each manhole

	1st-Quartile (m^3/s)	2nd-Quartile (m^3/s)	3rd-Quartile (m^3/s)	4th-Quartile (m^3/s)
50mm	7.793	12.257	11.923	0.000
60mm	14.426	19.972	20.380	18.496
70mm	19.955	26.516	26.589	24.658
80mm	25.761	33.784	32.584	28.260
90mm	32.188	36.719	35.944	34.471
100mm	36.615	39.140	37.952	36.354

그림 10에서 도시하였다. 표 2는 시나리오에 따른 맨홀의 월류량을 나타내었으며, 0074-100-1번 맨홀의 경우 10분당 최대 $39.14m^3/s$의 월류량이 발생하였다.

2. 시나리오에 따른 타당성 검토

시나리오에 따른 타당성을 검토하기 위하여 침수예상도의 결과와 NDMS 자료에 대한 분석을 실시하였다. 2010년 9월 21일 대상유역에 내린 강우사상의 시간당 최대 강우량은 강남지점과 서초지점으로 각각 70㎜, 77.5㎜로 관측되었으며, 강우시나리오 70㎜와 80㎜를 1분위~4분위까지 격자별 최대 침수심으로 침수예상도 작성하여 NDMS와 비교 검증을 실시하였다.

그림 11은 시나리오 70㎜의 침수예상도와

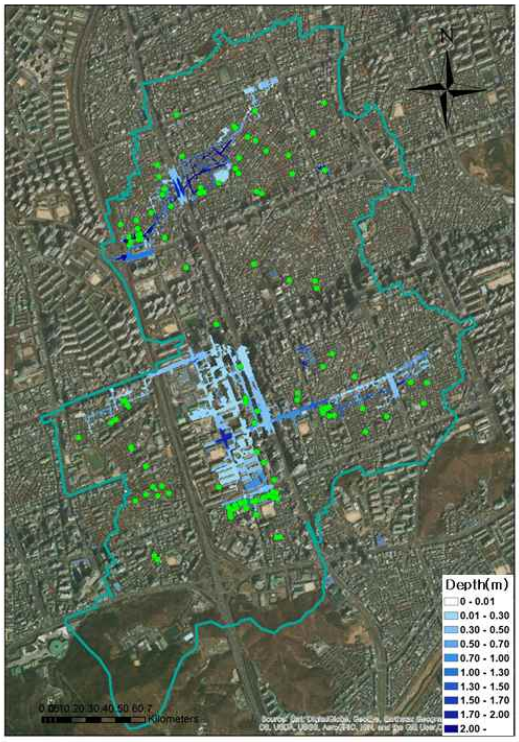


FIGURE. 11 Comparison of 70mm flood forecast with NDMS database

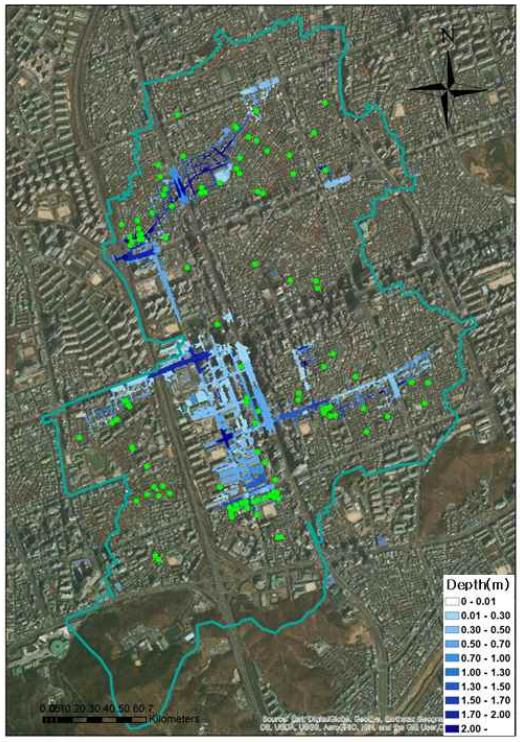
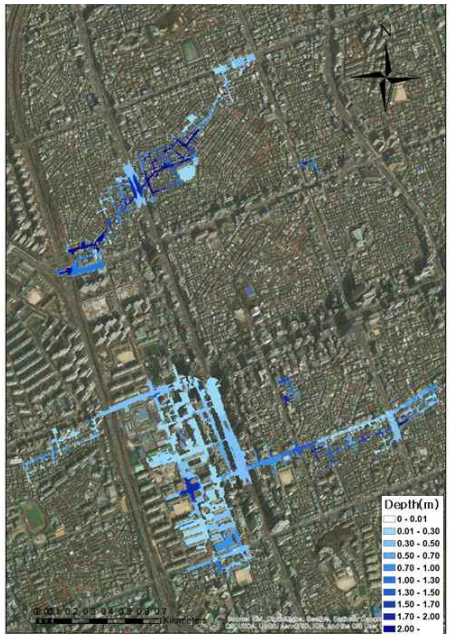


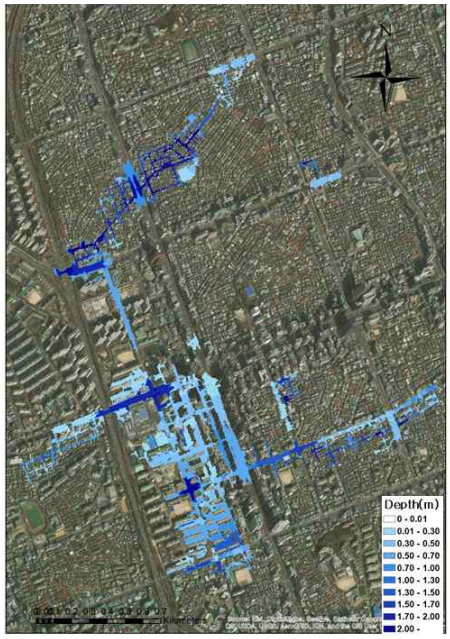
FIGURE. 12 Comparison of 80mm flood forecast with NDMS database

(a) 50mm flood forecast

(b) 60mm flood forecast

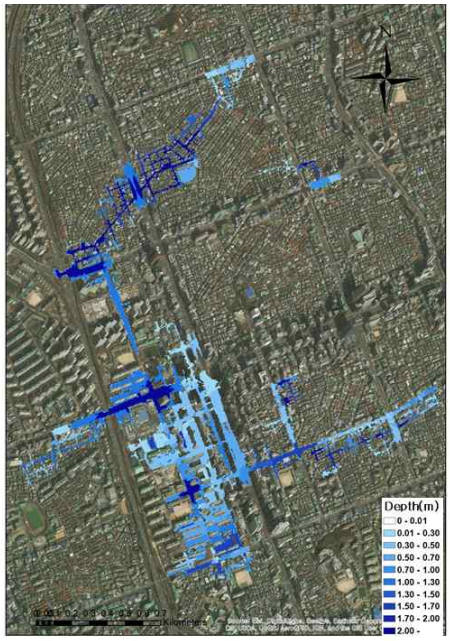


(c) 70mm flood forecast

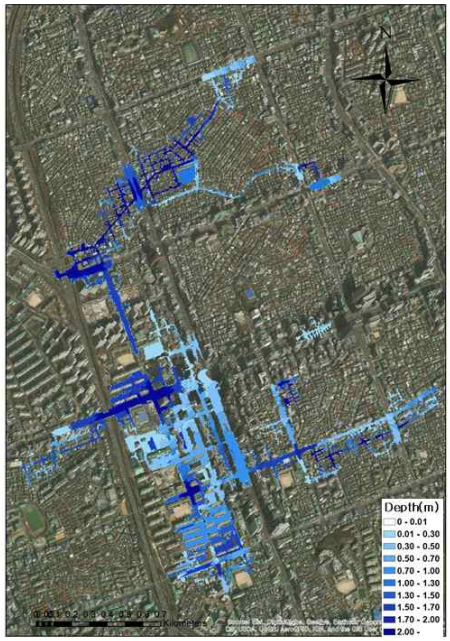


(d) 80mm flood forecast

FIGURE. 13 Forecast of inundation map



(e) 90mm flood forecast



(f) 100mm flood forecast

FIGURE. 13 Continued

NDMS를 중첩시켜 도시화 하였다. 적합도를 분석한 결과 70.3%를 가졌으며, 그림 12는 80㎜의 침수예상도의 경우 72.0%의 적합도를 가지는 것으로 분석되었다. 또 다른 적합도에 대한 분석으로는 2D 해석 결과와 침수예상도의 범람면적에 대한 분석을 실시하였다. 70㎜의 침수예상도의 범람범위와 실제 호우사상을 검증한 2D 침수 해석의 범람범위는 75%의 적합도를 가지는 것으로 분석되었다. 이는 도시 홍수 예·경보를 위한 사전 침수면적 데이터베이스 구축에서 강우의 시나리오에 따른 1D-2D 해석 결과가 만족할 만한 결과를 얻었다고 판단이 된다. 그림 13은 본 연구에서 제안한 방법론을 이용하여 시나리오별 침수예상도를 작성하여 제시하였다.

자동기상관측소(AWS)의 위치를 기준으로 티센망을 구축하여 가중치를 산정해 본 결과 대상유역에 강남(AWS)는 42.9% 서초(AWS) 57.1%로 면적평균강우량은 74.3㎜인 것으로 분석이 되었다. 2010년 9월 21일 강우사상에 대한 범람 해석 결과를 ArcGIS를 이용하여 산정해 본 결과 범람면적은 488,850㎡이며, 70㎜ 시나리오에 따른 범람면적은 440,850㎡이며, 80㎜ 시나리오의 범람면적은 558,750㎡으로 분석되었다. 분석 결과를 토대로 범람면적에 대한 평가는 강우 시나리오 70㎜ 범람면적 이상 강우 시나리오 80㎜ 범람면적 이하로 시나리오 70㎜와 80㎜ 사이의 범람면적을 가지는 것으로

TABLE 3. Inundation area with various scenario

	50mm (㎡)	60mm (㎡)	70mm (㎡)	80mm (㎡)	90mm (㎡)	100mm (㎡)
Inundation Areas	95,150	211,825	440,850	558,750	618,775	697,775

TABLE 4. Road damage status and comparison of research results

Administrative District	Inundated road	Location	History of damage(cm)	70mm (cm)	80mm (cm)
Seocho-gu	① Seoun-ro	Seoun middle school area	10~30	13.6~24.5	24.6~32.5
	② Seocho-ro	Jinheung Apartment Crossroad	50~100	28.8~73.3	44.5~123.3

도시 홍수 예·경보를 위한 데이터베이스 구축을 완료하였다. 표 3은 시나리오별 침수예상도에 대한 범람면적을 비교하여 나타내었다.

침수범위에 대한 적절성을 검토한 다음 주요 지점에 대한 침수심에 대한 적절성을 검토하고자 한다. 서울시에서는 2010년 9월 호우에 의한 도시침수 피해이력 조사를 실시하였다. 이 조사를 토대로 상습 침수구역에 대한 구조물 대책을 수립하기 위하였으며, 2011년 2월에 보고서가 발간되었다. 이 보고서의 내용 중 도로침수 현황 조사에서 침수도로, 도로위치, 침수규모(연장, 침수심), 배수구역 구분 등의 피해이력을 발취하였다. 발취한 내용을 바탕으로 시나리오별 분위별 침수예상도와 조사된 자료를 이용하여 비교 검토를 실시하였다. 그림 14는 피해이력 조사 지점이며, 표 4는 비교 대상인 도로 침수피해 현황과 강우시나리오 70㎜와 80㎜의 경우에 대한 침수예상도의 침수심을 비교 분석한 결과이다. 서울시에서 조사된 피해이력 보고서 내용 중에서 주요 도로 피해 현황 자료와 강우시나리오 70㎜에 따른 침수예상도와 80㎜에 따른 침수예상도 이 3가지를 비교해본 결과 적절한 침수심 해석 결과를 가지는 것으로 판단이 된다. 피해 이력에서 조사된 침수심의 경우 침수심에 대한 범위만을 나타내고 있기에 조금 더 정확한 통계분석을 실시하지는 못하였다.

FIGURE. 14 Road flooded area(Source: http://map.daum.net, 2018)

3. 연구 결과에 대한 활용성

현재 기상청에서는 발표하는 기상예보는 예상 강수량으로써 시간당 최대강수량을 예보하고 있는 상황이다. 일반적인 국민의 경우 최대강수량에 대한 지식이 부족하거나, 체감하기 어려운 부분이 있으며, 이러한 예보는 기상현상으로 인한 재해 발생 위험이나 사회 경제적 의사결정에 직접적인 도움을 줄 수 없는 형태이다. 또한, 기상청의 예보와 방재기관의 위험 및 대응에 신속한 대책수립이 힘들 것으로 판단된다.

도시침수의 정확한 모의를 위해서는 고정밀 지형자료 및 하수관망 자료, 정교한 수치모형 및 해석 시간, 정확한 강우자료, 배수펌프장의 운영 등이 필수적으로 요구된다. 이는 많은 시간이 필요하며, 도시지역의 홍수 예·경보에 대한 충분한 선행시간을 확보하기가 어렵다. 이를 극복하고자 본 연구에서는 사전 침수 면적 데이터베이스를 구축하고 기상청 시간당 최대강수량 예보와 함께 침수 위험지역에 대한 예·경보를 제공할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 이는 기존의 예보 체계와 달리 영향예보 체계로써 날씨로 인해 예상되는 사회 경제적 영향을 포함하여 제공하는 실용적인 예·경보 시스템이 될 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 구축된 사전 침수면적 데이터베이스를 기계학습의 입력자료로 이용하여 강우와 침수심 관계를 학습시켜 모형을 구축 할 수 있으며, 소형 레이더 및 예측된 선행 강우자료를 활용하여 예측된 침수심을 공간적인 확장을 통해 실시간으로 도시지역에 대한 홍수위험지역을 예·경보 할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 기존의 물리적인 기법과 자료지향형 기법을 결합한 Hybrid 모형이며, 물리적 모형의 계산소요 시간에 대한 단점을 보완하여 실시간으로 수재해 위험지역을 Zoning 할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 15는 앞서 언급한 본 연구 결과에 대한 활용성을 그림으로 도식화 하였다.

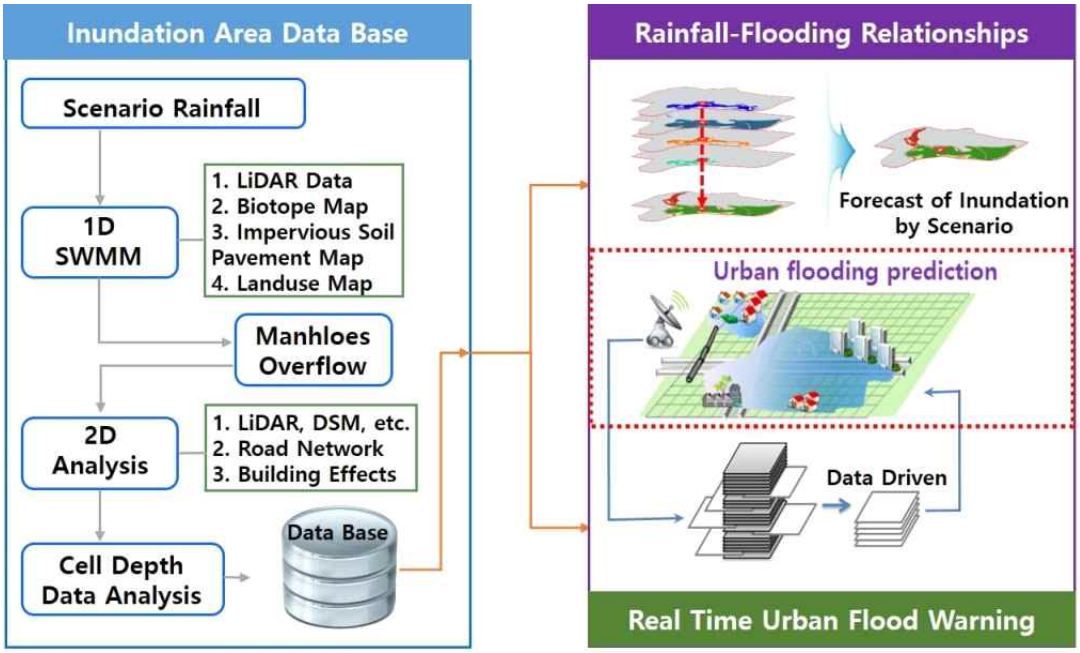


FIGURE. 15 Application of research results

결 론

본 연구에서는 상습적으로 도시침수피해를 입은 지역에 대하여 도시홍수 예 · 경보를 위한 사전 침수면적 데이터베이스를 구축하여 기상청에서 예보하는 1시간 최대강우량을 내수침수 모의 없이 데이터베이스를 이용하여 도시지역의 홍수 위험지역을 사전에 예측하고자 하는 것을 목적으로 하였다. 강우의 시나리오는 50㎜에서 100㎜까지 증분하여 Huff 4분위를 이용하여 총 24개의 시나리오로 ArcGIS를 이용하여 침수예상도를 구성하였다. 구성된 강우 시나리오를 1D-2D 해석을 통해 사전 침수면적 데이터베이스를 구축하였다. 사전침수면적 데이터베이스의 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 2010년 9월 21일에 대상유역에 내린 강우사상에 대한 NDMS 신고지점은 총 118지점에서 신고가 되었으며, 도시 침수해석 결과 82개 지점이 계산결과에 포함되었다. NDMS 신고 지점과 침수해석 결과에 대하여 적합도를 계산한 결과 69.5%의 적합도로 분석되었다. 사전 침수 데이터베이스에서 70㎜의 침수예상도의 경우 NDMS의 신고지점과의 적합도 산정결과 70.3%으로 분석되었으며, 80㎜의 침수예상도의 경우 72.0%의 적합도를 가지는 것으로 분석되었다.

둘째, 서울시에서 조사한 2010년 9월 호우에 대한 도시지역의 침수 피해이력 조사 보고서의 주요 지점에 대한 침수심과 시나리오별 침수예상도의 분위별 침수심에 대하여 비교 검토를 실시해 본 결과 서운중학교 일대에 조사된 피해 침수심은 10~30cm이며, 70㎜ 시나리오와 80㎜ 시나리오에서는 각각 13.6~24.5cm와 24.6~32.5cm로 분석 되었다. 진흥아파트 사거리의 경우 조사된 침수심은 50~100cm이며, 70㎜ 시나리오와 80㎜ 시나리오에서는 각각 28.8~73.3cm와 44.5~123.3cm로 분석되었다. 2010년 9월 호우에 대한 면적평균강우량을 산정해 본 결과 74.3mm로 분석 되었으며, 피해이력 조사 보고서에 조사된 침수심과 시나리오에 따른 침수예상도의 침수심은 적정범위 내에 산정된 것으로 분석되었다.

셋째, 2010년 9월 21일 강우사상에 대한 도시 침수해석 결과 범람면적은 488,850㎡이며, 70m 시나리오에 따른 범람면적은 440,850㎡이며, 80㎜ 시나리오의 범람면적은 558,750㎡으로 분석되었다. 또한 70㎜의 침수예상도와 실제 호우사상을 검증한 2차원 침수해석 결과를 범람면적으로 적합도를 분석해본 결과 75%를 가지는 것으로 분석 되었다.

연구 결과 중 가장 큰 의미를 가지는 것은 강우 발생 시 침수면적 및 범위를 판별할 수 있는 사전침수 데이터베이스를 구축하여 침수 예 · 경보 시 필요한 선행시간을 확보할 수 있는 방법론을 제시했다는 점이다. 사전 침수 데이터베이스를 기반으로 기상청에서 예보하는 최대강우량 정보를 이용하여 사전에 침수구역에 대한 판단과 재해에 대한 사건 재난관리계획에 대한 의사결정을 지원할 수 있을 걸로 판단된다. KAGIS

REFERENCES

Anderson, M.G. and Burt, T.P. 1985. Hydrological Forecasting. John Wiley & Sons, New York. pp. 32-63.

Available at: http://map.daum.net. 2018.

Bedient, P.B., Holder, A., Benavides, J.A. and Vieux, B.E. 2003. Radar-based flood warning system applied to Tropical Storm Allison. Journal of Hydrologic Engineering, 8(6):308-318.

Bae, D.H., Jeong, C.H. and Yoon, S.S. 2008. Development of flood prediction model using hydrologic observations in Cheonggye stream. Korean Society of Civil Engineers, 28(6B):683-690 (배덕효, 정창삼, 윤성심. 2008. 수문관측 기반의 청계천 홍수예측모델 구축. 한국수자원학회논

문집 제28권 6B호 683- 690쪽).

Choe, W.H., Han, K.U., Hwang, T.J. and Aon, A.L. 2011. 2-D Inundation Analysis in Urban Area considering Building and Road. Korean Society of Hazard Mitigation, 11(5):159-168 (조완희, 한건연, 황택진, 손아롱. 2011. 건물 및 도로영향을 고려한 도시지역에서의 2차원 침수해석. 한국방재학회논문집 11(5):159-168).

Ha, C.Y. 2017. Parameter Optimization Analysis in Urban Flood Simulation by Applying 1D-2D Coupled Hydraulic Model, Ph.D. Dissertation, Kyungpook National University, Daegu, Korea. pp. 73 (하창용. 2017. 도시침수 최적화 모의를 위한 1D-2D 모형의 연계해석. 경북대학교 대학원 박사학위논문. 73쪽).

Jensen, N.E., Thyme, J.B., and Nielsen, B.M. 2008. Real-time SMS warnings on expected basement flooding based on nowcasting using high-resolution x-band radar data. In ERAD 2008. Fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology. CD-Room.

Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. 2011. Improvement and Supplement of Probability Rainfall in South Korea. pp. 145 (국토해양부. 2011. 확률강우량도 개선 및 보완 연구. 145쪽).

Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. 2016. http://www.molit.go.kr/USR/policyData/m_34681/dtl.jsp?id=237.

Oh, M.K., Lee, D.R., Kwon, H.H. and Kim, D.K. 2016. Development of flood inundation area GIS database for Samsung-1 drainage sector, Seoul, Korea. Journal of Korea Water Resources Association, 49(12):981-993 (오민관, 이동률, 권현한, 김동균. 2016. 서울 삼성 1분구에 대한 침수면적 GIS데이터베이스 구축. 한국수자원학회논문집 49(12):981-993).

Raymond, M., Peyron, N., and Martin, A. 2006. ESPADA, A unique flood management tool: First feedback from the September 2005 flood in Nîmes. In 7th International Conference on Hydroinformatics, HIC. CD-Room.

Seoul Metropolitan Facilities Management Corporation. 2005. Development of Flood Forecasting System in Cheonggye Stream Project. pp. 55 (서울시 시설관리공단. 2005. 돌발강우대비 청계천 방재시스템 구축 방안 55쪽).

Shin, H.S., Park, Y.W. and Hong, I.P. 2007. The study on the development of flood prediction and warning system at ungaged coastal urban area - On-Cheon Stream in Busan. Journal of Korea Water Resources Association, 40(6):447-458 (신현석, 박용운, 홍일표. 2007. 미계측 해안도시 유역의 홍수 예·경보 시스템 구축 방법 검토 -부산시 온천천 유역 대상. 한국수자원학회논문집 40(6):447-458).

Seoul Metropolitan Government. 2011. Water-Related Disaster in 2010. pp. 81 (서울시특별시. 2011. 수해백서 81쪽).

Son, A.L. 2016. The Development of Urban Inundation Reduction Model Combined Real-time Data-Driven Estimation and 2D Hydraulic Analysis, Ph.D. Dissertation, Kyungpook National University, Daegu, Korea. pp. 143 (손아롱. 2016. 실시간 자료지향형 예측과 2차원 수리 해석을 연계한 도시침수 저감모형 개발. 경북대학교 대학원 박사학위논문. 143쪽).