

# 원격탐사 기반 스마트 도시침수 위험관리 기술 개발

Development of Risk Management for Smart Urban Inundation based on  
Remote Sensing Technique

박경원, 이승수 응용사업팀, 이성규 정보서비스팀

## 발간사

2017년 허리케인 하비로 인한 미국 휴스턴 지역의 전례 없는 침수피해에서 볼 수 있듯이 최근 기후변화로 인한 자연재해에 따른 인명·재산상의 피해가 갈수록 증가하고 있다. 엘니뇨와 같은 기온상승에 따른 강수 강도가 갈수록 증가하여 이전에 볼 수 없었던 대규모 홍수 재해가 예상이 된다. 국내도 최근 태풍 차바 등의 영향으로 울산지역에 도시침수로 인한 재산상의 피해가 발생하였다.

본 연구보고서는 기후변화로 인한 홍수 피해 저감의 일환으로 위성강우와 레이더 강우를 결합하여 정확도 높은 강우 추정 알고리즘을 개발하였으며, 추정된 강우 자료를 이용하여 도시침수 모형에 적용하여 도시지역의 침수 발생 원인에 대한 분석을 수행하였다. 연구결과 이전 위성 및 레이더 강우 단독으로 위성강우를 관측했을 경우 보다 정확한 강우를 관측할 수 있었다. 또한 공간정보와 강우추정 알고리즘을 이용한 웹 기반 실시간 강우 모니터링 시스템 구축에 관한 연구는 향후 현업에서 바로 이용이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용되는 위성강우 기반 도시침수 모형이 국내 자치단체나 아시아·태평양 지역의 상황관리자가 이용한다면 실질적으로 피해가 저감 될 수 있도록 정책적 활용이 가능하리라고 생각한다.

본 연구보고서가 발간되기까지는 센터 내의 많은 분들의 도움이 있었다. 도시침수 모형 개발에 이승수 박사, 위성 추정 알고리즘 개발에 박경원 박사와 공간정보 기반 시스템 구축 연계 맡은 이성규 박사에게 깊은 감사의 뜻을 전한다.

2018년 3월  
APEC 기후센터  
원장 정 흥 상

---

## ABSTRACT

The demand for climate and meteorological information prediction is increasing due to climate change. However, there are many difficulties in predicting extreme rainfall, which is concentrated in the summer or in the rainy season. Extreme rainfall characterized by a large amount of rainfall in a short period of time is a major cause of various water disasters, such as embankment failures, overflows, landslides, inundation of agricultural areas, and urban inundation due to sewer system overflow.

To date, disaster mitigation and management have focused mainly on building dikes or designing sewers to minimize maximum flood damage by probability rainfall through frequency analysis. Recently, however, the frequency of rainfall has been increasing, and the development of rainfall forecasting and precautions technology that predicts rainfall is urgently needed.

This study developed a method for a precipitation retrieval algorithm consisting of combined COMS rainfall and radar rainfall (Rain-1), COMS brightness temperature (TBB), and radar reflectivity (dBz) with a database of co-located Global Precipitation Mission (GPM) Dual Precipitation Radar (DPR) Level 2 precipitation, rain flag, precipitation type flag, land/ocean flag, convective/stratiform flag, and cloud top height flag. The Rain-1 and Rain-2 algorithms were compared with the COMS rainfall algorithm and radar algorithm for the case of the Busan city flood of August 25, 2014. The results showed that the rainfall of the Rain-2 algorithm based on blended TBB and radar reflectivity was more accurate than the rainfall of the Rain-1, COMS, and radar rainfall retrieval algorithms.

Rainfall data obtained from satellite data were used as input data for the 1D-2D

Coupled Urban iNundation Analysis model (CUNA) to evaluate the applicability for urban flood analysis. For a test case, the rainfall incident that caused inundation damage in the Oncheon River basin of Busan on August 25, 2014, was selected. As a result, it was determined that the rainfall data using the satellite data showed sufficient accuracy to analyze the cause of inundation through urban flood analysis. It also showed potential for use in inundation vulnerability analysis as well as in flood analysis. The results of this study can contribute to the development of a real-time urban inundation forecasting system through the combination of predicted rainfall data using satellite rainfall and an urban inundation model.

# 목 차

1. 서론	1
2. 연구 자료 및 방법	4
2.1 위성자료	4
2.1.1 GPM (Global Precipitation Mission)	4
2.1.2 천리안 위성	6
2.2 침수 모의 대상구역	8
2.3 1D-2D 결합 도시침수 해석 모형	9
2.3.1 지표면 침수 모형	11
2.3.2 1차원 하수관망 해석 모형	13
2.3.3 연결부 모형	17
2.4 입력자료 구축 및 전처리	20
2.4.1 GPM 자료 전처리	20
2.4.2 COMS 자료 전처리	22
2.4.3 레이더 자료 전처리	23
2.4.4 GPM COMS 레이더 자료 전처리	24
2.4.5 지표면 지형자료	25
2.4.6 지표면 도로망 자료	26
2.4.7 유역분할	27

2.4.8 하천 단면 자료	28
2.4.9 하수관망 데이터	30
2.4.9.1 하수관거 자료	30
2.4.9.2 맨홀 자료	32
2.4.9.3 배수펌프장 자료	34
2.4.10 도로망과 하천형상을 고려한 불규칙삼각망	34
2.4.11 토지이용도를 고려한 격자 구분	35
2.5 강우 알고리즘	36
2.5.1 위성, 레이더 반사도 및 강우량 비교	36
2.5.2 레이더 자료 전처리	38
2.5.3 위성-레이더 합성 강우량 추정 알고리즘	40
<b>3. 연구내용</b>	<b>42</b>
3.1 부산 8월 25일 집중호우	42
3.2 GPM 강수 알고리즘 검증	43
3.3 웹기반 실시간 집중호우 예측시스템 프로토타입 개발	46
3.4 도시 침수 해석을 위한 경계 조건 및 매개변수 선정	50
3.5 매개변수 민감도 평가	51
3.5.1 Rain-1 매개변수 민감도 평가	51
3.5.2 Rain-2 매개변수 민감도 평가	53
3.6 최적 매개변수 산정	55
3.7 침수 원인 분석	59
<b>4. 결론 및 고찰</b>	<b>66</b>
<b>REFERENCES</b>	<b>68</b>

## 1. 서론

최근 기후변화로 인하여 전 세계적으로 기상이변이 속출하고 있으며 특히, 강력한 호우에 의해 발생하는 재난의 발생 빈도와 강도가 증가하고 있다. 특히 도시유역에서 발생하는 홍수/침수 피해는 인적·물적 자원이 집중되어 있는 도시의 특성상 인명피해 뿐만 아니라 교통시스템마비, 전력차단, 운송기능 마비 등에 따른 대규모 피해를 일으키며 심각한 경제적 피해를 유발한다.

2017년 8월 미국 텍사스 지역에 상륙하여 1,310mm라는 미국 역사상 가장 많은 강우를 기록한 허리케인 하비의 경우 휴스턴 등의 대도시에 유래 없는 침수를 발생시켜 막대한 인명과 재산상의 피해를 유발하였다. 우리나라와 인접한 일본의 경우에도 2017년에만 5개의 태풍(난마돌, 노루, 탈림, 란, 사올라 등)의 직·간접적인 영향에 의한 집중호우, 산사태, 홍수, 침수 등의 피해를 일으켰다. 국내의 경우 2017년 7월에 중부권에 발생한 집중호우는 시간당 70mm가 넘는 호우를 기록하며 인천시, 천안시, 청주시, 충주시, 괴산군 등에 인명 피해뿐만 아니라 도시 기능을 마비시키는 침수를 유발하였다.

이와 같이 최근에 대도시에서 침수로 인해 많은 인명과 재산상의 피해가 발생하고 있는 실정이며, 많은 기상·기후 학자들은 앞으로 돌발성 집중호우의 발생 빈도가 증가하고 태풍이 더욱 대형화·복잡화 되어 그로 인한 강우강도가 증가할 것으로 예상하고 있다. 이는 홍수 및 도시 침수 발생 빈도가 앞으로 더욱 증가할 것이라는 것을 의미한다. 돌발 홍수와 집중 호우와 같이 극한 강우로 인한 피해를 줄이기 위해서는 강수의 유무, 강수시기와 강수량의 정량적 관측이 매우 중요하다. 그러나 2014년 8월 부산 온천천이 범람하면서 발생한 도시 침수의 예에서 볼 수 있듯이 최근 홍수와 침수 피해를 야기한 강우 사상들은 수 km에서 수십 km 정도의 중간규모의 비구름대에서 발생하였으며, 지속시간과 발달시간이 매우 짧은 것이 특징이다. 중소규모의 크기로 단기간에 발생하는 비구름대에서 유발된 집중호우는 모니터링뿐만 아니라 강우의 강도와 이동 방향의 예측 정확도가 상대적으로 낮은 수준이다.

기상분야에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 레이더, 지상관측자료(AWS), 위성 등을 이용하여 강수량을 관측하고 예측하는 방법을 활용하고 있다. 레이더를 활용하여 강우자료를 관측하는 경우 반사인자를 통한 Z-R관계식을 이용하여 강수량을 산정한다.

그러나 국내의 지상레이더에 적용되는 Z-R관계식은 일반적인 강우강도의 관측 정확도를 높이도록 구성되어 있기 때문에 집중호우, 태풍으로 인한 극한 강우에 대해서는 일반적으로 강수량을 과소 추정하는 경향이 있다. 또한 레이더의 관측 반경의 한계로 인하여 서해상에서 갑자기 발생하여 한반도에 영향을 주는 비구름대나 열대지방에서부터 올라오는 태풍의 경우 레이더 반경 안에 들어오기 전까지는 자료를 얻기 어렵다는 문제점이 꾸준히 지적되고 있다. 또한 지상관측자료(AWS)는 관측점 사이에서 발생한 강수의 공간적 분포성을 고려할 수 없기 때문에 강수의 공간적 분포를 고려한 활용에 이용하는 경우 적용성의 한계가 있는 실정이다.

그러나 위성을 이용한 강수관측의 경우에는 정지궤도 위성을 활용할 경우 실질적으로 관측 범위의 제한이 없으며 태풍의 발생과 이동에 따른 발달 그리고 소멸에 이르기까지 지속적으로 모니터링이 가능하다는 장점이 있다. 정지궤도위성을 이용하여 강수량을 추정하는 방법은 전통적으로 적외(IR) 채널을 이용하는 방법이다(Alder and Mark 1984; Scofield 1987). 정지궤도 강수인자를 이용하는 방법(GPI; Arkin and Meisner 1987)과 convective-stratiform을 이용하는 방법(CST; Alder and Negri 1988)은 전통적으로 널리 알려진 방법이다. 기본적으로 적외채널을 이용하여 높은 구름과 낮은 운정온도는 강한 적운형 구름으로 강한 비구름을 동반하는 방법을 사용한다(Miller et al., 2001). 이러한 방법은 강수입자와 얼음입자들의 강수량으로 변환되는 물리적 과정을 동반하지 않기 때문에 warm 구름 등의 강수량을 추정하는데 어려움을 겪는다(Kidd et al., 2003). 따라서 최근에는 적외채널과 마이크로파 채널을 결합한 방법을 이용한다(Adler et al., 1993; Kummerow and Giglio 1995; Xie and Arkin 1996; Xu et al., 1999; Todd et al., 2001; Huffman et al., 1995, 2001). 하지만 현업 실시간으로 사용하기엔 물리적 컴퓨팅 시간제한이 있다. 따라서 최근에는 Auto-Estimator(AE) 방법(Vicente et al., 1998), SCaMPR(self-calibration multivariate precipitation retrieval algorithm) 방법(Kuligowski, 2002)들이 많이 이용된다.

따라서 Multi Sensor를 이용해 강수량을 산정하고 수리·수문 모형과의 융합을 통한 홍수 예측 감시 시스템 기술을 개발할 경우 홍수기에 집중적으로 발생하는 국지성 강우 및 돌발 홍수 예측이 가능하다. 이는 재난 피해 발생에 앞서 선제적으로 대응이 가능하다는 것을 의미한다. 더불어 홍수재해와 재난을 사전에 예방하였을 경우 그 피해저감 효과는 클 것으로 판단된다.

본 연구에서는 집중호우 홍수 예보 감시 예측시스템 개발을 위하여 위성 휘도온도와 레이더 반사도를 결합한 강우 추정 알고리즘을 개발한다. 개발된 알고리즘의 검증을 위하여 2014년 8월 25 부산시 온천천 유역에 침수 피해를 유발한 강우 이벤트에 적용하여 지상강우관측 값과의 비교를 수행한다. 강우 자료의 검증 후에는 획득된 강우자료를 1D-2D 통합 도시침수 해석 모형의 입력자료로 활용하여 강우자료의 도시침수 해석 및 예측에 대한 적용성을 평가한다. 또한 침수피해를 유발한 원인에 대한 분석을 기반으로 향후 온천천 유역의 침수 피해를 줄이기 위한 대책을 제안한다. 본 연구를 통해 개발된 결과물은 향후 도시유역에서 발생하는 침수 원인에 대한 면밀한 분석을 가능하게 하여 침수 취약지구 파악, 도시유역 침수 대응능력 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 연구 자료 및 방법

### 2.1 위성자료

#### 2.1.1 GPM (Global Precipitation Mission)

GPM 위성은 2014년 2월 28일 오전 3시 37분, 일본 다네가시마 우주센터에서 성공적으로 발사가 되었다. 2005년부터 제작되기 시작한 전지구강수관측위성(Global Precipitation Measurement, GPM)은 지구의 강수량, 태풍, 호우 예보 등을 관측하는 위성으로 미국 항공우주국(NASA)의 위성 기술 로드맵에 따라 일본 우주항공국(JAXA)의 합작으로 공동 개발되었다. GPM 위성의 핵심 센서인 DPR(Dual Precipitation Radar)는 태풍의 구조뿐만 아니라, 시간과 위치에 따라 변화하는 태풍을 감시할 수 있으며, 강수량을 3D로 관측하는 것도 가능하다. 미국에서 개발된 마이크로파 라이오미터(GPM Microwave Imager, GMI)는 강수량과 강설량의 강도를 관측할 수 있으며, 두 센서를 탑재한 GPM 핵심 관측위성과 기존의 강수량을 관측할 수 있는 여러 기상위성자료가 결합되어 지구 전체의 약 90%로 해당되는 곳의 강수량과 강설량을 매 30분마다 관측할 수 있다 (Figure.1).

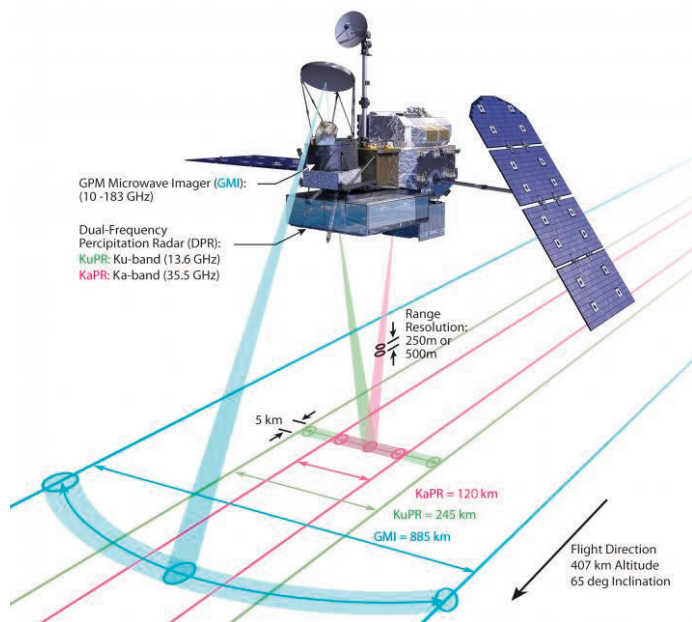


Figure.1. GPM 위성

GPM 코어 위성 중에 가장 중요한 센서 중의 하나인 듀얼레이더(Dual-frequency Precipitation Radar, DPR)는 Ku밴드 레이더(KuPR), Ka밴드 레이더(KaPR)로 구성되어 있으며, KuPR 센서는 13.6GHz로 이전 TRMM 위성의 센서와 같으며, 수직 해상도는 250m, 수평해상도는 5km이다(Figure. 2). KaPR 센서는 GPM코어 위성에서 새롭게 탑재된 센서로 35GHz의 주파수를 가지며, 수직 해상도는 250/500m이며, 수평해상도는 KaPR 센서와 같은 5km이다.

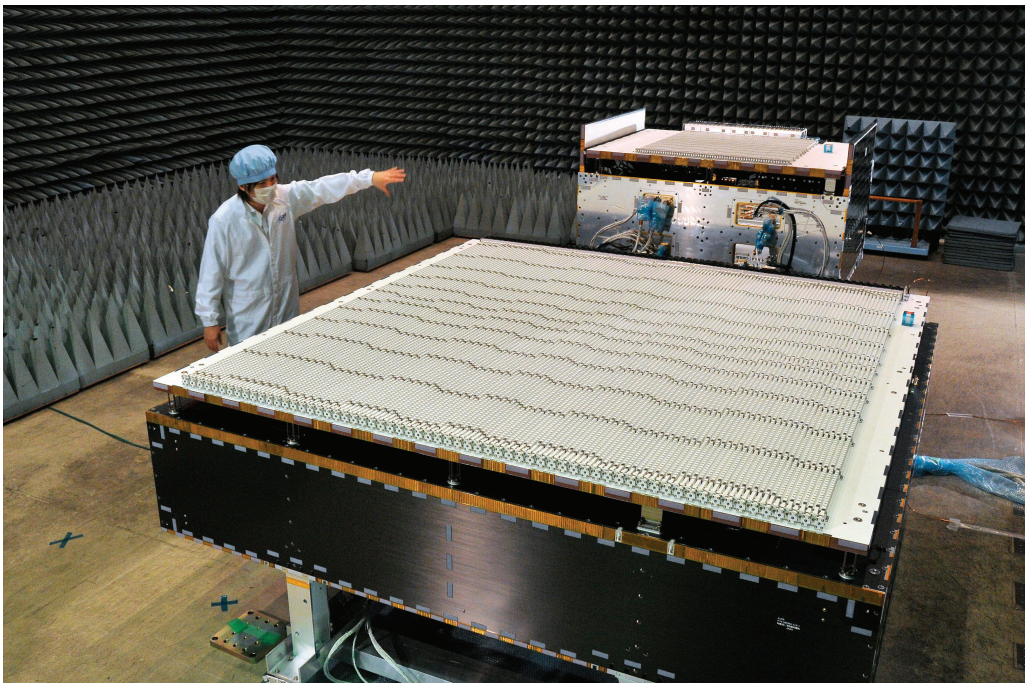


Figure.2. GPM 듀얼레이더(DPR) 센서

GPM 자료는 Level 0, Level 1A, Level 1B, Level 1C, Level 2, Level 3 자료의 형태로 제공된다. Level 0 자료는 기본적인 정보와 데이터 missing에 대한 정보로서 일반 유저에게는 제공되지 않는 정보이다. Level 1A 자료는 센서에 대한 정보, 고도, 위치, 센서, 위성 상태 등의 정보로서 이 정보 또한 일반 유저에게는 제공되지 않는다. Level 1B, Level 1C 자료는 기하적인 보정된 자료로 반사도 값, 휘도온도 값을 제공한다. Level 2 자료는 반사도 값과 휘도온도에서 강수량 산정 알고리즘에 따라 강수량으로 변환된 값을 제공한다. Level 3 자료는 통계적인 방법을 이용하여 시공간적으로 격자

화 된 자료를 제공한다. Level 3 자료 중에서 GPM 핵심위성 자료만으로 보간하여 격자화된 자료가 있으며, GPM 코어 위성과 여러 마이크로파 협력위성, 정지궤도 위성에서 산출되는 강수량을 결합하여 시간해상도 30분 10km의 공간 해상도로 NASA에서 개발하여 제공되는 자료는 GPM IMERG 자료이다. Level 2에서 GPM 위성 이중강우레이더(DPR)에서 KuPR 센서에 제공하는 강수량, KaPR 센서에서 제공하는 강수량이 있으며, KuPR, KaPR의 강수량 값을 서로 보정하여 제공하는 DPR 강수량 값도 제공한다. 본 연구에서는 DPR 강수량 값과 COMS 센서와 레이더 반사도 값을 시간 및 공간 정보들을 일치화 시켜 데이터베이스화하였으며, DB를 통하여 COMS-레이더 블렌딩 강수량 산정 알고리즘을 검증하였다.

### 2.1.2 천리안 위성

국가기상위성센터에 따르면 천리안 위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite, COMS)은 지구적도상공 36,000km 고도, 동경 128.2도에 위치하여 기상관측, 해양관측 통신서비스 임무를 수행하는 우리나라 최초의 정지궤도 복합위성이다. 이 위성은 2003년부터 국가 우주개발 중장기 계획에 따라 기상청, 교육과학기술부, 국토해양부, 방송통신위원회 공동사업으로 추진하여 한국항공우주연구원이 총괄주관 연구기관으로 개발을 책임지며, 프랑스의 EDAS Astrium사와 미국의 ITT가 해외 협력회사로 참여, 2010년 6월 27일 남미 프랑스령 기아나 꾸르 우주센터에서 성공적으로 발사하였다. 그리고 현재 한반도를 비롯하여 전구를 27분 이하의 시간 간격으로 관측하고 있다. 위성의 제원은 중량이 2,497kg으로 7년의 위성수명으로 발사되었다. 기상관측센서, 해양관측센서, 통신 탑재체(Ka-band)를 탑재하고 있으며, 이 위성으로 인해 그동안 일본으로부터 30분 간격으로 수신하고 있던 기상위성자료는 평상시 15분 간격, 악기상시 최대 8분 간격의 관측이 가능해졌다.

기상탑재체는 미국 GOES-8호 ~ GOES 13호 및 일본 MTSAT-2에 탑재된 기상센서와 동일한 센서를 탑재하고 있다(Table. 1). 총 5개의 센서를 탑재되어 있으며, 가시광선(VIS : visible) 센서는 태양광의 가시광선 영역인 0.5 ~ 0.9 $\mu$ m 파장대의 지구반사량을 관측하고 있다. 가시채널은 태양광이 있는 주간에만 관측이 가능하고 하층운, 안개, 적설, 해빙 등의 기상요소를 관측이 유용하다. 단파적외 채널은 3.7 $\mu$ m의 파장대로 주간

는 태양광의 지구반사량을 측정 가능하며, 야간에는 지구 복사량을 측정하여 하층운, 야간 안개, 산불 등의 관측에 이용된다. 수증기 채널은  $6.7\mu\text{m}$ 의 파장대에서 대기의 수증기 흡수에 따른 복사량을 측정하며, 이 채널을 이용하여 대류권 상층 및 중층의 수증기량 관측이 가능하다. 적외 1, 적외 2채널은 각각  $10.8\mu\text{m}$ ,  $12.0\mu\text{m}$ 의 파장대를 가지며, 지구 표면이나 구름에서의 온도를 측정하여 구름탐지, 바람장, 강우강도, 해수면 온도 등의 기상 물리값으로 변환하여 이용된다. 센서의 각 채널의 정보는 Table. 2에 정리하였다.

Table. 1. COMS 센서 특징

채널	파장 ( $\mu\text{m}$ )	공간해상도	활용분야
가시광선	0.67	1km	주간 구름영상, 황사·산불·연무관측, 대기운동벡터
단파적외	3.7	4km	야간안개 및 하층운, 산불감지, 지면온도 추출
수증기	6.7	4km	중상층 대기 수증기량, 상층대기 운동파악
적외1	10.8	4km	구름정보, 해수면 온도, 황사관측
적외2	12.0	4km	구름정보, 해수면 온도, 황사관측

Table. 2. 전지구 정지궤도 위성 센서 특징

위성	번호	채널	파장범위 ( $\mu\text{m}$ )	해상도
미국 GOES-13 (=GOES N) 2006.5.24	1	VIS	0.55-0.75	1km
	2	IR	3.8-4.0	4km
	3	VW	6.5-7.0	4km
	4	IR	10.2-11.2	4km
	5	IR	13.0-13.7	8km
유럽 MSG-2 (=MATEOSAT-9) 2005.12.21	1	High.Res.VIS	0.6-0.9	1km
	2	VIS 0.6	0.56-0.71	3km
	3	VIS 0.8	0.74-0.88	3km
	4	IR 1.6	1.50-1.78	3km
	5	IR 3.9	3.48-4.36	3km
	6	IR 8.7	8.30-9.10	3km
	7	IR 10.8	9.80-11.80	3km
	8	IR 12.0	11.00-13.00	3km
	9	VW 6.2	5.35-7.15	3km
	10	VW 7.3	6.85-7.85	3km
	11	IR 9.7	9.38-9.94	3km
	12	IR 13.4	12.40-14.40	3km

Table. 2. 전지구 정지궤도 위성 센서 특징(계속)

위성	번호	채널	파장범위 ( $\mu\text{m}$ )	해상도
일본 MTSAT-1R 2005.2.26	1	VIS	0.55-0.75	1km
	2	IR 1	3.8-4.0	4km
	3	IR 2	6.5-7.0	4km
	4	IR 3 (WV)	10.2-11.2	4km
	5	IR 4 (Near IR)	13.0-13.7	4km
중국 FY-2C 2004.12.24	1	VIS	0.55-0.90	1.25km
	2	IR3	3.5-4.0	5km
	3	WV	6.3-7.6	5km
	4	IR1	10.3-11.3	5km
	5	IR2	11.5-12.5	5km

천리안위성은 지상으로부터 약 36,000 km 떨어진 적도 상공에서 지구를 관측하기 때문에 지구의 크기는 아주 작아 보여서 이를 보완하기 위하여 위성의 기상 영상기에는 망원경이 함께 부착되어 있다. 그리고 이 망원경 앞에 달린 스캔 거울이 좌우/상하로 움직이면서 지구로부터 반사된 태양복사에너지와 적외선 에너지를 망원경으로 전달하며, 디텍터가 디지털화해 기록하고 이어붙이는 방식으로 영상을 만들어내고 있다. 좌우(동서방향)로 한 번 스캔한 값들의 집합을 한 스캔라인이라고 하며, 이 한 스캔라인은 위성에서 볼 때, 남북방향 8 km 정도의 폭으로 이루어져 있다. 위성에서 보이는 둥근 지구의 모습을 모두 촬영한다면 1천 번이 넘는 스캔라인 관측이 이뤄져야 하며, 한 스캔라인을 관측하는 데는 약 1초가량이 소요된다. 따라서 전지구 촬영모드는 약 27분이 소요되며, 한반도 영역만 촬영하는 데에도 1분가량이면 관측이 가능하다. 자료는 국가기상 위성센터로 한반도 지역자료를 바이너리 자료를 수신하여 적외 채널을 TBB 온도 값으로 변환하여 사용하였다.

## 2.2 침수 모의 대상구역

본 연구에서는 부산광역시 해운대구, 동래구, 연제구, 북구, 금정구에 걸쳐 위치하고 있는 온천천 유역에 대하여 위성자료를 활용하여 추정된 분포형 강우자료를 이용하여 침수 해석을 수행한다. 온천천 유역은 유로연장 14.13km로서 유역면적은 56.28km<sup>2</sup>이다. 수영강 전체 유역면적의 약 28.2%를 점하고 있으며 유역의 형상은 Figure. 3에 같

이 동서 방향으로로는 좁고(4~5km) 남북 방향으로로는 긴 형태(약 15km)를 취하고 있다(부산광역시, 2004). 유역의 최북단에는 금정산(EL. 801.5m)과 계오봉(EL. 601.5m)이 위치하고 있으며 서측으로는 금정봉(EL. 387m), 금용산(EL. 152.3m), 황령산(EL. 427.9m), 금연산(EL. 400m), 배산(EL. 254.9m)으로 둘러싸여 있고 동쪽으로는 구월산(EL. 317.4m)이 위치하고 있다.

온천천은 태풍의 주경로인 한반도 동남쪽 최하단에 위치하고 있어 태풍의 위험반경에 위치할 가능성이 매우 크며 그로 인해 막대한 피해가 발생한 사례가 다수 존재한다(Lee, 2016). 또한 최근에는 기후변화로 인한 국지성 돌발 호우 및 게릴라성 호우로 인한 침수 피해의 발생 빈도가 증가하고 있다.

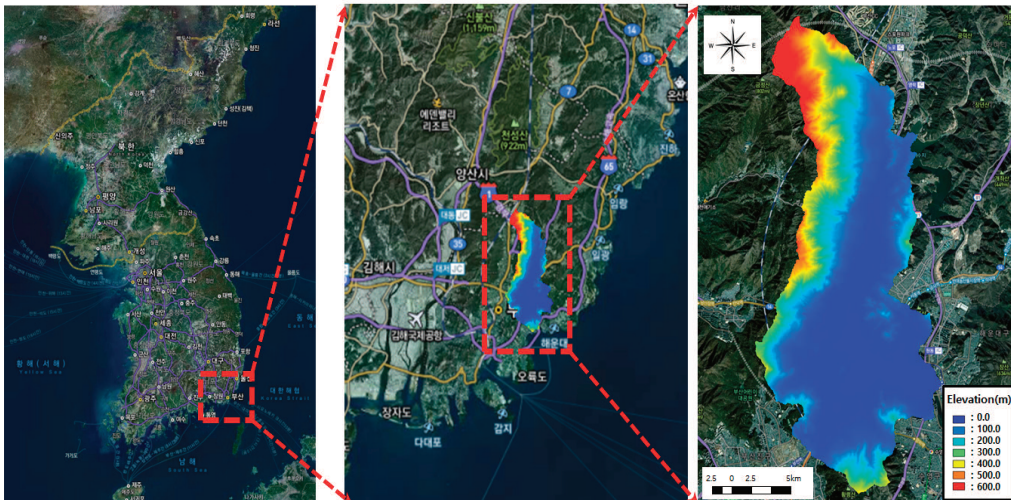


Figure. 3. 연구대상 지역

### 2.3 1D-2D 결합 도시침수 해석 모형

본 연구에서는 Lee et al.(2016)에 의해 개발된 1D-2D 결합 도시침수 해석 모형을 활용하여 도시침수 해석(1D-2D Coupled Urban iNundation Analysis model, 이하 CUNA)을 수행한다. CUNA 모형은 Figure. 4에서와 같이 집수구(storm drain)에서 2차원 지표면 흐름과 1차원 하수관망 사이의 유량 교환이 가능하도록 설계되었다. 국내에서 도시유출 해석과 침수해석에 널리 이용되고 있는 Storm Water Management Model(이하 SWMM)은 맨홀을 기준으로 한 소유역에서 발생한 유출량이 해당 맨홀로

전부 유입되고 그 초과분이 지표면 침수에 기여한다는 가정을 기본으로 침수해석을 수행한다. 이는 모형의 구조와 흐름 해석을 비교적 간단하게 처리 할 수 있다는 장점을 가지고 있으나 실제 도시구역에서 지표면 유출해석에 많은 영향을 미치는 인공 구조물(도로, 건물)의 영향을 고려 할 수 없고 시시각각 변화하는 지표면 수심과 하수관로의 수두(water head)차로 인해 발생하는 지표면에서 하수관로의 유입과 하수관로에서 지표면에서의 역류를 동시에 고려할 수 없으며, 지표면과 하수관망 사이에서 발생하는 유입과 역류를 맨홀에서만 고려할 수 있어 유출량의 유입과 역류로 인한 침수 면적의 공간분포를 왜곡할 수 있다는 단점을 가지고 있다.

CUNA 모형은 모형 해석을 위해 필요한 데이터의 양이 많고 전처리 작업에 상대적으로 많은 시간이 소모된다는 단점을 가지고 있지만, 지표면 흐름과 관망 흐름을 개별적으로 또는 순차적으로 해석하지 않고 동시에 상호간의 수리학적 조건에 따라 유량 교환이 가능하게 구성되어 있어 실제 도시구역에서 발생하는 우수의 흐름과 유사하게 모의 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 사용자의 편의와 대상 구역의 특성에 따라 정방형 격자와 불규칙 격자를 선택하여 지표면 형상을 표현할 수 있으며 도로를 따라 일정하게 분포되어 있는 집수구에서 지표면과 하수관망 사이의 유량교환이 가능하도록 설계되어 보다 실제와 유사한 흐름 해석이 가능하며 건물에 의한 지표면 유출의 영향을 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Lee et al., 2013; Lee et al., 2017). 하수관망의 해석은 맨홀과 맨홀 사이의 관로를 일정 크기의 격자로 나누어 Preissmann slot 모형에 기반을 두어 동역학 방정식(Dynamic equation)으로 해석하여 배수위 영향까지 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 모형에서 고려 가능한 요소를 최대한 고려할 수 있도록 활용 가능한 데이터를 수집하였다. 이와 동시에 데이터의 불확실성을 최소화하고 적정 수준의 모의 시간을 확보하기 위하여 다음과 같은 가정을 기반으로 모의를 수행한다.

- 도로를 포함하는 격자는 인도와 구분을 하기 위해 실제 지반고 보다 0.2m 낮춘다.
- 건물 밀집 구역의 경우 개별 건물의 형상과 배치를 고려하는 것은 계산 시간상 비효율 적이므로 도로로 둘러싸인 지역을 건물 밀집지역으로 가정하여 전체 지반고에서 10m 상승 시켜 건물로 인한 지표수 흐름의 가로막힘 현상(blocking

effect)을 고려한다.

- 하수관망은 우수의 배수에 직접적인 역할을 하는 집수구, 하수관로, 맨홀, 배수 펌프장 만을 고려한다.
- 집수구는 도로와 건물 밀집지역에 일정 간격으로 분포하고 있다고 가정한다.

이와 관련하여 CUNA 모형의 지배방정식과 구성, 수치해석 기법에 관한 보다 자세한 사항은 다음 장에서 다루기로 한다.

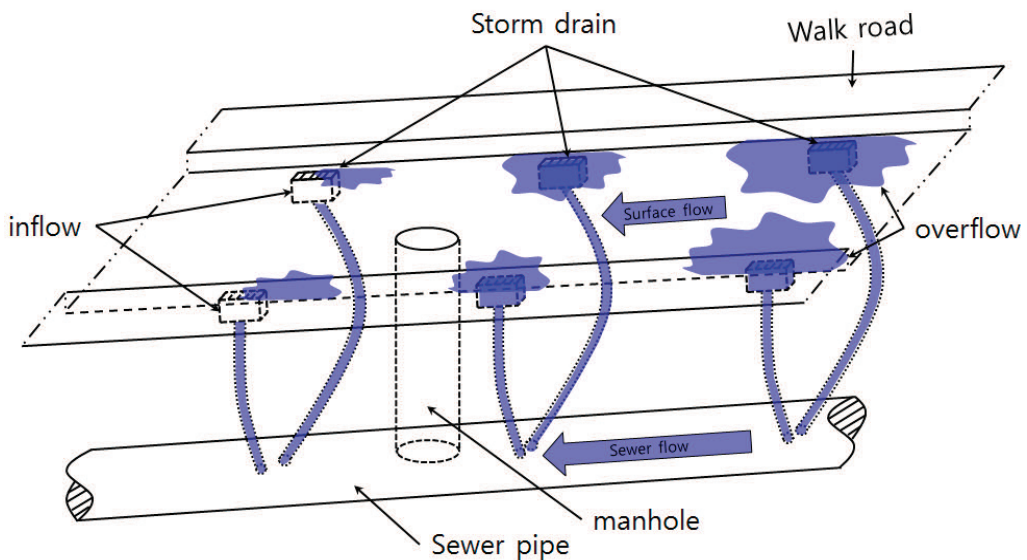


Figure. 4. CUNA 모형의 침수 해석 개념도

### 2.3.1 2지표면 침수 모형

CUNA 모형은 3차원 천수방정식(Shallow Water Equation)을 수심방향( $z$ -direction)으로 적분한 2차원 연속방정식과 운동량방정식을 이용하여 유체의 흐름 해석을 수행하며 식(1)~(3)과 같다.

### 〈연속 방정식〉

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = rr - q_{storm} \quad (1)$$

### 〈운동량 방정식〉

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

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

여기서,  $h$  : 수심( $m$ ),  $t$  : 시간( $sec$ ),  $M(=uh)$  :  $x$ 방향 유량 플럭스( $m^2/s$ ),  $rr$  : 유효강우량( $m/s$ ),  $q_{storm}$  : 지표면과 집수구통 사이의 단위면적당 교환 유량( $m/s$ ),  $u$  :  $x$  방향 유속( $m/s$ ),  $N(=vh)$  :  $y$ 방향 유량 플럭스( $m^2/s$ ),  $v$  :  $y$  방향 유속( $m/s$ ),  $g$  : 중력가속도( $m^2/s$ ),  $H(=z+h)$  : 수위,  $z$  : 지반고( $m$ ),  $n$  : 조도계수

2차원 지배방정식의 수치해석에 필요한 각 변수의 배치와 관련해서는  $x, y$  방향의 유량 플럭스( $M, N$ ), 및 유속( $u, v$ )을 삼각격자의 경계(삼각형의 변의 중점)에서, 수심( $h$ )을 격자의 도심에서 정의하고 Leap-Frog법을 이용하여 계산을 진행한다. 수치해석에 관한 보다 자세한 내용은 Lee(2016)에 자세히 기술되어 있으므로 본 보고서에서는 생략하도록 한다.

강우 자료의 적용과 관련하여 CUNA모형은 모의 영역 전체에 단일 강우 사상을 적용하는 방법과, Thissen망을 활용하여 모의 영역 내에 다수의 지점 강우 자료를 적용하는 방법 그리고 레이다나 위성자료와 같이 격자형태의 시계열 자료 등을 이용할 수 있다. Thissen망을 활용하는 경우와 격자형태의 시계열 자료를 활용하는 경우에는 강우 자료의 위치( $x, y$  좌표) 정보와 유효영역(Thissen 영역 또는 그리드 크기) 정보 그리고 모의 영역의 개별 격자의 위치정보와 격자 크기 자료를 활용해 강우자료의 영역이 모의 영역에 영향을 미치는 범위를 산정한다.

### 2.3.2 1차원 하수관망 해석 모형

도시지역 하수관망은 배수특성에 따라 구분한 배수분구를 기본단위로 구분할 수 있다. 각 배수분구에는 집수구, 배수설비, 배수설비관, 복개하천, 차집시설 등과 같은 지표면과 하수관망을 이어주는 요소와 하수관로, 맨홀, 배수펌프장 등과 같이 실제 지하에서 지표수를 배수시키는 역할을 수행하는 요소로 구분 지을 수 있다. 도시구역에서 일어나는 유출 해석을 수행하기 위해서는 실제와 최대한 유사한 상황을 모형에서 고려하는 것이 타당하다고 할 수 있으나 활용 가능한 데이터의 유무, 활용 가능한 데이터의 신뢰도, 모형의 전처리 과정에 소요되는 시간, 모델 계산에 소요되는 시간 등을 종합적으로 고려하여 적정 수준의 데이터를 활용하여 모의를 수행하는 것이 합리적이라 할 수 있다.

CUNA모형에서는 위에서 언급한 바와 같이 집수구, 맨홀, 하수관로, 배수펌프장 등을 고려하여 하수 관망해석을 수행한다. 하수관로 내에서의 우수의 흐름 해석을 위해서는 개수로 흐름과 관로 흐름 해석을 동시에 수행할 수 있는 Preissmann slot 모형을 이용하였다. Preissmann slot 모형은 개수로 흐름과 관로 흐름을 동시에 해석할 수 있도록 관로의 상단에 좁고 긴 가상의 슬롯이 설치되어 있다고 가정하여 관로흐름도 개수로 흐름과 동일한 방정식으로 해석할 수 있다는 장점을 가지고 있으며 식 (4)의 1차원 연속방정식과 식 (5)의 운동량방정식을 유한 차분하여 모의를 수행한다.

#### 〈연속방정식〉

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_d - q_m \quad (4)$$

#### 〈운동량방정식〉

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (uQ)}{\partial x} = -gA \frac{\partial H_p}{\partial x} - gn^2 \frac{|Q|Q}{R^{4/3}A} \quad (5)$$

여기서,  $A$  : 통수단면적( $m^2/s$ ),  $t$  : 시간( $sec$ ),  $Q$  : 유량( $m^3/s$ ),  $q_d$  : 집수구와 하수관로 사이의 단위 길이당 교환유량( $m^2/s$ ),  $q_m$  : 하수관로와 맨홀사이의 단위 길이당 교환

유량( $m^2/s$ ),  $u$  : 유속( $m/s$ ),  $g$  : 중력가속도( $m^2/s$ ),  $H_p$  : 피에조수위( $m$ ),  $n$  : 하수관로 내의 조도계수,  $R$  : 동수반경( $m$ )

맨홀과 맨홀사이를 연결하는 하수관로는 일정 간격에 따라 1차원 격자로 분할되며 각 격자의 경계에는 유량( $Q$ )을, 격자의 중간에는 수심( $h$ )을 엇갈리게 배치하여 유한차분 기반 leap-frog기법을 이용하여 수치해석을 수행한다. 그러나 CUNA 모형에서는 하수관로 내의 수위와 지표면의 수위를 비교하여 지표면과 하수관망 사이의 교환유량을 산정하므로 식 (5)에서 계산되는 통수단면적( $A$ )을 수심( $h$ )으로 변환시켜줘야 한다. 일반적으로 하수관로는 원형 또는 사각형으로 구성되어 있으며 하수관로의 형상이 원형인 경우에는 원형 관로의 수심과 단면적 사이의 관계를 나타내는 수리특성 곡선식(hydraulic characteristic curve)을 활용한 식 (6)을 이용하여 통수단면적을 수심으로 변환시키며, 하수관로의 형상이 사각형인 경우는 식 (7)을 활용하여 통수단면적으로 수심으로 변환시킨다.

$$h = \begin{cases} f(A) & : A \leq A_s \\ D + (A - A_s)/B_s & : A > A_s \end{cases} \quad (6)$$

여기서,  $f(A)$  : 수리특성 곡선식,  $A$  : 개수로 흐름일 때의 통수단면적( $m^2$ ),  $A_s$  : 단관인 경우 하수관로의 단면적( $m^2$ ),  $D$  : 하수관로의 직경,  $B_s$  : 슬롯 폭( $m$ )

$$h = \begin{cases} A/W & : A \leq A_s \\ h_s + (A - A_s)/B_s & : A > A_s \end{cases} \quad (7)$$

여기서,  $W$  : 하수관로의 폭( $m$ ),  $h_s$  : 하수관로의 높이( $m$ )

Preissmann slot 모형의 핵심 개념인 가상의 좁고 긴 slot의 폭을 결정하는 방법은 아래 식 (8)을 이용한다.

$$B_s = g \frac{A_s}{a^2} \quad (8)$$

여기서,  $g$  : 중력가속도( $m^2/s$ ),  $a$  : 압력파 전파속도( $m/s$ )

### 〈집수구통에서의 수심계산〉

본 연구에서 이용된 CUNA모형의 2차원 지표면 해석 모형과 1차원 하수관망 해석 모형은 하수관망과 교환유량의 양을 지표면과 하수관망 사이의 수리학적 조건에 따라 비교하여 수정된 위어와 오리피스 공식을 적용하여 계산한다. 지표면의 도로에 위치하고 있는 집수구에서 유량교환이 일어나도록 설계되었다. 그러나 하수관로의 피에조 수위와 지표면의 수위를 직접 비교하여 교환유량을 산정하게 될 경우 상대적으로 적은 유량이 흐르고 있는 하수관로 내의 수심이 급격하게 변화되어 수치적 불안정을 유발 할 수 있다. 따라서 CUNA모형에서는 실제 지표수가 차집 되어 하수관로로 보내지는 집수구를 고려하여 보다 실제와 근접한 도시유출 해석을 실시함과 동시에 급격한 수심변화로 인한 수치해석의 불안정을 피할 수 있도록 하였다. 집수구통은 집수구의 분포와 동일하게 지표면의 도로 격자에 일정 단위 면적당 분포하고 있는 집수구의 하단에 위치하고 있다고 가정하고 있으며 집수구 통의 폭( $w$ )은 0.5m, 길이( $L$ )는 20m로 가정하고 있으며 그 높이를 추정하고 있는 방법은 Figure. 5와 같이 집수구를 포함하고 있는 격자 중심과 하수관로 격자 중심 사이의 거리를 계산하고 집수구와 하수관로가 0.2m 관경의 관로로 연결되어 있다고 가정하여 그 부피를 계산한 후 집수구통의 높이( $h$ )로 변환한다. 식 (9)는 집수구통의 수심을 계산하기 위한 공식을 나타낸다.

$$\frac{\partial h_{db}}{\partial t} = \frac{\sum_{i=1}^M Q_i}{A_{db}} \quad (9)$$

여기서,  $h_{db}$  : 집수구통의 수위( $m$ ),  $t$  : 시간( $sec$ ),  $M$  : 집수구통에 연결된 하수관로 격자와 지표면 격자의 총 개수,  $Q_i$  : 집수구통에서 연결된 지표면과 하수관로 격자 사이에서 발생된 교환 유량의 총 합( $m^3$ ),  $A_{db}$  : 집수구통의 바닥면적( $m^2$ )

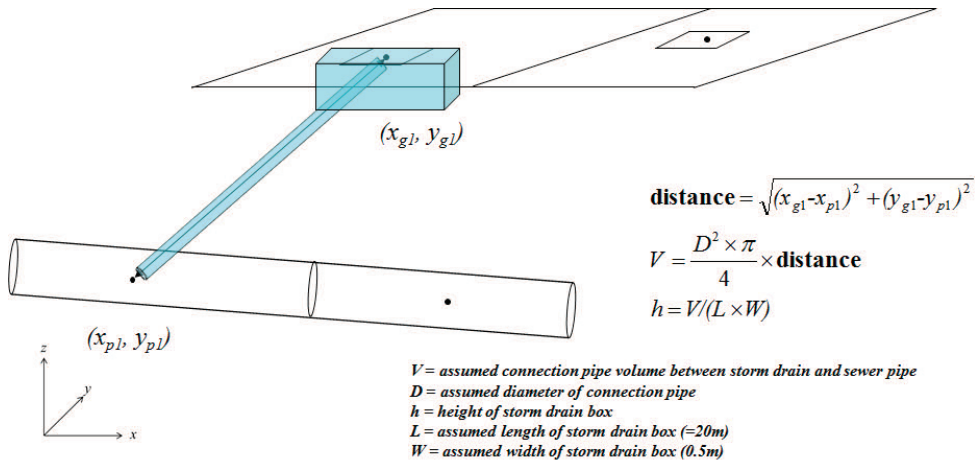


Figure. 5. 집수구통의 높이를 산정하기 위한 개념도(Lee et al., 2015)

### 〈맨홀의 수심계산〉

일반적으로 맨홀은 하수관로의 경사와 방향 등을 조절하기 위해 필요하다. 그러나 도시침수 해석에 있어서 하수관로 간의 단차로 인해 발생하는 에너지 손실뿐만 아니라, 하수관로내의 흐름 상태에 따라 개수로 흐름, 압축류 흐름, 천이영역 흐름뿐만 아니라 제트류(Jet flow)가 발생할 수 있으며 그로 인한 에너지 손실 등 수리학적으로 대단히 복잡한 흐름이 발생하는 영역이다. 실제와 유사한 침수해석을 위해서는 위에 언급한 사항들을 모두 고려하여 침수 해석을 실시해야 하겠으나 실제 유역에서 상기 언급된 사항을 모두 고려하기 위해서는 침수 모의에 필요한 자료가 부족할 뿐만 아니라 일반적으로 지표수의 유입과 역류에 기인한 도시침수의 특성상 맨홀 내부의 복잡한 수리 특성은 고려하지 않고 유속을 0으로 가정하여 맨홀과 하수관로 사이의 교환유량만을 고려한 연속 방정식을 이용한다. 맨홀 내부에서의 수심을 계산하기 위한 식은 다음의 식 (10)과 같다.

$$\frac{\partial h_m}{\partial t} = \frac{\sum_{i=1}^M Q_i}{A_m} \tag{10}$$

여기서,  $h_m$  : 맨홀내부의 수심(m),  $t$  : 시간(sec),  $A_m$  : 맨홀 바닥의 넓이( $m^2$ ),  $Q_i$  : 맨홀과 하수관로 사이의 유출입 유량( $m^3/s$ ),  $M$  : 맨홀에 연결된 하수관로의 개수

### 〈펌프장 연속방정식〉

도시화는 콘크리트와 아스팔트 같은 불투수층을 증가시키고, 증가된 불투수층은 강우 발생 시 토층으로의 침투율을 감소시켜 직접유출에 기여하는 유효강도를 증가시키게 된다. 따라서 증가된 지표면 유출량의 일부를 지하공간을 통해 배수시키기 위하여 하수관망 설치의 필요성이 증대되었다. 하수관망은 지표면에서 발생하는 유출량을 지표면 보다 낮은 높이에서 배수 시켜야 하므로 하수관망의 최하단은 하천 수위에 직접적으로 영향을 받지 않는 높이로 하천과 연결되어야 한다. 그러나 지표면 보다 낮은 높이에 매설되는 하수관로의 특성상 최하류단 배출구의 높이가 하천의 수위보다 낮아지는 경우가 다수 발생하게 되며 이런 경우에는 우수를 인공적으로 배수를 시키기 위해 배수펌프장 설치가 필요하다. 따라서 도시침수 해석에 있어서 배수펌프장의 고려는 필수적이라 할 수 있다. CUNA 모형의 경우 배수펌프장의 고려를 위해 아래의 식 (11)을 이용한다.

$$\frac{\partial h_{pm}}{\partial t} = \frac{Q_{pm}}{A_{pm}} \quad (11)$$

여기서,  $h_{pm}$  : 배수펌프장에서의 수위(m),  $t$  : 시간(sec),  $Q_{pm}$  : 배수펌프장으로 유입되는 총 유량( $m^3/s$ ),  $A_{pm}$  : 배수펌프장 바닥 면적( $m^2$ )

1차원 하수관망 해석의 수치해법에 관한 자세한 사항은 Lee(2016)을 참고 할 수 있다.

### 2.3.3 연결부 모형

CUNA모형은 2차원 지표면 흐름 1차원 하수관망 흐름을 동시에 해석하면서 각 계산 단계마다 지표면과 하수관망의 수리적 조건에 따라 지표면 위의 도로격자에 위치하고 있는 집수구를 기준으로 하수관망으로의 유입과 하수관망에서 지표면으로의 역류를 계산한다. 따라서 2차원 지표면 흐름을 위한 지배방정식과 1차원 하수관망 해석을 위한 지배방정식 이외에 유량교환이 가능하도록 두 개의 공간을 연결 시켜줄 수 있는 연결부 모형이 필요하다. 또한 1차원 연속방정식과 운동량방정식으로 해석이 가능한 하수관로의 해석과 더불어 하수관로와 하수관로를 연결해주는 맨홀에서의 유량교환을 위해 필요

한 연결부 모형이 필요하다.

연결부 모형은 지표면과 하수관망, 그리고 하수관로와 맨홀 사이의 유량교환을 위한 모형으로 구분 할 수 있으며 각 모형별 교환유량 산정을 위한 기본 가정과 공식은 다음과 같다.

### 〈맨홀과 하수관로 사이의 교환유량 산정〉

CUNA모형에서는 하수관로는 연속방정식과 운동량방정식으로, 맨홀에서의 수심은 유속을 0으로 가정하여 연속방정식만으로 해석하므로 맨홀과 하수관로의 연결부에서 발생하는 유량을 해석할 수 있는 지배방정식이 독립적으로 필요하다. 따라서 본 모형에서는 맨홀과 하수관로 사이에서 발생하는 교환유량을 계산하기 위하여 각 요소의 수위 조건을 고려하여 위어(weir)와, 오리피스(orifice) 공식을 적용하여 교환유량을 계산하며 그 관계조건 식은 식 (12), (13)과 같다.

-  $h_m/h_s \geq 2/3$ 인 경우

$$Q = 0.35 \times A_s \sqrt{2gh_s} \quad (12)$$

$h_m/h_s < 2/3$ 인 경우

$$Q = 0.91 \times A_m \sqrt{2g(h_s - h_m)} \quad (13)$$

여기서,  $h_m$  : 맨홀 수위(m),  $h_s$  : 하수관로의 수위(m),  $Q$  : 교환유량( $m^3/s$ ),  $A_s$  : 맨홀과 하수관로의 접합부에서의 하수관로의 단면적( $m^2$ ),  $g$  : 중력가속도( $m^2/s$ ),  $h_s$  : 하수관로 격자의 수위(m),  $A_m$  : 맨홀과 하수관로의 접합부에서의 맨홀쪽 하수관로의 단면적( $m^2$ )

식 (12), (13)은 하수관로의 수위가 맨홀의 수위보다 큰 경우 적용 가능한 공식이며, 맨홀의 수위가 하수관로의 수위보다 높은 경우에는 공식의 부호가 바뀌고 단면적과 수위의 아래첨자가 반대로 바뀐 공식이 적용된다.

### 〈지표면과 하수관망 사이의 교환유량〉

CUNA모형은 도로격자에 일정한 간격으로 분포되어 있는 집수구를 통해 2차원 지표면 흐름 해석 모형과 1차원 하수관망 해석 모형이 연결된다. 지표면에서 하수관망으로의 유입유량과 하수관망에서 지표면으로의 역류량은 도시구역의 침수면적과 침수심을 계산하는 가장 중요한 요소이므로 신중히 계산되어야 한다. 본 모형에서는 집수구-집수구통-하수관로로 이어지는 도시구역 배수시스템을 모형화 하여 집수구-집수구통, 집수구통-하수관로 사이의 수리학적 조건에 따라 상호간의 교환유량을 산정하도록 하였다. 교환유량산정에 이용되는 공식은 수정된 위어와 오리피스공식(Lee et al., 2012)이 이용되며 그 식은 다음의 식 (14)와 (15)와 같다.

-  $(h_{hs} - h_{hg})/B_0 \geq 0.5$ 인 경우(오리피스 공식)

$$Q = C_{do} \times A_{sd} \sqrt{2g(h_{hs} - h_{hg})} \quad (14)$$

-  $(h_{hs} - h_{hg})/B_0 < 0.5$ 인 경우(위어 공식)

$$Q = C_{dw} \times L \times \frac{2}{3} \sqrt{2g} (h_{hs} - h_{hg})^{1.5} \quad (15)$$

여기서,  $h_{hs}$  : 집수구를 포함하고 있는 지표면 격자의 수심(m),  $h_{hg}$  : 지표면 기준 집수구통에서의 수심(m),  $B_0$  : 집수구 가로와 세로길이 중 작은쪽의 폭(m),  $C_{db}$  : 오리피스 공식 계수,  $A_{sd}$  : 집수구 덮개 넓이( $m^2$ ),  $g$  : 중력가속도( $m^2/s$ ),  $C_{dw}$  : 위어공식 계수,  $L$  : 집수구 덮개 둘레길이(m)이다.

맨홀과 하수관로사이의 교환 유량 산정과 동일하게 집수구통의 수위가 지표면의 수심보다 높아지는 경우에는 공식의 부호가 +에서 -로 바뀌고, 각 변수의 아래첨자가 반대로 바뀐 공식이 적용되며, 집수구통과 하수관로 사이의 유량교환 역시 식 (14), (15)와 동일한 방식으로 계산된다.

## 2.4 입력자료 구축 및 전처리

### 2.4.1 GPM 자료 전처리

GPM 자료는 2A 이중강수레이더(DPR) 자료를 이용하였다. 이중강수레이더를 이용한 강수량은 KuPR과 KaPR에서 얻게 되는 에너지를 변환하여 관측한다. 이 강수 알고리즘은 강수타입이나 강수높이, 밝은 띠 높이 등의 정보도 제공한다. 알고리즘은 TRMM/PR 강수 알고리즘을 배경으로 개발되었으며, 이중강수레이더에 대한 정보가 추가되었다. 여러 모듈로 이루어진 알고리즘은 동시에 TRMM/PR과 KuPR에 적용될 수 있도록 설계되었다. 입력자료는 레벨 1 자료들(received power profile, etc.)이며, 레이더 방정식은 다음과 같다. 출력데이터는 레벨 2 강수연직분포 자료이다.

$$P_r(r) = \frac{C|K|^2}{r^2} Z_{m0}(r) \quad (16)$$

$$Z_e = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K|^2} \int \sigma_b(D) N(D) dD \quad (17)$$

$Z_e$ 는 강수입자 지름  $D$ 와  $N(D)$ 로 나타낼 수 있다.  $Z_e$ (Effective radar reflectivity factor)와  $k$ (specific attenuation) 관측레이더반사인자를 이용하여 식 (16)과 같이 쓸 수 있다. 그리고  $Z$ - $R$ 관계식을 이용하여 강수량을 산정한다.

$$10\log_{10} Z_m(r) = 10\log_{10} Z_e(r) - 2 \int_0^r k(s) ds \quad (18)$$

위의 식을 다음(19)과 같이 풀어서 강수량 산정하거나

$$Z_e(r) = \frac{Z_m(r)}{[1 - 0.2(\ln 10)\beta \int_0^r \alpha(s) Z_m(s)^\beta ds]^{1/\beta}} \quad (19)$$

강수에 의해 감쇄값(PIA, Path integrated attenuation)을 이용하여 강수량 산출한다(20).

$$PIA = -\frac{10}{\beta} \log_{10} [1 - 0.2(\ln 10)\beta \int_0^{r_s} \alpha(s) Z_m(s)^\beta ds] \quad (20)$$

태풍 차바가 제주도를 지나 북상할 때 GPM 위성의 DPR 센서가 태풍 차바를 관측하였다 (Figure. 6). 촬영모드는 2016년 10월 4일 20시(UTC) 19분에서 22분, 약 27분이 소요되었 으며, 지상에서 2.5km 되는 자료를 이용하였다. Flag 자료로 강수 알고리즘과 구름분류 를 위한 Flag 값을 이용하였다. Land surface type 값은 0-99까지 바다, 100-199 값까지 육지, 200-299는 해안, 300-399는 육지내 호수값을 나타내며 에러값을 -9999는 가진다. 강수 flag값은 0일 때 강수가 없으며, 1일 때 강수가 있다는 표시자를 나타낸다. 강수가 있는 경우 강수 구름에 대한 정보를 제공하는데, 값이 1일 경우는 stratiform 구름에서 비가 내리는 경우를 말하고 2의 값은 convective 구름의 강수를 나타낸다. 구름분류는 GPM 자료 중 강수 표시인자 1의 값인 강수가 있을 경우의 GPM, COMS 자료의 데이터베 이스와 강수 표시인자가 0인 강수가 없을 때의 GPM, COMS자료 데이터베이스에서 구름 분류를 시도하였다. 일반적으로 잘 알려진 적외 온도는 250K이하일 때 비가 온다고 정하였 으며, 낮에는 Visible 채널값이 40% 이상일 때만 비가 오는 결정값으로 이용하였다. 정지 궤도 위성 강우량을 산출할 때 가장 많은 에러값은 얇은 상층운이 온도가 낮고 강수가 없는 구름인데 알고리즘에서는 강수가 온도에 반비례하기 때문에 비가 많이 내리는 값으로 표시가 된다. 일반적으로 단파적외(3.7 $\mu$ m)와 적외 채널의 차분온도와 적외채널을 이용하여 얇은 상층운을 판별하려고 하였으나 정확히 얇은 상층운을 판별하기 어려웠다.

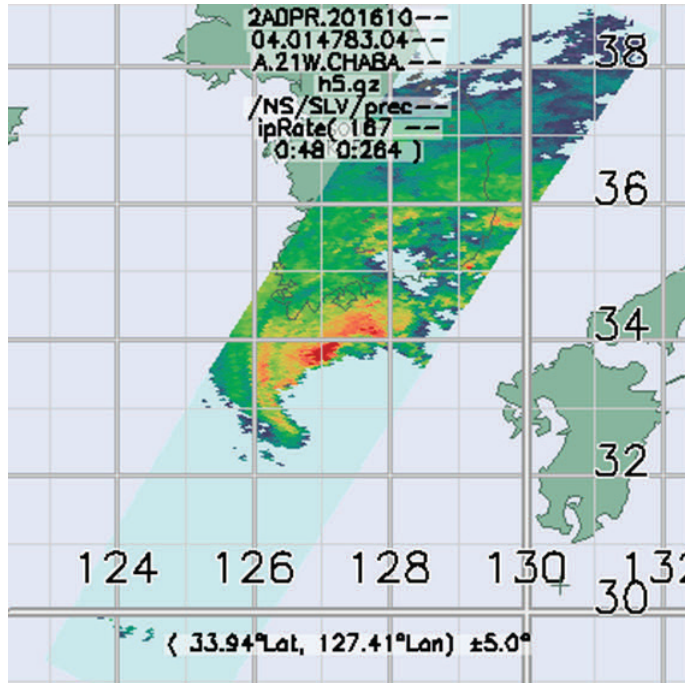


Figure. 6. 태풍 차바의 GPM 듀얼레이더 강우량

#### 2.4.2 COMS 자료 전처리

COMS 적외 채널 자료를 태풍 차바 관측한 GPM 위성과 같은 시간대의 입수하였다. 한반도 지역 자료이며, 자료는 10bit 자료로 기상청에서 제공하는 Conversion Table 자료 기반으로 10bit 상수자료를 휘도온도(Brightness Temperature)로 변환하여 사용하였다. COMS 위성자료에서는 Visible( $0.67\mu\text{m}$ ) 반사인자값과 단파적외채널( $3.7\mu\text{m}$ ), 수증기 채널( $6.7\mu\text{m}$ ), 적외 채널( $10.8\mu\text{m}$ ,  $12.0\mu\text{m}$ )의 복사값은 플랑크 법칙에 의해서 TBB 값으로 환산하였다(Figure. 7). 강수 타입을 250K도 보다 적은 적운형의 강수구름으로 적용하였으며, 상대적으로 적은 강수사상으로 육지와 해양쪽으로 나누지 않고 모든 경우에 대해서 강수와 적외채널 값의 데이터베이스를 산출하였다.

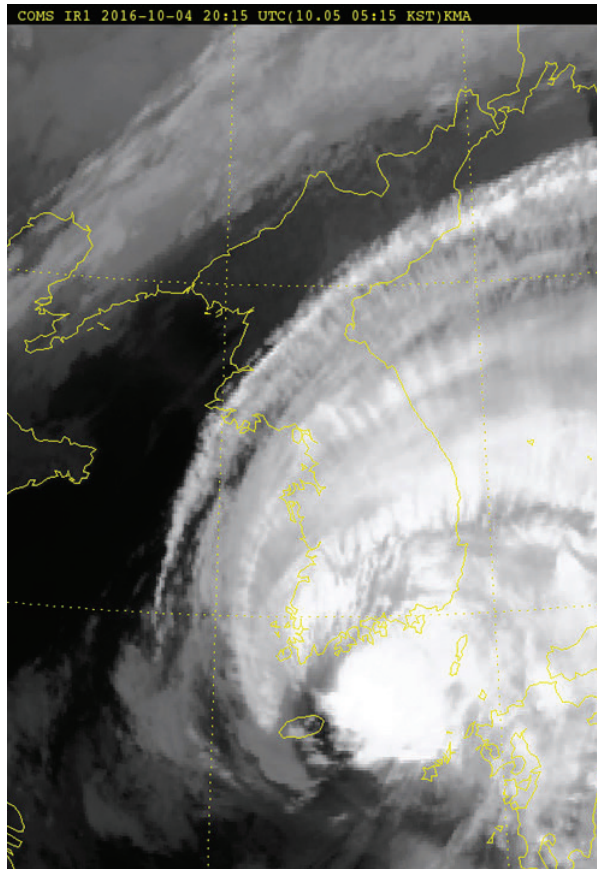


Figure. 7. COMS 태풍 차바의 적외채널 영상

### 2.4.3 레이더 자료 전처리

고산레이더에서 관측한 자료를 이용하였다. 고산레이더는 제주시 고산리에 위치하며 S밴드 단일 편파 도플러로 안테나 직경이 8.5m로 관측반경이 240km이다. CAPPI 자료이며, 고도는 지상에서 2.5km 반사도(dBZ)을 산출하여 DB화 하였다(Figure. 8).

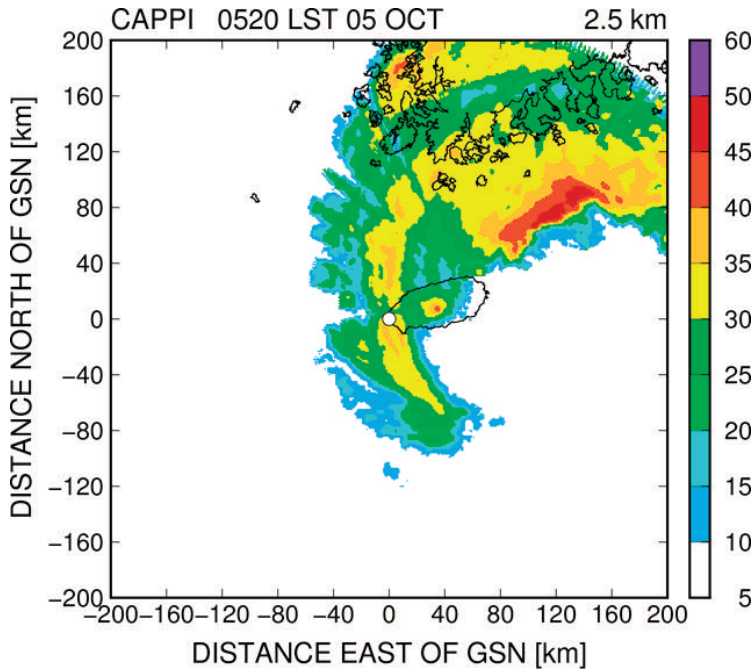
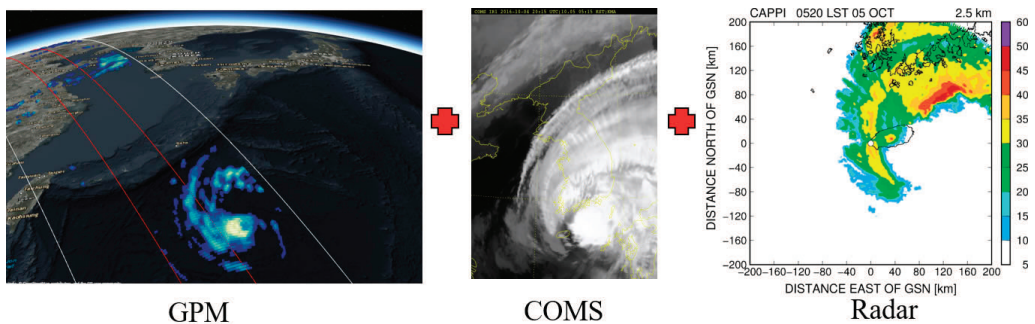


Figure. 8. 고산레이더 태풍 차바 반사도

#### 2.4.4 GPM COMS 레이더 자료 전처리

GPM 자료와 COMS 레이더 자료는 각각의 픽셀단위로 시간과 위치가 맞지 않기 때문에, 각각의 시간과 위치를 보정해야 하는 전처리 과정을 거쳐야 한다. GPM 자료는 픽셀마다 시간과 위경도 정보값을 제공하기 때문에 GPM 자료를 고정하고 프로그램(Maltab 코드)을 이용하여 GPM 각 픽셀 자료마다 COMS와 레이더 자료 중에서 시·공간이 가장 근접한 자료를 추출하여 각각의 픽셀마다 GPM, COMS, 레이더 자료를 데이터베이스화한다(Figure. 9).





지표면에서 물의 흐름은 지형의 높낮이에 의한 영향을 가장 많이 받으므로 지표면 고도자료는 2차원 지표면 흐름 해석에 필수적인 요소이다. Figure. 10은 본 연구의 대상유역인 온천천 유역의 고도자료를 얻기 위해 수집된 1:5,000과 1:1,000 축척의 등고선 자료를 보여준다. 본 연구에서 수집한 등고선 자료는 국토정보지리원 홈페이지(<http://www.ngii.go.kr>) 제공하는 ngi파일 형식의 수치지도를 다운로드 받아 지형의 고도자료를 나타내는 등고선 자료만 shp 파일 형태로 변환하여 얻어진 자료이다. 온천천 유역 전체의 고도자료를 획득하기 위하여 1:5,000 축척은 570장, 1:1,000은 1659장의 ngi파일을 다운로드받아 개별적으로 shp 파일로 저장한 후 오픈소스 기반의 GIS 소프트웨어인 QGIS([www.qgis.org](http://www.qgis.org))를 활용하여 1m 해상도의 Digital Elevation Model(DEM)으로 변환하였다. 최종 얻어진 DEM 자료는 온천천 유역분할 및 불규칙 격자망의 고도자료 획득에 이용된다.

#### 2.4.6 지표면 도로망 자료

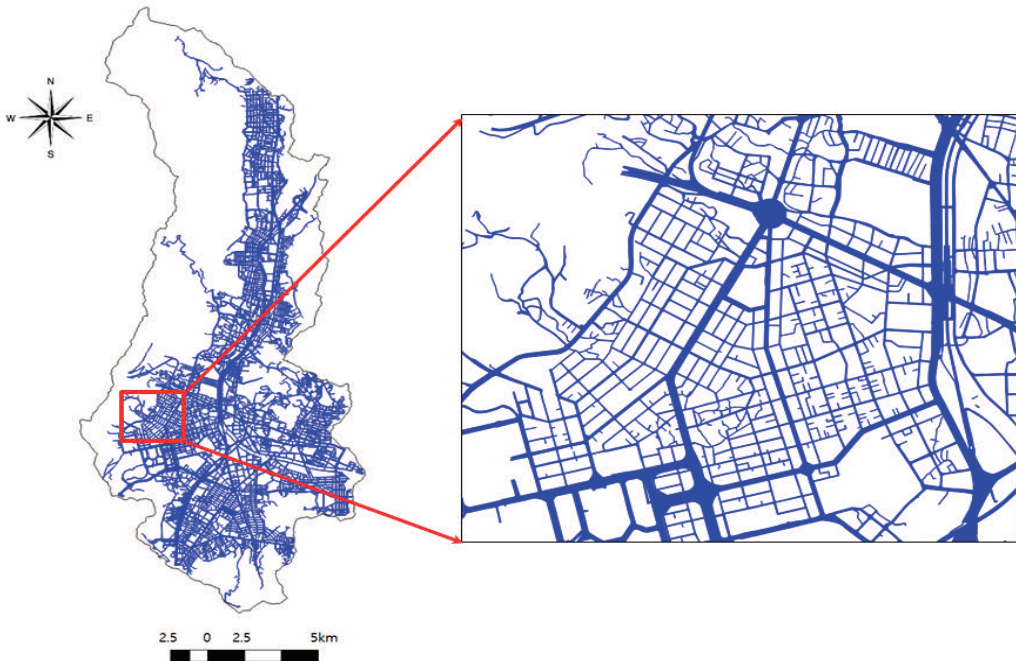


Figure. 11. 온천천 유역 도로망 자료

CUNA모형은 도로위에 분포되어 있는 집수구를 통해 지표면과 하수관망 사이의 유량 교환이 일어나도록 설계되었으므로 모의 수행을 위해서는 도로망 자료 확보가 필수적이다. Figure. 11은 본 연구에서 수집된 온천천 유역의 도로망 자료를 보여준다. 온천천 유역의 도로망 자료 역시 국토지리정보원에서 제공하는 수치지도에서 추출하였다. 수치지도에서 추출된 도로망 자료는 shp파일 형태로 저장되어 온천천 유역의 불규칙 격자망 분할시 활용되며 모형의 내부적으로는 집수구를 분포시키는 용도로 활용된다. 도로망 격자 위에 집수구 분포시에는 공개되어 있는 자료를 활용하거나 실제 현장 조사를 통해 수집된 크기와 형상을 고려하는 것이 가장 타당하다고 할 수 있으나 국내에서 공개되어 있는 집수구 관련 자료는 자료의 신뢰성이 상대적으로 낮아 모의에 활용하기 곤란하며 현장조사를 통해 자료를 수집하는 방법은 효율적이지 못해 본 연구에서는 Lee et al.(2017)에서 활용한 격자면적  $100m^2$  당  $0.25m^2(0.5m \times 0.5m)$  크기의 집수구가 한 개씩 분포되어 있다는 가정을 기반으로 모의를 수행하였다.

#### 2.4.7 유역분할

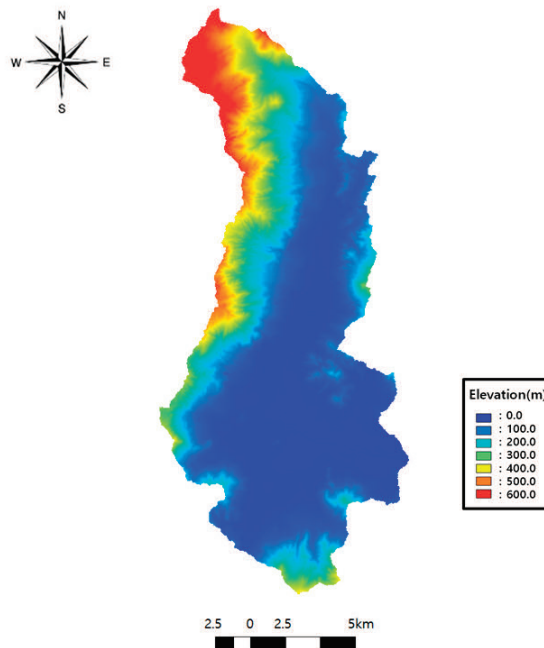


Figure. 12. 온천천 유역도

Figure. 12는 본 연구의 대상 지역인 온천천 유역도를 나타낸다. Figure. 12의 온천천 유역도는 국토지리정보원에서 제공하는 수치지도를 활용해 얻은 1m 해상도의 DEM을 활용하였으며 유역출구는 수영강과 온천천의 합류지점으로 유역분할을 수행하였다. 유역분할 수행결과 온천천 유역은 표고 4.78m ~ 595.28m까지 분포 되어 있으며 북서쪽의 금정산과 남쪽의 황령산과 금련사 그리고 운산으로 둘러 싸여 있다. 북서쪽에 위치하고 있는 금정산의 고도가 가장 높으므로 강우 발생시 북서쪽에서 유하하는 지표수가 온천천 유출량에 가장 크게 기여할 것으로 판단된다.

#### 2.4.8 하천 단면 자료

항공측량시 이용되는 센서의 경우 수표면(water surface)을 결측자료로 나타낸다 (Charlton et al., 2003). 물론 국토지리정보원에서 제공하는 수치지도는 항공사진 촬영 → 지상기준점 측량 → 사진기준점 측량 → 수치도화 → 지리지명 조사 → 정위치 편집 등의 과정을 거쳐 데이터베이스화 되므로(국가정보포털 홈페이지, <http://www.nsd.go.kr/?menuno=2719>) 자료의 외견상 하도의 형상을 확인할 수 있으나 보다 정확한 2차원 하천 단면자료를 얻기 위해서 본 연구에서는 부산시에서 제공받은 하천 단면 측량자료를 활용하여 추가적인 보간 작업을 수행하였다. 하천 단면 자료를 활용하여 2차원 DEM 자료에 합성하는 전처리 과정은 다음과 같다.

- 1) HEC-RAS를 활용하여 하천 단면 측량 자료를 보다 짧은 간격으로 보간한다.
- 2) 보간된 단면 자료의 x, y, z 좌표 자료를 텍스트 형식으로 저장 후 QGIS로 읽어 들인다.
- 3) QGIS상에서 x, y, z 포인트 자료를 1m 간격의 격자자료로 변환한다.
- 4) 하천 단면 측량자료에서 하천 제방 노드자료를 활용하여 제외지 폴리곤 자료를 생성한다.
- 5) 제외지 폴리곤 자료를 이용하여 기존의 DEM자료에서 제외지 영역을 삭제한다.
- 6) 3)에서 생성된 격자자료에서 제내지 영역을 삭제하여 Figure. 14와 같이 하천 단면 자료만 남도록 한다.
- 7) 5)에서 생성된 자료와 6)에서 생성된 자료를 합성하여 최종 DEM자료를 생성한다.

Figure. 13 (a)는 2004년 온천천 하천정비기본계획 보고서 작성시에 수행된 하천단면 측량자료이다. 하천 단면자료는 미공병단에서 제공하는 1차원 부등류 해석 모형인 HEC-RAS 모형에서 확인 가능하며 단면과 단면 사이의 자료를 보다 세밀하게 표현하기 위한 보간작업도 수행가능하다(Figure. 13 (b)).

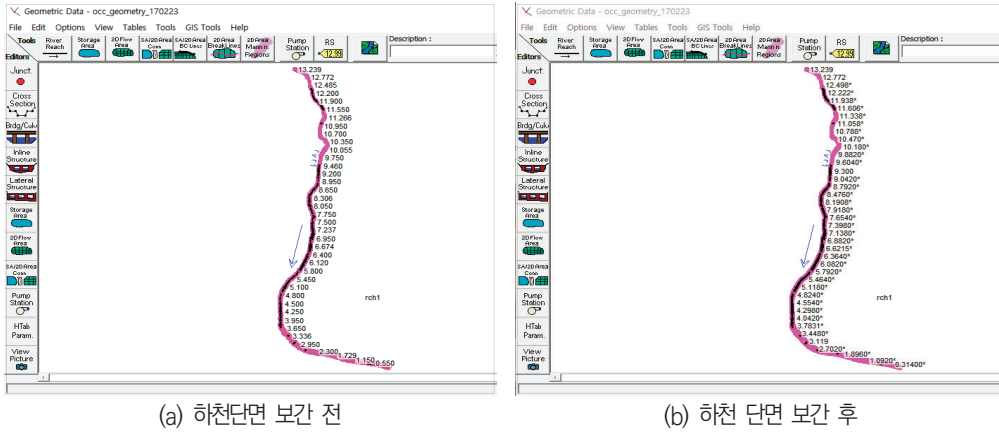


Figure. 13. 온천천 단면 측량 자료

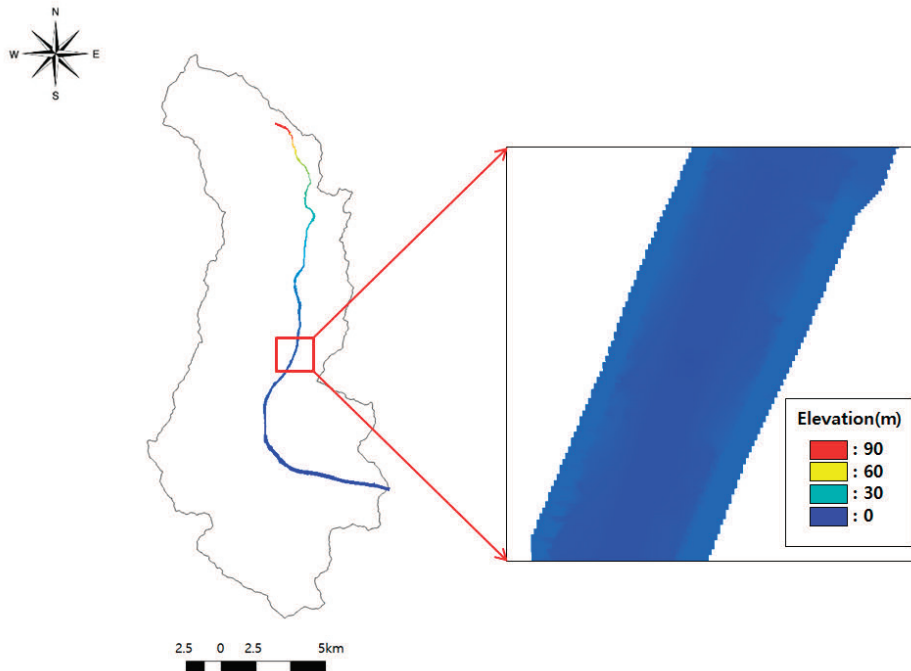


Figure. 14. 보간된 2차원 하천단면 자료

### 2.4.9 하수관망 데이터

도시지역이 확장되면서 증가된 불투수층은 강우 발생시 표층에서의 침투 현상을 감소시키게 되며 이는 지표면에서의 유출량을 증가시키게 되어 결과적으로 도시구역의 침수 발생을 증가시키게 된다. 하수관망은 증가된 지표면의 유출량을 지하에 매설된 관로를 통해 배출시키기 위한 목적으로 설계 되므로 도시구역의 유출 과정에서 대단히 중요한 역할을 수행한다.

본 연구에서 수행된 침수 해석에서는 1차원 동역학방정식을 이용하여 하수관로내의 유량과 수위를 해석한다. 또한 하수관망 구성 요소 중 맨홀과 배수펌프장을 고려하여 온천천 구역의 침수해석을 수행하였으며 도시침수 해석에 필요한 하수관망 데이터는 부산시에서 제공받았다. 본 장에서는 하수관망 데이터 간의 상호 연관성과 모형의 입력자료로 변환하기 위한 전처리 과정에 대해 기술한다.

#### 2.4.9.1 하수관거 자료

하수관로는 하수관망의 구성요소 중 하나로써 맨홀과 맨홀 사이를 연결하여 배수분구 단위로 지표면의 우수를 지하공간에서 유하시키는 역할을 수행한다. 하수관로는 지하공간에 매설되어 있으므로 정확한 크기와 위치 그리고 형상을 확인하는데 상당한 어려움이 따른다. 따라서 최초 설계된 하수관로 설계도에 기초 하여 모의에 필요한 정보를 수집하여야 한다. 부산시에서는 1999년부터 ‘도시정보시스템’ 사업을 통해 도로와 하수도, 상수도 등의 정보를 디지털화 하는 사업을 수행하고 있으며, 본 연구에서는 부산시에서 제공받은 GIS 형태의 자료를 활용하여 모의 입력자료를 구축하여 연구를 수행하였다. 부산시로부터 제공받은 데이터 중 하수관로는 총 110,953 개였으며 그중 온천천 구역에 포함되는 자료는 총 31,503개로 그 공간적 배치는 Figure. 15와 같다.

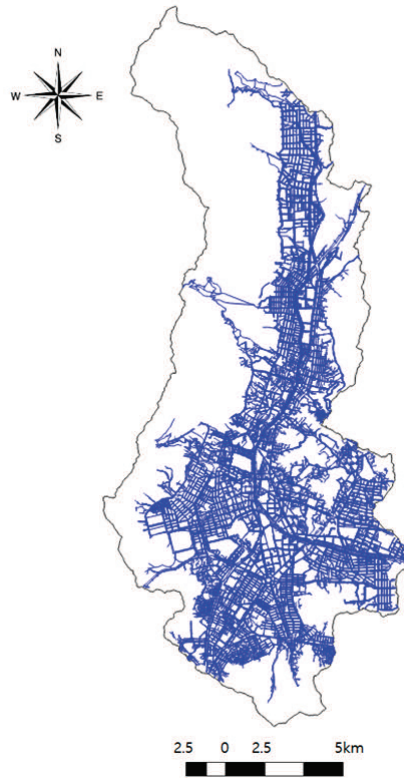


Figure. 15. 온천천 유역의 하수관거 자료 배치도

모의 수행에 필요한 하수관거의 속성정보는 관거의 길이, 관거의 형태(원형 또는 사각형), 관거 단면 너비, 관거 단면 높이, 조도계수, 매설깊이, 매설경사, 상하류단에 연결된 맨홀 정보, 하수관로의 각 절점별 x, y 좌표 등이며 부산시에서 제공받은 하수관거 자료를 모형의 입력자료로 변환하기 위한 전처리 과정은 다음과 같다

- 1) 개별 ID로 구분되어 line 자료 형태로 구성되어 있는 관거자료의 모든 node를 추출한 후 다시 개별 ID로 묶어 개별 data set을 구성한다.
- 2) 하수관거의 길이는 각 노드를 연결한 총합으로 한다.
- 3) 하수관거의 단면 형태를 결정하기 위해 관거의 직경, 너비, 높이를 확인 후 원형과 사각형으로 구분하고, 조도계수는 일괄적으로 0.013으로 결정한다.
- 4) 하수관거의 매설깊이가 나와 있는 경우는 그 값으로 결정하고 그렇지 않은 경

우는 하수도시설기준(환경부, 2011)에 따라 최소 매설 깊이인 1m에 안전율을 고려하여 1.5m로 정한다.

- 5) 하수관거의 경사는 하수관로의 상하류단 매설깊이가 기록되어 있는 경우에는 그 값을 이용하고 그렇지 않은 경우에는 하수관로의 각 노드가 분포되어 있는 지표면 경사의 평균값으로 한다.
- 6) 하수관거의 상하류단에 연결되어 있는 맨홀 정보가 없는 경우에는 하수관거의 최 끝단 노드와 0.1m 반경 내에서 가장 가까운 맨홀로 지정해 준다.

이상의 방법을 이용하여 shp파일 형태의 하수관망 자료를 모형의 입력자료로 변환하였으며 하수관거 입력자료는 txt파일 형태로 저장되어 모의 입력자료로 이용된다.

#### 2.4.9.2 맨홀 자료

하수관망 구성요소 중 맨홀은 하수관거와 하수관거의 단차와 흐름 방향을 전환시키기 위해 필수적인 요소이다. 부산시로부터 제공받은 데이터 중 맨홀은 총 68,956개였으며 그 중 온천천 유역에 포함되는 자료는 총 23,912 개였으며 그 공간적 배치는 Figure. 16과 같다. 그러나 위에서 언급된 바와 같이 하수관망 자료는 지하공간에 위치하고 있다는 자료의 특성상 자료의 불확실성이 매우 크므로 모형의 입력 자료로 활용하기 위해서는 자료의 분석이 필수적이다.

본 연구에서 수행된 모의를 수행하기 위해 필요한 자료는 맨홀의 x, y 좌표, 맨홀의 매설 깊이, 바닥면적 넓이, 맨홀에 연결되어 있는 하수관거 ID 등 이다. 부산시로부터 제공받은 GIS 자료 분석 결과 맨홀 자료의 속성 정보 중 누락자료가 확인되어 필요한 자료를 새롭게 생성하였으며 그 방식은 다음과 같다.

- 1) GIS자료 중 맨홀의 자료 불확실성이 더 높은 것으로 판단되어 하수관로 자료를 참값으로 가정하여 모의에 필요한 정보를 생성하는 것을 원칙으로 한다.
- 2) 하수관거 자료를 기준으로 상하류단에 연결된 맨홀 정보를 가지고 있는 하수관로의 정보 분석결과 전체 대비 약 13.8% 수준이었으며 누락된 맨홀 자료는 하수관거의 상하류단을 기준으로 새롭게 ID와 x, y 좌표를 생성한다.

- 3) 제공받은 GIS데이터의 맨홀 자료와 새롭게 생성된 맨홀자료 중 실제 하수관거와의 연결 관계가 없는 맨홀은 데이터 목록에서 삭제한다.
- 4) 맨홀의 바닥면 높이가 누락되어 있는 경우 바닥면 높이를 결정하기 위해 맨홀에 연결된 하수관로 중 가장 깊이 매설되어 있는 하수관로의 지반고를 맨홀의 지반고로 하여 맨홀과 하수관거 사이의 단차가 발생하지 않도록 한다.
- 5) 맨홀의 바닥면 넓이가 누락되어 있는 경우에는 맨홀과 연결된 하수관로의 직경 중 가장 큰 값의 1.5배를 맨홀의 바닥면 넓이로 결정한다.
- 6) 맨홀의 바닥면 넓이와 그 맨홀에 연결된 하수관거의 관경 데이터가 모두 누락된 경우에는 먼저 하수관거의 직경을 온천천 유역의 하수관거의 평균관경인 0.43m로 결정 한 후 5)에서와 같은 방법으로 맨홀의 바닥면 넓이를 결정한다.

위에서 기술된 방법을 이용하여 보정된 온천천 유역의 맨홀 자료는 최종적으로 총 60,917개로 결정되었다.

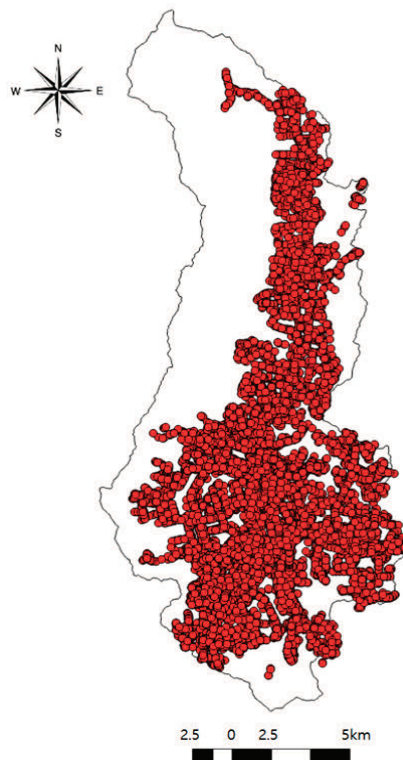


Figure. 16. 온천천 유역의 맨홀 자료 배치도

### 2.4.9.3 배수펌프장 자료

배수펌프장 자료는 2.3.4.2절에서 기술된 맨홀자료의 보정기법과 동일한 기법을 적용하였다. 온천천 유역에는 총 4개의 배수펌프장이 있는 것으로 조사되었으며 각 배수펌프장은 모의기간 동안 지속적으로 최대 용량으로 배수가 진행된 것으로 가정하여 모의를 수행하였다.

### 2.4.10 도로망과 하천형상을 고려한 불규칙삼각망

본 연구에서는 GID 13.0.1 버전을(<http://www.gidhome.com/>) 이용하여 대상 유역의 불규칙 삼각망을 생성하였다. GID는 2, 3차원 수치해석시 필요한 다양한 형태의 격자를 생성해주는 프로그램으로서 상대적으로 복잡한 형상의 격자도 안정적으로 생성할 수 있다는 장점을 가지고 있다. GID를 이용하여 격자를 구축하기 위해서 유역 경계와 Figure. 11의 도로망을 활용하였다. 유역내에 분포하고 있는 건물의 경우 개별적인 건물의 형상을 모두 고려하게 되면 격자 간의 간격이 과도하게 좁아지는 문제점이 발생하게 되므로(Lee et al., 2017) 도로로 둘러싸인 영역은 모두 건물 밀집지역으로 가정하고 격자를 생성함을 원칙으로 하였다. 특히 부산시 온천천 유역의 경우 최근의 계획도시와 같이 설계단계에서 교통량을 예상하고 도로를 설계한 지역이 아니어서 도로망이 매우 복잡하게 구성되어 있으나 최대한 기초데이터의 형상을 유지한 상태로 불규칙 격자망을 구축하였다.

하천형상의 경우 온천천 유역내의 도로망에 중첩시켜 그 형상을 유지한 상태에서 격자 분할을 수행하였다. 또한 도로망과 하천의 형상이 겹치는 지역의 경우 도로망보다 하천 형상을 우선하여 격자를 생성하여 침수해석 시 하천부근에서 도로의 영향으로 인하여 하천수의 흐름이 끊어지는 일을 방지할 수 있도록 하였다. 온천천 유역의 침수해석 모의를 위해 재현된 불규칙 삼각망의 형상은 Figure. 17과 같으며 총 662,246개의 삼각격자로 분할되었다. 전체 격자 중 최소 면적은  $0.29\text{m}^2$ (도로), 최대 면적은  $91,590.29\text{m}^2$ (산지)으로 분석되었다.

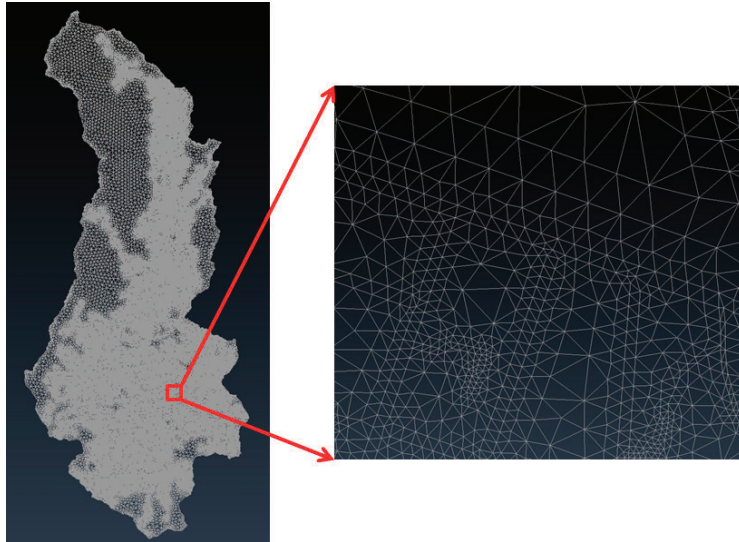


Figure. 17. 도로망을 고려한 온천천 지역의 불규칙 격자망도

#### 2.4.11 토지이용도를 고려한 격자 구분

본 연구에서 이용된 CUNA모형은 도로로 이용되는 격자 위에 집수구를 분포시켜 2차원 지표면 모형과 1차원 하수관망 해석 모형 사이의 유량 교환이 가능하도록 하며 도로망으로 둘러싸인 영역을 건물 밀집 지역으로 지정한 후 지표면 흐름에 영향을 미치도록 지반고를 일정 부분 상승시켜 모의를 수행한다. 또한 도로, 건물 밀집지역, 산지 등 토지이용도별로 조도계수와 유출계수를 다르게 적용한다. 이는 모형의 입력자료 구축에 많은 시간을 소모하게 하는 단점을 가지고 있으나 보다 실제와 유사하게 복잡한 도시지역을 묘사하여 정확한 침수 해석과 분석을 가능하게 하는 장점을 가지고 있다.

도로, 건물밀집지역, 하천, 산지 등과 같이 토지이용도별로 격자를 구분하기 위해서는 먼저 토지이용도별로 형태를 구분지을 수 있는 자료를 활용하여 그 형상을 잃지 않는 상태에서 전체 격자를 재현한 후 개별 자료만으로 재현한 격자자료와 비교 분석하여 전체 격자에서 개별 격자의 속성을 부여한다.

구분결과 Figure. 18에서와 같이 온천천 지역은 331,852개의 노드, 662,246개의 격자 그리고 994,097개의 링크로 구성되어 있으며, 그중 도로 격자는 202,463개, 건물 밀집지역 격자는 256,821개 하천 격자는 6,049개 그리고 야지 및 산지지역 격자는 69,912 개로 구분되었다.

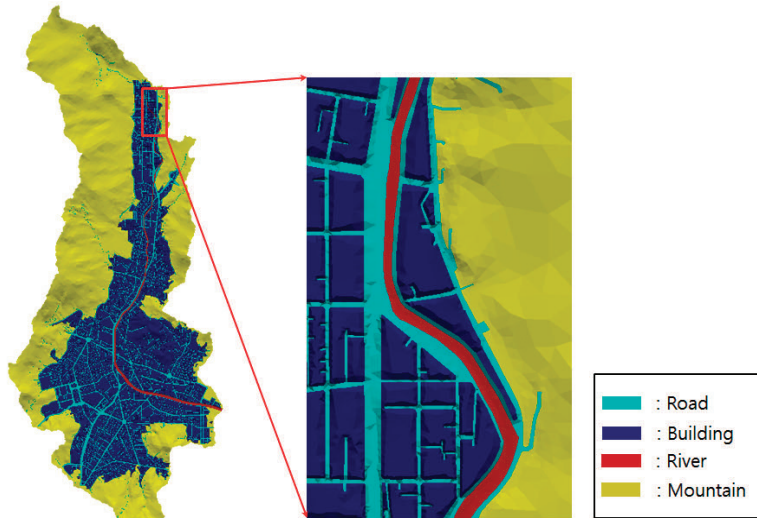


Figure. 18. 격자의 속성을 고려한 온천천 지역의 격자

유역분할, 격자 생성, 격자의 속성 부여 후에는 각 격자의 고도 데이터를 1m 해상도 DEM으로부터 추출하여 적용하였다. 개별 격자의 고도값 추출은 DEM 자료의 위에 최종 생성된 격자를 중첩 시킨 후 삼각격자의 내부에 포함된 DEM 데이터의 평균 값을 개별 격자의 고도값으로 하였다.

## 2.5 강우 알고리즘

### 2.5.1 위성, 레이더 반사도 및 강우량 비교

강우 알고리즘을 산출하기 위하여 GPM 레이더 반사도값과 고산레이더 반사도값을 비교하였다(Figure. 19). GPM 레이더는 14GHz Ku밴드값이고 고산레이더는 S밴드 레이더로 전체적인 값은 30dBZ 이하에서는 비교적 비슷하지만 30dBZ는 더 높은 값을 가진다. 지상레이더와 위성 레이더값의 큰 차이가 없기 때문에 강우 추정 알고리즘을 산출할 때 지상레이더를 이용하는 것도 크게 문제가 없을 것으로 판단된다.

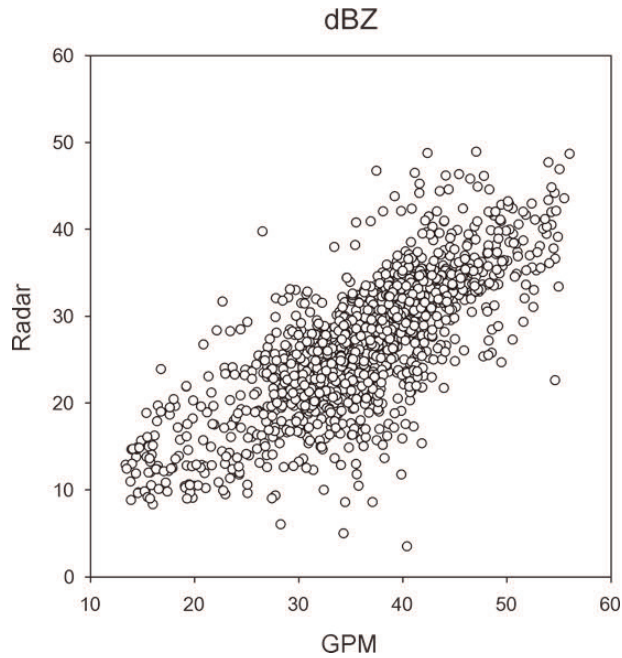


Figure. 19. GPM Ku 레이더 반사도와 고산 레이더 반사도 비교

일반적으로 강우 레이더는 전파를 직접 발사하여 반사되어 오는 값을 강우량으로 변환하기 때문에 원격탐사 강수량 관측 방법 중 가장 정확도가 높은 관측장비로 알려져 왔다. 하지만 Figure. 20에서 알 수 있듯이 30mm/h 까지는 반사도값이 높아질수록 강수량이 많아지는 것을 알 수 있듯이, dBZ가 40이상으로 집중호우가 내릴때는 반사도값에 크게 민감하지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 강우량이 많은 집중호우 기간 동안에는 단일 레이더 자료만을 이용하여 정확도 높은 강우량 산정이 어렵기 때문에 이러한 문제점을 보완하기 위하여 정지궤도 TBB값을 보정하게 되면 집중호우에 잘 맞는 강우 추정 알고리즘을 산정할 수 있다.

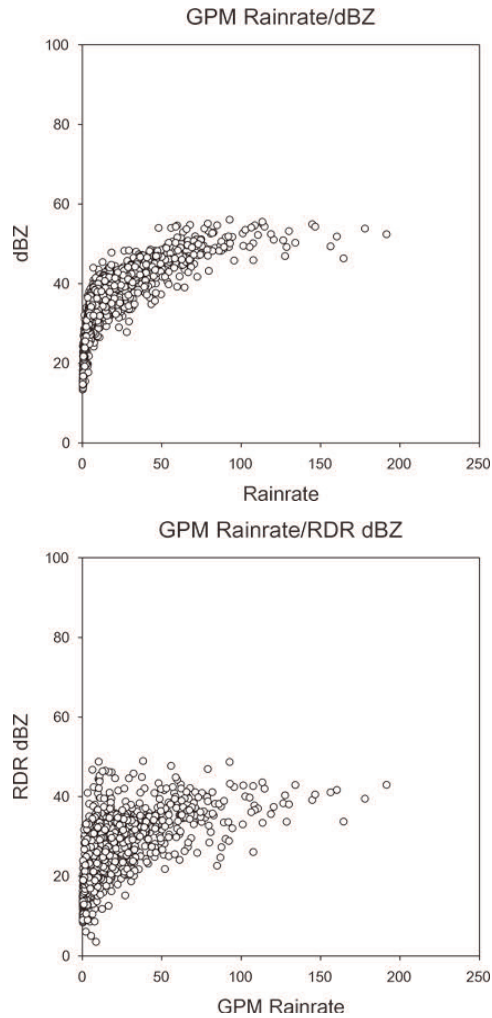


Figure. 20. GPM 위성과 고산레이더 반사값과 강우량 비교

### 2.5.2 레이더 자료 전처리

GPM 위성의 강우량과 COMS TBB 지상레이더 반사도 상관관계를 알아보기 위하여 Figure. 21처럼 레이더 반사도 높은 테스트베드 지역을 설정하고 자료를 추출한 후 상관관계를 알아보았다. Figure. 22에서 알 수 있듯이 COMS의 휘도온도가 낮을수록 레이더에 강한 강수가 나타나는 것을 알 수 있지만 그림 Figure. 22처럼 TBB 200K 내외의 낮은 운정온도로 강한 집중호우가 예상되지만 레이더 반사도값이 20 이하로 표시되는 지역이 있다. 상층운으로 운정온도는 낮지만 강한 강우는 발생하지 않는 구름으로

보이며, 이러한 문제점은 COMS의 구름분류로 약하게나마 분류가 가능하지만 레이더와 COMS의 반사도값과 TBB값을 동시에 고려한다면 COMS단독으로 가능한 구름분류보다 정확한 구름분류가 가능하며 또한 TBB와 반사도값을 동시에 고려하면 보다 강한 집중호우에 적합한 알고리즘 산출이 가능할 것으로 판단된다.

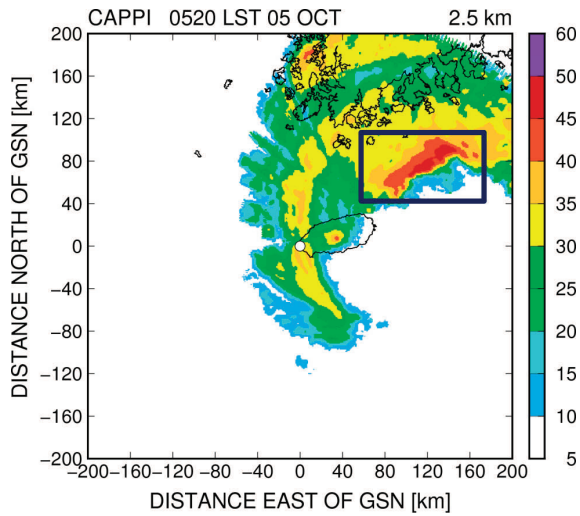


Figure. 21. 강우 알고리즘 위성, 레이더 자료 DB

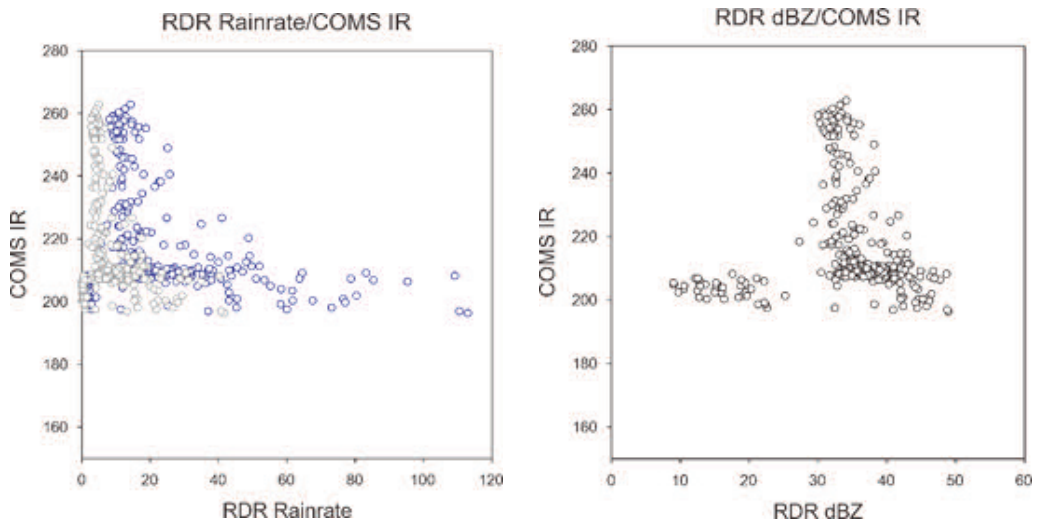


Figure. 22. COMS 적외채널 휘도온도와 강우량 산포도

### 2.5.3 위성-레이더 합성 강우량 추정 알고리즘

위성-레이더 합성 강우량 추정 방법으로는 Z-R관계식을 이용하여 강우량을 산출하는 레이더 값과 적외센서의 운정온도를 이용하는 COMS 강우량을 각각 산출하여 결합하는 방식이 있고(Rain-1), 본 연구에서 제시한 방법으로 COMS 위성의 적외채널 TBB와 레이더 반사도값을 통계적 방법으로 블렌딩하여 강우량을 산출하는 방법이 있다 (Rain-2)(Figure. 23).

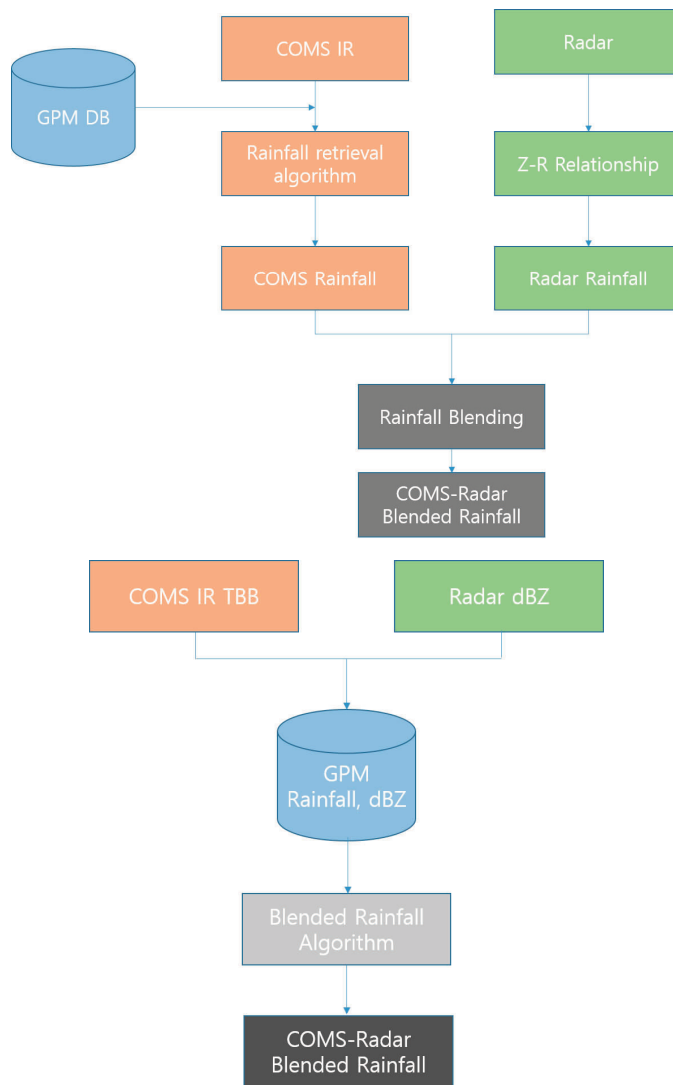


Figure. 23. Rain-1 및 Rain-2 강우추정 알고리즘 흐름도

본 연구에서는 Rain-2 방법을 이용하여 강우 추정 알고리즘을 개발하였다. 태풍 차바 사례에서 얻은 GPM, COMS, 레이더에서 각각 강우량, TBB, 반사도 값을 회귀식을 방법을 통하여 반사도가 42보다 크고 50보다 작은 구간에서의 회귀식과 50이상에서의 회귀식을 산출하여 42이하에서 레이더 Z-R관계식과 함께 강우량 추정 알고리즘을 개발하였다(Figure. 24).

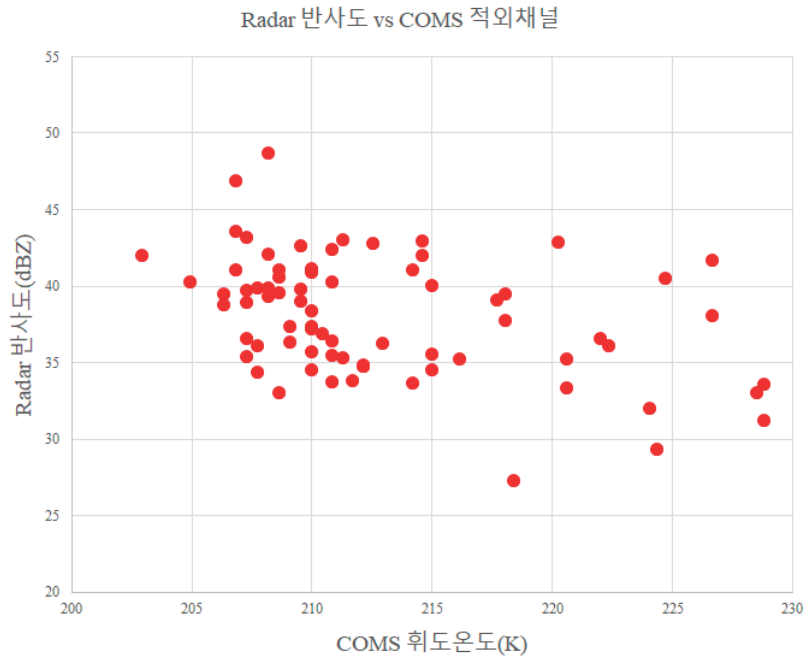


Figure. 24. COMS 휘도온도와 Radar 반사도

### 3. 연구내용

#### 3.1 부산 8월 25일 집중호우

강우 알고리즘(Rain-1, Rain-2)의 검증과 부산시 침수 모형의 입력자료로 이용하기 위한 사례로(Figure. 25) 2014년 8월 25일 경남 및 부산 일대 홍수를 야기한 호우 사상에 대해서 적용하였다. 24일 밤부터 내리기 시작한 집중호우는 오후 1시부터 더 많은 비가 내려 금정산을 중심으로 시간당 최고 130mm의 집중호우가 내렸으며, 금정구에는 242mm, 북구에는 222mm의 이상의 강수량을 기록하였다. Rain-1, Rain-2자료의 검증을 위한 사례로 AWS 지점 941의 북구지점의 시계열 자료를 이용하였고, 지점 940 지점의 동래는 Rain-2 알고리즘의 검증 사례로 관측자료를 이용하였다(Figure. 26).

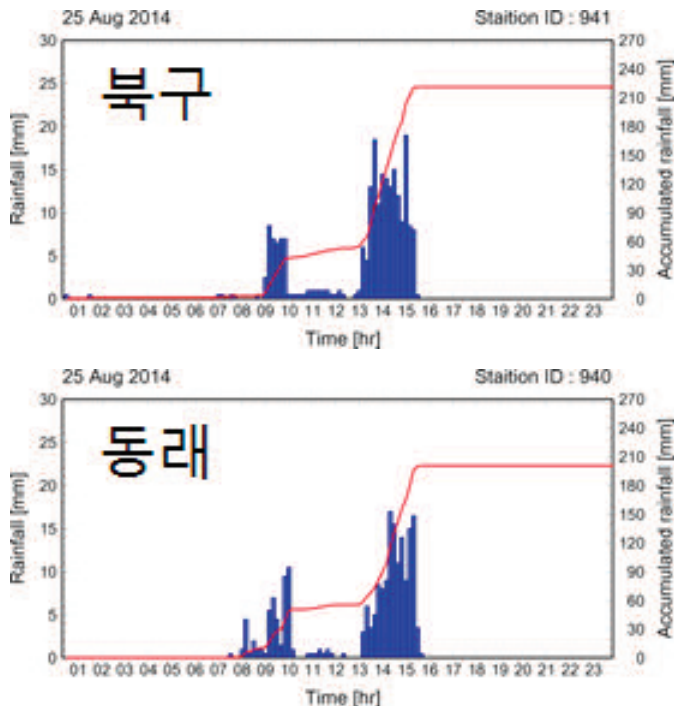


Figure. 25. 2014년 8월 25일 북구, 동래구 AWS 시계열 강우량

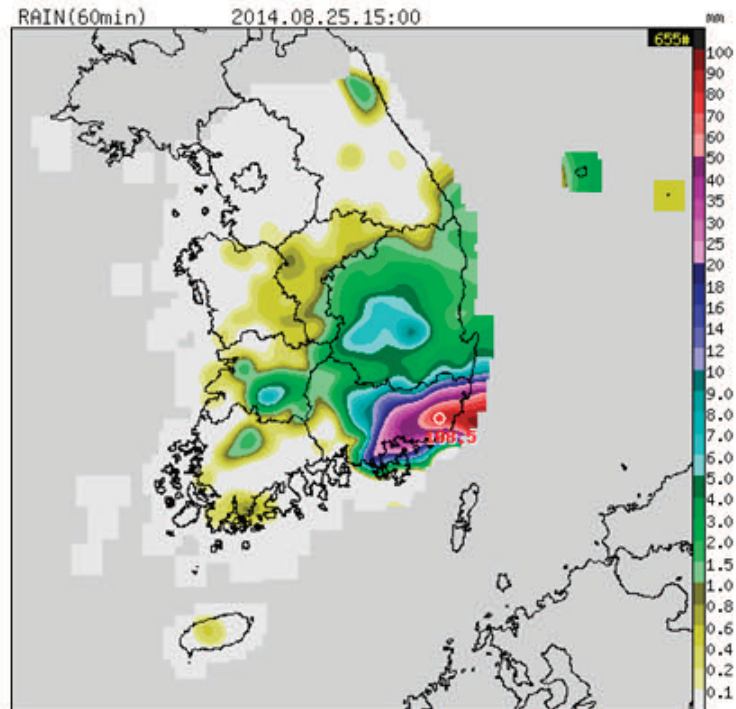
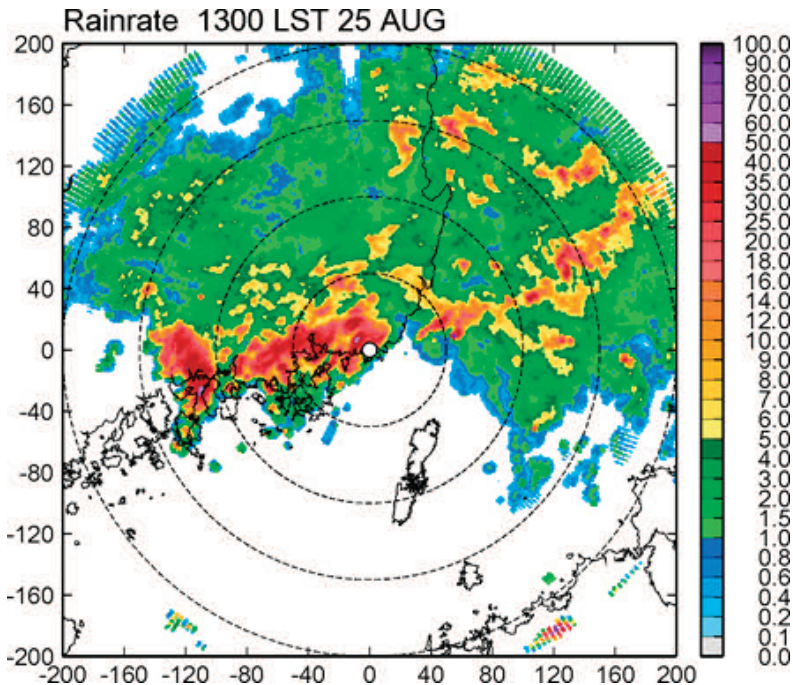


Figure. 26. 2014년 8월 25일 AWS 강우량 합성장

### 3.2 GPM 강수 알고리즘 검증

GPM기반으로 Rain-1(Figure. 27), Rain-2 방법에 대한 강수 알고리즘의 비교 검증을 실시하였다. 2014년도 8월 25일 04:00시부터 16:00까지 북구 AWS를 지상관측자료로 두고 COMS 단독으로 산출한 강우량, 200-1.6, 32-1.2 Z-R관계식으로 산출한 강우량값과 Rain-1, Rain-2 강우량을 비교 하였다. Figure. 28에서 알 수 있듯이 COMS 단독으로 산출한 강우량값은 AWS에서 비해 과대추정하는 것을 알 수 있으며, rain/no rain 구름분류가 명확하게 되지 않는 문제점이 제기 되었다. 이러한 COMS 구름분류는 현재의 5개보다 더 많은 센서를 탑재한 COMS2가 발사된다면 어느정도 해결이 될것으로 판단되며, 그 이전에 현재의 COMS 영상으로는 구름분류에 어려움이 계속 될 것으로 판단된다. 레이더 단독으로 기상청에서 일반적으로 제공하는 200-1.6 Z-R관계식은 수치예보나 실생활에서 많이 내리는 시간당 30mm/h 이하에서는 정확하게 사용될수 있으나 집중호우가 내리는 적운형 구름대에서는 많게 과소추정하는 것을

알 수 있다. 집중호우에 잘 맞도록 다시 개발한 32-1.2 Z-R 관계식은 200-1.6보다는 더 많은 강수량으로 표시되나 여전히 100mm/h 정도의 집중호우에서는 과소추정하는 것을 알 수 있다. Rain-1, Rain-2 강우 알고리즘은 레이더 단독으로 사용되는 두 개의 Z-R관계식보다는 더 정확도가 높아졌음을 알 수 있다. Rain-1은 Z-R관계식이 60mm/h이상일때는 위성-레이더 블렌딩 강우 추정 알고리즘을 사용하며, 이하에서는 레이더 단독 알고리즘을 이용하게 된다. 따라서 60mm/h 이상인 구름이 많지 않을 경우에는 레이더 단독 알고리즘을 따라가게 되어 있기 때문에 블렌딩을 적용할 수 있는 구간의 재설정이 필요할 것으로 보인다. Rain-2 알고리즘은 Rain-1 알고리즘 보다는 집중호우에 더 정확도가 높은 것으로 판단된다. 하지만 Rain-2도 여전히 AWS에 비해서 과소추정하는 것을 볼 수 있으며, 이러한 부분은 강우 알고리즘 개발할 때 보다 다양한 사례와 데이터베이스화 된 자료구축이 필요할 것으로 보인다.



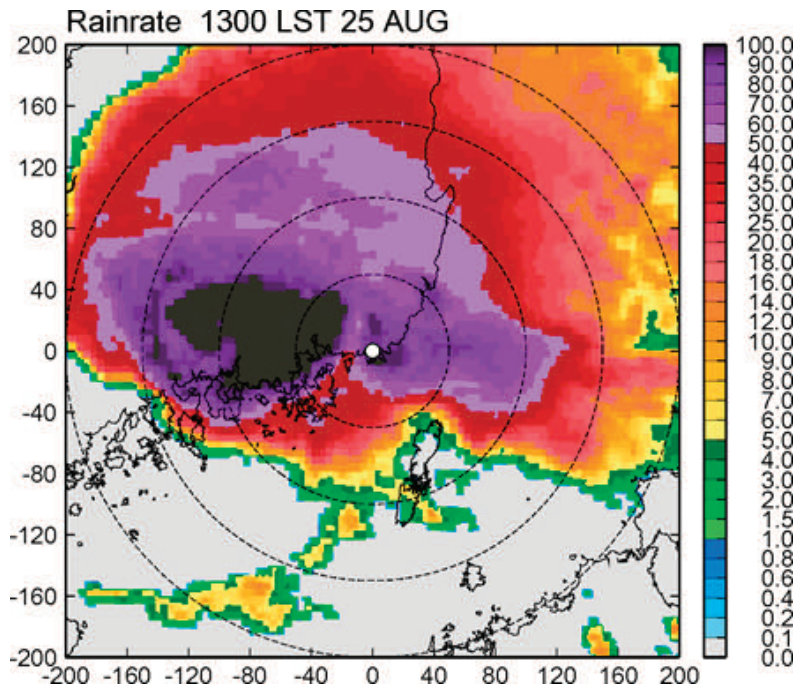


Figure. 27. 2014년 8월 25일 COMS 및 구덕산 레이더 강우강도

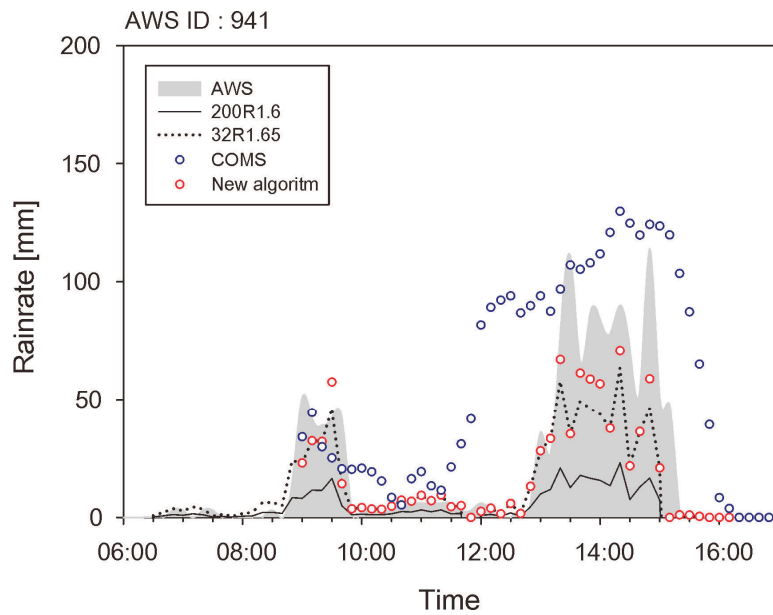


Figure. 28. 2014년도 8월 25일 AWS 북구지점 COMS, 레이더, 블렌딩 강우량

또 다른 지점인 940 동래지점에 대하여 COMS 단독, 레이더 단독, Rain-2의 비교 검증 실시하였다. Figure. 29에서 알 수 있듯이 COMS단독은 AWS에 비하여 과대추정하고 있으며, 레이더 단독 알고리즘 또한 941 북구지점처럼 과소 추정하는 것을 알 수 있다. Rain-2 알고리즘은 레이더 단독이나 COMS 단독으로 사용하는 알고리즘보다 더 정확한 것으로 판단되나 집중호우의 피크부분은 관측하지는 못했다. 북구 지점처럼 위성-레이더 블렌딩 알고리즘이 정확도에서 높지만 집중호우의 피크를 잡아내기 위해서는 시간당 100mm 정도 내리는 집중호우의 정확도를 더 높일 필요가 있을 것으로 본다. 100mm/h의 구간에서 레이더의 반사도보다 COMS의 TBB값의 비중의 더 높여 준다면 보다 정확한 강우 알고리즘 개발이 가능할 것으로 판단된다. 더불어 반사도, TBB값을 이용하여 인공지능, 기계학습 방법을 통한 정확도 개선이 가능한지도 향후 연구를 통하여 검증할 필요가 있을 것으로 판단된다.

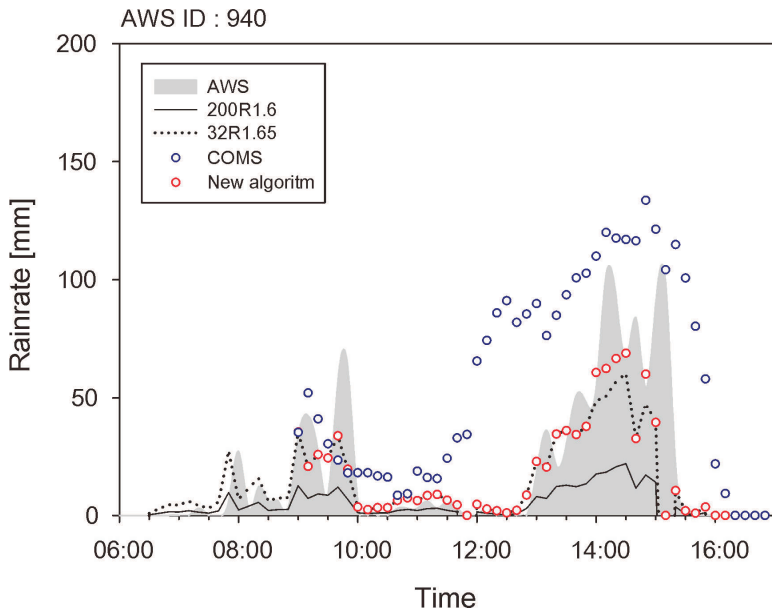


Figure. 29. 2014년도 8월 25일 AWS 동래지점 COMS, 레이더, 블렌딩 강우량

### 3.3 웹기반 실시간 집중호우 예측시스템 프로토타입 개발

실시간 천리안 위성자료와 기상레이더를 이용하여 블렌딩 기법 기반의 집중호우 기간 강우를 추정하는 시스템을 구축에 필요한 프로토타입을 설계하고 시범 서비스를 개발하

였다. 예측시스템은 실시간으로 수신되는 관측자료를 처리하는 전처리부분, 집중호우 예측부분, 웹서비스 부분으로 구성하였다(Figure. 30). 전처리부분과 집중호우 예측부분에서 생산되는 자료는 데이터베이스에 저장하여, 웹서비스부분에서 효율적으로 이용이 가능하도록 하였다.

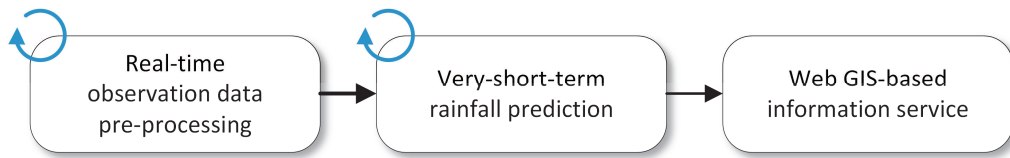


Figure. 30. GIS 기반 집중호우 예측시스템 모식도

데이터 전처리부분은 실시간으로 수신되는 위성자료와 기상레이더 자료를 집중호우 예측알고리즘의 입력 자료로 이용할 수 있도록 처리하는 역할을 수행한다(Figure. 31). 천리안 위성자료와 기상레이더 자료를 블렌딩 알고리즘으로 집중호우 기간 강우예측 자료를 생산하기 위해서는 위성자료와 기상레이더 자료의 공간해상도를 동일하게 맞추는 작업이 필요하다. 천리안 위성자료는 래스터 형태의 격자자료가 아닌 점 형태의 비격자(non-grid) 자료로 되어 있어 리샘플링(resampling) 기법을 이용하여 점 자료를 1 km 해상도를 가지는 격자자료로 변환하는 과정이 필요하다. 기상레이더 자료는 UF(universal format)로 작성된 관측자료를 1km 해상도를 가지는 CAPPI(Constant altitude plan position indicator) 자료로 변환하는 과정이 필요하다. 1km 해상도로 변환된 위성/레이더 관측자료는 데이터베이스에 저장된다.

집중호우 예측부분은 데이터 전처리부분에서 처리된 1km 해상도의 위성/레이더 자료를 이용하여 2시간 내 강우예측자료를 생산하고, 이를 이용하여 웹GIS 서비스에서 지도와 맵핑하여 서비스를 제공하기 위한 지오레퍼런스된 이미지 생성과 공간통계분석을 이용하여 행정구역 단위의 통계자료를 생성하는 역할을 한다(Figure. 32). 2시간 내 강우예측자료는 데이터 전처리를 통해 생성된 1km 해상도의 위성과 레이더자료를 통계적 블렌딩 기법을 이용하여 1km 해상도의 강우강도 자료(mm/hr)를 생성한다. 다음, 예측장 알고리즘을 이용하여 2시간 내 예측장 생성에 필요한 자료를 생성하고, 이 자료와 블렌딩된 강우강도 자료를 바탕으로 2시간 내 10분 간격의 집중호우 예측자료를 생성한

다. 예측자료를 이용하여 공간통계분석을 이용한 행정구역 단위의 통계자료, 웹GIS 서비스에 필요한 지오투퍼런스된 이미지를 생성하고 데이터베이스에 저장한다.

웹서비스 부분은 집중호우 예측부분에서 생산된 2시간 내 10분 간격의 집중호우 예측자료와 공간통계분석자료를 웹GIS를 이용하여 사용자에게 보다 쉽고 편리하게 예측정보를 제공하는 역할을 한다. 웹 GIS 기반의 실시간 집중호우 예측시스템의 레이아웃은 지도, 집중호우 예측 이미지와 범례, 지역별 통계정보창로 구성하였다(Figure. 33). 레이아웃은 실시간 집중호우 예측정보를 이용하여 지도에 맵핑하고 관련 정보들을 효과적으로 표현할 수 있는 요소로 구성하였다. 지도는 공간정보를 조회하거나 집중호우 예측결과를 지도위에 맵핑하여 예측결과에 따른 예상피해지역을 지리적으로 확인하는데 이용이 가능하다. 지역별 통계정보창은 30분간 간격의 2시간 예측정보를 이용하여 행정구역 내 공간통계 분석자료를 나타내며, 분석자료는 지역별로 내리는 평균 강우량(mm/hr)에 따라 관심(1~10 mm/hr), 주의(10~30 mm/hr), 경계(30~50mm/hr), 심각(50mm/hr 이상)으로 구분하고 표현함으로써, 2시간 이내 집중호우가 예상되는 지역을 쉽게 파악하고 대비할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 사용된 행정구역 단위는 부산광역시 내 16개 구군을 대상으로 하였다.

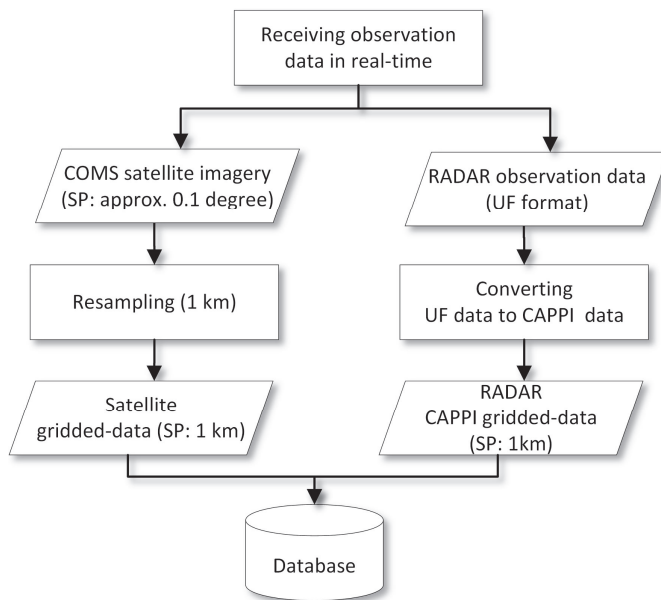


Figure. 31. 관측자료 전처리 모식도

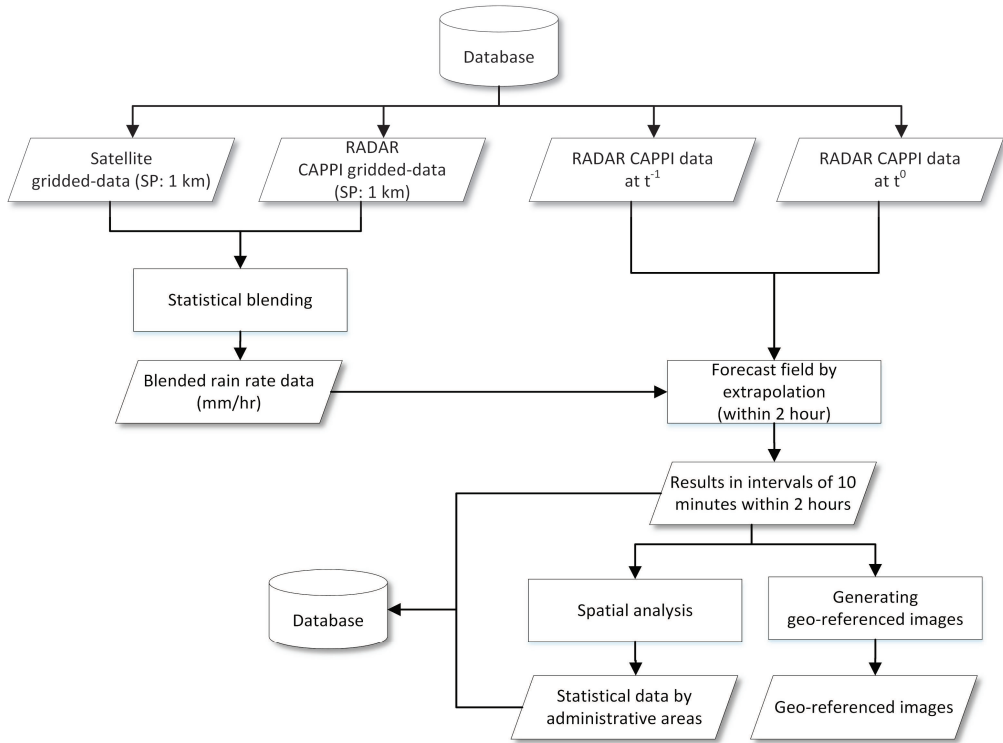


Figure. 32. 집중호우 예측시스템 모식도

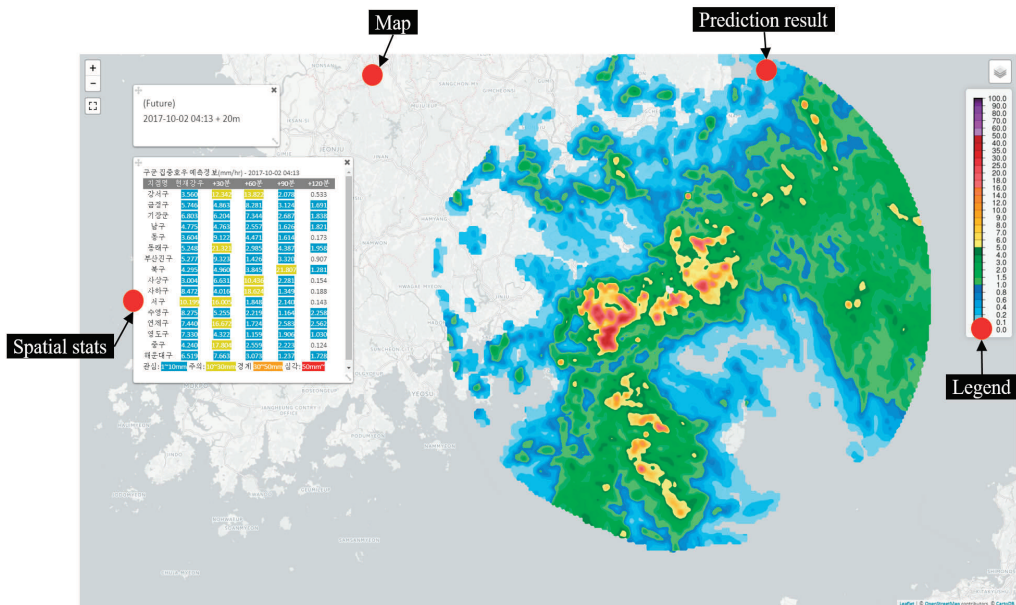


Figure. 33. 웹GIS 집중호우 예측 표출시스템

### 3.4 도시 침수 해석을 위한 경계 조건 및 매개변수 선정

온천천 유역의 침수 해석을 위해서 필요한 매개변수는 조도계수와 유출계수 2개가 존재한다. 본 연구에서는 2014년 8월 25일 온천천 유역에 많은 침수 피해를 일으킨 강우 사상을 대상으로 선정하였다. 침수 모형의 매개변수를 보정하기 위해서는 대상 유역의 실측 강우 자료와 침수범위 그리고 침수심 관측 자료가 있어야 하지만 도시유역의 특성상 사회적 경제적 문제로 인하여 당시 온천천 유역의 침수범위와 침수심을 확인할 수 있는 자료는 공개되어 있지 않으므로 본 장에서는 참고문헌을 통해 선정된 조도계수를 이용하고, 유출계수에 대한 모형의 민감도를 분석하여 제 3장에서 수행되는 결과 분석의 기초자료로 활용한다.

본 연구에서는 온천천 유역의 외부는 경계는 wall 조건으로(Martins, 2017) 계산 시간 간격  $dt$ 는 최소 격자의 크기를 고려하여 0.01초로 결정하였다. 온천천 상류단은 산지 유역에서 유하하는 유량이 지반고의 차이로 인해 자연스럽게 하천 내로 흘러 들어오도록 하였으며 하류단에서는 open boundary 조건(Martins, 2017)을 적용하였다.

Table. 3에서는 Kalyanapu et al.(2010)등에 의해 제안된 도시유역의 조도계수 값을 보여주고 있다. 상기 기술한 바와 같이 본 연구에서는 토지이용도별 조도계수의 매개변수 보정은 수행하지 않고 참고 문헌을 통해 수집된 자료를 활용하여 토지이용도별 조도계수를 결정하였다.

Table. 3. Applied Manning's coefficient (Kalyanapu et al., 2010)

Index	Manning's coefficient
Road	0.012
Building	0.0404
River	0.1825
Mountain	0.4

매개변수 보정을 위해 토지이용도별 두 가지(rain-1, rain-2) 강우 산정 기법에 대해서 강우 유출계수를 변화시켜 각 계수별 모형의 민감도를 분석하였다. Table. 4에서는 선행연구를 통해 선정된 토지이용도별 유출계수값을 보여주고 있다. 본 연구에서는 각각

의 유출 계수에 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0을 곱하여 개별적으로 모의를 수행하였으며 그 결과를 분석하여 최적 매개변수 값을 제시하고 침수원인을 분석하고 향후 침수 발생 피해를 저감시킬 수 있는 방안에 대해 기술한다.

Table. 4. Applied run-off flow coefficient (Lee et al., 2015)

Index	run-off flow coefficient
Road	0.75
Building	0.75
River	1.0
Mountain	0.5

### 3.5 매개변수 민감도 평가

#### 3.5.1 Rain-1 매개변수 민감도 평가

Figure. 34에서는 유출계수 조절 값(0.5~1.0)별로 시간에 따른 침수심도(10cm에서 50cm 이상까지 10cm 간격)의 변화를 보여주고 있다. Rain-1에서 10cm이상의 침수심 변화는 유출 계수가 증가함에 따라 13시 30분을 기점으로 일정 비율로 증가하는 형태를 보여주었으며 14시 30분 이후 유출계수의 변화에 따라 침수면적의 변화 양상이 달라지는 모습을 보여준다. 특이점으로는 유출계수가 0.6인 경우가 최종 모의까지 가장 넓은 침수 면적을 보여주고 유출 계수가 0.8인 경우가 최소 침수 면적을 보여준다는 점과 유출 계수가 클수록 단일 피크형상 곡선을 나타내며 유출 계수가 작을수록 침수면적의 감소폭이 적다는 점이다. 20cm 이상의 침수심 변화는 약 14시 45분을 기점으로 유출 계수별 변화 양상이 달라지기 시작한다. 특이한 점으로는 유출계수가 1.0인 경우가 가장 넓은 침수 면적(약 475,000m<sup>2</sup>)을 보여 주었으나 15시 이후로는 유출계수가 0.9인 경우 보다 빠르게 침수 면적이 감소하기 시작하였으며 15시 15분 이후에는 유출계수가 0.8인 경우 보다 빠르게 침수 면적이 감소하였다. 30cm 이상의 침수심의 시간에 따른 침수면적 변화에서는 유출 계수가 0.9인 경우를 제외하고 유출 계수가 증가할수록 침수면적 최대치가 증가하는 경향을 보였으며, 특히 유출 계수가 0.9인 경우는 모의 종료 시까지 최대 침수심이 증가하는 경향을 보였다. 40cm 이상의 침수심 변화에서는 유출계수가 1.0인 경우와 0.9인 경우에서 약 15시 10까지 비슷한 변화 양상을 보여주다 그 이후부

터 약 30여분 간의 시간 지연 현상이 발생하였으나 최대 침수면적은 거의 동일한 값을 나타내었다. 그 외 유출계수 0.5 ~ 0.8의 경우 유출 계수가 증가함에 따라 침수면적이 증가하였으나 시간에 따른 변화 양상은 대동소이하게 나타났다. 마지막으로 최대 침수심 50cm 이상에서는 최대 침수면적을 나타내는 시간대가 유출계수가 증가함에 따라 조금씩 빨라지는 경향을 보였으나 대체적으로 유출계수가 증가함에 따라 최대 침수면적도 일관되게 증가하는 양상을 보여주었다.

이러한 결과는 강우의 공간적 분포가 동일한 상태에서 유출계수가 변화하면 전체적으로 내리는 강우의 양이 변화되므로 시간에 따른 침수면적의 변화가 선형적으로 변화할 것이라는 당초의 예상과는 상반된 결과를 보여준다. 이는 도시구역의 유출 현상이 단순히 강우의 절대량에 따라서만 변화하지 않음을 간접적으로 증명하는 결과라고 할 수 있다. 도시구역의 유출은 지표면에 내리는 강우량으로 인해 지표면에서 발생하는 유출량과 집수구를 통해 하수관망으로 배수되는 양 그리고 하천으로 흘러들어가 배수되는 양까지 복합적으로 고려해야 하며 상호간의 연관성을 고려해야만 보다 종합적이고 정확도 높은 결과를 얻을 수 있음을 의미한다.

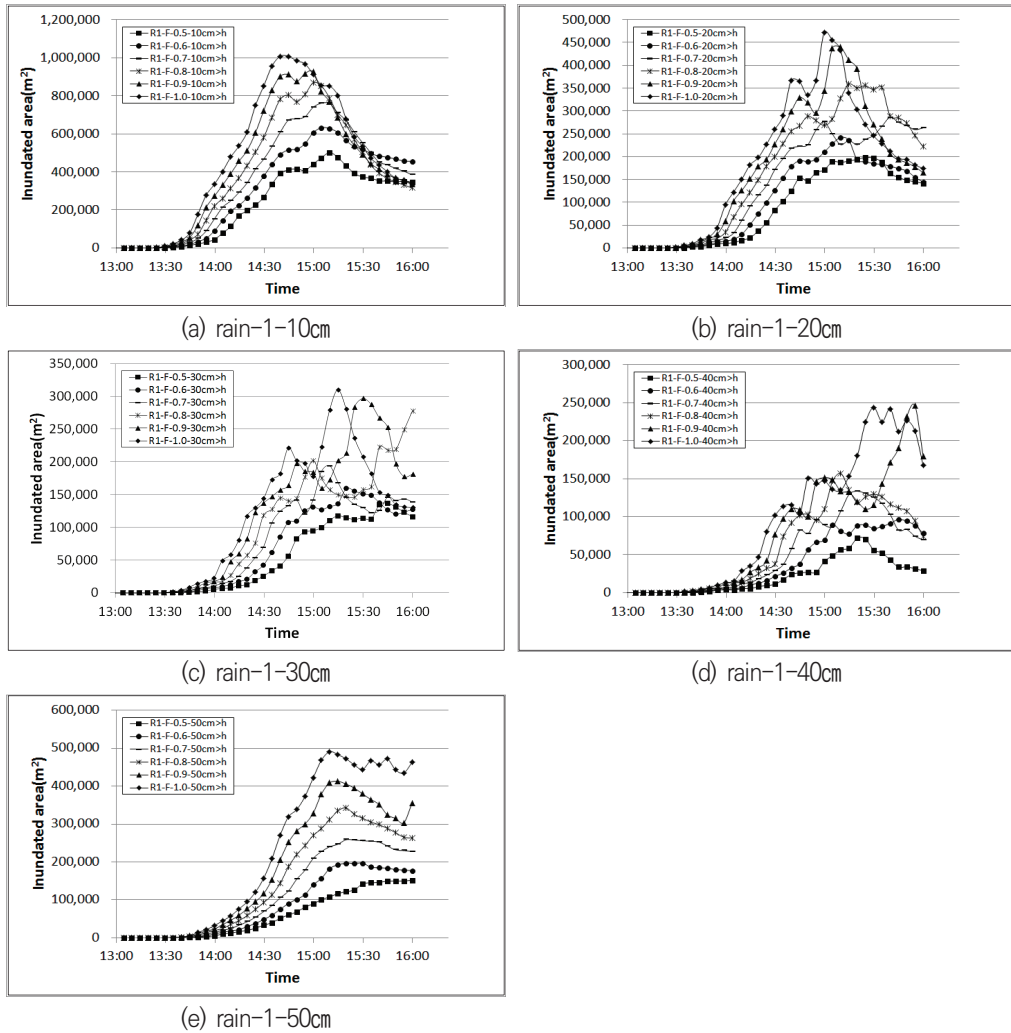


Figure. 34. 유출계수 변화에 따른 침수심 및 교환유량의 변화(rain-1)

### 3.5.2 Rain-2 매개변수 민감도 평가

Figure. 35.에서는 rain-2를 입력자료로 모의를 수행한 결과를 보여준다. Rain-2를 입력자료로 사용하여 모의를 수행한 결과 10cm 이상의 침수심의 침수면적 변화는 rain-1과 유사하게 유출 계수가 증가함에 따라 13시 30분을 기점으로 일정 비율로 증가하는 형태를 보여주다가 rain-1보다 다소 늦은 14시 45분 이후 유출계수의 변화에 따라 침수면적의 변화 양상이 달라지는 모습을 보여준다. 특이점으로는 유출계수가 0.6인 경우가 최종 모의까지 가장 넓은 침수 면적을 보여주고 있다는 점이며 유출 계수가 0.7인

경우가 최소 침수 면적을 보여준다는 점과 침수면적 변화 곡선이 rain-1과 다르게 유출 계수가 작은 경우에도 이중피크가 명확하게 나타나지 않는다는 점이다. 침수면적의 감소폭은 rain-1과 동일하게 유출계수가 작을수록 작게 나타났으며 최대 침수면적 역시 다시 작게 나타났다. 20cm 이상의 침수심의 침수면적 변화는 rain-1보다 약 15분 늦은 15시를 기점으로 유출 계수별 변화 양상이 달라지기 시작한다. 유출 계수 0.7에서 1.0까지는 유출 계수가 작아지면서 최대 침수면적을 나타내는 피크점이 늦게 나타나면서 최대 침수 면적은 감소하는 양상을 보여주나 유출계수가 0.5, 0.6인 경우는 피크점에서의 최대 침수면적은 유출계수에 따라 감소하였지만 피크발생 시점은 유출계수 0.8, 0.9와 비슷한 값을 보여주었다. 특이점으로는 모의 종료시에 최대 침수면적을 보여준 유출계수는 0.7이며 최소 침수면적을 보여준 유출 계수는 0.5이다. 즉, 유출계수가 1.0인 경우 최대 피크치에서 모의 종료시까지 침수 면적이 가장 빠르게 줄어들었다. 30cm 이상의 침수심의 침수면적 변화에서는 rain-1과는 다소 상이하게 유출 계수가 0.8인 경우가 0.9인 경우 보다 더 넓은 침수면적을 기록하였으며 유출 계수가 1.0인 경우의 최대 침수 면적이 rain-1보다 다소 높게 나타났다. 또한 유출 계수가 0.7인 경우가 0.6인 경우보다 최대 침수면적이 낮게 기록되었다. 40cm 이상의 침수심의 침수면적 변화에서는 유출계수가 1.0인 경우와 0.9인 경우에서 rain-1과 매우 상이한 결과를 나타내었다. 먼저 유출 계수가 0.9인 경우가 최대 침수면적을 보여주었으며 rain-1과 비교시 rain-2의 최대 침수 면적 약 50,000m<sup>2</sup> 가량 더 넓었다. 또한 유출 계수 0.8인 경우 모의 종료시점에 임박해서 최대 침수 면적이 나타났다. 마지막으로 최대 침수심 50cm 이상에서는 침수 면적 변화에서는 최대 침수 면적이 rain-1 보다 약 100,000m<sup>2</sup> 가량 넓게 나타났다. 최대 침수면적을 나타내는 시간대는 유출계수가 1.0인 경우를 제외하고 유출계수가 증가함에 따라 조금씩 늦어지는 경향을 보이긴 했으나 비교적 유출계수가 증가함에 따라 최대 침수면적도 일관되게 증가하는 양상을 보여주었다.

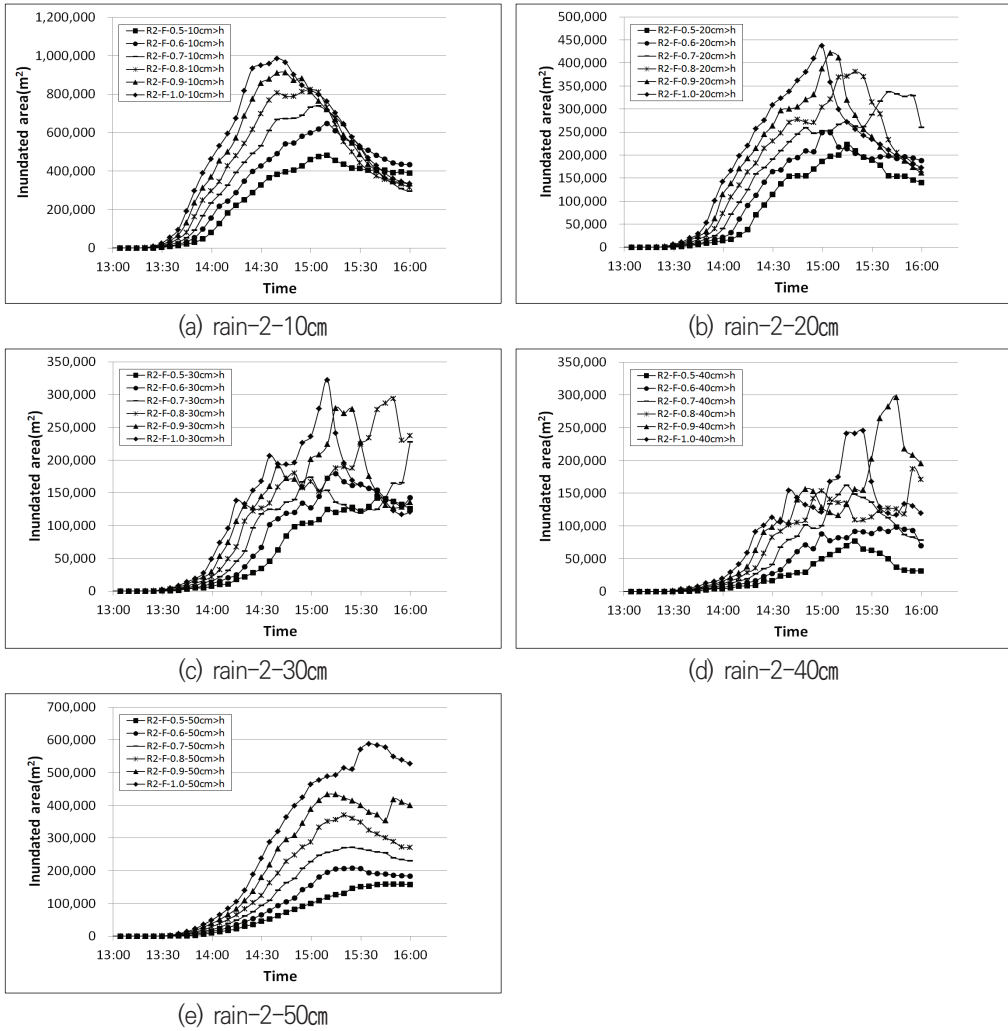


Figure. 35. 유출계수 변화에 따른 침수심 및 교환유량의 변화(rain-2)

### 3.6 최적 매개변수 산정

3.1절에는 rain-1과 rain-2에 대해서 유출계수의 변화에 따른 최대 침수면적의 변화를 살펴보고 그 변화 양상에 대하여 분석하였다. 최적 매개변수 산정을 위해서는 침수 발생 시 시간에 따른 침수심의 변화 또는 최대 침수면적과 최대 침수심을 이용한 비교 분석이 수행되어야 하나 위에서 언급한 바와 같이 도시침수의 특성상 시간에 따른 침수심과 침수 면적의 변화 데이터뿐만 아니라 최대 침수면적과 최대 침수심 관측 데이터

확보에 곤란을 겪는 경우가 많다. 본 연구에서는 공식적인 관측데이터를 확보 하지 못하여 당시 온라인 매체를 통해 보도된 기사의 사진에서 위치와 수심을 추정한 자료를 활용하여 최적 매개변수 산정에 활용하였다.

최적 매개변수 산정을 위해 필요한 침수피해 사진은 인터넷 검색을 통해 수집하였으며 인터넷에 존재하는 수많은 사진 중 피사체에서 침수심을 유추할 수 있는 사진과 표지판, 건물 간판 등을 통해 사진이 찍힌 위치를 파악할 수 있는 사진을 선택하였다. 수집된 사진들의 위치 정보는 Figure. 36.와 같이 온천천 증상류부터 중 하류까지 온천천에 밀집된 위치에서 주로 침수 피해 사진이 수집되었다.

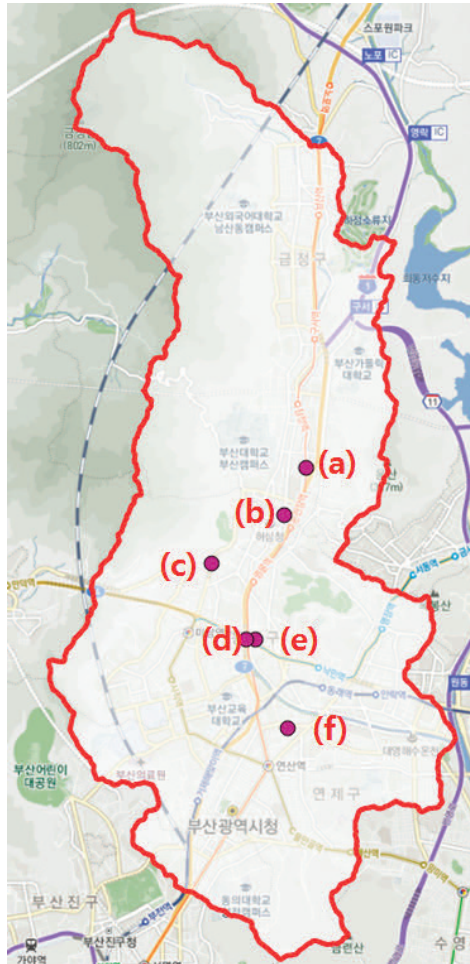


Figure. 36. 수집된 침수 피해 사진의 위치분포도

각 위치별 수집된 자료는 Figure. 37과 같이 (a)~(f) 총 6개로써 사진에 나와 있는 자동차((a), (b), (e), (f))와 벽면에 나타난 침수 흔적((c), (d))으로부터 침수심을 유추한 결과값과(이하 관측값) 모의 결과 유출계수별 관측지점에서의 침수심(이하 모의 결과값)은 Table. 5와 Table. 6에 나타내었다. 자동차의 바퀴높이는 승용차 기준 62cm로 가정하였다. 또한 최적 매개변수를 선정하기 위하여 관측값과 모의 결과값을 비교하기 위하여 Root Mean Square Error(RMSE) 기법을 이용하였다. Table. 5에 나타난 것과 같이 분석결과 rain-1과 rain-2 모두 유출계수가 1.0인 경우에 최소 RMSE값이 산정되었다. Rain-1과 Rain-2를 이용한 침수 해석 결과의 차이는 크지 않으나 Rain-2를 활용한 결과가 더 정확한 결과값을 보여주었으므로 침수 원인 분석은 Rain-2를 이용해 모의된 결과값을 활용한다.



(a) 부산대역 3번 출구

(source: [http://thumb.mt.co.kr/06/2014/08/2014082516308264321\\_1.jpg](http://thumb.mt.co.kr/06/2014/08/2014082516308264321_1.jpg))



(b) 동래구 중앙대로

(source: [https://i.ytimg.com/vi/Rf2hg\\_UlbfQ/mxresdefault.jpg](https://i.ytimg.com/vi/Rf2hg_UlbfQ/mxresdefault.jpg))



(c) 우정춘지하도

(source: [http://static.news.zumst.com/images/4/2014/08/26/201408260438501046\\_h.jpg](http://static.news.zumst.com/images/4/2014/08/26/201408260438501046_h.jpg))



(d) 동래구 총렬대로

(source: [http://mblogthumb2.phinf.naver.net/20140826\\_125/siselpower\\_1409014089277Ewrta\\_JPEG/1409014087674\\_20140826\\_083139.jpg?type=v2](http://mblogthumb2.phinf.naver.net/20140826_125/siselpower_1409014089277Ewrta_JPEG/1409014087674_20140826_083139.jpg?type=v2))



(e) 동래역

(source: <http://cf10.uf.tistory.com/image/225ED54453FBE59620642F>)



(f) 연제구 거제천로 인근

(source: <http://i.imgur.com/PL1bP71.jpg>)

Figure. 37. 2014년 8월 25일 부산시 온천천 유역 침수 피해 사진

Table. 5. 침수심 추정 결과(Rain-1)

위치	관 측 침수심 (cm)	유출계수					
		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
(a)	0.35	0.006	0.133	0.330	0.449	0.564	0.640
(b)	0.15	0.032	0.042	0.051	0.066	0.079	0.092
(c)	1.75	1.474	1.526	1.542	1.569	1.612	1.661
(d)	0.55	0.078	0.081	0.111	0.171	0.142	0.180
(e)	0.15	0.003	0.004	0.014	0.040	0.058	0.068
(f)	0.90	0.073	0.105	0.164	0.213	0.280	0.352
RMSE		0.43527	0.40461	0.3666	0.3360	0.3238	0.2998

Table. 6. 침수심 추정 결과(Rain-2)

위치	관 측 침수심 (cm)	유출계수					
		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
(a)	0.35	0.023	0.092	0.438	0.468	0.547	0.628
(b)	0.15	0.030	0.044	0.053	0.071	0.076	0.087
(c)	1.75	1.454	1.450	1.526	1.541	1.580	1.605
(d)	0.55	0.073	0.081	0.106	0.123	0.143	0.158
(e)	0.15	0.004	0.005	0.008	0.020	0.031	0.049
(f)	0.90	0.083	0.134	0.186	0.247	0.325	0.418
RMSE		0.4331	0.4073	0.3639	0.3390	0.3119	0.2882

### 3.7 침수 원인 분석

본 장에서는 최적 매개변수를 이용하여 모의된 침수해석 결과를 분석하여 침수 유발 원인에 대해서 알아보고 향후 침수 피해 저감을 위한 방안에 대해서 알아본다.

Figure. 38에서는 Rain-2를 입력자료로 이용하여 모의된 시간에 따른 온천천 유역의 침수 결과를 보여주고 있다. 온천천 유역의 침수 양상은 침수 모의 1시간 후인 14시부터 유역의 북서쪽에 위치하고 있는 금정산으로부터 내려오는 다량의 지표면 유출이 도시유역으로 집중되는 현상을 확인할 수 있다. 이는 우수관로가 매설되어 있지 않은 산지 지역에서는 강우가 대부분 직접유출에 기여하여 유출량이 증가하고, 증가된 유출량은 지표면

의 표고차를 따라 자연스럽게 낮은 지역에 위치하고 있는 도시지역으로 내려오는 것으로 판단된다. 그러나 상대적으로 낮은 지표면 수심을 보여주는 도시지역의 경우 대부분은 강우량이 도로위에 분포하고 있는 집수구를 통해 하수관거로 배수되어 침수는 발생하지 않은 것으로 분석되었다. 금정산 방향에서 내려온 지표면 유출은 14시 20분부터 유역의 최북단에 위치하고 있는 온천천 시작점으로부터 온천천을 따라 하도유출을 발생시키고, 부산지하철 3호선의 사직역과 종합운동장역 사이에 위치하고 있는 종합운동장 교차로에서 0.5m에 가까운 침수가 발생하였다. 종합운동장 교차로와 그 인근 여고로에서 발생한 침수는 좌측에 위치하고 있는 백양산 자락에서 내려온 지표면 유출이 배수되지 않아 발생한 것으로 판단된다. 또한 연산 5동 주민센터 인근 교차로 인근에서도 침수가 발생하기 시작하였으며 14시 40분부터 온천천 부산대역과 온천장역 인근에서 침수를 발생시켰으며 안락교차로 인근의 도로와 지하철 4호선 수안역 인근도로에서도 0.3m이상의 침수심이 발생하기 시작하였다. 14시 40분 이후부터는 지하철 3호선 명륜역 3번 출구 방향의 블록에서 침수심이 급격하게 늘어나기 시작하여 15시에는 1m에 가까운 침수가 발생한 것으로 모의 되었다. 이후 15시 이후에는 거제천로와 반송로에서 침수가 발생하기 시작하여 16시에는 약 1m에 가까운 침수가 발생하는 것으로 모의 되었다. 온천천의 수심은 모의 시작 후 약 2시간 30분 후에 유역출구지점까지 도달하였으며 15시 30분 이후 침수 면적은 눈에 띄게 증가하지 않은 것으로 모의 되었다.

도시 유역의 침수 발생원인은 첫째, 하수관거 배수용량 부족으로 인한 내수배제 불량과 둘째, 지표면의 유출수가 집수구로 적절하게 유입되지 못하는 병목현상으로 인해 발생하는 경우로 구분 지을 수 있다(Lee et al., 2013). 2014년 8월 25일 온천천 유역에서 발생한 침수의 발생 원인을 알아보기 위하여 Figure. 39에서는 시간에 따라 지표면과 하수관망 사이의 누적 유량교환량을 표시하였다. 이는 지표면에서 하수관망으로 유입되는 유량은 양(+의 값)을 가지며, 하수관망에서 지표면으로 역류하는 양은 음(-의 값)을 갖도록 설정하고 계산 단계마다 그 합을 누적하여 작성된 그래프이다. 그래프가 음의 값을 갖는다는 것은 하수관망에서 지표면으로 역류된 양이 지표면에서 하수관망으로 유입된 양보다 많다는 것을 의미 하며 양의 값을 갖는다는 것은 지표면에서 하수관망으로 유입된 양이 역류된 양보다 많다는 것을 의미하다. 즉, 온천천 침수의 경우 모의 결과 지표면으로부터 하수관망으로의 유입이 역류된 양보다 항상 많았음에도 불구하고 집수구에서 발생한 병목현상으로 인하여 우수가 지표면에서 지체되는 시간이 증가되어 침수

가 발생하기 시작한 것으로 판단할 수 있다. 또한 15시 10분 이후 누적 교환양의 증가 속도가 정체되는 것은 유입량과 역류량이 거의 동일해 졌다는 것을 의미 하므로 그 이후 발생한 침수면적으로 증가는 상대적으로 병목현상보다는 역류로 인해 발생했을 가능성이 더 크다는 것을 의미 한다.

침수 해석 결과 2015년 8월 25일 부산시 온천천 유역에서 발생한 침수는 매우 강한 강도의 강우로 인하여 발생한 지표면 유출량이 집수구를 통해 하수관망으로 유입되는 양을 초과 하여 발생하는 병목현상에서 최초 기인하였으며 그 이후에는 증가된 온천천 수위와 하수관망의 우수배수 능력의 저감으로 인해 침수피해가 심화된 것으로 분석되었다.

이러한 피해를 예방하기 위한 직접적인 방안으로는 녹지공간 확대, 우수관로의 정비와 집수구 설치 증대, 하수관로 확장 등이 필요할 것으로 판단되며, 하수관로 내의 압력저감을 위하여 구단위 지하저류조 시설 설치와 같은 구조적 변화를 통한 침수 피해 저감 노력이 필요할 것으로 판단된다. 또한 시민들의 안전을 위해 침수피해 예측 시스템과 정보전파를 위한 전광판과 방송시설이 필요할 것으로 판단되며 침수 피해 발생 예측시 하천진입 통제와 지하차도 봉쇄 등을 위한 가이드라인 구축이 필요할 것으로 판단된다.

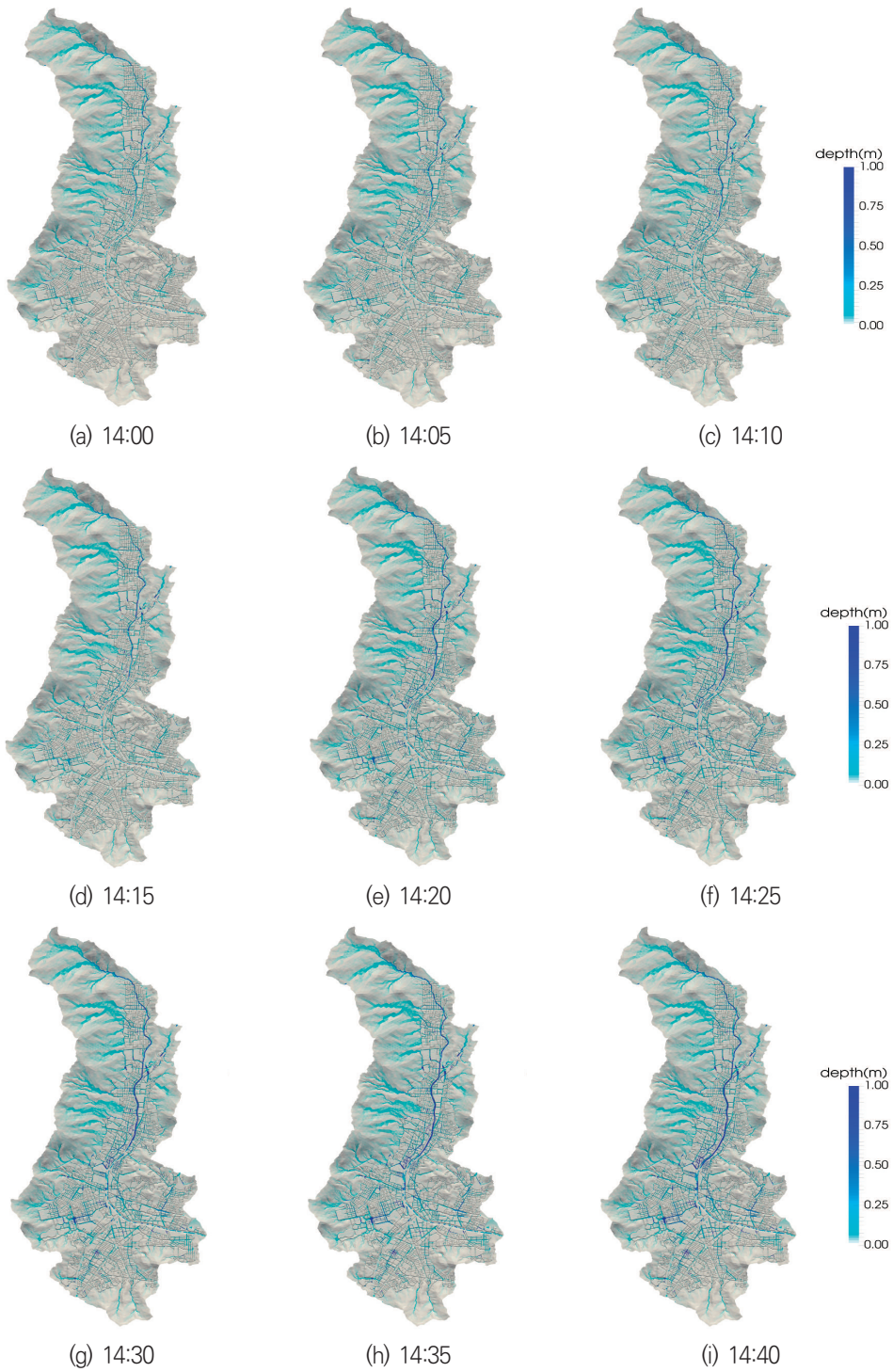


Figure. 38. 시간에 따른 침수심 변화

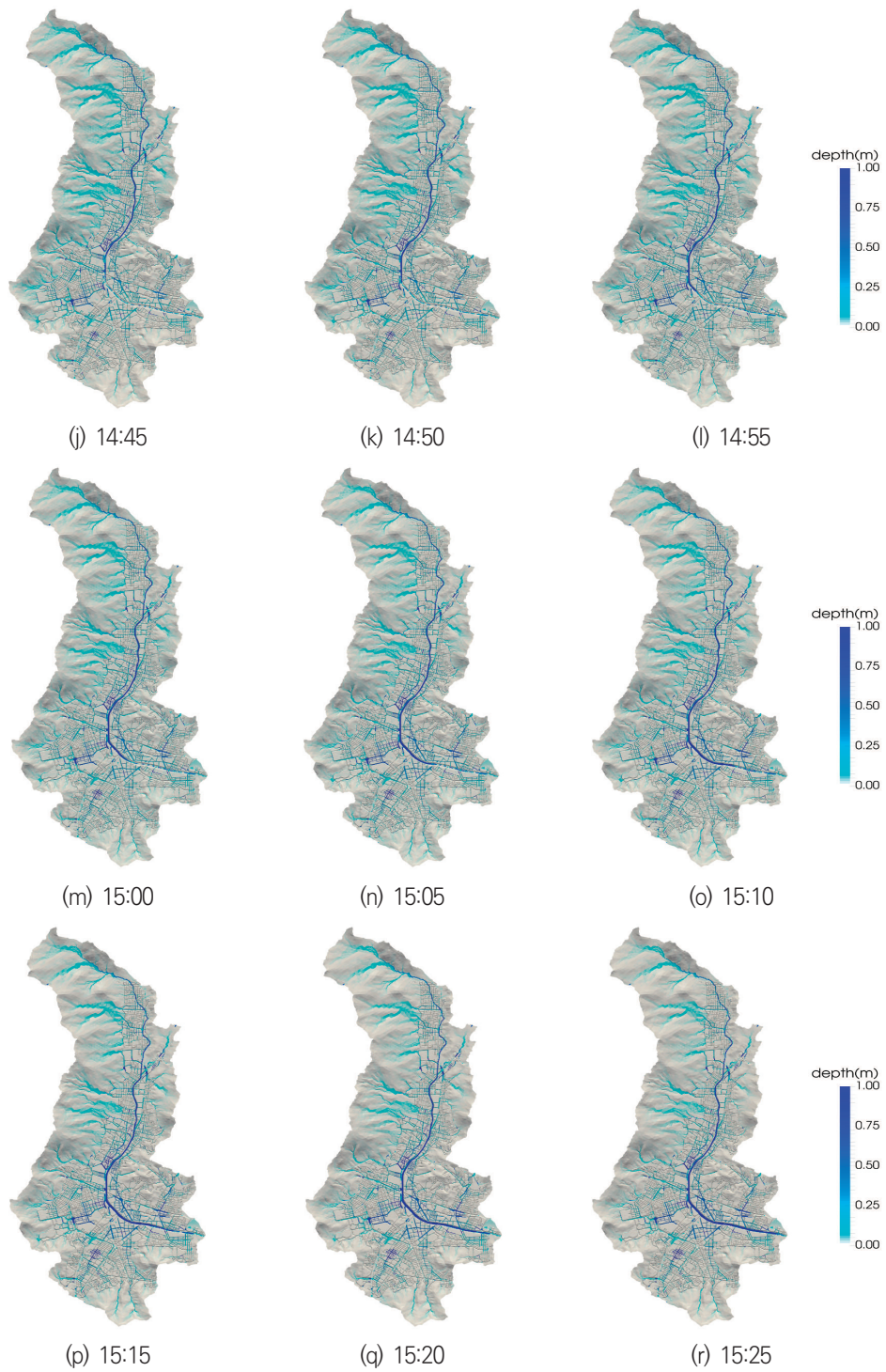


Figure. 39. 시간에 따른 침수심 변화(계속)

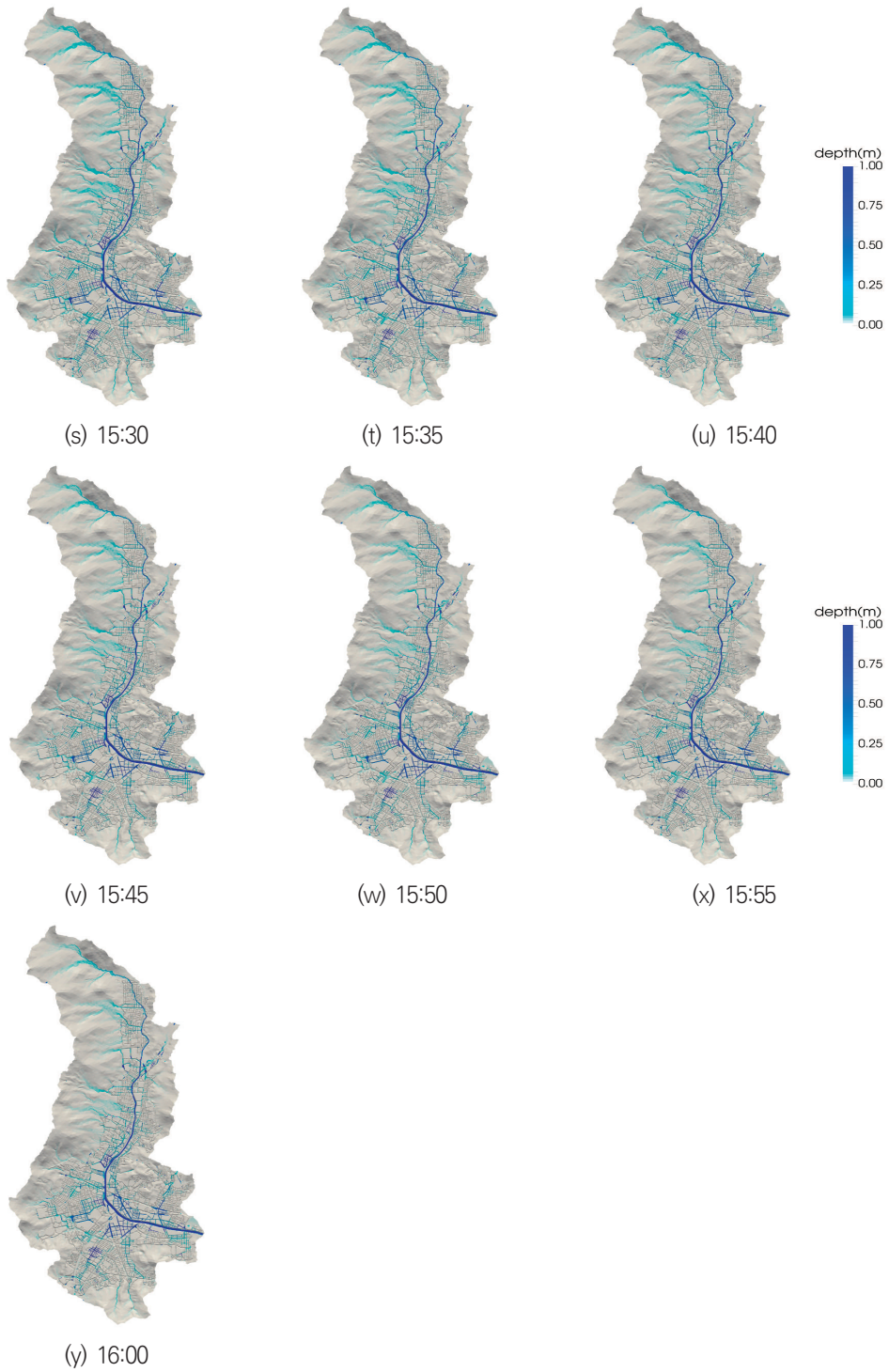


Figure. 40. 시간에 따른 침수심 변화(계속)

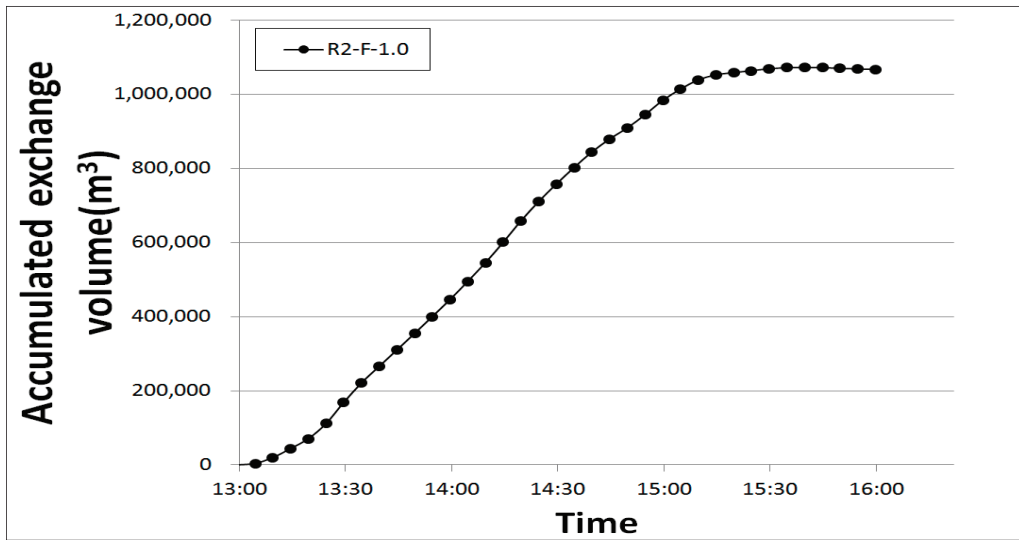


Figure. 41. 시간에 따른 지표면-하수관망 사이의 누적 유량교환량

## 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 집중호우 홍수 예보 감시 예측시스템 개발을 위하여 위성 휘도온도와 레이더 반사도를 결합한 강우 추정 알고리즘을 개발하였다. COMS TBB와 S밴드 지상 레이더를 결합한 알고리즘을 개발하기 위하여 GPM KuPR, KaPR 듀얼 강우레이더 Level2 자료와 강우 유무, convective/stratiform, 육지/해양 등의 Flag 정보와 COMS의 적외 1(10.8 $\mu$ m)채널 등의 정보를 태풍 차바 사례에 대하여 GPM 강우강도 값과 COMS의 각 적외채널 정보 및 제주도 고산 레이더의 값들을 각각 픽셀별로 위치를 통일 시키고 시간차 5분내의 모든 자료들을 데이터베이스화하여 알고리즘 개발을 위한 기본 정보로 활용하였다. 최근 강우 알고리즘의 검증과 도시침수 입력 자료로 활용하기 위하여 부산 도시 침수가 발생하였던 2014년 8월 25일 홍수 사례에 적용 검증하였다. 검증결과 COMS 단독 강우알고리즘은 과대 추정하는 경향을 나타내었고, 실생활 기상 정보 활용에 사용하는 지상레이더 200-1.6 Z-R관계식은 부산 홍수사상에 크게 과소추정을 하였다. 36-1.2 Z-R관계식은 200-1.6 관계식보다는 정확도가 개선이 되었으나 여전히 과소 추정하는 경향을 보였다. 본 연구에서 개발된 COMS-Radar 결합 강우 알고리즘은 강우 피크를 정확하게 잡아내지는 못하지만 다른 COMS, Radar 단독으로 이용할 때보다 정확도 높은 결과를 보여준다. 본 연구에서 개발된 COMS-Radar 결합 강우 알고리즘은 향후 진보된 기술과 보다 많은 센서가 탑재된 COMS2 위성이 성공적으로 발사되고, 지상관측레이더 또한 편파 Radar의 현재 보다 많은 정보를 이용하여 결합된 알고리즘을 적용한다면 집중호우와 태풍과 같은 자연재해를 정확히 모니터링이 가능해질 것이며, 그렇게 된다면 정책결정자들로 하여금 집중호우에 기인한 도시 침수 및 홍수로 인한 피해저감 대응에 효과적으로 이용이 가능할 것으로 판단된다.

위성자료의 도시침수 해석 및 예측에 대한 적용성을 평가하기 위하여 1D-2D 결합 모형인 CUNA 모형이 이용되었다. 위성강우자료의 도시침수 해석의 적용결과 rain-1과 rain-2 모두 만족할 만한 수준의 침수 해석 결과를 보여주었으나 수집된 자료와의 침수 심 비교 결과 rain-2의 경우가 다소 높은 정확도를 보여주었다. 또한 해석결과 CUNA 모형은 하수관거의 공간적 분포를 고려함과 동시에 지표면과 하수관망 사이의 수리학적 조건에 따라 교환유량을 산정할 수 있어 실제 도시 지역의 수리수문학적 현상을 잘 모사할 수 있었으며 모의 결과 다음과 같은 장점을 확인 할 수 있었다.

- 도로 단위 수준까지의 자세한 침수해석 결과를 얻을 수 있다.
- 토지이용도별로 유출 계수와 유효 강우량에 대한 매개변수 보정이 가능하다.
- 도시구역의 산지, 하천, 도로, 운동장, 건물 밀집 지역을 동시에 해석 할 수 있다.
- 도로위의 집수구를 통해 지표면과 하수관망 사이의 유량교환이 이루어져 지표면에서 하수관망으로의 유입과 하수관망에서 지표면으로의 역류 현상의 공간 분포를 고려할 수 있다.

다만 침수심에 대한 관측결과의 부재로 인하여 매개변수 보정에 대한 불확실성이 있으며 온천천 유역 출구점인 수영강 합류점의 수심변화에 따른 상호작용을 고려하지 못하여 유역 출구점(온천천-수영강 합류점)에서의 배수위를 고려하지 못하였다. 따라서 향후에는 온천천 내부의 수위 변화 기록뿐만 아니라 현장 조사를 통한 침수 피해 조사를 통한 자료의 축척이 필요하며, 수문모형과를 결합을 통한 수영강 수위 변화와 수영강 유역 출구점의 조위에 의한 영향을 고려하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

최근 부산시에서는 이러한 피해를 사전에 예방하고자 온천천 제외지에 수위계와 CCTV를 설치하여 침수관련 정보(수위, 유량 등) 수집하고 있다. 모니터링을 통해 수집된 정보는 제내지에 설치되어 있는 광고판을 활용하여 거주민들에게 위험을 사전에 알리기 위한 기초자료로 사용되고 있다. 그러나 단순히 모니터링 결과를 알려주는 것에 그치지 않고 침수 피해 발생 예상시 대처 방안이나 피난로 안내등과 같이 실질적인 피해 저감을 위한 매뉴얼 개발 등에 관한 연구 수행이 필요하다. 예를 들어 도로 침수 발생이 예상되는 경우 사전에 CCTV를 통해 피해 예측 지역에 대한 현장정보 확인 수행 후 도로 통제를 실시함과 동시에 시민들에게 현장 상황 전파, 통제 구간 안내, 도로 통제에 따른 우회구간 안내에 대한 안내 방송 또는 문자 메시지 발송 등과 같은 실질적인 대처 방안의 효율화를 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## REFERENCES

부산광역시, 2004: 온천천 하천정비 기본계획

환경부, 2011: 하수도시설기준.

Adler, R.F., P. R. Keehn, and I. M. Hakkarinen, 1993: Estimation of monthly rainfall over Japan and surrounding waters from a combination of low-orbit microwave and geosynchronous IR data. *J. Appl. Meteor.*, 32, 335-356.

Adler, R. F., and R. A. Mack, 1984: Thunderstorm cloud height-rainfall rate relations for use with satellite rainfall estimation techniques. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23, 280-296.

Adler, R. F., and A. J. Negri, 1988: A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. *J. Appl. Meteor.*, 27, 30-51.

Arkin, P. A., and B. N. Meisner, 1987: The relationship between large-scale convective rainfall and cold cloud over the Western Hemisphere during 1982-84. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 51-74.

Charlton, Martin E., Andrew RG Large, and Ian C. Fuller. "Application of airborne LiDAR in river environments: the River Coquet, Northumberland, UK." *Earth surface processes and landforms* 28.3 (2003): 299-306.

Huffman, G. J., R. F. Adler, B. Rudolf, U. Schneider, and P. R. Keehn, 1995: Global precipitation estimates based on a technique for combining satellite-based estimates, rain-gauge analysis, and NWP model precipitation information. *J. Climate*, 8, 1284-1295.

Huffman, G. J., M. M. Morrissey, D. T. Bolvin, S. Curtis, R. Joyce, B. McGavock, and J. Susskind, 2001: Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. *J. Hydrometeor.*, 2, 36-50.

Kalyanapu, Alfred J., Steven J. Burian, and Timothy N. McPherson. "Effect of land use-based surface roughness on hydrologic model output." *Journal of Spatial Hydrology* 9.2 (2010).

Kidd, C., D. R. Kniveton, M. C. Todd, and T. J. Bellerby, 2003: Satellite rainfall estimation using combined passive microwave and infrared algorithms. *J. Hydrometeor.*, 4, 1088-1104.

Kuligowski, R. J., 2002: A self-calibrating real-time GOES rainfall algorithm for short-term rainfall estimates. *J. Hydrometeor.*, 3, 112-130.

Kummerow, C., and L. Giglio, 1995: A method for combining passive microwave and infrared rainfall observations. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 12, 33-45.

- Lee, S.S., 2016: Development of real-time urban inundation prediction system using estimated precipitation data based on remote sensing technology. APCC Annual Report.
- Lee, S.S., Nakagawa, H., Kawaike, K., and Zhang, H., 2012: Study on inlet discharge coefficient through the different shapes of storm drains for urban inundation analysis. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 68 (4), I\_31-I\_36.
- Lee, S.S., Nakagawa, H., Kawaike, K., and Zhang, H., 2013: Experimental validation of interaction model at storm drain for development of integrated urban inundation model. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 69 (4), I\_109-I\_114.
- Lee, S.S., Nakagawa, H., Kawaike, K., and Zhang, H., 2016: Urban inundation simulation considering road network and building configurations. *Journal of Flood Risk Management*, 9 (3), 224-233.
- Lee, S.S., Noh S.J., Zhang, C.H., and Lee, D., S., 2017: Simulation and analysis of urban inundation using the integrated 1D-2D urban flood model. *Journal of Korea Water Resources Association*, 50 (4), 263-275.
- Martins, R., Kesserwani, G., Rubinato, M., Lee, S., Leandro, J., Djordjević, S., and Shucksmith, J. D., 2017: Validation of 2D shock capturing flood models around a surcharging manhole. *Urban Water Journal*, 1-8.
- Miller, S. W., P. A. Arkin, and R. Joyce, 2001: A combined microwave/infrared rain rate algorithm. *Int. J. Remote Sens.*, 22, 3285-3307.
- Scofield, R. A., 1987: The NESDIS operational convective precipitation-estimation technique. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1773-1792.
- Todd, M. C., C. Kidd, D. Kniveton, and T. J. Bellerby, 2001: A combined satellite infrared and passive microwave technique for estimation of small-scale rainfall. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 18, 742-755.
- Vicente G. A., 1996: Algorithm for rainfall rate estimation using a combination of GOES-8 11.0mm and 3.9mm measurements, *Proceedings of the Eighth Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*. Atlanta. Amer. Meteor. Soc., 274-278
- Xie, P., and P. A. Arkin, 1996: Analyses of global monthly precipitation using rain-gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions. *J. Climate*, 9, 840-858.
- Xu, L., X. Gao, S. Sorooshian, P. A. Arkin, and B. Iman, 1999: A microwave infrared threshold technique to improve the GOES precipitation index. *J. Appl. Meteor.*, 38, 569-579.

**【연구자】**

박경원 선임연구원

이승수 선임연구원

이성규 선임연구원

연구보고서 2017-17

**원격탐사 기반 스마트 도시침수 위험관리 기술 개발**

---

I S B N 979-11-5698-207-4

발 행 2018년 3월

발 행 인 정 흥 상

발 행 처 APEC기후센터  
부산시 해운대구 센텀7로 12

제작·인쇄 경성문화사

---

이 보고서는 APEC기후센터 홈페이지(<http://www.apcc21.org/>)에서 이용하실 수 있습니다.  
또한 보고서에 실린 내용은 출처를 명시하면 자유롭게 인용할 수 있습니다. 단, 무단 전재 및  
복제를 금합니다.