



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

과거 초단기 강수 예보 데이터를
활용한 도시침수 모의 및 선행 예측
시간 분석



국립부경대학교 대학원

토목공학과

정철웅

공학석사 학위논문

과거 초단기 강수 예보 데이터를
활용한 도시침수 모의 및 선행 예측
시간 분석

지도교수 이상호

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2025년 8월

국립부경대학교 대학원

토목공학과

정철웅

정철웅의 공학석사 학위논문을 인준함.

2025년 8월 22일



위원장 공학박사 김수한 (인)

위원 공학박사 김열우 (인)

위원 공학박사 이상호 (인)

목 차

	쪽
표 목차	vi
그림 목차	viii
Abstract	xi
제1장 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 동향	3
1.3 연구 내용 및 범위	6
제2장 연구의 이론적 배경	7
2.1 기상청 강수 자료	7
2.1.1 종관기상관측	7
2.1.2 기상청 수치예보모형 및 초단기예측시스템	9
2.1.3 초단기 예보	14
2.2 XP-SWMM의 개요	17
2.3 XP-SWMM 모형의 구성	18
2.3.1 SWMM의 구성	18

목 차(계속)

	쪽
2.3.2 SWMM의 지배방정식	20
2.3.3 TUFLOW의 구성	22
2.3.4 TUFLOW의 지배방정식	25
2.4 TUFLOW의 1/2차원 연계 기법을 활용한 하천과 제내지 관망 연계 방법	26
2.5 TUFLOW 2차원 셀(cell)의 수위 산정과 시계열 데이터 추출 방법	28
제3장 과거 초단기 강수 예보 데이터의 예측 정확도 평가 방법	30
3.1 강수 자료 선정 방법	30
3.1.1 지역 및 기상 관측 지점 선정	30
3.1.2 일 합계 강수량 기준의 분석일 선정	33
3.2 과거 초단기 강수 예보 데이터의 예측 정확도 평가 방법	34
3.2.1 관측 및 예측 강수 자료의 수집과 비교 방법	34
3.2.2 정량적 평가 지표	35

목 차(계속)

쪽

제4장 과거 초단기 강수 예보 데이터의 예측 정확도 평가	37
4.1 정량적 평가 지표 및 산포도 그래프를 활용한 예측 정확도 평가	37
4.2 연구 대상 지역의 침수 발생일에 대한 과거 초단기 강수 예보 데이터의 예측 정확도 평가	43
제5장 대상 유역의 침수 모의 모형 구축	47
5.1 연구 대상 유역 선정 및 소유역 분할	47
5.2 XP-SWMM 침수 모의 모형	49
5.2.1 교량과 2차원 침수 모의 격자	49
5.2.2 XP-SWMM의 하천-제내지 배수체계의 연계 구조	50
5.3 입력자료 구성	52
5.3.1 조위 자료	52
5.4 XP-SWMM의 수위 시계열 데이터 출력 지점 설정	53
제6장 침수 모의 기간 및 강수 입력자료 구축	56
6.1 침수 모의 기간 및 초단기 예보 강수 자료 적용 기간	56

목 차(계속)

	쪽
6.2 중관기상관측 강수 입력자료	57
6.3 과거 초단기 예보의 강수 입력자료	58
제7장 침수 모의 결과 및 선행 예측 시간 추정 ...	63
7.1 침수 모의 결과 비교	63
7.1.1 침수심 비교 지점 및 연구 대상 지역의 하천 범람 시각 ·	63
7.1.2 침수심 비교 결과	68
7.1.2 침수면적 비교 결과	71
7.2 위험 침수심 기준 설정	73
7.3 수위 시계열 모의 결과의 분석 및 선행 예측 시간 추정	74
7.3.1 위험 침수심 도달 소요 시간 비교 및 선행 예측 시간 추정	74
제8장 결론 및 향후 연구	86
8.1 결론	86
8.2 향후 연구 내용	89

목 차(계속)

	쪽
참고문헌	90
부 록	96



표 목 차

쪽

Table 2.1 Detailed operational status of GDAPS, RDAPS, LDAPS, and KLAPS.	11
Table 2.2 Key features of KLAPS.	13
Table 3.1 ASOS stations selected for the study.	31
Table 3.2 Very short-range forecast grids selected for the study.	32
Table 3.3 Evaluation criteria for PBIAS.	36
Table 4.1 Evaluation results of MAE, RMSE and PBIAS by forecast period.	38
Table 4.2 Observed, forecasted, and average precipitation in Pohang on Sep. 6, 2022.	44
Table 4.3 Evaluation results of MAE and RMSE by forecast period in Pohang on Sep. 6, 2022.	44
Table 6.1 Application periods of very short-range forecast precipitation in inundation simulations.	56
Table 6.2 Very short-range forecast precipitation used in inundation simulation.	59
Table 7.1 Comparison of inundation depths at point A in inundation simulations using forecasted and observed precipitation data.	69

표 목차(계속)

쪽

Table 7.2 Comparison of inundation depths at point B in inundation simulations using forecasted and observed precipitation data.	69
Table 7.3 Comparison of inundation depths at point C in inundation simulations using forecasted and observed precipitation data.	70
Table 7.4 Comparison of inundation area in inundation simulations using forecasted and observed precipitation data.	72
Table 7.5 Comparison of times to reach critical inundation depths at points A, B, and C in inundation simulations using forecasted and observed precipitation data.	76
Table 7.6 Comparison of times to reach critical inundation depths at points D and E in inundation simulations using forecasted and observed precipitation data.	81

그림 목차

	쪽
Fig. 2.1 Location map of ASOS stations in Republic of Korea.	8
Fig. 2.2 Numerical weather prediction systems operated by the Korea Meteorological Administration.	10
Fig. 2.3 Extension of the forecast range of the very short-range forecast.	15
Fig. 2.4 SWMM program configuration.	18
Fig. 2.5 TUFLOW data input and output structure.	24
Fig. 2.6 Schematic diagram of the connection between a river and the protected lowland.	27
Fig. 2.7 Location of Zpts and computation points.	28
Fig. 2.8 Interpretation of PO objects and SMS output.	29
Fig. 4.1 Scatter plots of very short-range forecast and ASOS precipitation by forecast period.	40
Fig. 4.2 Scatter plots of very short-range forecast and ASOS precipitation by forecast period in Pohang on Sep. 6, 2022.	46
Fig. 5.1 Schematic diagram of subcatchments and conduits in the downstream Naengcheon watershed study area.	48
Fig. 5.2 The XP-SWMM models for Hx line and CN line.	51

그림 목차(계속)

쪽

Fig. 5.3 Tide level observed at the Pohang tidal station during Typhoon Hinnamnor on Sep. 6, 2022.	52
Fig. 5.4 Flood inundation in the Woobang Apartment area and corresponding Point object locations in XP-SWMM.	54
Fig. 5.5 Flood inundation in the Ocheon Market area and corresponding Point object locations in XP-SWMM.	55
Fig. 6.1 Minute-scale precipitation data from Pohang ASOS during Typhoon Hinnamnor on Sep. 6, 2022.	57
Fig. 6.2 Minute-scale precipitation data input: a combination of measurements and very short-range forecasts.	60
Fig. 7.1 Initial stages of inundation at locations A, B, and C simulated using observed precipitation data.	64
Fig. 7.2 Initial stages of inundation from Naengcheon simulated using observed precipitation data.	66
Fig. 7.3 Time series of the inundation depth at point A simulated using observed and forecasted precipitation data.	77
Fig. 7.4 Time series of the inundation depth at point B simulated using observed and forecasted precipitation data.	78
Fig. 7.5 Time series of the inundation depth at point C simulated using observed and forecasted precipitation data.	79

그림 목차(계속)

쪽

- Fig. 7.6 Time series of the inundation depth at point D simulated using observed and forecasted precipitation data. 82
- Fig. 7.7 Time series of the inundation depth at point E simulated using observed and forecasted precipitation data. 83
- Fig. 7.8 Initial stages of inundation at points D and E in the simulation result using observed precipitation data. 85



Urban inundation simulation and forecast lead time analysis using
archived very short-range precipitation forecast data

Cheol Ung Jeong

Department of Civil Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Due to sudden localized heavy rainfall under recent climate conditions, the risk of urban flooding has been increasing. Urban flooding occurs rapidly within a few hours, making timely response challenging. To enable proactive measures, securing advance lead time through urban flood prediction is critical. The study here utilized archived very short-range precipitation forecast data from Korea Meteorological Administration as inputs for an urban flood simulation model. The model simulated flooding scenarios and analyzed the time required to reach hazardous inundation depths of 20 cm, 30 cm, and 50 cm, defined in the study here, thereby estimating lead time. Prediction accuracy was validated by comparing the precipitation forecast data with observed hourly precipitation measurements from the Automated Synoptic Observing System. Simulations employed a 1D-2D coupled hydrodynamic model that utilizes the TUFLOW module in XP-SWMM developed in prior studies by others to represent both inland and riverine inundation dynamics. The study area was the lower basin of the Naengcheon Stream in Pohang, Gyeongsangbuk-do, which experienced flood damage due to Typhoon Hinnamnor on September 6, 2022. Results indicated that certain areas achieved over one hour of lead time prior to reaching the 50 cm hazard threshold. These findings provide foundational insights for leveraging very short-range forecast precipitation data in urban flood forecasting systems.

제1장 서론

1.1 연구 배경 및 목적

산업혁명 이후, 온실가스 배출 증가로 지구 평균 기온이 상승하고 있으며, 이로 인한 기후변화는 전 세계적으로 강수 양상을 변화시키고 있다. 특히 강수사상의 강도는 점차 증가하는 추세이다(IPCC, 2021). 또한, Center for Research on the Epidemiology of Disasters(CRED)에 따르면 2022년 한 해 동안 전 세계적으로 총 387건의 자연재해가 발생하였으며, 이 중 홍수로 인한 재해는 176건으로 전체 재해 중 가장 높은 비중을 차지하였다. 이는 2002~2021년 평균인 168건보다 많은 수치로, 최근 기후변화의 영향으로 홍수 발생이 증가하고 있음을 보여준다(CRED, 2023).

한반도에서도 기후변화의 영향으로 지난 106년간 연 강수량이 증가하였으며, 특히 여름철 강수량이 크게 증가하였다(Kim et al., 2018). 이와 더불어, 도시화율은 1960년 이후 급격한 산업화와 도시 개발로 인해 지속적으로 증가하여 2021년 기준 전국 도시화율은 90.7%에 이르렀다(Statistics Korea, 2024). 이에 따라 녹지 및 자연 토지가 감소하고, 도로·건물 등 인공 포장면적이 확대되면서 불투수 면적이 증가하였다. 이러한 변화는 유역의 저류 능력을 저하시킬 뿐만 아니라, 침투와 증발산량을 감소시키고 지체시간을 단축시키며 유출량을 증가시켜 자연하천 유역과 다른 유출 특성을 갖게 하였다(Jang, 2008). 그 결과, 도시 지역에서 침수 위험이 더욱 확대되고 있다.

도시 지역의 침수 피해는 단시간에 집중되는 강수로 인해 더욱 심화되고 있다. 2022년 8월 서울 동작구에서 시간당 최대 141.5 mm의 폭우가 내려 도로가 파손되고 옹벽이 붕괴되는 등 778건의 시설물 피해가 발생하였

다(Jeonkukmaeil Newspaper, 2023). 같은 해 9월에는 태풍 힌남노로 인해 포항 지역에서 시간당 최대 104.5 mm의 비가 내려 하천이 범람하고 침수 피해가 발생하였다(JoongAng Ilbo, 2022). 이후 2023년 7월에는 청주 오송읍 지하차도가 미호강 임시 제방의 붕괴 및 하천 범람으로 침수되어 인명 피해가 발생하였다(Hankyoreh, 2023). 이에 따라 국회는 도시침수 피해의 예방 및 저감을 위해 2023년 8월 ‘도시하천유역 침수 피해 방지 대책법’을 제정하였으며, 2024년 3월부터 시행 중이다. 또한, 환경부는 국가 및 지방 하천을 대상으로 홍수위험지도를 제작하여 침수 위험 지역을 식별하고 있으며, 부산광역시도 도시침수 통합관리시스템을 구축해 실시간 침수정보를 제공하고 있다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고, 도시침수는 몇 시간 내에서 급히 일어나므로 대응하기 매우 어렵다.

도시침수 예보의 기술과 경험이 충분히 축적되지 않은 현 단계에서 필요한 일 중의 하나는, 가용한 자료와 침수 모의 모형으로써, 침수 지역이 위험 침수심에 이르기까지 걸리는 선행 예측 시간(forecasting lead time)을 추정하는 일이다. 이에 본 연구는 기상청에서 제공하는 과거 초단기 예보의 강수 자료에 대해 예측 정확도를 평가하고, 이를 도시침수 모의 모형의 입력자료로 적용하여 침수 모의를 수행한 후 본 연구에서 정의한 위험 침수심에 이르기까지 선행 예측 시간을 추정하는 것을 목표로 한다. 이를 통해, 초단기 예보의 예측 강수량을 활용한 도시침수 예측 가능성을 살펴보고자 한다.

1.2 연구 동향

도시침수 피해 저감을 위한 대응과 예측의 중요성이 증가함에 따라, 수리·수문 모형을 활용한 도시침수 모의뿐만 아니라, 예측 강수와 다양한 기계학습 모형을 연계한 도시침수 예측에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 본 절에서는 이러한 연구 동향을 살펴보고자 한다.

도시침수 모의에 관한 연구는 미국 환경보호국(Environmental Protection Agency; EPA)에서 개발한 SWMM(storm water management model)을 중심으로 수행되어 왔다(Park et al., 2017; Kang et al., 2010; Shon et al., 2010; Lee et al., 2006). 그러나 SWMM은 침수 해석 시 하수관거 내 월류량을 기준으로 하기때문에, 지표면을 따라 확산되는 침수 현상을 정확히 모의하기 어렵다. 이를 보완하기 위해 하수관거 내 월류뿐만 아니라 지표면의 침수 확산까지 고려할 수 있는 XP-SWMM과 같은 상용 모형을 활용한 도시침수 모의 연구가 활발히 진행되고 있다(Sun et al., 2021; Kim and Lee., 2015; Shin et al., 2014). 그러나 대부분의 도시침수 모의 연구는 과거 특정 강수 사례를 입력자료로 활용하여 침수 모의를 수행하고 이에 따른 영향을 평가하는 사후 분석에 초점을 맞추고 있다. 이러한 연구는 국지성 집중호우로 인해 단시간 내 발생하는 도시침수를 사전에 예측하고 대응하기 위한 실용적인 방법론을 제시하는 데 한계가 있다.

이에 따라, 예측 강수를 활용하여 도시침수를 예측하는 연구가 활발히 진행되고 있다. Yoon et al.(2014)은 레이더 예측 강수를 SWMM 모형과 2차원 침수해석모형에 적용하여 침수 피해가 발생한 서울 삼성배수분구의 침수를 모의하고, 지상관측강수를 적용한 침수 모의 결과와 비교하였다. 그 결과, 당시 침수 발생 지점이 각 모의 결과들에서도 유사하게 나타났으며, 레이더 예측 강수는 예측 선행 4시간까지 유사한 패턴 및 강수량을 보여

예측 선행 1~4시간 정도에서는 침수 예측이 가능할 것이라 언급하였다. Kim et al.(2015)은 기상레이더 자료를 기반으로 TREC(tracking radar echoes by correlation) 기법을 이용하여, 10분 간격으로 최대 60분까지 초단기 레이더 강수 예측을 수행하고, 이를 도시유출 모형에 적용하였다. 초단기 강수 예측 결과, 선행시간 60분까지 상관계수가 0.5 이상 유지되었으며, 예측 강수를 적용한 도시유출 모의에서는 선행시간이 길어질수록 침투유량과 유출체적은 감소하였으나, 침투시간은 비교적 일치하는 결과를 나타내었다. 또한, Chen et al.(2020)은 GRAPES_MESO(global/regional assimilation and prediction system_MESO model) 수치예보모형과 2차원 수리·수문 모형을 결합하여 고해상도의 도시침수 예측 시스템을 제안하였다. 12시간의 홍수 사상을 2 m 해상도에서 모의한 결과, 5.09시간이 소요되었으며 수치예보모형이 72시간 전에 강수를 예측할 수 있다고 가정할 때, 54.91시간 선행하여 예측 정보를 제공할 수 있음을 언급하였다. 아울러, Hwang et al.(2025)은 예측 10분~1시간의 정확도가 높은 홍수 통제소의 초단기 예측 강수와 약 예측 2시간 이후부터 정확도가 높은 기상청 수치예보모형의 예측 강수를 병합하는 기법을 개발하였다. 그 결과, 돌발홍수 예측 시스템의 선행 예측 시간을 기존 1시간에서 3시간까지 확장 가능성을 확인하였다.

한편, 도시침수 모의 분야에서도 다양한 기계학습 모형을 활용하여 침수 발생 가능성을 보다 신속하게 예측하는 연구가 활발히 진행되고 있다. Kim et al.(2020)은 침수 피해를 야기한 다양한 강우 사상을 LSTM(long short-term memory) 모형의 입력자료로 활용하고, SWMM의 1차원 도시유출해석 결과를 목표값으로 사용하여 총 월류량을 예측하였다. 또한, 로지스틱 회귀모형의 종속 변수로 2차원 침수 해석 결과를 적용하여, LSTM에서 예측한 총 월류량이 입력될 때, 침수 범위를 예측할 수 있도록 하였다. 그 결과, 침수심 0.5m 이상의 침수 범위에 대해 최대 침수면적 적합도는 97.3

3%로 나타났으며, 3초 이내에 2차원 침수 범위 예측까지 가능하였다. 또한, Kim et al.(2021)은 기상청의 강수 자료와 SWMM 및 FLO-2D 모의 결과를 랜덤포레스트 회귀모형에 학습시키고, 이를 통해 도시침수 예측 모형을 구축하여 실시간으로 도시구역의 침수지도를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 아울러, Xu et al.(2023)은 수리-수문 모형인 PCSWMM(personal computer storm water management model)으로 생성한 모의 데이터를 LightGBM(light gradient boosting machine)모형에 학습시키고, 예측 정확도를 향상시키기 위해 격자 탐색과 K-겹 교차검증으로 초매개변수를 최적화한 도시침수 예측모형을 제안하였다.

위의 연구들은 도시침수 및 돌발홍수를 신속하게 예측하고 예측 정확도를 향상시키는 데 크게 유용하였으나, 대부분의 연구가 침수 발생 여부 및 범위 예측에 초점을 두고 있었다. 한편, 일부 연구는 레이더 및 기상 수치예보모형의 강수 예측 기간과 침수 모의에 소요된 시간을 고려하여 선행 예측 시간을 추정하였으나, 위험 침수심에 이르기까지 소요 시간을 분석하여 확보 가능한 선행 예측 시간을 정량적으로 추정한 연구는 희소한 상태이다.

1.3 연구 내용 및 범위

본 연구는 2022년 9월 6일 태풍 힌남노 내습 당시 침수 피해가 발생한 포항시 냉천 하류 유역을 대상으로, 기상청에서 제공하는 과거 초단기 예보의 강수 자료와 종관기상관측 강수 자료를 각각 입력자료로 적용하여 침수 모의를 수행하고, 본 연구에서 정의한 위험 침수심에 이르기까지 선행 예측 시간을 추정하고자 한다.

먼저, 침수 모의를 수행하기에 앞서 입력자료로 활용될 과거 초단기 예보의 강수 자료에 대해 종관기상관측 강수 자료와 시간 단위로 비교하여 예측 정확도를 평가하였다. 침수 모의는 선행 연구인 Hwang et al.(2024)에서 XP-SWMM의 TUFLOW 1차원/2차원 연계 기능을 활용하여 하천 범람과 내수 침수를 동시에 모의할 수 있도록 구축한 침수 모의 모형을 활용하였다. 본 연구에서는 해당 침수 모의 모형에, 실제 침수 피해가 발생한 지역을 대상으로 수위 시계열 데이터 출력 지점을 지정하고, 수두/유속 자료 저장 지점을 정의하는 Point 객체를 추가하였다. 이후 과거 초단기 예보의 강수 자료와 종관기상관측 강수 자료를 각각 입력자료로 적용하여 동일한 기간에 대해 침수 모의를 수행하였다. 이를 통해 얻은 침수 모의 결과를 비교·분석하고 앞서 지정한 지점에서 도출된 1분 간격의 수위 시계열 데이터를 활용하여, 초단기 강수 예보 시점부터 본 연구에서 정의한 위험 침수심에 이르기까지 소요 시간을 분석하여 선행 예측 시간을 추정하였다.

제2장 연구의 이론적 배경

2.1 기상청 강수 자료

2.1.1 종관기상관측

종관기상관측(automated synoptic observing system; ASOS)이란 종관 규모의 기상 현상을 파악하기 위해 정해진 시각에 전국의 모든 관측소에서 종관기상관측장비를 통해 동일한 시각에 자동으로 수행되는 지상관측을 의미한다. 여기서 종관규모란 일기도에 표현되는 고기압이나 저기압의 수명 및 공간적 크기를 말한다. 종관기상관측은 현재 Fig. 2.1과 같이 전국에 총 97개소가 설치되어 운영 중이며 약 67 km의 관측 조밀도를 가진다. 이러한 종관기상관측장비를 통해 만들어진 종관기상관측 자료는 기상청 기상자료개방포털(KMA, 2015)에서 제공되며 분, 시간(매 정시), 일, 월, 연 단위로 제공된다. 자료 제공 기간은 1904년부터 최근까지로, 관측 지점과 요소별로 상이하다. 제공되는 주요 관측요소는 기온, 강수, 바람, 기압, 습도, 일사, 일조 등이며, 자료의 오류 및 결측 여부를 식별할 수 있다.

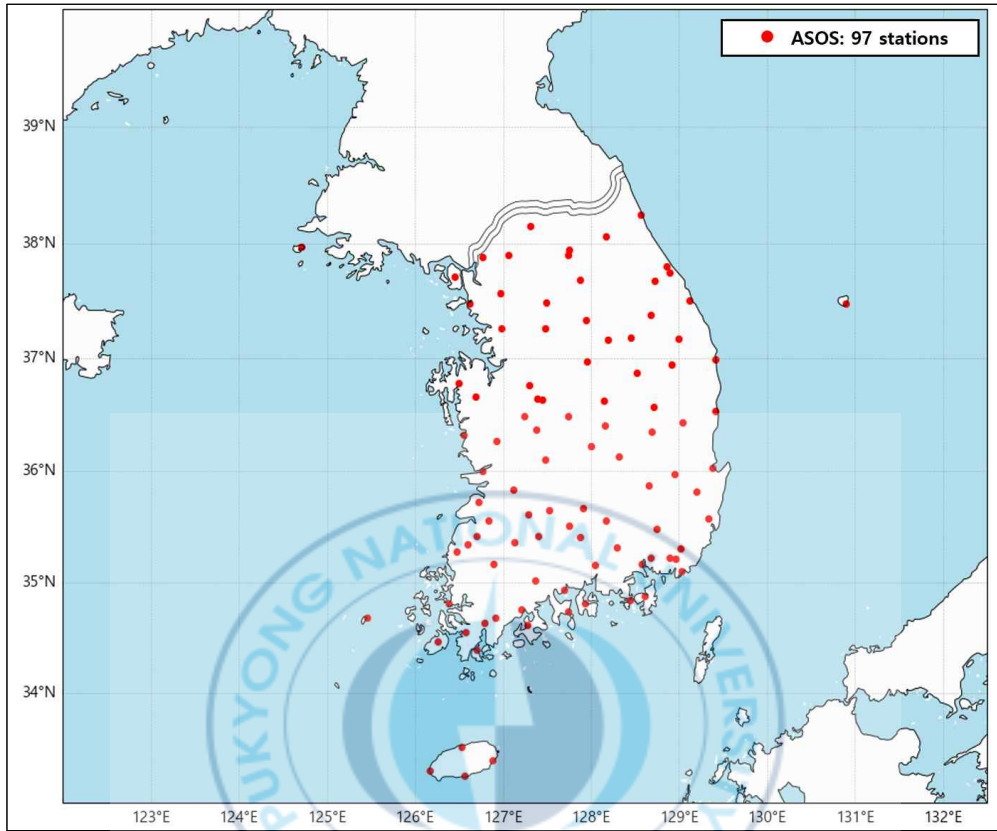


Fig. 2.1. Location map of ASOS stations in Republic of Korea.

2.1.2 기상청 수치예보모형 및 초단기예측시스템

기상청은 수치예보모형을 이용해 1989년부터 수치예보 업무를 수행하고 있다. 수치예보모형은 지구를 수평 및 연직 방향으로 세분화하여 수많은 격자로 나눈 뒤, 각 격자점의 대기 상태 및 운동을 지배하는 대기방정식을 슈퍼컴퓨터를 이용하여 계산하며, 이를 통해 미래의 대기 상태를 예측한다. 수치예보시스템의 검증(Park et al., 2025) 보고서에 따르면 기상청은 예측 기간 및 대상 영역 등에 따라 20여 종의 수치예보시스템을 현업에서 운영 중이며 Fig. 2.2는 이를 요약한 것이다. 이 중 주요 수치예보모형은 전지구예보시스템(global data assimilation and prediction system; GDAPS), 지역예보시스템(regional data assimilation and prediction system; RDAPS), 국지예보시스템(local data assimilation and prediction system; LDAPS), 초단기예측시스템(Korea local analysis and prediction system; KLAPS) 등으로 세부 운영 현황은 Table 2.1과 같다.

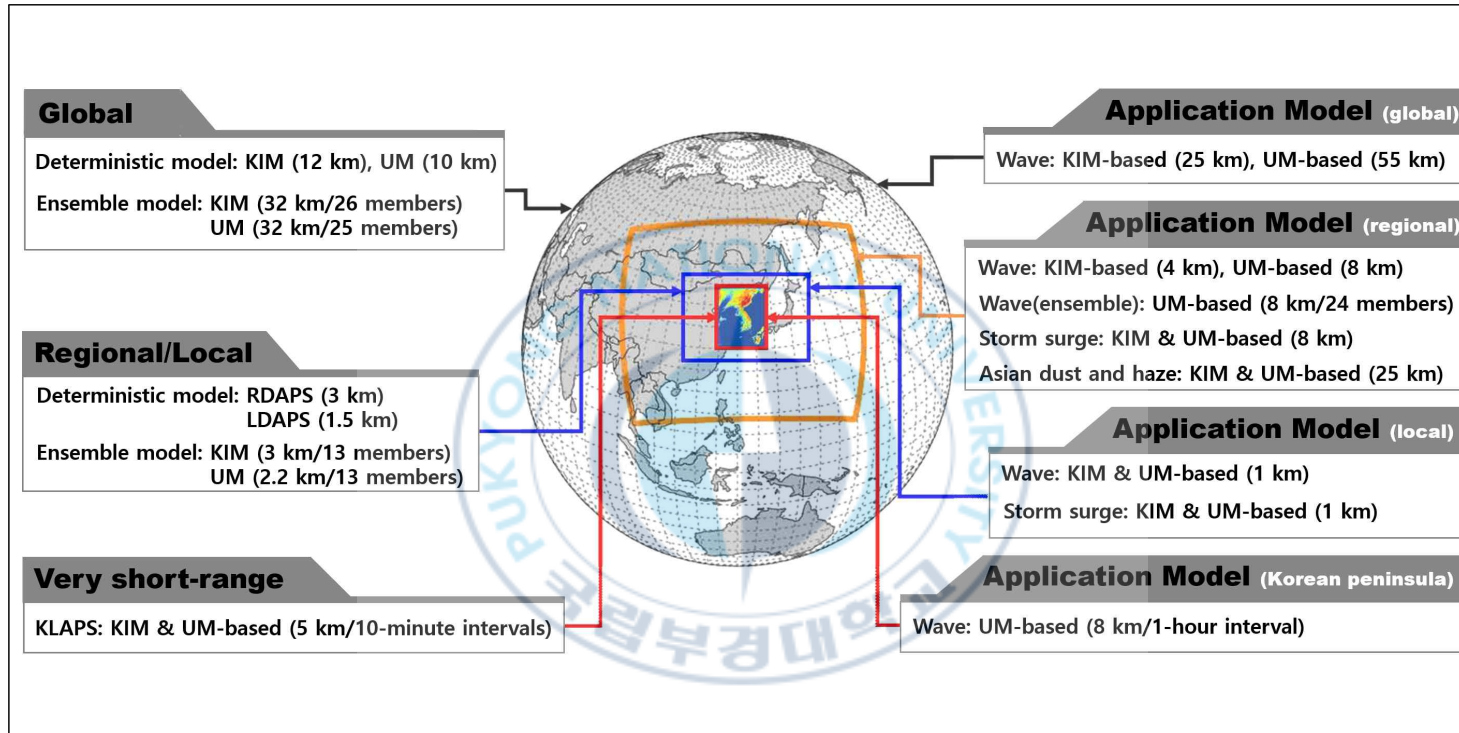


Fig. 2.2. Numerical weather prediction systems operated by the Korea Meteorological Administration.
Park et al. (2025)

Table 2.1. Detailed operational status of GDAPS, RDAPS, LDAPS, and KLAPS.

System (model) \ Category		Horizontal resolution (Vertical levels)	Number of operations /day	Forecast range	Purpose	Domain
GDAPS	KIM-Global	12 km (91 levels)	4 times	12 days (00.12UTC) /87 hours (06.18UTC)	Short-range forecast, Medium-range forecast	Global
	UM-Global	10 km (70 levels)				
RDAPS	KIM-Regional	3 km (40 levels)	4 times	120 hours (00.12UTC) /72 hours (06.18UTC)	Short-range forecast	East asia
LDAPS	UM-Local	1.5 km (70 levels)	4 times	48 hours	Short-range forecast	Korean peninsula
KLAPS	KIM-KLBG	5 km (40 levels)	4 times	36 hours	Background field generation for KLAPS	Korean peninsula
	UM-KLBG	5 km (40 levels)	4 times	36 hours		
	KIM-KL05	5 km (22 levels)	48 times	-	3D analysis/ very short-range prediction	Korean peninsula
	UM-KL05	5 km (22 levels)	144 times			
	KIM-KLFS	5 km (40 levels)	48 times	12 hours		
	UM-KLFS	5 km (40 levels)	144 times	12 hours		

Park et al. (2025)

이 중 초단기 예보에 사용되는 수치예보모형은 초단기예측시스템이며, 배경 및 초기장으로 활용되는 전지구예보시스템의 종류에 따라 두 개의 초단기모형이 운영되고 있다. 운영 중인 두 초단기모형은 각각 2019년 7월부터 운영 중인 영국 통합모형(unified model; UM)기반의 UM-KLAPS와 2023년 2월부터 운영 중인 한국형 수치예보모형(Korean integrated model; KIM)기반의 KIM-KLAPS이다. 이 중 UM-KLAPS를 기준으로 초단기 분석 및 예측 시스템은 한반도 영역에 대해 수평 해상도 5 km, 연직 40층(상단 50 hPa)의 공간 해상도를 가지며, 원격, 중관, 지점 등 다양한 기상 관측 자료를 매 10분마다 수집 및 분석하여 초기장으로 활용한다. 이를 기반으로 12시간까지 초단기 강수 및 예측정보를 생산하고 있다. 이러한 초단기 예측시스템의 주요 특징은 Table 2.2와 같다.

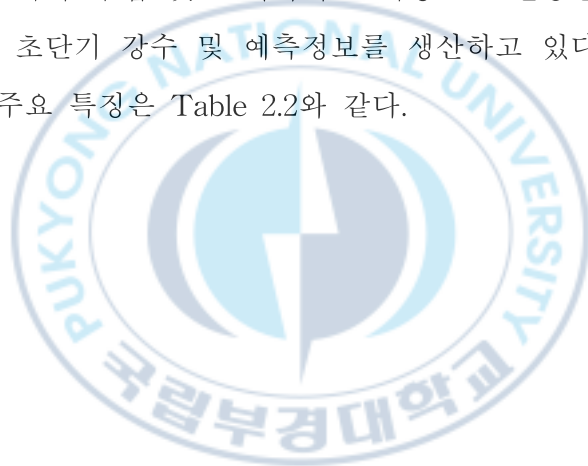


Table 2.2. Key features of KLAPS.

System		KLAPS (KIM/UM 5 km L40)
Horizontal resolution/ number of grids		5 km x 5 km/235 (East-West) x 283 (North-South)
Vertical levels/ integration interval		40 levels (Top: 50 hPa)/20 seconds
Forecast range/ output interval		12 hours/1 hour, 10 minutes (precipitation)
Initial-boundary conditions		KIM (NE36)/UM (N128) Global data
Land/sea surface data		KIM/UM-Global Soil data/GODAPS2 SST and ocean mixed layer data
Data assimilation		Objective analysis (Barnes), Cloud analysis
Domain center		38° N, 126° E
Map projection		Lambert conformal conic projection (latitude of true scale: 30° N, 60° N)
Topographic information		gmted2010_30s + GEBCO 2014_30s (sea surface)
Grid system	Horizontal	Arakawa C-grid staggering
	Vertical	Sigma-pressure vertical coordinate
Moist processes		(cumulus parameterization) KSAS (Korean integrated model simplified Arakawa-Schubert) (microphysics) WRF Double Moment 7-Class (WDM7) microphysics
Radiation		RRTMG
Boundary layer		Shin-Hong
Land/earth surface		Noah LSM/Revised MM5 Monin-Obukhov Scheme

Park et al. (2025)

2.1.3 초단기 예보

초단기 예보(very short-range forecast; VSRF)는 예보 시점부터 6시간 이내에 대하여 수행되는 예보를 말한다. 이는 짧은 시간에 발생·소멸하는 위험기상에 대응하기 위해 전국의 읍·면·동 단위로 매시 30분마다 발표하여 이음새 없는 예보 체계를 구축하고 있다. 초단기 예보는 앞서 2.1.2절에서 언급한 수치예보모형 중 초단기예측시스템과 실황분석에 기반하여 생산되며, 생산된 초단기 예보는 1시간 간격으로 발표된다. 이때 발표되는 기상 요소는 기온, 강수형태, 강수량, 상대습도, 풍속, 풍향 등 6개의 기상 실황 요소와 강수형태, 강수량, 기온, 하늘상태, 낙뢰, 습도, 풍속, 풍향 등 8개의 예보 요소이다.

초단기 예보의 강수 자료는 기상청 기상자료개방포털의 ‘기상예보’ 메뉴 내 ‘동네예보’ 항목의 ‘초단기 예보’에서 1시간 누적강수량 형태로 제공되며 읍·면·동 단위로 자료를 조회할 수 있다. 자료의 시간 기준은 협정세계시(universal time coordinated; UTC)를 사용하며 이는 전 세계적으로 표준화된 시간 체계로, 한국표준시(Korea standard time; KST)보다 9시간 느리다. 따라서 자료를 수집하거나 실제 관측된 강수 자료와 비교할 경우, 협정세계시와 한국표준시 간의 시간 차이를 고려해야 한다. 또한, 초단기 예보는 과거 2019년 10월 10일 10시 30분부터 발표 시각(매시 30분)마다 예보 시간을 세 개의 순서로 반복해서 발표하였다(Fig. 2.3의 (a)). 첫 번째는 6시간, 두 번째는 5시간, 세 번째는 4시간의 예보를 반복적으로 발표하여, 일 24회 발표되었으며, 이로써 총 120개의 자료를 제공하였다(Ahn et al., 2020).

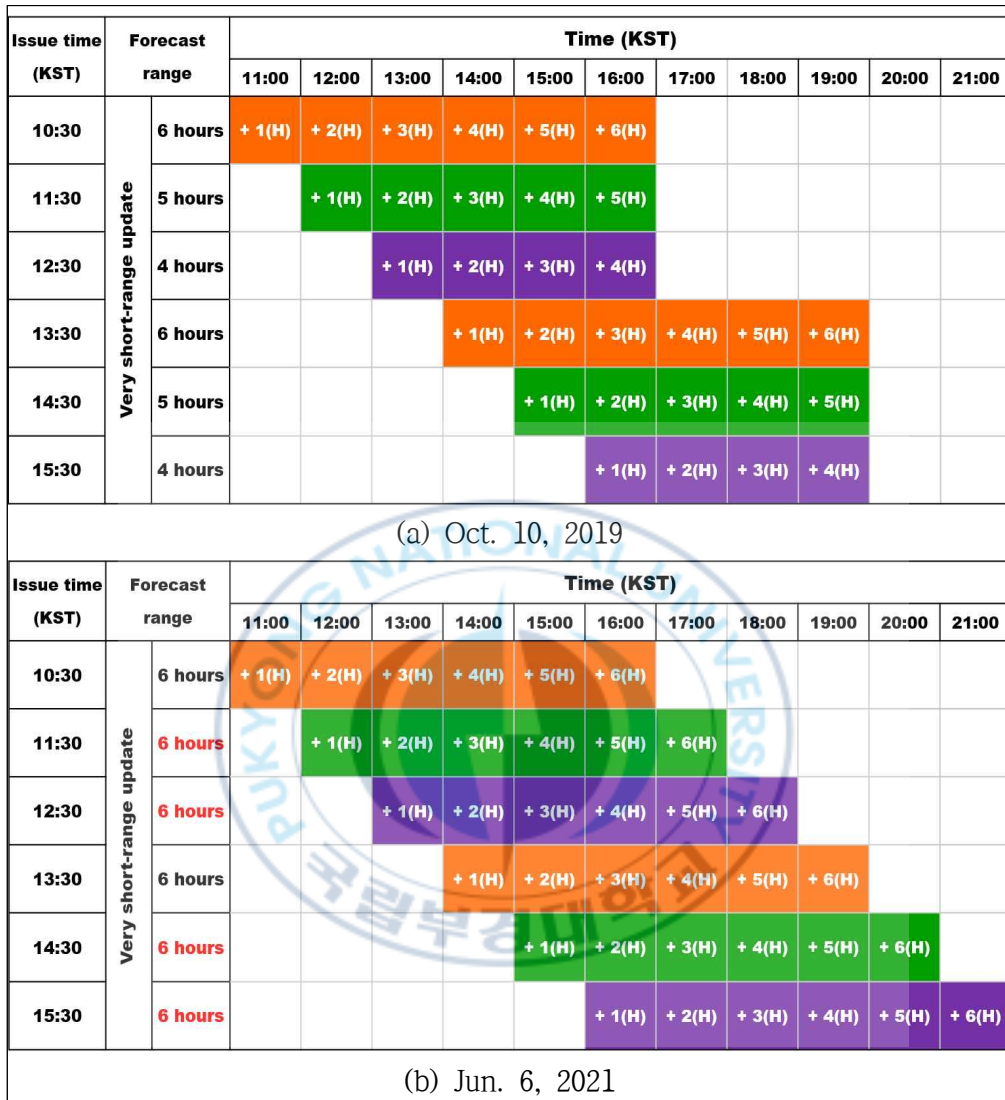


Fig. 2.3. Extension of the forecast range of the very short-range forecast.

그러나 2021년 6월 29일을 기준으로 초단기 예보의 생산체계가 개선되면서, 발표 시각마다 예보 범위가 모두 6시간까지로 확대되었으며, 하루 24회 발표를 통해 총 144개의 자료를 제공하고 있다(Fig. 2.3의 (b)). 이에 따

라, 기상청 기상자료개방포털에서는 2021년 6월 29일 이전 자료는 ‘(구)초
단기 예보’로 구분하여 제공한다.



2.2 XP-SWMM의 개요

XP-SWMM은 호주의 XP-Software사에서 개발된 소프트웨어로, EPA-SWMM 엔진을 기반으로 유역-관거-하도를 따라 흐르는 물의 흐름에 대한 1차원 해석과 TUFLOW 엔진을 기반으로 한 범람 유동 2차원 해석을 통합한 수리·수문 모의 소프트웨어이다.

XP-SWMM의 1차원 해석은 SWMM(storm water management model) 4.0 엔진을 기반으로 수행된다. EPA-SWMM은 1969년부터 개발되어 1971년에 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency; EPA)의 지원 아래 Metcalf & Eddy사 등과 함께 개발한 지표면 유출 및 강수-유출 모의 모형이다(Huber and Dickinson, 1988). 해당 모형은 다양한 수문 자료를 입력받아 도시 유역의 하수 시스템 내 유량 및 수질 모의가 가능하다. 2차원 해석은 TUFLOW(two-dimensional unsteady flow)를 기본 엔진으로 한다. 해당 모형은 호주의 WBM과 퀸즐랜드 대학교에서 공동 개발하였다. TUFLOW는 천수 방정식을 기반으로 하며, Stelling의 유한차분기법과 ADI(alternating direction implicit) 기법을 적용하여 수치해석을 수행하며, 1차원 수치해석 모형과 연계가 용이하다는 특징이 있다(Sun et al., 2021).

2.3 XP-SWMM 모형의 구성

2.3.1 SWMM의 구성

SWMM의 구성과 모듈에 대한 세부적인 내용은 Lee et al.(2010)의 제 3회 SWMM-GE Workshop 교재의 일부 내용을 발췌하여 작성하였다.

SWMM은 5개의 실행 블록과 5개의 보조 블록으로 이루어진 모듈 구조를 갖추고 있으며, 126개의 부 프로그램을 포함하여 구성된다(Fig. 2.4).

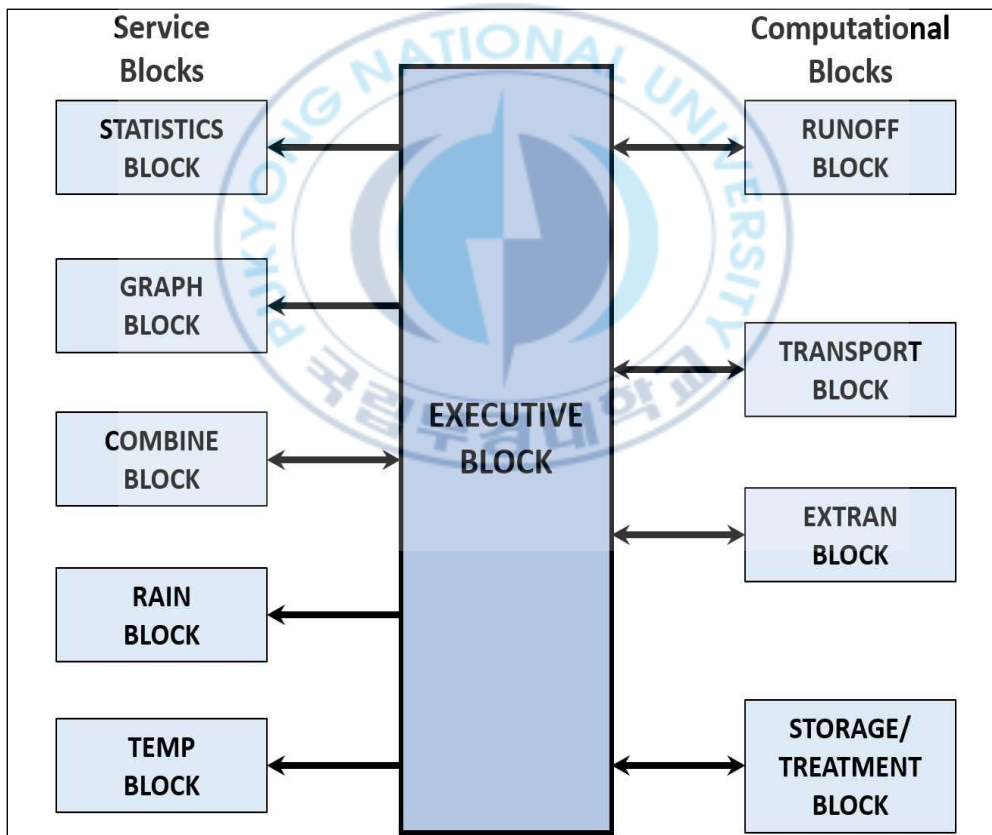


Fig. 2.4. SWMM program configuration.

Huber and Dickinson (1988)

(1) RUNOFF BLOCK

RUNOFF BLOCK은 배수 유역의 유출과 유량 및 수질을 모의하기 위해 개발된 모듈로, 관거(pipes; links)를 통해 흐름(flow) 및 오염물질(contaminants)의 추적(routing)을 모의할 수 있다. 해당 모듈은 임의의 강수 또는 강설의 주상도를 받아들여 투수유역의 침투, 용설, 지표 흐름, 표면 저류, 하도 흐름, 유입구(inlet; node)로 흘러들어오는 성분을 단계적으로 계산하며, 각 노드에서 수문 및 오염부하곡선을 산출한다.

(2) TRANSPORT BLOCK

TRANSPORT BLOCK은 SWMM에서, 수지형 관거시스템을 통한 용량 이내의 자유흐름(non-surcharged; free-flowing flow)과 오염물질의 추적을 수행하는 모듈이다. 통상적으로 RUNOFF 모듈에서 산정된 유역의 유출 및 오염물질은 TRANSPORT 모듈을 사용하는 경우 해당 모듈로 전달되어 관로 또는 하도의 상류단에 유입된다.

(3) EXTRAN BLOCK

EXTRAN BLOCK은 개수로 및 관거(closed conduit) 시스템을 위한 수리학적 하도 추적 모듈이다. 해당 모듈은 특정 노드 위치에서 수문곡선의 입력 데이터를 받으며, 이는 RUNOFF 모듈과 같은 상위 모듈로부터 인터페이스 파일로 전송되거나 사용자가 직접 입력한다. EXTRAN 모듈은 우수의 유입 수역(receiving water system)에 이르는 유출구까지 배수 시스템을 통해 우수의 동적인 흐름을 추적한다.

2.3.2 SWMM의 지배방정식

SWMM의 지배방정식은 Kang et al.(2010)의 내용을 발췌하여 다음과 같이 기술하였다.

지표면유출(surface runoff)의 추적식(routing equation)은 저류량의 변화율을 유입량 및 유출량으로 나타낸 연속방정식 Eq. (2.1)과 마찰 경사에 대해 유역 경사와 동일하다고 가정한 Manning 식으로 구성된 비선형 저수지(nonlinear reservoir) 식을 사용한다.

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dh}{dt} = A_s i_e - Q \quad (2.1)$$

Eq. (2.1)에서 V 는 물의 체적($= A \cdot h$), t 는 시간(sec), h 는 수심(m), A_s 는 수표면의 면적(m^2), i_e 는 초과 강우량(m/s), Q 는 유출량(m^3/s)이다. 지표유출은 Eq. (2.2) 식을 사용하여 계산한다. Eq. (2.2)는 흐름 단면을 넓은 폭으로 보고 동수반경이 수심과 같다고 가정한 Manning 식이다.

$$Q = W \frac{1}{n} (d - d_p)^{\frac{5}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

Eq. (2.2)에서 W 는 유역의 폭(m), n 은 Manning의 조도계수, d_p 는 지면 저류의 깊이(m), S 는 소유역의 경사(m/m)이며, d 는 Eq. (2.1)과 Eq. (2.2)로부터 구하는 변수이다.

SWMM은 관거에 흐르는 물의 흐름을 추적하기 위해서 동역학과 (dynamic wave) 추적법 및 운동파(kinematic wave) 추적법 그리고 비선형 저수지 방법을 사용한다. 이 중 동역학과 추적법은 도로 침수의 상류영향을 모의할 수 있는 방법이다. 동역학과의 지배방정식으로서 운동량방정식과 연속방정식이 있으며, SWMM은 링크의 유량 Q 를 계산하기 위해 두 식을 결합하여 하나로 변형한 Eq. (2.3)를 사용한다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V\frac{\partial A}{\partial t} - V^2\frac{\partial A}{\partial x} + gA\frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

Eq. (2.3)에서 t 는 시간, g 는 중력가속도, A 는 흐름 면적, S_f 는 마찰 (에너지) 경사, x 는 관 또는 수로를 따른 거리, $H = z + h$ 는 수위이며 여기서 z 는 관거 바닥 높이, h 는 수심이다. Eq (2.3)에서 Q 와 H 는 미지수이므로 두 변수를 연관시키기 위한 다른 수식이 하나 더 필요하며 이는 노드에서 집중형 연속방정식 Eq (2.4)를 통해 얻어진다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q_t \Delta t}{A_s} \quad (2.4)$$

Eq. (2.4)에서 A_s 는 노드의 수표면적이며, Eq. (2.3) 및 (2.4)는 유한차분 양해법을 통해 수치해를 구한다.

2.3.3 TUFLOW의 구성

TUFLOW 구성의 세부 내용은 WBN Oceanics(2018)의 문헌 내용을 발췌하여 기술하였다. TUFLOW의 기본 구조는 Fig. 2.5와 같으며, 그림은 입력자료를 기반으로 해석 엔진을 거쳐 결과가 출력자료로 생성되는 과정을 나타낸다. 본 절에서는 TUFLOW의 구성을 입력자료 및 출력자료, 해석 엔진으로 나눠 말하고자 한다.

(1) 입력 및 출력자료

TUFLOW의 입력자료는 수치지형모형(digital terrain model; DTM), GIS 레이어(layers), 시계열 경계조건, 제어 파일 등으로 구성된다. 먼저, 수치지형모형은 계산 영역의 지표면 고도 정보를 포함하는 래스터 자료로, 격자 생성 및 수위 계산의 기준이 되는 기본 지형정보를 제공한다. GIS 레이어는 모형의 공간적 특성을 정의하는 자료이며, 이는 지형정보와 2차원 격자 위치, 1차원 네트워크 도메인, 1차원 및 2차원 경계조건, 1차원과 2차원 해석 영역을 연계하는 링크(2D/1D links), 토양의 피복 상태를 고려한 토지 이용도(land use map)가 포함된다. 또한, 시계열 경계조건은 유량, 수위, 강수량 등 시간에 따라 변하는 수문학적 시계열 자료가 입력된다.

해석 결과는 시계열 자료, 맵 데이터(map data) 등으로 출력된다. 시계열 자료는 시간에 따라 변하는 수위, 유량, 유속 등의 값이 출력된다. 맵 데이터는 해석 영역 내 각 셀의 수위, 유속, 침수심 등을 포함하는 자료로, GIS 또는 시각화 프로그램을 통해 지도로 표현할 수 있다.

(2) 해석 엔진

TUFLOW의 해석 엔진은 2차원 유동 해석을 위한 TUFLOW Classic과 TUFLOW HPC(heavily parallelised compute), 1차원 흐름 해석을 위한

ESTRY로 구성된다. TUFLOW Classic 엔진은 단일 코어의 중앙처리장치에서 작동하며, 주로 도시침수, 하천 범람, 조석 및 해안 유동 현상을 모의하는 데 활용된다. 반면, TUFLOW HPC 엔진의 경우 다중코어 중앙처리장치 또는 그래픽처리장치를 활용하며, 이를 통해 빠른 병렬 계산이 가능하다. 한편, 1차원 해석 엔진인 ESTRY는 자유수면 흐름 해석을 수행하며, 개수로, 관거, 위어, 교량, 펌프, 수문 등의 다양한 수리 구조물의 모의가 가능하다. 또한, ESTRY는 TUFLOW Classic 또는 HPC와 연계하여 1/2차원 통합 해석을 지원하며, 도시 지역의 배수관망과 지표 유출을 동시에 모의하는 복합 침수 모의에 활용된다.



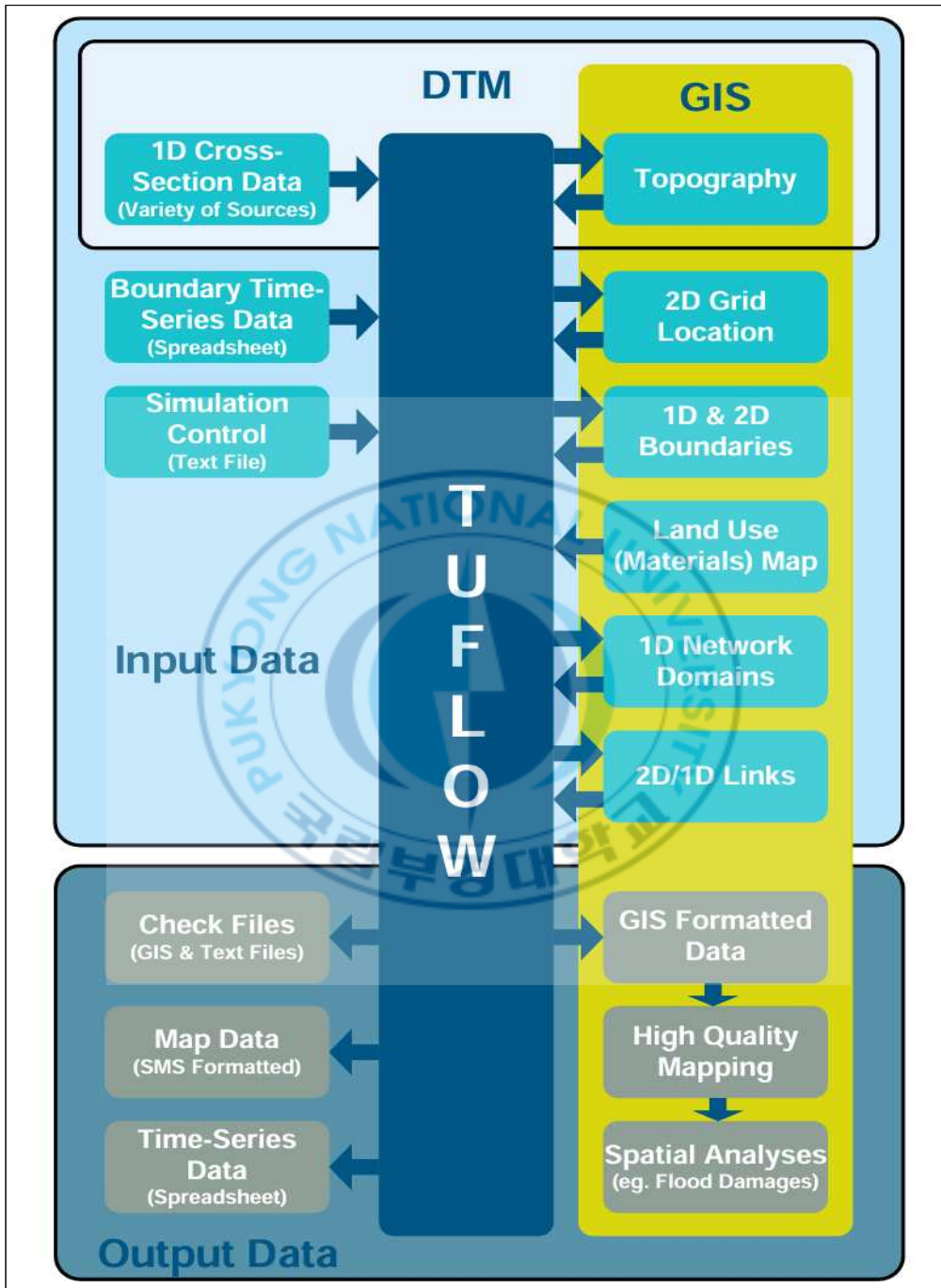


Fig. 2.5. TUFLOW data input and output structure.
WBN Oceanics (2018)

2.3.4 TUFLOW의 지배방정식

TUFLOW의 지배방정식은 2차원 천수방정식(shallow water equations)이며, 이는 x, y 방향의 운동량 및 연속 방정식으로 Eq. (2.5) ~ (2.7)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} = 0 \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - c_f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ & + gv \left(\frac{n^2}{H^{4/3}} + \frac{f_l}{2g\Delta x} \right) \sqrt{u^2 + v^2} - \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = F_x \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + c_f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ & + gv \left(\frac{n^2}{H^{4/3}} + \frac{f_l}{2g\Delta y} \right) \sqrt{u^2 + v^2} - \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = F_y \end{aligned} \quad (2.7)$$

여기서, t 는 시간, ζ 는 수면의 높이(elevation), u 와 v 는 각각 x, y 방향의 수심 평균 된 유속인자, x 와 y 는 x, y 방향으로의 거리, H 는 수심, c_f 는 코리올리 힘 계수, n 은 조도계수, f_l 는 에너지손실계수, μ 는 수평 방향의 운동량확산 계수, p 는 대기압, ρ 는 물의 밀도, F_x 와 F_y 는 x, y 방향으로 작용하는 각종 외력의 합이다.

2.4 TUFLOW의 1/2차원 연계 기법을 활용한 하천과 제내지 관망 연계 방법

XP-SWMM은 TUFLOW의 1/2차원 연계 기능을 활용하여 하천과 제내지의 연계가 가능하며 Fig. 2.6은 하천과 제내지를 연계하는 모식도이다. 하천과 제내지를 연계하기 위해서 먼저 제내지의 관망과 제외지의 하천을 각각 1차원 링크와 노드로 구성하여 배수체계를 구축하고, 제내지의 지형은 2차원으로 구성한다. 이때, 하천 영역은 비활성화 영역으로 설정한다. 이후, 1차원의 하천에서 범람한 물을 제내지의 2차원 지형으로 이동시키는 수두 전달선(head external source line; Hx line)을 하천(1차원)과 제내지(2차원)의 경계 주변에 구축하여 하천 범람 시 범람한 물이 제내지로 이동할 수 있도록 구성한다. 또한, 가능한 많은 연결선(connection line; CN line)을 수두 전달선에 직각으로 연결하여 구축하고 이를 통해 1차원의 하천에서 범람된 물의 정확한 양이 지표면으로 이동할 수 있도록 한다.

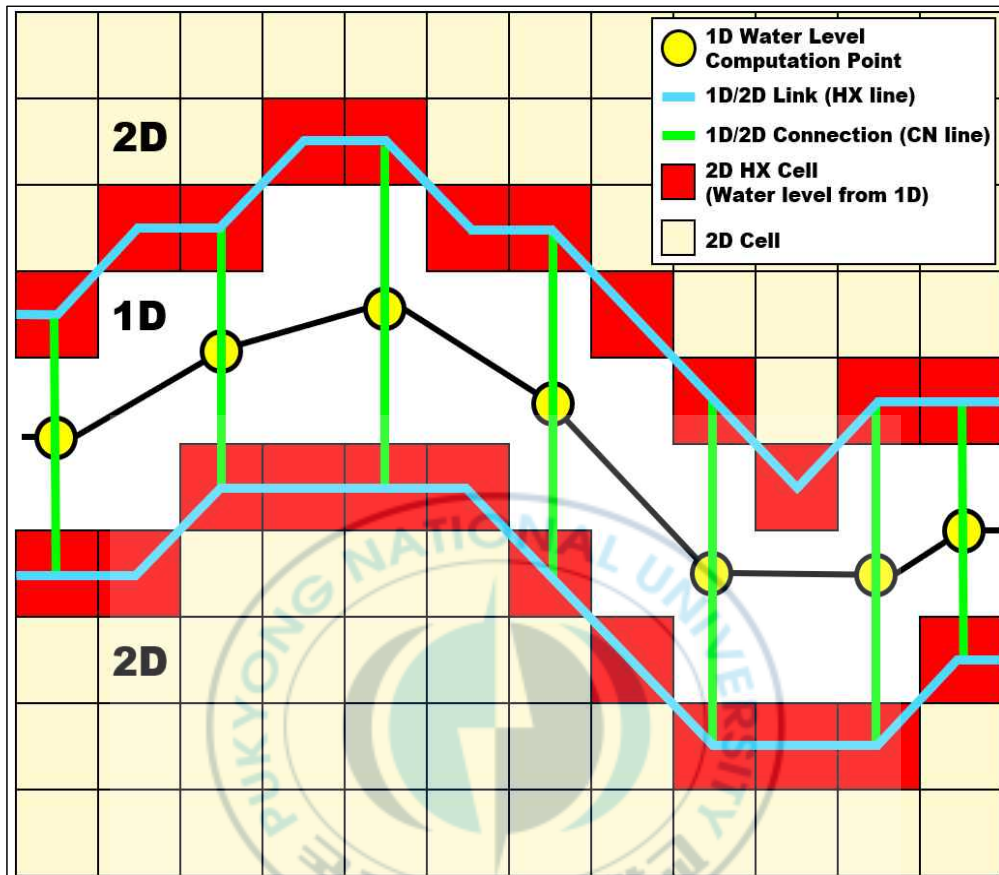


Fig. 2.6. Schematic diagram of the connection between a river and the protected lowland.

2.5 TUFLOW 2차원 셀(cell)의 수위 산정과 시계열 데이터 추출 방법

TUFLOW의 2차원 셀(cell)에는 네 가지 고도점(Zpt)이 있으며, ZC는 셀의 중심, ZU는 셀의 X 방향 측면 중앙, ZV는 셀의 Y 방향 측면 중앙, ZH는 셀의 모서리에 해당한다(Fig. 2.7). 이 중 셀의 중심 ZC에서는 수위(water level)가 계산되며, ZC의 지반고에서 Wet/Dry 깊이를 더한 값을 기준으로 셀의 습윤(wet) 및 건조(dry) 상태를 판단한다. 이때, Wet/Dry 깊이의 범위는 0.0002 m ~ 0.002 m이며, 사용자가 지정할 수 있다. 셀의 중심 수위가 ZC의 지반고와 Wet/Dry 깊이를 더한 값을 초과하면 해당 셀은 습윤 상태로 간주 되고, 셀의 중심 ZC에서 수위가 계산된다. 반면, 건조 상태로 간주될 경우 수위는 ZC의 지반고 값으로 출력된다.

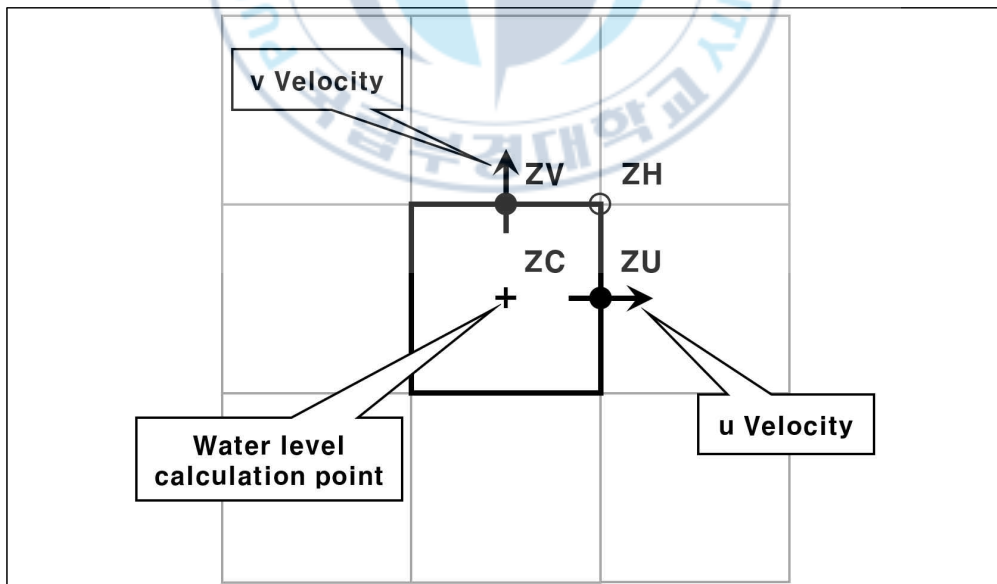


Fig. 2.7. Location of Zpts and computation points.

WBN Oceanics (2018)

TUFLOW의 수위 시계열 데이터는 PO(plot output)를 통해 생성된다. PO 객체의 출력 위치는 모의 실행 전에 Read GIS PO 명령어로 정의되어야 한다. 이를 위해 PO의 출력 위치를 정의하는 점(point), 선(line), 폴리라인(polyline), 영역(region) 등을 포함하는 하나 이상의 GIS 레이어를 생성하여 수행하며, 수위 데이터는 H_ 플래그를 통해 지정된다(Fig 2.8).

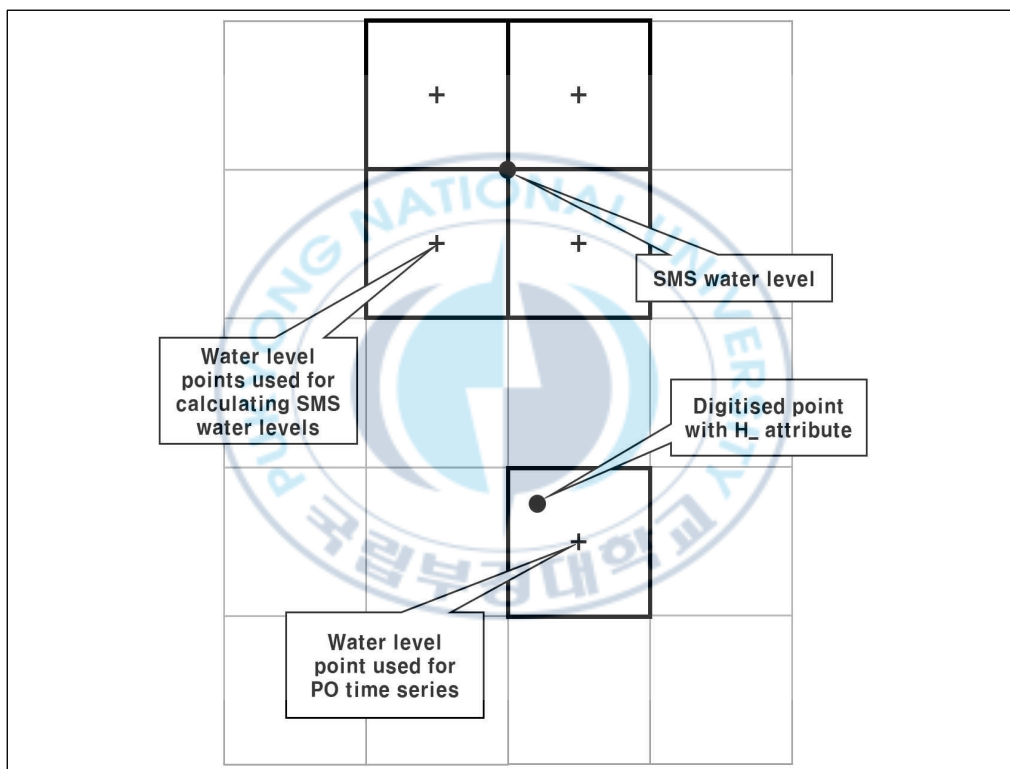


Fig. 2.8. Interpretation of PO objects and SMS output.
WBN Oceanics (2018)

제3장 과거 초단기 강수 예보 데이터의 예측 정확도 평가 방법

3.1 강수 자료 선정 방법

3.1.1 지역 및 기상 관측 지점 선정

강수 자료를 수집하기 위한 중관기상관측 지점을 선정하고자 먼저 지역을 선정하였다. 지역은 국내 행정구역 중 일부와 주요 대도시, 그리고 본 연구의 연구대상 지역을 포함하여 선정하였다. 선정된 지역은 특별시 1개(서울), 광역시 6개(부산, 대전, 울산, 대구, 광주, 인천), 특별자치도 1개(제주), 인구 100만 명 이상의 대도시 2개(수원, 창원), 연구대상 지역인 포항의 총 11개 지역이다. 이후, 11개 지역에 속한 중관기상관측 지점을 선정하였고 이는 Table. 3.1에 나타내었다.

초단기 예보의 경우 중관기상관측과 달리 기상관측소의 관측 지점이 아닌 격자 기반으로 자료가 생성되며 기상청 기상자료개방포털에서 읍·면·동 단위로 자료를 조회할 수 있다. 이를 고려하여 앞서 선정한 11개의 중관기상관측 지점과 가장 인접한 위치의 격자점을 선정하였고, 해당 격자점에서 생성된 자료를 사용하였다. 중관기상관측지점과 대응되는 격자점의 위치 정보는 Table 3.2에 제시하였다.

Table 3.1. ASOS stations selected for the study.

No.	Station		Latitude	Longitude	Address
	Region	Number			
1	Seoul	108	37.57142	126.96580	Seoul Meteorological Observatory, 52 Songwol-gil, Jongno-gu, Seoul
2	Busan	159	35.10468	129.03203	Busan Meteorological Observatory, 5-11 Bokbyeongsan-gil 32beon-gil, Jung-gu, Busan
3	Incheon	112	37.47772	126.62490	Incheon Meteorological Observatory, 61 Jayugongwonseo-ro, Jung-gu, Incheon
4	Daegu	143	35.87797	128.65296	Daegu Meteorological Observatory, 10 Hyodong-ro 2-gil, Dong-gu, Daegu
5	Daejeon	133	36.37199	127.37210	Daejeon Meteorological Observatory, 383 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon
6	Gwangju	156	35.17294	126.89156	Gwangju Meteorological Observatory, 71 Seoam-daero, Buk-gu, Gwangju
7	Ulsan	152	35.58237	129.33469	Ulsan Meteorological Observatory, 65-26 Dalbit-ro, Jung-gu, Ulsan
8	Jeju	184	33.51411	126.52969	Jeju Meteorological Observatory, 32 Mandeok-ro 6-gil, Jeju-si, Jeju-do
9	Suwon	119	37.25746	126.98300	Suwon Meteorological Observatory, 276 Gwonseon-ro, Gwonseon-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do
10	Changwon	155	35.17019	128.57282	Changwon Meteorological Observatory, 172 Gaposunhwan-ro, Masanhappo-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do
11	Pohang	138	36.03201	129.38002	Pohang Meteorological Observatory, 70 Songdo-ro, Nam-gu, Pohang-si, Gyeongsangbuk-do

Table 3.2. Very short-range forecast grids selected for the study.

No.	Region	Grid point		Latitude	Longitude	Address
		X	Y			
1	Seoul	60	127	37.56908	126.96410	Gyonam-dong, Jongno-gu, Seoul
2	Busan	97	74	35.10115	129.03333	Daecheong-dong, Jung-gu, Busan
3	Incheon	54	125	37.47405	126.63111	Dongincheon-dong, Jung-gu, Incheon
4	Daegu	90	91	35.87816	128.64747	Hyomok 1(il)-dong, Dong-gu, Daegu
5	Daejeon	66	101	36.35723	127.33904	Oncheon 2(i)-dong, Yuseong-gu, Daejeon
6	Gwangju	59	75	35.17097	126.88475	Unam 2(i)-dong, Buk-gu, Gwangju
7	Ulsan	102	84	35.56739	129.33954	Yaksa-dong, Jung-gu, Ulsan
8	Jeju	53	38	33.51169	126.52819	Ildo 1(il)-dong, Jeju-si, Jeju-do
9	Suwon	60	120	37.26973	126.98810	Seodun-dong, Gwonseon-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do
10	Changwon	89	75	35.16957	128.57205	Gapo-dong, Masanhappo-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do
11	Pohang	102	94	36.02889	129.37783	Songdo-dong, Nam-gu, Pohang-si, Gyeongsangbuk-do

3.1.2 일 합계 강수량 기준의 분석일 설정

과거 초단기 예보의 강수 자료에 대한 예측 정확도는 종관기상관측 강수 자료와 비교하여 평가하였다. 이에 2021년 6월 29일부터 2024년 12월 31일까지의 기간을 대상으로 11개의 종관기상관측 지점에서 관측된 일 합계 강수량의 상위 사례를 기준으로 자료의 분석일을 선정하고자 하였다. 해당 기간은 초단기 예보의 생산체계가 개선되어, 예보 기간이 매 발표 시 각마다 6시간 후까지 일관되게 확장된 2021년 6월 29일을 기준으로 설정한 것이다. 분석일을 선정하기 위해, 기상청 기상자료개방포털의 ‘기후통계분석’ 메뉴 내 ‘순위 값’ 항목을 활용하였다. 이 항목에서는 사용자가 지정한 종관기상관측 지점과 기간에 대해, 상위 30위에 해당하는 일 합계 강수량과 해당 강수량의 발생일을 제공한다. 이에 따라, 2021년 6월 29일부터 2024년 12월 31일까지의 기간을 대상으로 11개의 종관기상관측 지점 각각에 대해 일 합계 강수량의 순위값을 조회하였다.

조회 결과, 11개의 종관기상관측 지점별로 해당 기간의 상위 30위에 해당하는 일 합계 강수량과 그에 따른 발생일이 조회되었으며, 이는 부록 A에 제시하였다. 일 합계 강수량은 최소 31.5 mm에서 최대 397.7 mm로 나타났다으며, 11개의 종관기상관측 지점에서 조회된 모든 일 합계 강수량의 사례를 포함하여, 총 330일에 해당하는 사례를 분석일로 선정하였다.

3.2 과거 초단기 강수 예보 데이터의 예측 정확도 평가 방법

3.2.1 관측 및 예측 강수 자료의 수집과 비교 방법

과거 초단기 예보의 강수 자료는 1시간 누적강수량 형태로 제공되며, 매시 30분의 발표 시각마다 1시간 단위로 6시간 후까지 예보한다. 예를 들어, 9시 30분의 예보에서 첫 한 시간의 예보기간은 9시부터 10시이고, 다음 한 시간의 예보기간은 10시부터 11시이며 여섯 번째 한 시간의 예보기간은 14시부터 15시이다. 과거 초단기 예보의 강수 자료가 1시간 누적강수량 형태로 제공되므로 비교 기준이 되는 종관기상관측 강수 자료도 3.1.2절에서 분석일로 선정된 사례들에 대해 1시간 누적강수량 자료로 수집하였다. 이때, 품질검사 표지(flag)를 함께 내려받아 결측 및 오류 자료를 판별하여 제외하였다. 또한, 강수량이 없는 시간대의 자료도 분석 대상에서 제외하여 총 4,479개의 1시간 누적강수량 자료를 수집하였다.

한편, 과거 초단기 예보의 강수 자료는 협정세계시를 기준으로 제공되므로, 한국표준시를 기준으로 하는 종관기상관측 강수 자료와 9시간의 차이가 난다. 이를 고려하여, 앞서 수집한 종관기상관측 강수 자료 4,479개의 관측 시각마다 9시간을 빼서 협정세계시로 변환하고 변환된 시각의 강수를 예보한 과거 초단기 예보의 강수 자료를 모두 수집하였으며, 총 26,874개였다. 이는 초단기 예보가 1시간 단위로 6시간 후까지 예보하므로, 4,479개의 관측 시각마다 1시간 단위의 강수량 예보 자료 6개를 수집한 것이다. 수집된 과거 초단기 예보의 강수 자료는 한국표준시로 변환하여 상응하는 종관기상관측 강수 자료와 시간 단위로 비교하였다. 또한, 과거 초단기 예보의 강수 자료에 대한 예측 정확도는 정량적 평가 지표와 산포도 그래프를 활용하여 평가하였다.

3.2.2 정량적 평가 지표

본 연구에서 활용한 정량적 평가 지표는 평균 절대오차(mean absolute error; MAE)와 평균 제곱근 오차(root mean squared error; RMSE), 퍼센트 편향(percent bias; PBIAS)이다.

(1) 평균 절대오차

MAE는 예측값과 관측값 간의 차이에 절댓값을 취한 후, 평균한 값이며 이는 다음과 같은 수식으로 계산된다.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|. \quad (3.2)$$

여기서, N 은 자료의 총 개수, y_i 는 관측값, \hat{y}_i 는 예측값이다. 평균 절대오차는 예측값과 관측값 간의 차이를 측정하는 평가 지표로 평균 절대오차의 값이 0에 가까울수록 예측값이 관측값과 일치함을 의미한다. 절대값을 사용하여 오차의 크기만 고려하기 때문에 이상치의 영향을 적게 받지만 오차의 과대 및 과소 예측을 고려하지 않는다.

(2) 평균 제곱근 오차

RMSE는 예측값과 관측값 간의 차이를 제곱하여 평균한 뒤, 그 평균에 제곱근을 취한 값이며 이는 다음과 같은 수식으로 계산된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (3.2)$$

여기서, N 은 자료의 총 개수, y_i 는 관측값, \hat{y}_i 는 예측값이다. 평균 제곱근 오차는 예측값과 관측값의 차이를 나타내는 평가 지표로 예측값이 관측값과 일치할 경우 평균 제곱근 오차는 0 값을 가지며 예측값과 관측값의 차이가 클수록 평균 제곱근 오차 값이 커진다. 또한, 오차에 제곱을 취하기 때문에 오차가 클수록 더 큰 영향을 받아 이상치에 민감하다.

(3) 퍼센트 편향

PBIAS는 예측값과 관측값 간의 오차의 총합을 관측값의 총합으로 나눈 뒤 백분율로 나타낸 값이며 이는 다음과 같은 수식으로 계산된다.

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)}{\sum_{i=1}^N y_i} \quad (3.3)$$

여기서, N 은 자료의 총 개수, y_i 는 관측값, \hat{y}_i 는 예측값이다. 퍼센트 편향은 예측값이 관측값에 대해 얼마나 과대 및 과소 추정됐는지 나타내는 지표이다. 퍼센트 편향의 값이 0일 때 최적값이며, 양수(+)의 값을 가지면 과소평가를 의미하며 음수(-)의 값을 가지면 과대평가 되었음을 의미한다. 퍼센트 편향의 평가 기준은 Table. 3.3과 같다.

Table 3.3. Evaluation criteria for PBIAS.

Performance rating	PBIAS (%)
Very good	$PBIAS < \pm 10$
Good	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfactory	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Unsatisfactory	$\pm 25 \leq PBIAS$

Moriasi et al. (2007)

제4장 과거 초단기 강수 예보 데이터의 예측 정확도 평가

4.1 정량적 평가 지표 및 산포도 그래프를 활용한 예측 정확도 평가

과거 초단기 예보의 강수 자료는 평균 절대오차와 평균 제곱근 오차, 퍼센트 편향, 산포도 그래프를 활용하여 정확도를 평가하였다. Table 4.1에 제시된 바와 같이, 예보기간 0~1시간에서 평균 절대오차는 2.181 mm로 가장 낮았으며, 이후 점진적으로 증가하여 예보기간 5~6시간에서는 5.984 mm에 이르렀다. 평균 제곱근 오차 또한 예보기간 0~1시간에서 4.158 mm였던 값이 예보기간 5~6시간에서는 10.421 mm로 증가하며, 평균 절대오차와 유사한 경향을 보였다. 이는 예보기간이 현재에서 멀어질수록 종관기상관측 강수 자료와 차이가 커지며, 예측의 정확도가 저하되고 있음을 나타낸다. 또한, 퍼센트 편향의 결과를 보면 과거 초단기 예보의 강수 자료는 전반적으로 종관기상관측의 강수 자료에 대해 과소 추정하는 경향을 보였다. 예보기간 0~1시간과 1~2시간에서 과거 초단기 예보의 강수 자료는 종관기상관측의 강수 자료 보다 각각 2.54%, 8.08% 작았으며, Moriasi et al.(2007)에서 제안한 퍼센트 편향 평가 기준의 매우 우수에 해당하였다. 반면, 예보기간 2~3시간부터 퍼센트 편향은 급격히 증가하여, 이후 모든 예보기간에서 20%를 초과하는 과소추정 경향이 뚜렷하게 나타나며 퍼센트 편향 평가 기준의 만족과 불만족에 해당하였다.

Table 4.1. Evaluation results of MAE, RMSE and PBIAS by forecast period.

Forecast period (hour)	MAE (mm)	RMSE (mm)	PBIAS (%)
0~1	2.181	4.158	2.54 (Very good)
1~2	3.395	6.454	8.08 (Very good)
2~3	4.744	8.700	22.72 (Satisfactory)
3~4	5.038	8.876	27.18 (Unsatisfactory)
4~5	5.704	10.001	21.54 (Satisfactory)
5~6	5.984	10.421	20.69 (Satisfactory)

이러한 경향은 Fig. 4.1의 산포도 그래프를 통해서도 확인할 수 있다. 해당 산포도 그래프에는 상관계수가 제시되어 있으며, 횡좌표와 종좌표의 값이 같은 기준선이 있다. 예보기간 0~1시간의 산포도 그래프는 기준선 부근에 예측값이 분포해 있으며, 상관계수는 0.864로 나타나, 과거 초단기 예보의 강수 자료와 중관기상관측의 강수 자료 간에 매우 높은 양의 상관 관계를 보였다. 예보기간 1~2시간에서 상관계수는 0.667로, 예보기간 0~1시간에 비해 상관계수가 감소 하나, 비교적 일정 수준의 양의 상관관계를 유지하고 있었다. 반면, 예보기간 2~3시간부터는 상관계수가 급격히 감소하며 기준선으로부터 예측값이 크게 벗어나 산포하는 경향이 나타났으며, 각각의 상관계수는 0.359, 0.258, 0.156, 0.133으로 나타나 과거 초단기 예보의 강수 자료와 중관기상관측 강수 자료 간의 상관성이 매우 낮았다.

정량적 평가 지표와 산포도 그래프의 결과를 종합적으로 고려한 결과, 과거 초단기 예보의 강수 자료는 예보기간 0~1시간에서 가장 높은 정확도

를 가지며, 예보기간 1~2시간에서도 상대적으로 일정 수준의 정확도를 가지는 것으로 나타났다. 그러나 예보기간 2~3시간 이후부터는 예측 정확도가 급격히 저하되는 경향이 나타나 침수 모의의 입력자료로 활용할 수 없다고 판단하였다.



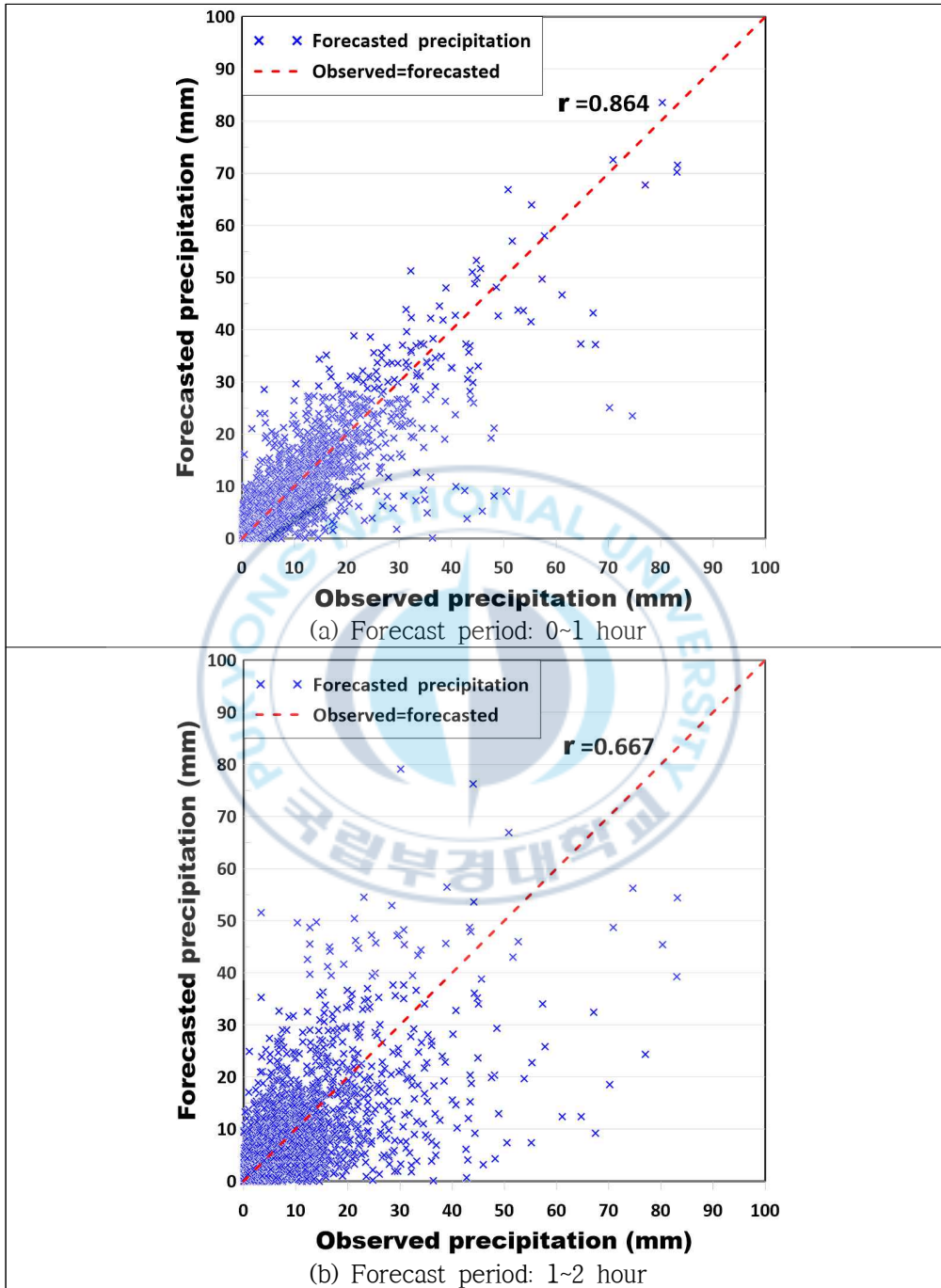


Fig. 4.1. Scatter plots of very short-range forecast and ASOS precipitation by forecast period.

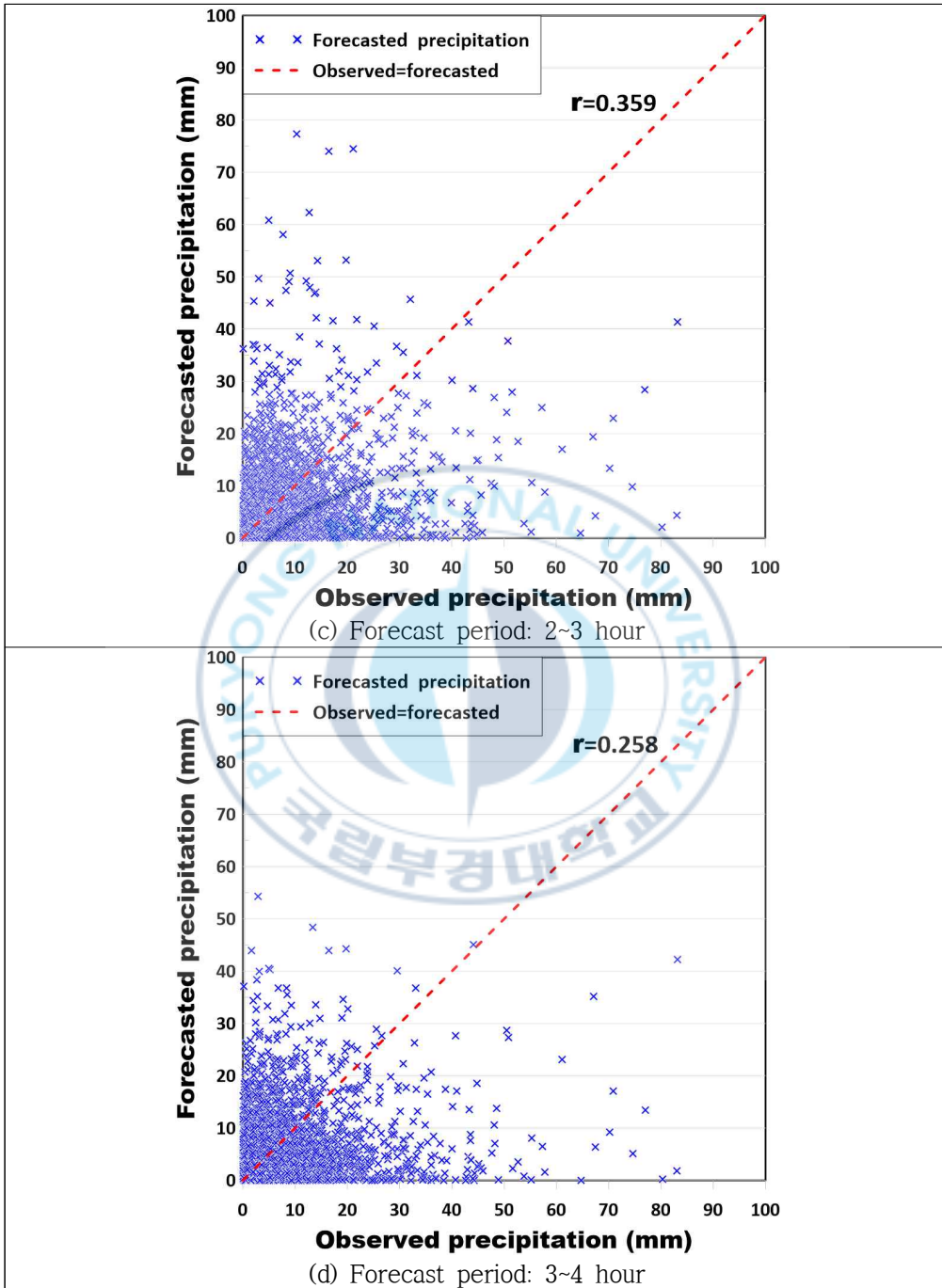


Fig. 4.1. Continued

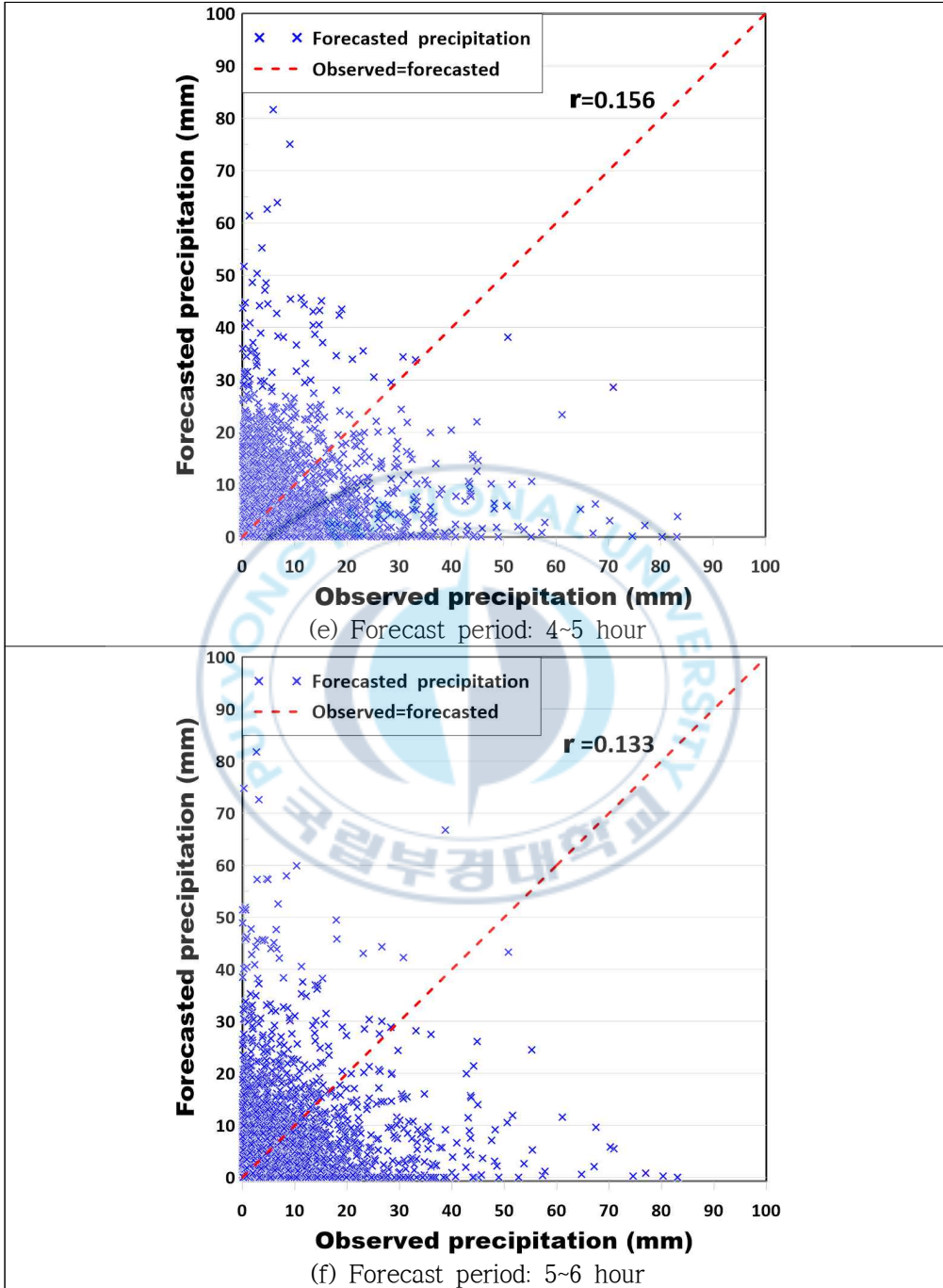


Fig. 4.1. Continued

4.2 연구 대상 지역의 침수 발생일에 대한 과거 초단기 강수 예보 데이터의 예측 정확도 평가

본 절에서는 연구 대상 지역인 포항을 대상으로, 태풍 힌남노로 인해 침수 피해가 발생한 2022년 9월 6일에 해당하는 '경상북도 포항시 남구 송도동'의 격자점에서 생성된 과거 초단기 예보의 강수 자료에 대해 예측 정확도를 분석하였다. 비교의 기준이 되는 2022년 9월 6일 종관기상관측 강수 자료는 결측 및 오류 자료를 제외한 0시부터 10시까지의 자료가 제공되며, 이 중 10시에는 비가 오지 않아 0시부터 9시까지의 자료를 기준으로 정확도 평가를 수행했다. 또한, 앞서 4.1절에서 초단기 예보의 예보기간 0~1시간 및 1~2시간의 강수 자료가 상대적으로 예측 정확도가 높은 것으로 판단하여, 해당 예보기간의 강수 자료에 대해서만 평가하였다.

Table 4.2에 제시된 바와 같이, 초단기 예보의 예보기간 0~1시간에 대한 강수 자료의 평균 강수량은 40.59 mm로, 종관기상관측 강수 자료의 평균 강수량 35.87 mm보다 4.72 mm 커서 다소 과대 예측되었다. 이때, 평균 절대오차는 7.3 mm로, 종관기상관측 강수 자료의 평균 강수량의 20.35%에 해당하며, 평균 제공근 오차는 8.86 mm로 나타났다(Table 4.3). 반면, 예보기간 1~2시간의 과거 초단기 예보의 강수 자료는 평균 강수량이 27.96 mm로 종관기상관측 강수 자료의 평균 강수량보다 7.91 mm 작아 과소 예측되었다(Table 4.2). 특히, 평균 절대오차는 17.43 mm로 종관기상관측 강수 자료의 평균 강수량의 48.59%에 해당하며, 평균 제공근 오차는 23.02 mm로 산정되어 예보기간 0~1시간에 비해 예측 정확도가 낮아진 것을 확인하였다(Table 4.3).

Table 4.2. Observed, forecasted, and average precipitation in Pohang on Sep. 6, 2022.

Precipitation Type		Time (hour)										Average precipitation (mm)
		23-0	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
Observed (mm)		16.30	20.70	24.50	36.00	55.30	77.00	70.90	50.80	6.70	0.50	35.87
Forecasted (mm)	Period: 0-1 hour (Issue time)	18.50 (23:30)	31.10 (0:30)	38.60 (1:30)	42.20 (2:30)	63.90 (3:30)	67.80 (4:30)	72.60 (5:30)	66.90 (6:30)	3.00 (7:30)	1.30 (8:30)	40.59
	Period: 1-2 hour (Issue time)	11.10 (22:30)	16.50 (23:30)	47.20 (0:30)	26.10 (1:30)	22.80 (2:30)	24.30 (3:30)	48.70 (4:30)	66.90 (5:30)	13.90 (6:30)	2.10 (7:30)	27.96

Table 4.3. Evaluation results of MAE and RMSE by forecast period in Pohang on Sep. 6, 2022

Forecast period (hour)	Average precipitation (mm)		MAE (mm) (ratio to the observed average)	RMSE (mm)
	Observed	Forecasted		
0~1	35.87	40.59	7.30 (20.35%)	8.86
1~2		27.96	17.43 (48.59%)	23.02

Fig. 4.2에 제시된 산포도 그래프를 보면, 예보기간 0~1시간의 경우 대부분의 예측값이 오차 없는 값을 나타내는 기준선 부근에 분포하고 있으며, 상관계수는 0.957로 매우 높은 수준의 양의 상관관계를 나타내고 있다. 반면, 예보기간 1~2시간의 산포도 그래프에서는 예측값이 기준선에서 다소 떨어져 분포하고 있으며, 상관계수는 0.554로 상관관계가 낮아졌다. 이러한 산포도 그래프와 정량적 평가 지표의 결과는 예보기간이 예보 시점에

서 멀어질수록 예측 정확도가 낮아지는 4.1절의 분석 결과와 유사한 경향을 보인다. 다만, 4.1절의 예측 정확도 평가 결과에 비해 본 절의 예보기간 1~2시간에서는 평균 절대오차와 평균 제곱근 오차가 크게 증가하며 예측 정확도가 낮아졌다.



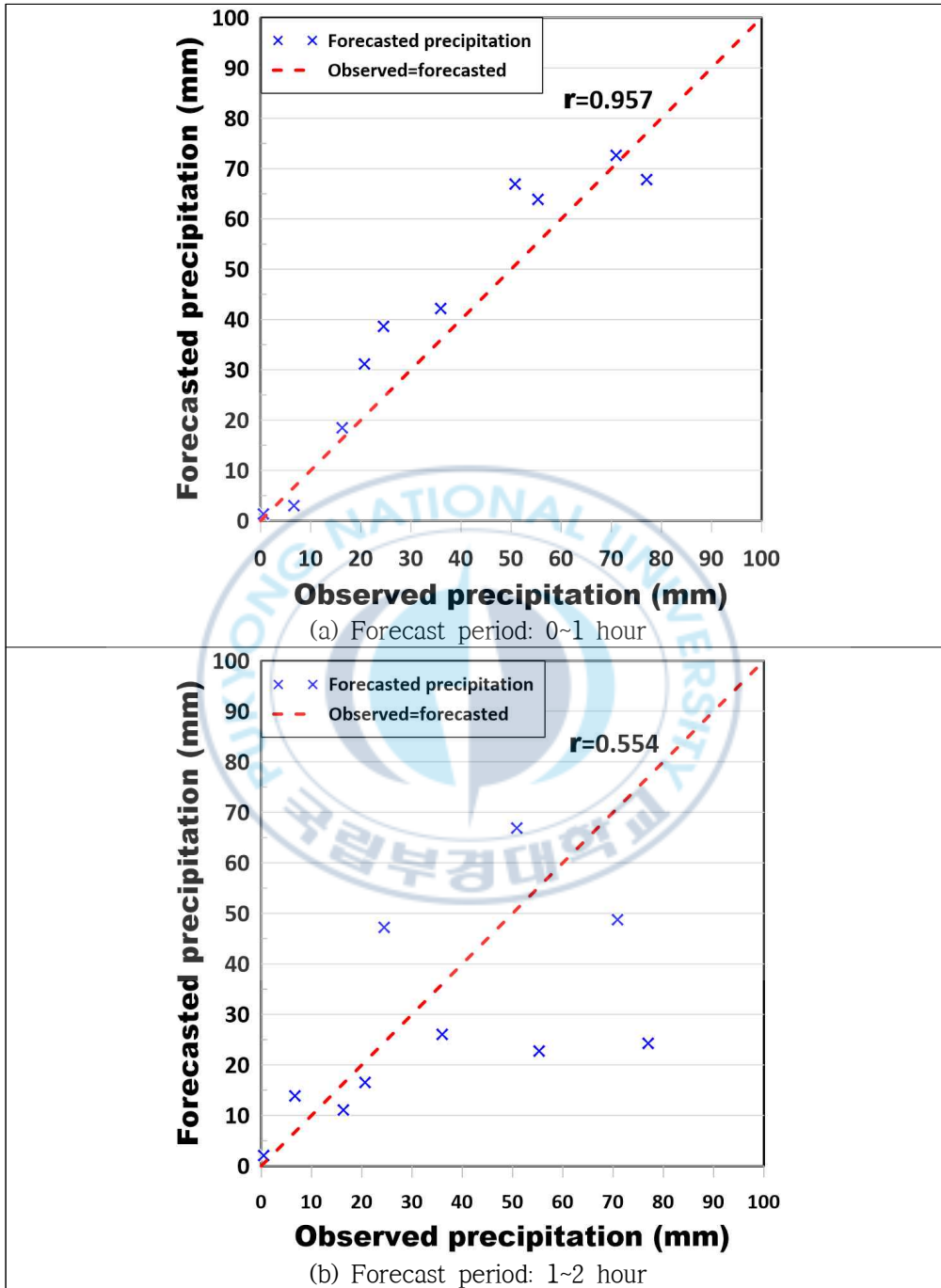


Fig. 4.2. Scatter plots of very short-range forecast and ASOS precipitation by forecast period in Pohang on Sep. 6, 2022.

제5장 대상 유역의 침수 모의 모형 구축

5.1 연구 대상 유역 선정 및 소유역 분할

본 연구의 연구 대상 유역은 2022년 9월 6일 태풍 힌남노로 인해 내수 침수 및 하천 범람이 발생한 냉천 하류 유역이다. 포항시 냉천의 유역면적은 79.4 km²이며, 상류 지역은 대부분 산지이고 하류 지역은 도시가 발달하였다. 이에 상류 및 세계천 유역은 냉천 하천기본계획(Gyeongsangbuk-do, 2023)과 소하천정비종합계획(Pohang-si, 2020)을 참고하여 각각 단일 유역으로 고려했으며, Fig. 5.1과 같이 냉천 하류 유역을 침수 모의 및 선행 예측 시간 연구의 대상 유역으로 정하였다.

냉천 하류 유역은 태풍 힌남노로 인해 내수 침수 및 하천 범람이 발생한 주요 지역이므로 우수관거와 하천, 지형을 침수 분석에 고려해야한다. 이에, 냉천 하류 유역은 포항시의 우수관거 현황도를 참고하여 다수의 소유역으로 분할 하였다. 소유역은 306개로 분할 하였으며, 관거는 459개, 노드는 447개로 구성하였다(Fig. 5.1). 대상 유역의 유출 모의에는 SWMM의 비선형 저류 방정식을 사용하였으며, 침투량은 NRCS 방법을 적용하여 산정했다.

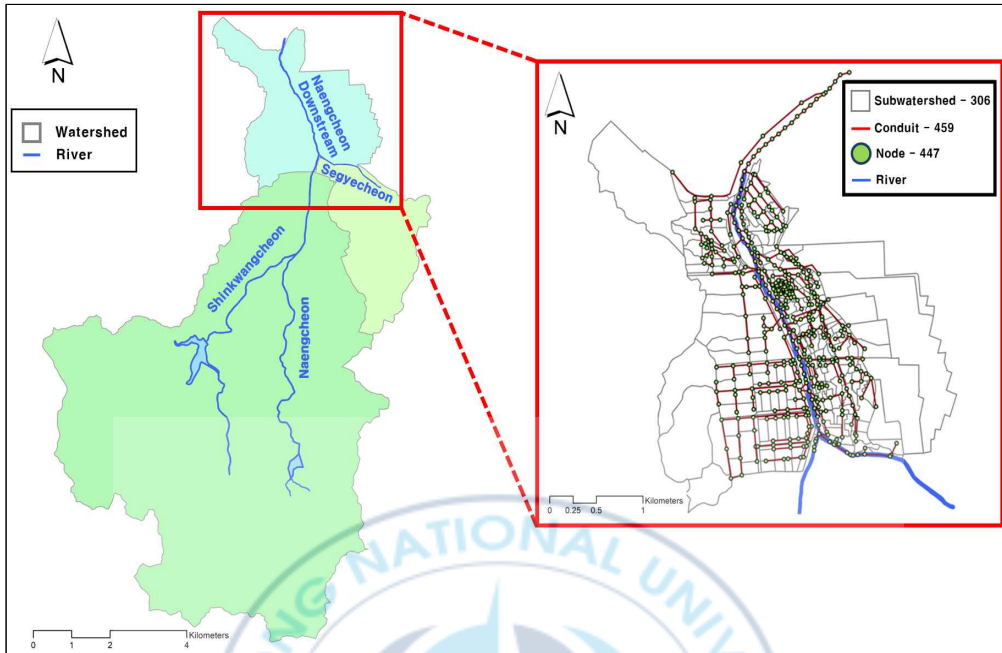


Fig. 5.1. Schematic diagram of subcatchments and conduits in the downstream Naengcheon watershed study area.
Hwang et al. (2024)

5.2 XP-SWMM 침수 모의 모형

5.2.1 교량과 2차원 침수 모의 격자

냉천 하류 구역의 냉천 본류 구간에는 항만교, 냉천교, 인덕교, 원용교, 박스교 총 5개의 교량이 있다. 이들 교량의 하부 구조물인 교각은 하천의 흐름 방해 및 단면 잠식으로 인해 교량 상류부의 수위 상승에 영향을 미치는 요인으로 작용한다. 이에, 냉천 하천기본계획을 참고하여, 하천 단면뿐만 아니라 5개의 교량 정보를 XP-SWMM의 입력자료로 사용하였다 (Hwang et al., 2024).

XP-SWMM은 2차원 침수 해석을 위한 지형 자료가 구축되어야 하며 이를 위해, 수치지형모형을 구축하였다. 수치지형모형은 국토지리정보원의 5 m 격자 크기 자료로 구성하였다. 그리고 2차원 침수 모의의 격자는 7 m × 7 m로 하였다. 수치 모의의 시간 간격은 10초로 설정하였으며, 결과 저장은 1분 간격으로 하였다.

5.2.2 XP-SWMM의 하천 - 제내지 배수체계의 연계 구조

본 연구의 연구 대상 유역인 포항시 냉천 하류 유역은 하천이 관류하는 도시 유역이므로, 하천과 제내지를 연계한 침수 모의 모형을 통해 정밀한 침수 모의가 필요하다. 이에 앞서 구성된 모형에서 하천 영역을 비활성화 영역으로 설정한다. 이는 제외지인 하천에 대해서 1차원 노드와 링크로 구성하기 위함이다. 이후, 제내지와 제외지의 경계에 위치하는 제방에 수두 전달선을 구축하여 제외지인 하천에서 범람한 물이 제내지인 지형으로 이동할 수 있도록 한다. 또한, 연결선 44개를 구축하여 하천의 노드에서 범람한 물이 지표면으로 전달되게 한다(Fig. 5.2). 이때 연결선은 수두 전달선에 직각으로 연결하여 유체의 흐름을 방해하지 않도록 해야한다. 이렇게, TUFLOW의 1/2 차원 연계 기능을 통해 구축된 모형은 제외지의 하천에서 제내지의 지형으로 범람하는 물과 관망을 통해 하천으로 유입되는 물을 동시에 모의할 수 있게 된다.



Fig. 5.2. The XP-SWMM models for Hx line and CN line.

5.3 입력자료 구성

본 연구에서 사용하는 입력자료에는 조위 자료와 강수 자료가 있으며, 이 중 조위 자료는 본 절에서 기술하고 강수 자료는 이후 6장에서 기술하였다.

5.3.1 조위 자료

조위 자료로서 포항 조위관측소에서 관측된 2022년 9월 6일 0시부터 2022년 9월 6일 10시까지의 1분 단위의 자료를 사용하였다(Fig. 5.3). 해당 기간에 기록된 최대 조위는 2022년 9월 6일 7시 44분에 El. 1.077 m로 기록되었다.

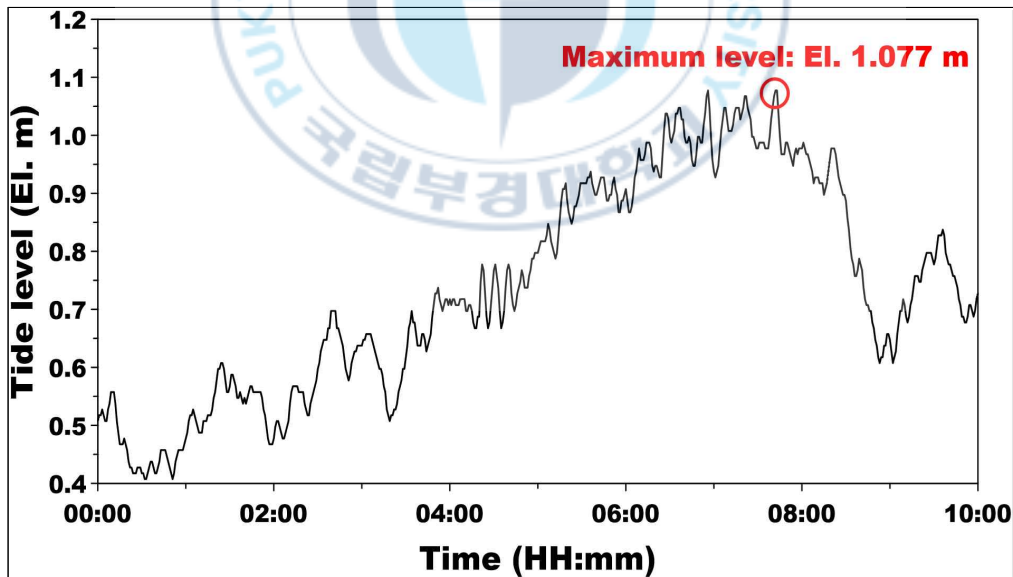


Fig. 5.3. Tide level observed at the Pohang tidal station during Typhoon Hinnamnor on Sep. 6, 2022.

5.4 XP-SWMM의 수위 시계열 데이터 출력 지점 설정

태풍 힌남노 내습 당시 실제 침수가 발생한 지역을 대상으로 침수 모의를 수행하고 선행 예측 시간을 추정하기 위해 1분 간격의 수위 시계열 데이터를 얻고자 하였다. 이를 위해, 수위 시계열 데이터를 얻고자 하는 지점에 대하여, XP-SWMM의 제어 자료로서 수두/유속 자료 저장 지점을 정의하는 Point 객체를 구성하였다. 수두/유속 자료 저장 지점을 정의하는 Point 객체는 2.5절에서 언급한 내용과 같이 Point 객체에 해당하는 2차원 셀의 중심 지점에서 수위가 시계열로 출력되도록 한다. 이때, 수위는 셀이 습윤 상태일 때 셀의 중심에서 계산된 값이며, 건조 상태의 경우 해당 셀 중심의 지반고가 출력된다. 셀의 습윤과 건조를 판단하는 Wet/dry 깊이는 XP-SWMM의 기술참조메뉴얼에서 제시하는 0.01~0.02 m보다 작은 0.002 m로 설정하여 정밀한 침수 모의가 가능하게 하였다. 또한, 수위 시계열 출력 간격은 1분으로 하였다.

Point 객체를 삽입한 지점은 태풍 힌남노 내습 당시 실제 침수 피해가 발생한 우방아파트 주변 지역과 오천시장 인근 지역을 대상으로 총 5개를 선정하였다. 다음 Fig. 5.4 ~ Fig 5.5는 언론에 보도된 각 지점의 실제 침수 피해 사진과 함께 해당 지점에 Point 객체를 삽입한 XP-SWMM의 화면이다(Hankyoreh, 2022; KBS News, 2022; Daekyung Ilbo, 2022; Yonhap News, 2022a; Nocut News, 2022b).

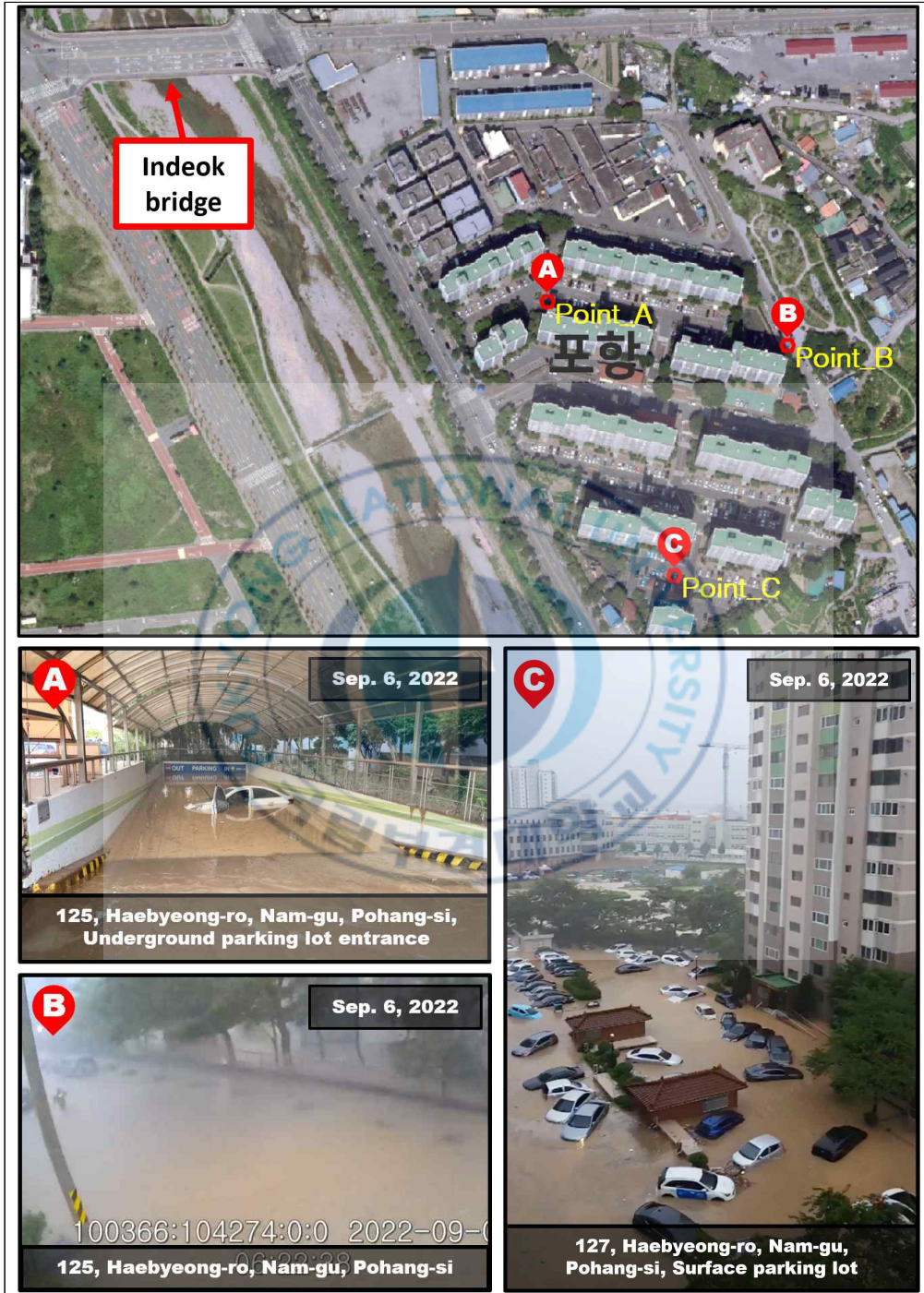


Fig. 5.4. Flood inundation in the Woobang Apartment area and corresponding Point object locations in XP-SWMM.



Fig. 5.5. Flood inundation in the Ocheon Market area and corresponding Point object locations in XP-SWMM.

제6장 침수 모의 기간 및 강수 입력자료 구축

6.1 침수 모의 기간 및 초단기 예보 강수 자료 적용 기간

2022년 9월 6일 태풍 힌남노 내습 당시 오전 3시 41분경 포항시 남구 일대에서 침수가 발생하고 재난문자가 발송되었다(Yonhap News, 2022b). 이러한 실제 침수 발생 시기를 고려하여, 전체 침수 모의 기간은 2022년 9월 6일 0시부터 10시까지이다. 또한, 본 연구에서는 예보기간 2시간의 초단기 예보 강수 자료를 침수 모의에 적용하였으며, 침수가 본격적으로 발생한 오전 3시 이후에 발표된 초단기 예보 강수 자료를 사용하였다. 이에 따라, 3시 30분부터 8시 30분까지 발표된 예보기간 2시간의 초단기 예보 강수 자료를 순차적으로 적용하여 침수 모의를 수행하였다. Table 6.1은 각 초단기 예보 강수 자료가 침수 모의 기간에 적용된 시간대를 나타낸 것이다. 예를 들어, 3시 30분에 강수 예보가 이루어진 후, 침수 모의에 사용하는 강수 자료는 0시부터 3시까지 중관기상관측 강수 자료이고 3시부터 5시까지 초단기 예보 강수 자료이며, 5시부터 10시까지 강수량은 0이다.

Table 6.1. Application periods of very short-range forecast precipitation in inundation simulations.

No.	Very short-range forecast		Inundation simulation period (hour:min)
	Issue time (hour:min)	Forecast precipitation application period (hour:min)	
1	03:30	03:00 ~ 05:00	00:00 ~ 10:00
2	04:30	04:00 ~ 06:00	
3	05:30	05:00 ~ 07:00	
4	06:30	06:00 ~ 08:00	
5	07:30	07:00 ~ 09:00	
6	08:30	08:00 ~ 10:00	

6.2 종관기상관측 강수 입력자료

연구에 활용된 종관기상관측 강수 자료는 침수 모의 기간인 2022년 9월 6일 0시부터 10시까지 기간에 포항 기상관측소에서 관측된 1분 단위의 강수 자료였으며, 이를 기상청 기상자료개방포털을 통해 수집하였다. 해당 기간에 관측된 누적강수량은 총 342.4 mm이며, 시간 최대 강수량은 4시부터 5시 사이에 77.0 mm/hr이다. 다음 Fig. 6.1은 2022년 9월 6일 0시부터 10시까지 1분 단위의 강수 입력자료를 나타낸 강수 주상도이다.

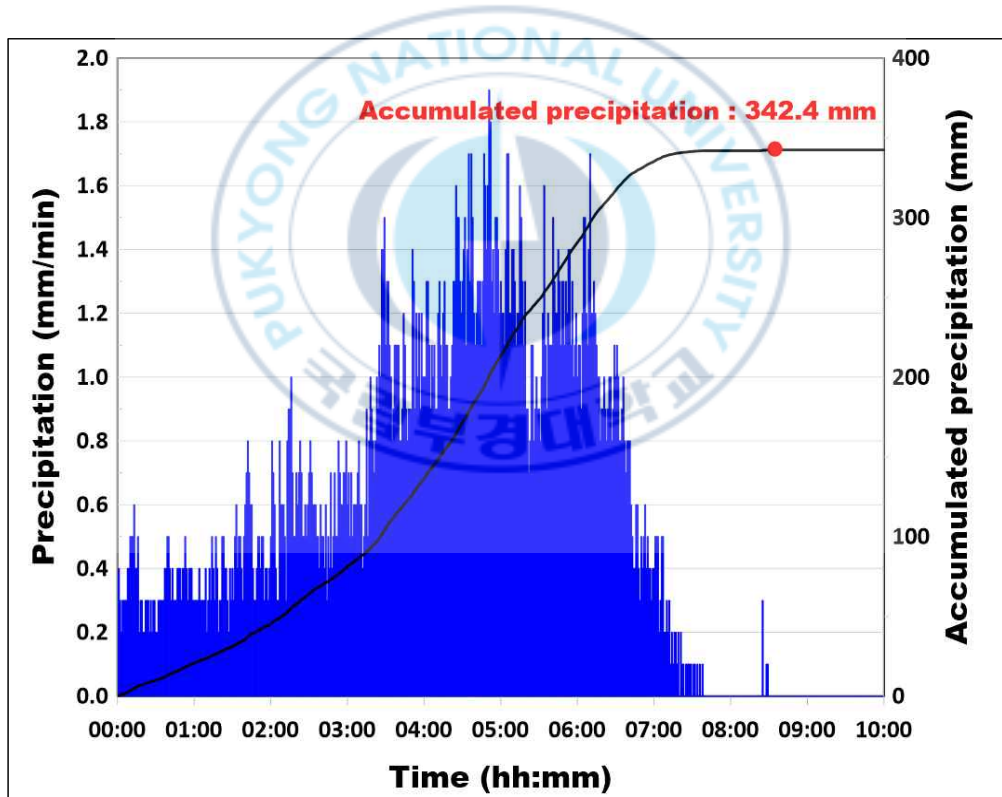


Fig. 6.1. Minute-scale precipitation data from Pohang ASOS during Typhoon Hinnamnor on Sep. 6, 2022.

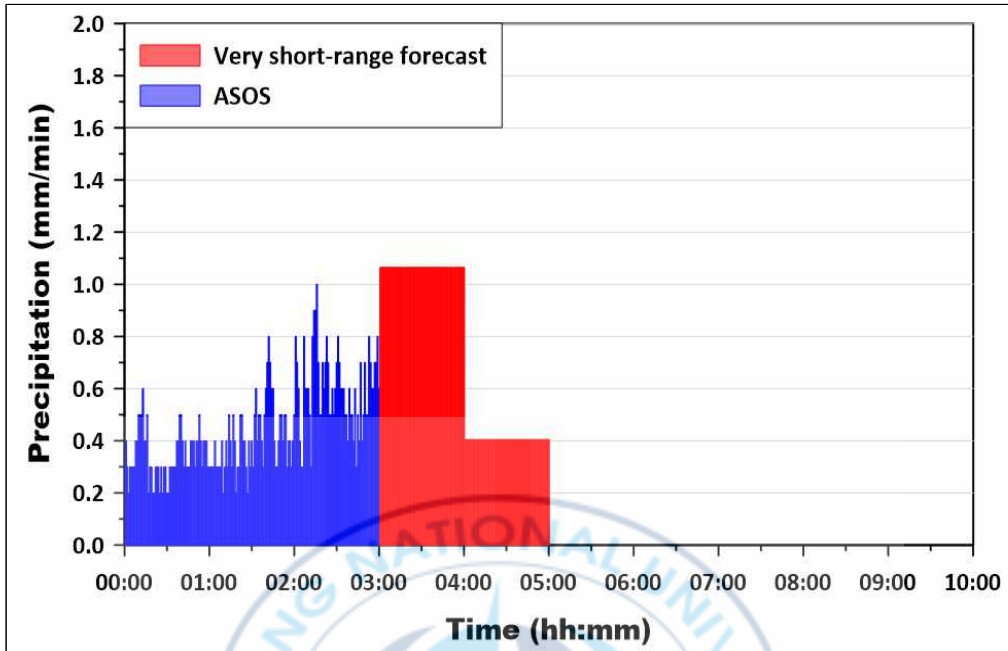
6.3 과거 초단기 강수 예보의 강수 입력자료

과거 초단기 예보의 강수 자료는 협정세계시를 기준으로 제공되며, 4.1 절의 정확도 평가 결과에 따라 예보기간 2시간 내의 초단기 예보 강수 자료를 침수 모의에 활용한다. 이를 고려하여 앞서 6.1절의 초단기 예보 한국 표준시 발표 시각에 해당하는 협정세계시 2022년 9월 5일 18시 30분부터 23시 30분까지 발표된 각 초단기 예보의 1시간 및 다음 1시간의 예보 강수 자료를 활용하였다. 해당 기간의 초단기 예보 강수 자료는 기상청 기상자료개방포털을 통해 포항 기상관측소와 가장 가까운 격자점인 ‘경상북도 포항시 남구 송도동’의 자료를 수집하였다. 수집된 초단기 예보의 강수 자료는 1시간 누적강수량 형태로 제공되므로, 이를 1분 단위의 강수 자료로 변환하기 위해, 1시간 내에서 강수의 분포는 균일하다고 가정하였다. 이에 따라, 1시간 누적강수량을 60으로 나누어 1분 단위의 강수 자료로 변환하여 침수 모의에 활용하였다. Table 6.2는 침수 모의에 적용된 초단기 예보의 예보기간 1시간 및 다음 1시간에 해당하는 각각의 1시간 누적강수량과 이를 변환한 1분 단위 강수량을 나타낸 것이다.

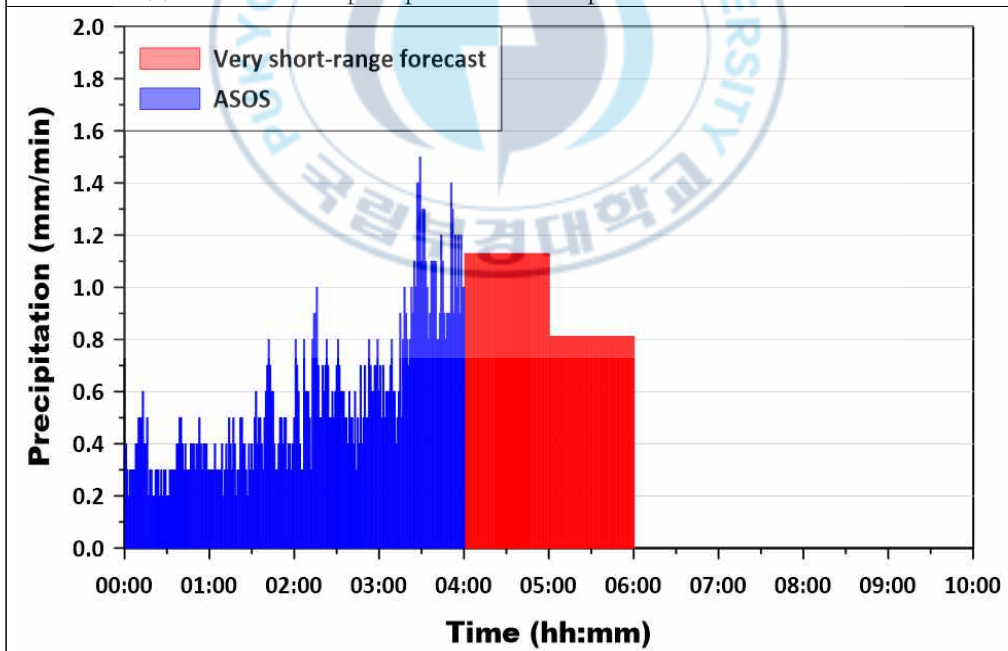
Table 6.2. Very short-range forecast precipitation used in inundation simulation.

Very short-range forecast		1-hour accumulated precipitation (mm)	Minute-scale precipitation (mm/min)
Issue time (hour:min)	Forecast period (hour:min)		
03:30	03:00 ~ 04:00	63.9	1.065
	04:00 ~ 05:00	24.3	0.405
04:30	04:00 ~ 05:00	67.8	1.130
	05:00 ~ 06:00	48.7	0.812
05:30	05:00 ~ 06:00	72.6	1.210
	06:00 ~ 07:00	66.9	1.115
06:30	06:00 ~ 07:00	66.9	1.115
	07:00 ~ 08:00	13.9	0.232
07:30	07:00 ~ 08:00	3.0	0.050
	08:00 ~ 09:00	2.1	0.035
08:30	08:00 ~ 09:00	1.3	0.022
	09:00 ~ 10:00	0.7	0.012

침수 모의 모형에 입력하는 강수 자료는 초단기 예보 전의 매시 정각까지 종관기상관측 강수 자료와 초단기 예보 시각 30분 전부터 2시간 동안의 예보 강수 자료를 조합하여 구성하였다. 다음 Fig. 6.2는 종관기상관측 강수 자료와 초단기 예보의 2시간 동안 예보 강수 자료를 활용하여 구축한 1분 단위 강수 입력자료를 나타낸 그래프이다.

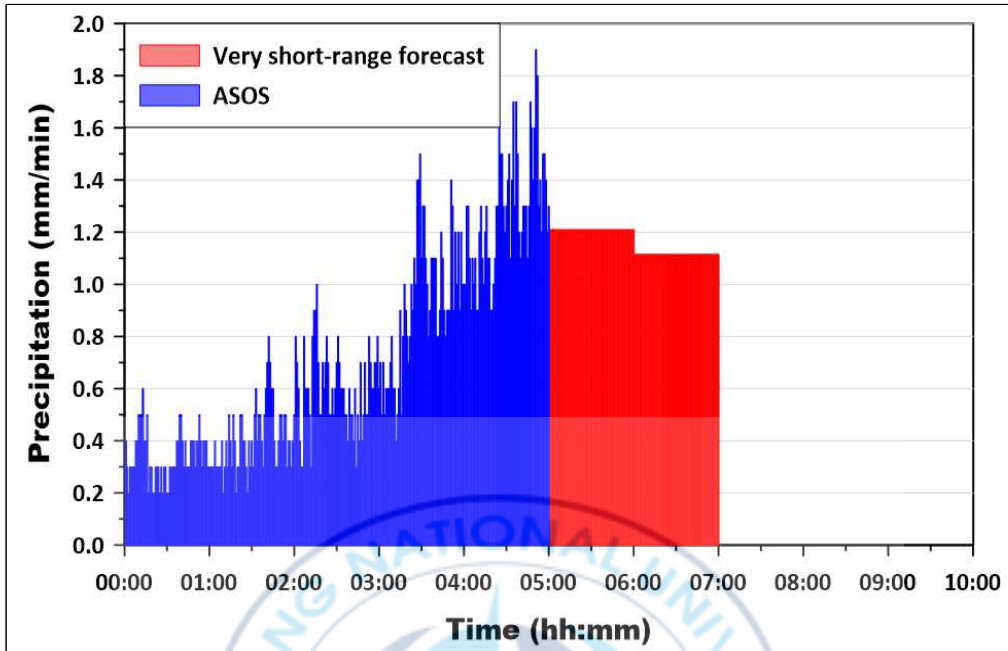


(a) Minute-scale precipitation data input from 00:00 to 05:00

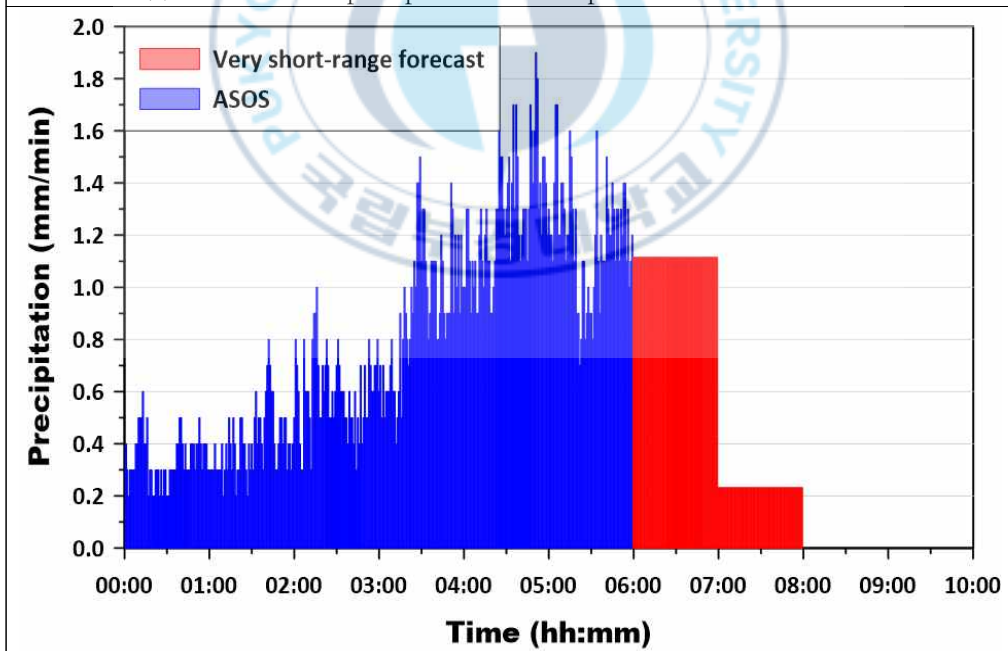


(b) Minute-scale precipitation data input from 00:00 to 06:00

Fig. 6.2. Minute-scale precipitation data input: a combination of measurements and very short-range forecasts.



(c) Minute-scale precipitation data input from 00:00 to 07:00



(d) Minute-scale precipitation data input from 00:00 to 08:00

Fig. 6.2. Continued

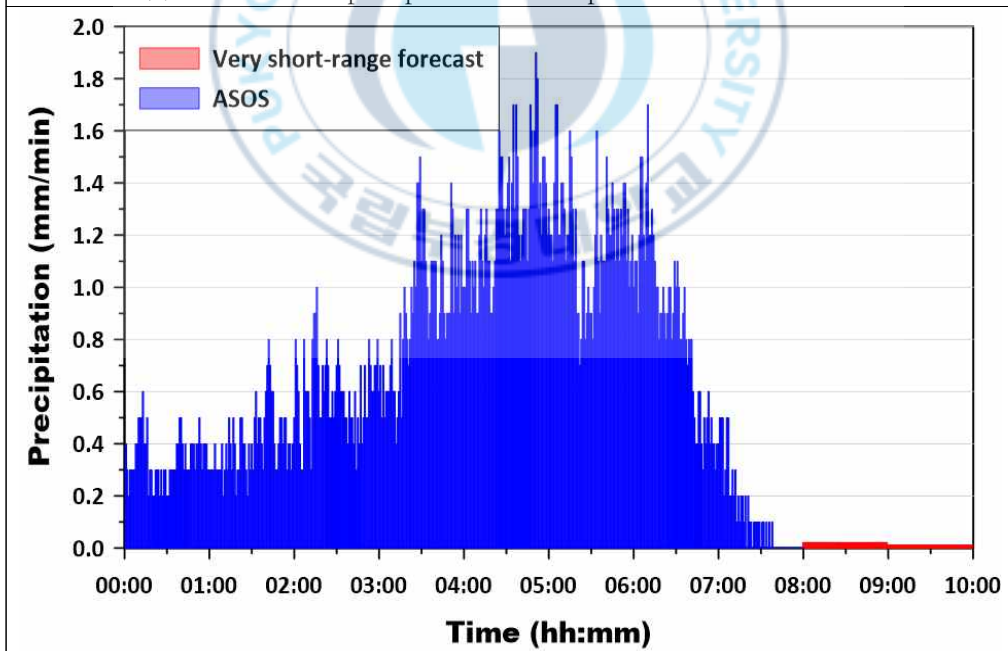
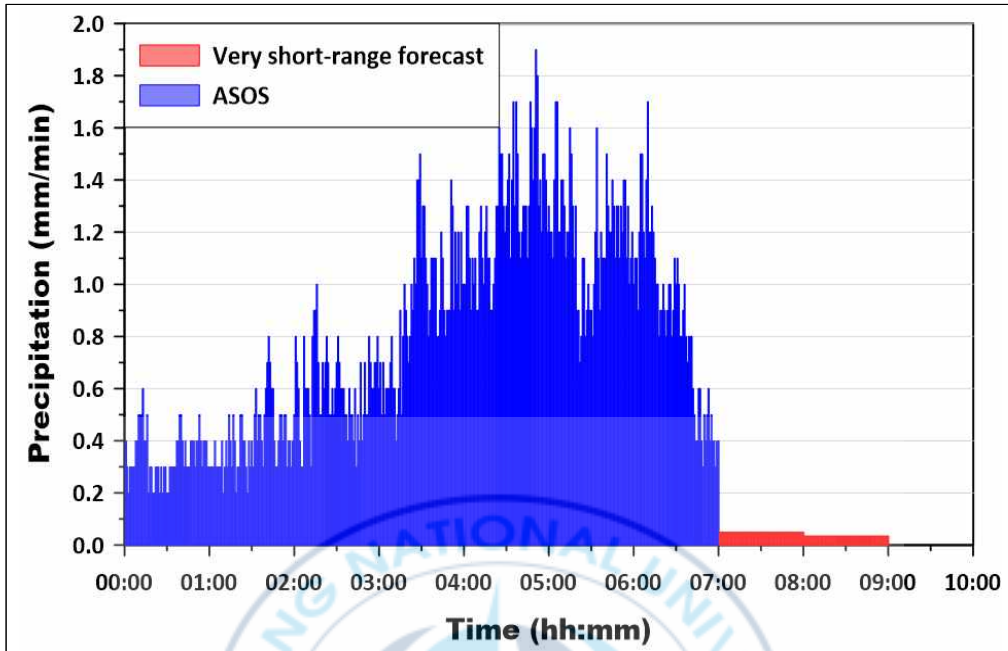


Fig. 6.2. Continued

제7장 침수 모의 결과 및 선행 예측 시간 추정

7.1 침수 모의 결과 비교

과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과를 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과와 비교하였다. 비교 항목은 침수심과 침수면적이었다. 침수심 비교는 2022년 9월 6일 태풍 힌남노가 지나갈 때 인명피해가 발생한 우방아파트 지역을 대상으로 하였다. 또한, 침수면적 비교는 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과 중 냉천 하류 유역에서 내수 침수와 하천 범람이 복합적으로 일어난 시기를 대상으로 하였다.

7.1.1 침수심 비교 지점 및 연구 대상 지역의 하천 범람 시각

침수심은 5.4절에서 선정한 A, B, C 지점에서 비교하였으며, 이들은 포항시 남구 우방아파트 지역에 위치한다. Fig. 7.1은 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과 중 A, B, C 지점의 침수 발생 초기에 우방아파트 지역의 침수 양상을 나타낸 것이다. 세 지점 중 먼저 C 지점에서 4시 32분경에 침수가 발생한 후 A 지점은 5시 41분경, B 지점은 5시 59분경에 침수가 발생하였다(Fig. 7.1).

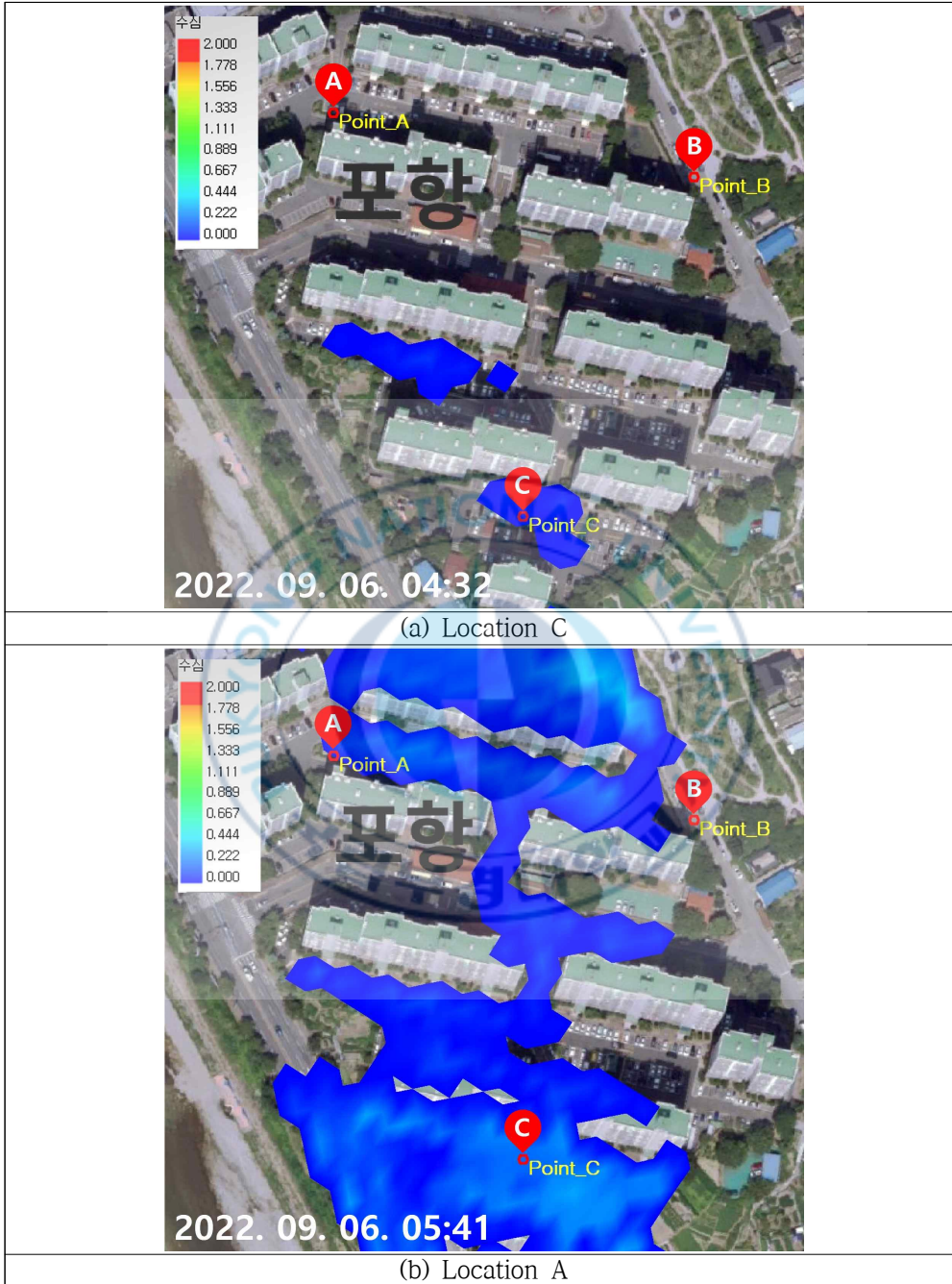


Fig. 7.1. Initial stages of inundation at locations A, B, and C simulated using observed precipitation data.

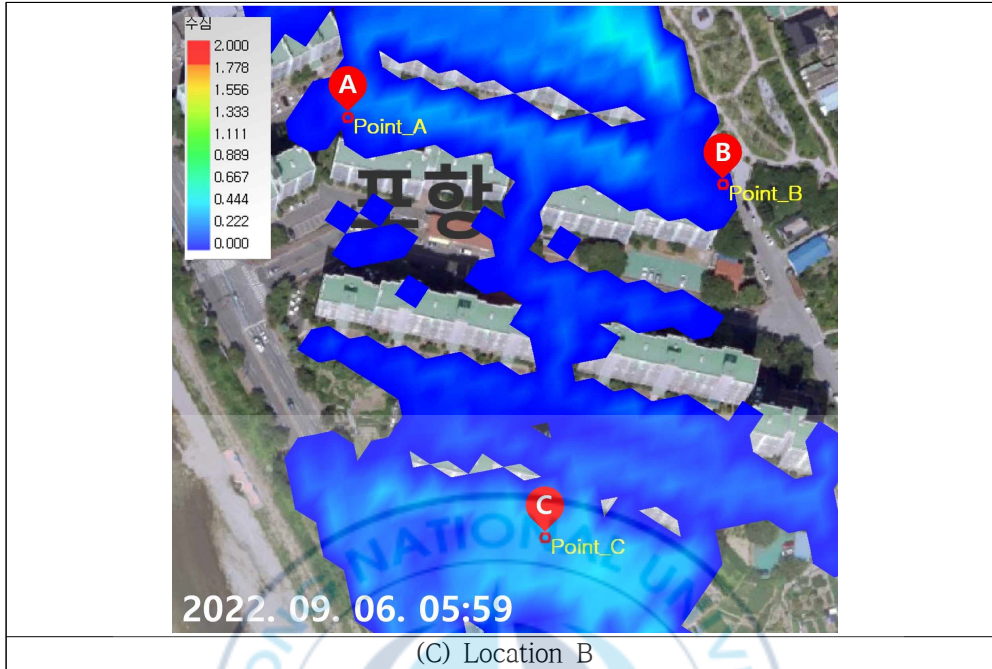


Fig. 7.1. Continued

냉천 하류 유역은 태풍 힌남노 내습 당시 내수 침수뿐만 아니라 하천 범람이 가중된 지역이다. 이러한 하천 범람은 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과에서 나타났다(Fig. 7.2). 우선 4시 10분경 세계천이 먼저 범람하여 오천시장 일대의 침수를 가중시켰다(Fig. 7.2의 (a)). 이후 5시 30분경 원용교 하류 우안의 우방아파트 주변과 냉천교 직상류의 좌안에서 냉천이 범람하여 침수를 가중시키는 것으로 모의되었다(Fig. 7.2의 (b)).

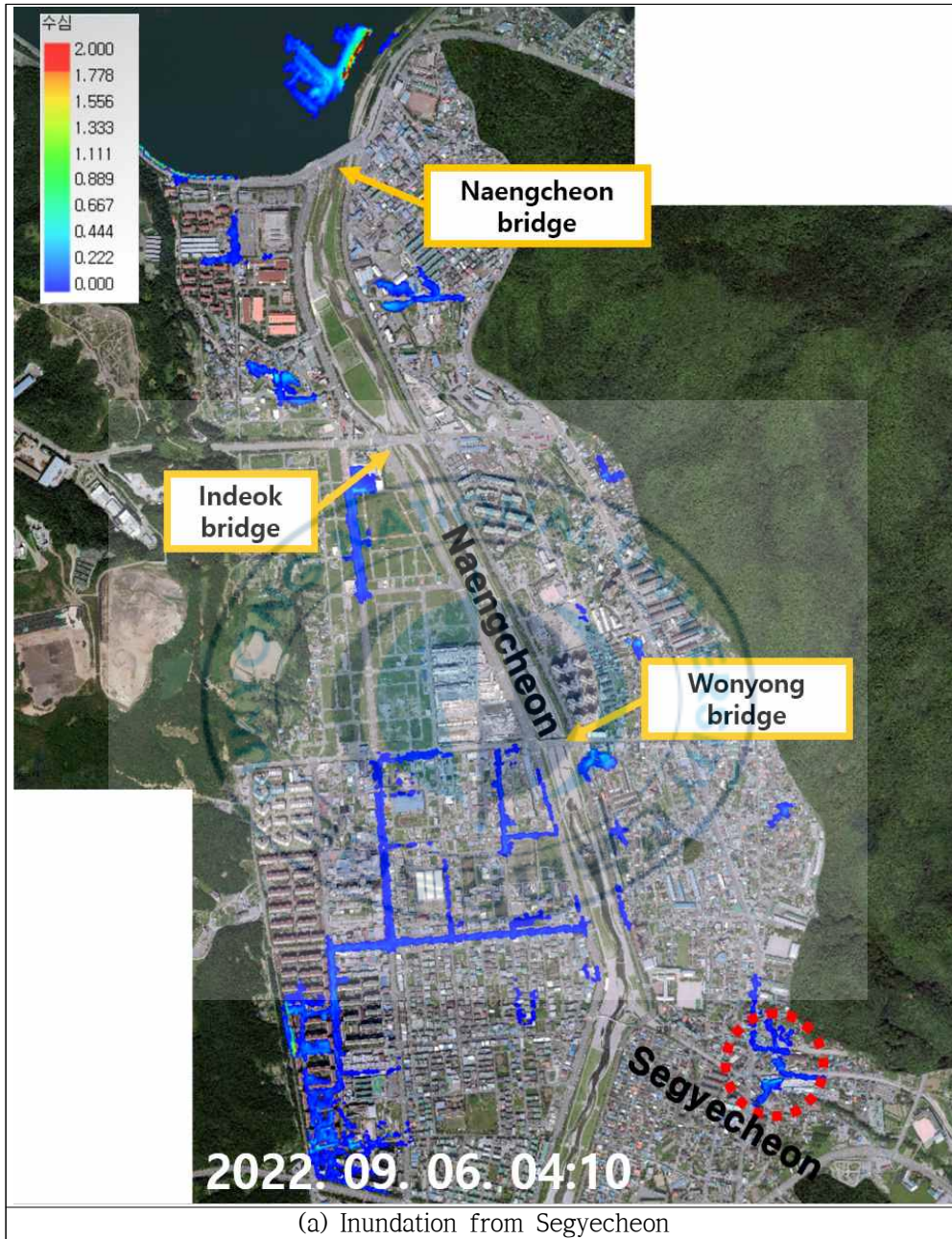


Fig. 7.2. Initial stages of inundation from Naengcheon simulated using observed precipitation data.

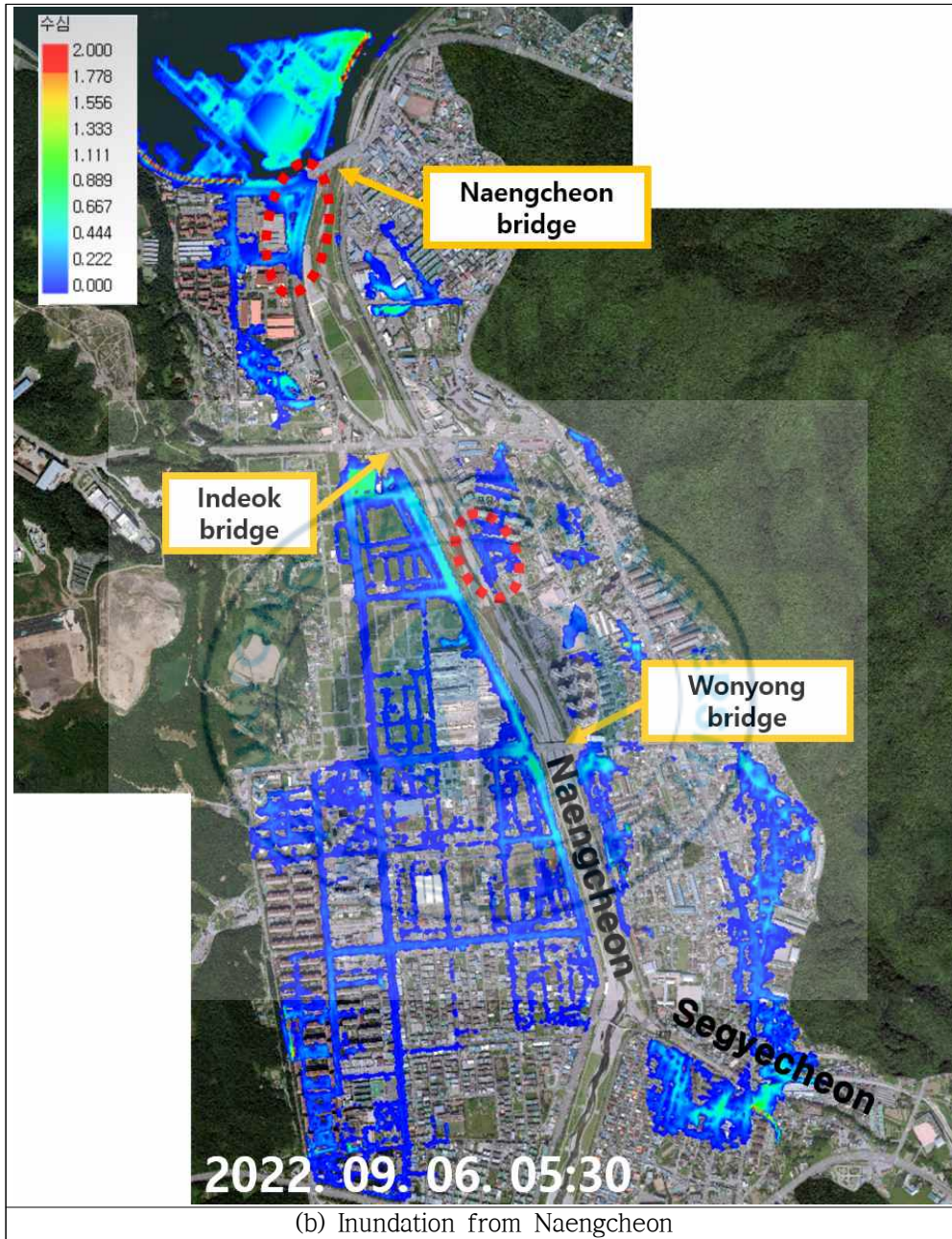


Fig. 7.2. Continued

7.1.2 침수심 비교 결과

7.1.1.절의 A, B, C 지점 침수 발생 초기 시각을 고려하여, 침수 발생 초기 시각 직전 정각 이후 발표된 과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과와 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과를 가지고 침수심을 비교하였다. 예를 들어, 4시 32분경에 침수가 발생한 C 지점은 4시 30분부터 8시 30분까지 발표된 과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과를 종관기상관측 강수 자료의 침수 모의 결과와 비교하였다. 즉, A와 B 지점은 Table 7.1~7.2와 같이 각각 4개의 기간, C 지점은 Table 7.3과 같이 5개의 기간에 대해 예보기간 2시간의 과거 초단기 예보 강수 자료를 적용한 각각의 침수 모의 결과를 침수심 비교에 활용하였다. 해당 침수 모의 결과를 같은 기간의 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과와 비교하되, 초단기 예보 1시간 말 및 다음 1시간 말의 침수심을 비교하고, 절대 차이를 산정하여 Table 7.1~7.3에 나타냈다.

침수심 비교 결과, A와 B 지점은 6시부터 8시까지 예보기간 2시간의 과거 초단기 예보 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과 중 8시의 절대 차이가 최대로 나타났다. A와 B 지점의 최대 절대 차이는 각각 0.22 m와 0.24 m였으며, 해당 기간에 예보 누적강수량과 관측 누적강수량 차이는 23.3 mm였다. 또한, C 지점은 4시부터 6시까지 예보기간 2시간의 과거 초단기 예보 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과 중 6시의 침수심이 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수심과 가장 차이가 컸다. C 지점 침수심의 최대 절대 차이는 0.19 m였으며, 해당 기간에 예보 누적강수량과 관측 누적강수량 차이는 31.4 mm였다. 세 지점 모두 과거 초단기 예보의 강수량과 종관기상관측 강수량 간의 차이가 클수록 모의 침수심 차이도 크게 나타났다.

Table 7.1. Comparison of inundation depths at point A in inundation simulations using forecasted and observed precipitation data.

Forecasted precipitation application period (hour:min)	Comparison time (hour:min)	1-hour accumulated precipitation (mm)		Inundation depth at point A (m)		Absolute difference (m)
		Observed	Forecasted	Observed precipitation applied	Forecasted precipitation applied	
05:00 ~ 07:00	06:00	70.9	72.60	0.16	0.18	0.02
	07:00	50.8	66.90	0.57	0.62	0.05
06:00 ~ 08:00	07:00	50.8	66.90	0.57	0.59	0.02
	08:00	6.7	13.90	0.26	0.48	0.22
07:00 ~ 09:00	08:00	6.7	3.00	0.26	0.22	0.04
	09:00	0.5	2.10	0.00	0.00	-
08:00 ~ 10:00	09:00	0.5	1.3	0.00	0.00	-
	10:00	0	0.7	0.00	0.00	-

Table 7.2. Comparison of inundation depths at point B in inundation simulations using forecasted and observed precipitation data.

Forecasted precipitation application period (hour:min)	Comparison time (hour:min)	1-hour accumulated precipitation (mm)		Inundation depth at point B (m)		Absolute difference (m)
		Observed	Forecasted	Observed precipitation applied	Forecasted precipitation applied	
05:00 ~ 07:00	06:00	70.9	72.60	0.03	0.05	0.02
	07:00	50.8	66.90	0.43	0.49	0.06
06:00 ~ 08:00	07:00	50.8	66.90	0.43	0.46	0.03
	08:00	6.7	13.90	0.11	0.35	0.24
07:00 ~ 09:00	08:00	6.7	3.00	0.11	0.07	0.04
	09:00	0.5	2.10	0.00	0.00	-
08:00 ~ 10:00	09:00	0.5	1.3	0.00	0.00	-
	10:00	0	0.7	0.00	0.00	-

Table 7.3. Comparison of inundation depths at point C in inundation simulations using forecasted and observed precipitation data.

Forecasted precipitation application period (hour:min)	Comparison time (hour:min)	1-hour accumulated precipitation (mm)		Inundation depth at point C (m)		Absolute difference (m)
		Observed	Forecasted	Observed precipitation applied	Forecasted precipitation applied	
04:00 ~ 06:00	05:00	77	67.80	0.03	0.02	0.01
	06:00	70.9	48.70	0.34	0.15	0.19
05:00 ~ 07:00	06:00	70.9	72.60	0.34	0.34	0.00
	07:00	50.8	66.90	0.50	0.54	0.04
06:00 ~ 08:00	07:00	50.8	66.90	0.50	0.52	0.02
	08:00	6.7	13.90	0.27	0.35	0.08
07:00 ~ 09:00	08:00	6.7	3.00	0.27	0.26	0.01
	09:00	0.5	2.10	0.16	0.15	0.01
08:00 ~ 10:00	09:00	0.5	1.3	0.16	0.16	-
	10:00	0	0.7	0.6	0.6	-

7.1.3 침수면적 비교 결과

7.1.1절의 냉천 하류 유역 하천 범람 초기 시각을 고려하여, 처음 하천이 범람한 4시 10분 이후 발표된 과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과와 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과를 가지고 침수면적을 비교하였다. 즉, Table 7.4와 같이 5개의 기간에 대해 예보기간 2시간의 과거 초단기 예보 강수 자료를 적용한 각각의 침수 모의 결과를 침수면적 비교에 활용하였다. 해당 침수 모의 결과를 같은 기간의 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과와 비교하되, 초단기 예보 1시간 말 및 다음 1시간 말의 침수면적을 비교하고, 상대 차이 비율을 산정하여 Table 7.4에 나타냈다.

침수면적 비교 결과, 상대 차이 비율은 최소 0.05%에서 최대 37.38%의 범위로 나타났으며, 평균 9.11%였다. 이때, 최대 상대 차이 비율은 4시부터 6시까지 예보기간 2시간의 과거 초단기 예보 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과 중 6시의 침수면적을 비교할 때 나타났다. 해당 기간에 예보 누적강수량과 관측 누적강수량 차이는 31.4 mm로 가장 크게 나타났으며, 이러한 강수량 차이가 침수 모의 결과에 영향을 주었다. 또한, 최소 상대 차이 비율은 8시부터 10시까지 예보기간 2시간의 과거 초단기 예보 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과 중 10시의 침수면적을 비교할 때 나타났다. 해당 기간에 예보 누적강수량과 관측 누적강수량 차이는 1.5 mm로 가장 작았으며, 이에 침수 모의 결과도 가장 작게 나타났다.

Table 7.4. Comparison of inundation area in inundation simulations using forecasted and observed precipitation data.

Forecasted precipitation application period (hour:min)	Comparison time (hour:min)	1-hour accumulated precipitation (mm)		Inundation area (m ²)		Relative difference (%)
		Observed	Forecasted	Observed precipitation applied	Forecasted precipitation applied	
04:00 ~ 06:00	05:00	77	67.80	672,525	573,496	14.72
	06:00	70.9	48.70	124,8618	781,844	37.38
05:00 ~ 07:00	06:00	70.9	72.60	1,248,618	1,270,766	1.77
	07:00	50.8	66.90	1,354,262	1,462,062	7.96
06:00 ~ 08:00	07:00	50.8	66.90	1,354,262	1,437,513	6.15
	08:00	6.7	13.90	939,134	1,121,218	19.39
07:00 ~ 09:00	08:00	6.7	3.00	939,134	913,458	2.73
	09:00	0.5	2.10	683,501	677,572	0.87
08:00 ~ 10:00	09:00	0.5	1.3	683,501	684,236	0.11
	10:00	0	0.7	586,873	587,167	0.05

7.2 위험 침수심 기준 설정

호우로 도시 지역에 침수가 일어나면 차량운행과 보행이 곤란해지고, 침수심이 깊어지면 사람이 위험에 처하게 된다. 이와 같은 위험 상황을 판별하기 위하여 차량 이동 제한과 주거지 대피, 보행의 최소 위험 침수심을 각각 20 cm, 30 cm, 50 cm로 정하였다. 먼저, 침수심 20 cm의 경우, Choi et al.(2024)에 따르면 차량 하부가 침수되기 시작하는 수심으로, 차량 하부의 기계 부품에 손상이 발생할 수 있어 20 cm 이상인 침수 지역은 차량 진입을 제한하거나 회피할 필요가 있는 것으로 분석되었다. 침수심 30 cm의 경우, 서울시 강남구는 도로 침수심이 30 cm 이상 될 때, 침수 경보를 발령하며, 구민에게 재난문자를 발송하고 차량 통제 및 주민 대피를 실시한다(Nate News, 2025). 또한, 행정안전부는 집이나 건물 안이 침수될 시 침수심이 30 cm 이하(종아리 아래)일 때, 신속히 문을 열고 탈출하라고 제시하고 있다(Nocut News, 2022a). 마지막으로 침수심 50 cm의 경우, 국민재난안전포털(MOIS, 2025)의 ‘자연재난 행동요령’에서 침수 시 보행 가능한 수위 기준을 무릎(약 50 cm)까지로 안내하고 있다. 이에 따라 침수심 50 cm를 보행의 위험 침수심으로 설정하였다.

위험 침수심을 정한 내용을 바탕으로, ‘선행 예측 시간’을 초단기 강수 예보 시점부터 도시의 어느 지점이 위험 침수심에 이르기까지 소요 시간으로 정의하여 이 논문에서 사용하고자 한다.

7.3 수위 시계열 모의 결과의 분석 및 선행 예측 시간 추정

본 절의 내용은 종관기상관측 강수 자료와 과거 초단기 예보의 강수 자료를 각각 적용한 침수 모의 결과로부터 도출된 1분 간격의 수위 시계열 데이터를 활용한 선행 예측 시간 추정 결과이다. 이때 활용된 수위 시계열 데이터는 5.4절에서 선정한 5개 수위 시계열 데이터 출력 지점에서 도출된 것이다.

7.3.1 위험 침수심 도달 소요 시간 비교 및 선행 예측 시간 추정

위험 침수심에 도달하는 소요 시간 및 선행 예측 시간을 추정하기 위해, 초단기 강수 예보 시점 이후 침수심이 위험 침수심의 최저 기준인 20 cm를 초과하는 침수 모의 결과를 분석하였다. 단, 초단기 강수 예보 시점 이전에 20 cm 이상의 침수심이 산정된 침수 모의 결과는 비교에서 제외하였다. 이에 A, B, C 지점은 5~7시, D와 E 지점은 각각 3~5시, 4~6시에 해당하는 예보기간 2시간의 과거 초단기 예보 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과를 분석하였다.

(1) 우방아파트 주변 A, B, C 지점

우방아파트 1차 정문을 중심으로 반경 120 m 이내의 A, B, C 지점은 서로 155~180 m 거리에 위치한다. 해당 지역은 7.1.1절에서 언급한 내용과 같이 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의에서 5시 30분경 인근 냉천이 범람하였다. 이에 냉천의 초기 범람 구간과 인접한 C 지점은 초단기 강수 예보 시점인 5시 30분에 10 cm의 침수가 발생하였으나, 상대적으로 거리가 먼 A와 B 지점은 침수되지 않았다.

Table 7.5는 과거 초단기 예보와 종관기상관측 강수 자료를 각각 적용

한 침수 모의 결과를 바탕으로, A, B, C 지점에서 초단기 강수 예보 시점부터 각 위험 침수심에 이르는 소요 시간을 비교하여 나타낸 것이다. 또한, 과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과에서 추정된 각 위험 침수심에 이르는 소요 시간을 A, B, C 지점의 침수심 시계열 그래프와 함께 나타내었다(Fig. 7.3~7.5). Table 7.5와 같이 초단기 강수 예보 시점부터 위험 침수심 20 cm에 이르는 소요 시간은 과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과로부터 A 지점은 32분, B 지점은 49분, C 지점은 9분으로 나타났다. 이는 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과보다 A 지점은 2분, B 지점은 1분 더 빨리 도달한 것이며, C 지점은 동일한 시간에 도달하였다. 위험 침수심 30 cm에 도달하는 소요시간은 과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과에서 A, B, C 지점 각각 45분, 61분, 22분으로 나타났다. 이는 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과와 비교할 때, A 지점은 1분, B 지점은 3분 더 빨리 도달하였으며, C 지점은 동일하였다. 또한, 위험 침수심 50 cm에 도달하는 소요 시간은 과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과에서 A, C 지점 각각 70분, 61분으로 나타났으며, 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과보다 A 지점은 5분, C 지점은 8분 더 빨리 도달하였다. 그러나 B 지점의 경우 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과, 최대 침수심이 44 cm로 산정되어 위험 침수심 50 cm에 도달하지 못하였다. 반면, 과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과, 최대 침수심은 52 cm로 산정되었으며, 위험 침수심 50 cm에 도달하기까지 91분이 걸렸다. 이는 침수 모의에 적용된 5~7시의 과거 초단기 예보 강수량이 같은 기간의 종관기상관측 강수량보다 17.8 mm 더 많았기 때문으로 판단된다.

B 지점은 종관기상관측 자료의 경우에 위험 침수심 50 cm에 도달하지

못하였으므로 이에 대한 선행 예측 시간을 추정할 수 없었다. 그러나 7.1.1 절의 Fig. 7.1에서 A와 C 지점이 침수된 후 B 지점이 침수되는 우방아파트 지역의 침수 양상을 고려하여, A와 C 지점에서 위험 침수심 50 cm에 도달할 것으로 예측될 때, B 지점도 위험 침수심 50 cm의 발생 가능성에 대비할 필요가 있다. 그렇게 함으로써 B 지점이 최대 침수심 44 cm에 이르기까지 처할 수 있는 위험에 대처하는 것이 좋다. 초단기 강수 예보 자료로 도출한 위험 침수심 도달 소요 시간은 곧, 위험 침수심 도달 선행 예측 시간이라고 말할 수 있다. 위의 분석을 요약하면 우방아파트 주변 A, B, C 지점이 위험 침수심 20 cm, 30 cm, 50 cm에 도달하는 선행 예측 시간은 각각 9~49분, 22~61분, 61~70분으로 추정되었다.

Table 7.5. Comparison of times to reach critical inundation depths at points A, B, and C in inundation simulations using forecasted and observed precipitation data.

Point	Forecast issue time (hour:min)	Forecasted precipitation application period (hour:min)	Applied precipitation	Inundation depth at forecast issue time	Time to reach critical inundation depth from forecast issue time (min)			Maximum inundation depth (time of occurrence)
					20 cm	30 cm	50 cm	
A	05:30	05:00 ~ 07:00	Observed (121.7 mm)	0 cm	34	46	75	57 cm (07:00)
			Forecasted (139.5 mm)	0 cm	32	45	70	65 cm (07:09)
B	05:30	05:00 ~ 07:00	Observed (121.7 mm)	0 cm	50	64	-	44 cm (07:01)
			Forecasted (139.5 mm)	0 cm	49	61	91	52 cm (07:11)
C	05:30	05:00 ~ 07:00	Observed (121.7 mm)	10 cm	9	22	69	51 cm (06:50)
			Forecasted (139.5 mm)	10 cm	9	22	61	55 cm (07:03)

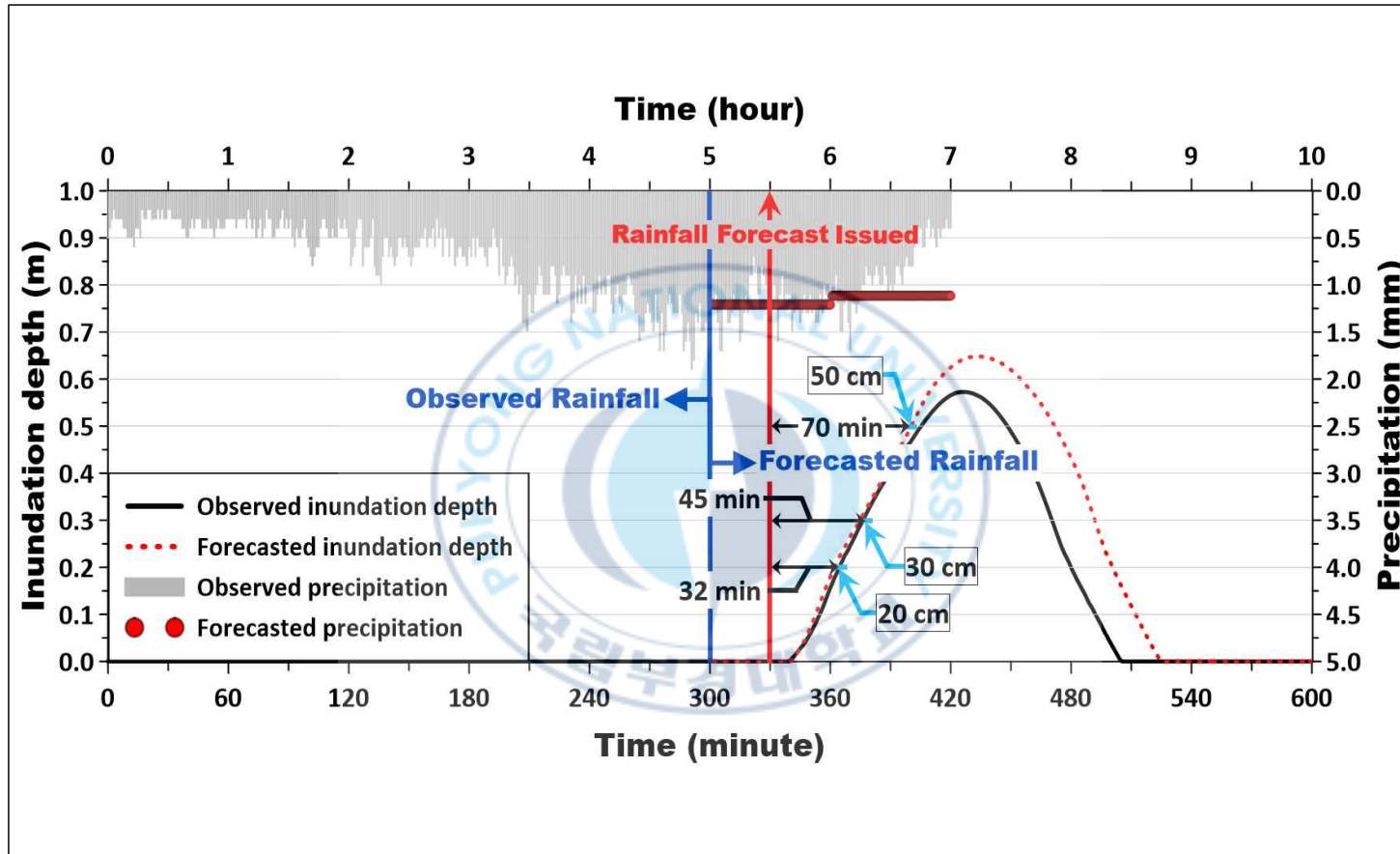


Fig. 7.3. Time series of the inundation depth at point A simulated using observed and forecasted precipitation data.

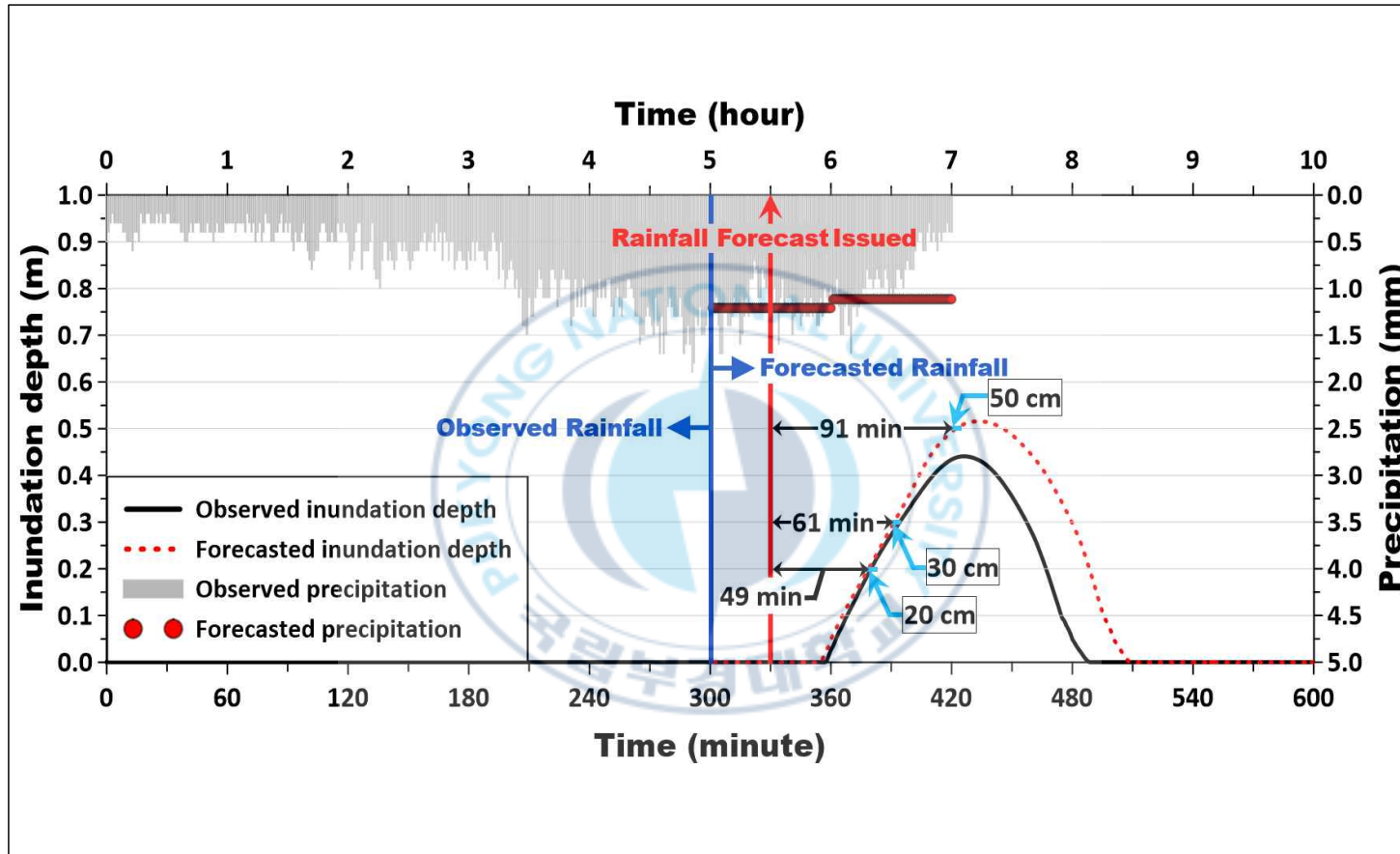


Fig. 7.4. Time series of the inundation depth at point B simulated using observed and forecasted precipitation data.

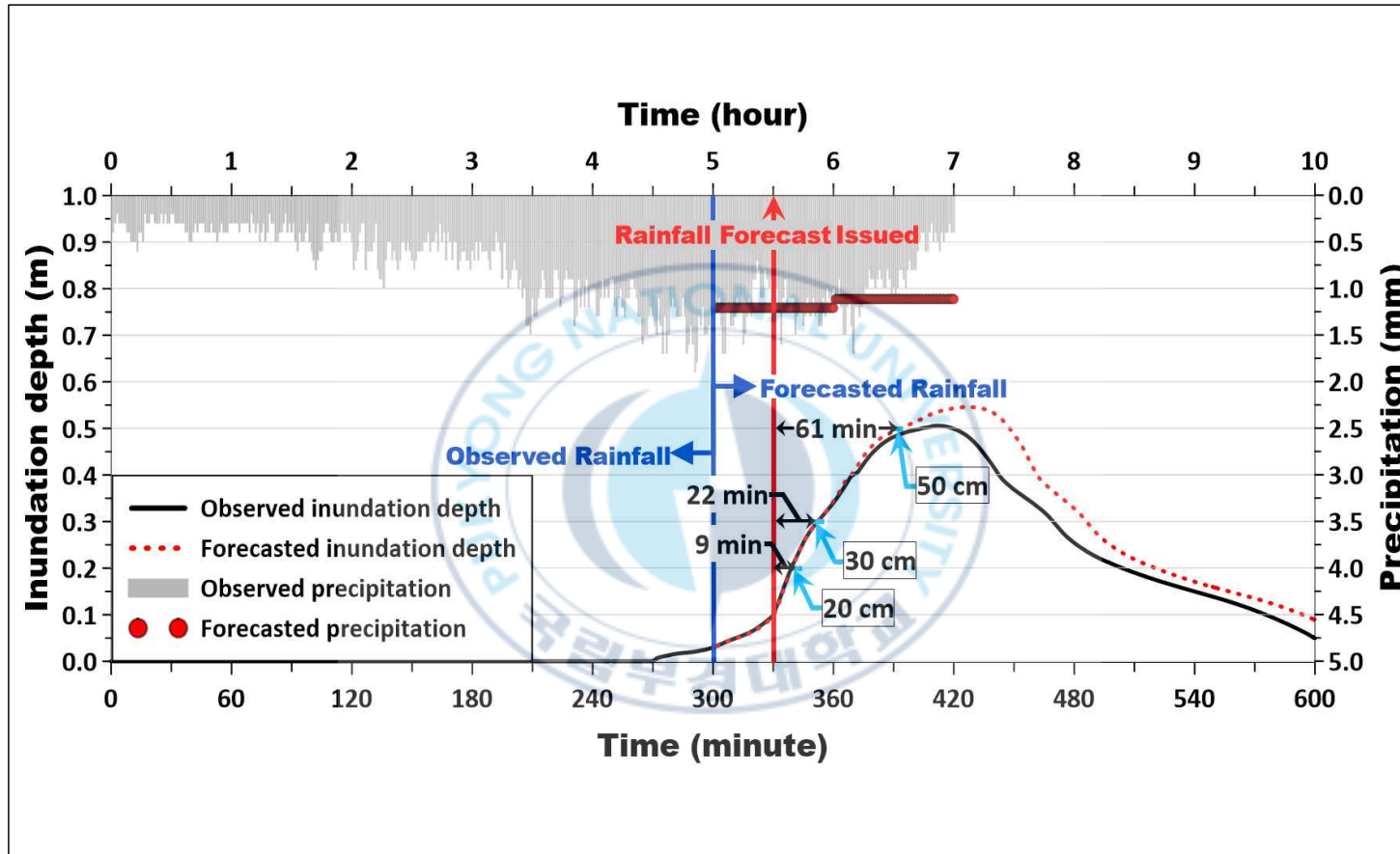


Fig. 7.5. Time series of the inundation depth at point C simulated using observed and forecasted precipitation data.

(2) 오천시장 인근 D, E 지점

오천시장 인근 D, E 지점은 서로 약 200 m 거리에 위치하며, 7.1.1절에서 언급한 내용과 같이 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의에서 4시 10분경 해당 지역 인근 세계천이 범람하였다. 이에 세계천과 인접한 D 지점에서 먼저 침수가 발생하고, 이후 E 지점이 침수되었다. 또한, 침수심 20 cm를 초과하는 모의 결과가 나타나는 D와 E 지점의 초단기 강수 예보 시점은 각각 3시 30분, 4시 30분이며, 두 지점 모두 해당 시점에 침수는 발생하지 않았다.

Table 7.6은 과거 초단기 예보와 종관기상관측 강수 자료를 각각 적용한 침수 모의 결과를 바탕으로, D, E 지점에서 초단기 강수 예보 시점부터 각 위험 침수심에 이르는 소요 시간을 나타낸 것이다. 또한, 과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과에서 추정된 각 위험 침수심에 이르는 소요 시간을 D, E 지점의 침수심 시계열 그래프와 함께 나타내었다 (Fig. 7.6~7.7). Table 7.6과 같이 D 지점은 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과에서 최대 49 cm의 침수심이 산정되었다. 반면, 과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과에서 최대 침수심은 24 cm에 불과하였다. 이는 침수 모의에 적용된 3~5시의 과거 초단기 예보 강수량이 같은 기간의 종관기상관측 강수량보다 44.1 mm 더 적었기 때문으로 판단된다. 이에 따라, D 지점은 위험 침수심 20 cm에 이르는 소요 시간만을 분석하였다. 그 결과, 과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과에서 29분이 걸렸으며, 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과보다 17분 더 빨리 도달하였다. 또한, E 지점은 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과에서 최대 침수심이 56 cm로 산정되었다. 그러나 과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과에서 최대 침수심은 42 cm로 나타나 위험 침수심 50 cm에 도달하지 못하였다.

이는 침수 모의에 적용된 4~6시의 과거 초단기 예보 강수량이 같은 기간의 중관기상관측 강수량보다 31.4 mm 적었기 때문에 판단된다. 이에 E 지점은 위험 침수심 20 cm와 30 cm에 이르는 소요 시간을 분석하였으며, 과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 경우 각각 7분, 12분으로 나타나 중관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과와 같은 시간에 도달하였다. 위의 분석 결과를 요약하면, 오천시장 인근 D 지점에서 위험 침수심 20 cm에 도달하는 선행 예측 시간은 29분으로 추정되었으며, E 지점에서 위험 침수심 20 cm와 30 cm에 도달하는 선행 예측 시간은 각각 7분, 12분으로 추정되었다.

Table 7.6. Comparison of times to reach critical inundation depths at points D and E in inundation simulations using forecasted and observed precipitation data.

Point	Forecast issue time (hour:min)	Forecasted precipitation application period (hour:min)	Applied precipitation	Inundation depth at forecast issue time	Time to reach critical inundation depth from forecast issue time (min)			Maximum inundation depth (Time of occurrence)
					20 cm	30 cm	50 cm	
D	03:30	03:00 ~ 05:00	Observed (132.3 mm)	0 cm	46	63	-	49 cm (05:05)
			Forecasted (88.2 mm)	0 cm	29	-	-	24 cm (04:07)
E	04:30	04:00 ~ 06:00	Observed (147.9 mm)	0 cm	7	12	38	56 cm (05:27)
			Forecasted (116.5 mm)	0 cm	7	12	-	42 cm (05:14)

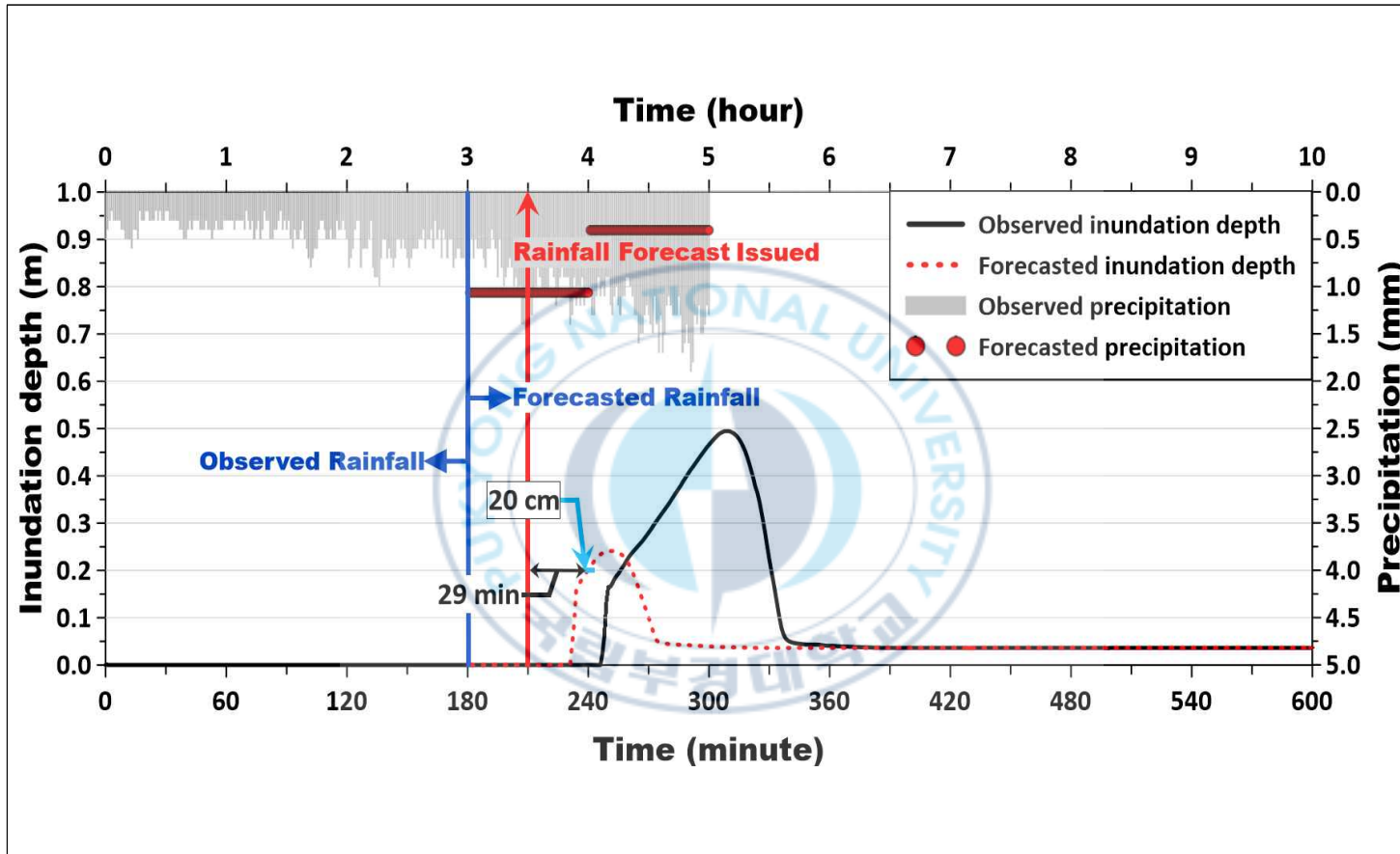


Fig. 7.6. Time series of the inundation depth at point D simulated using observed and forecasted precipitation data.

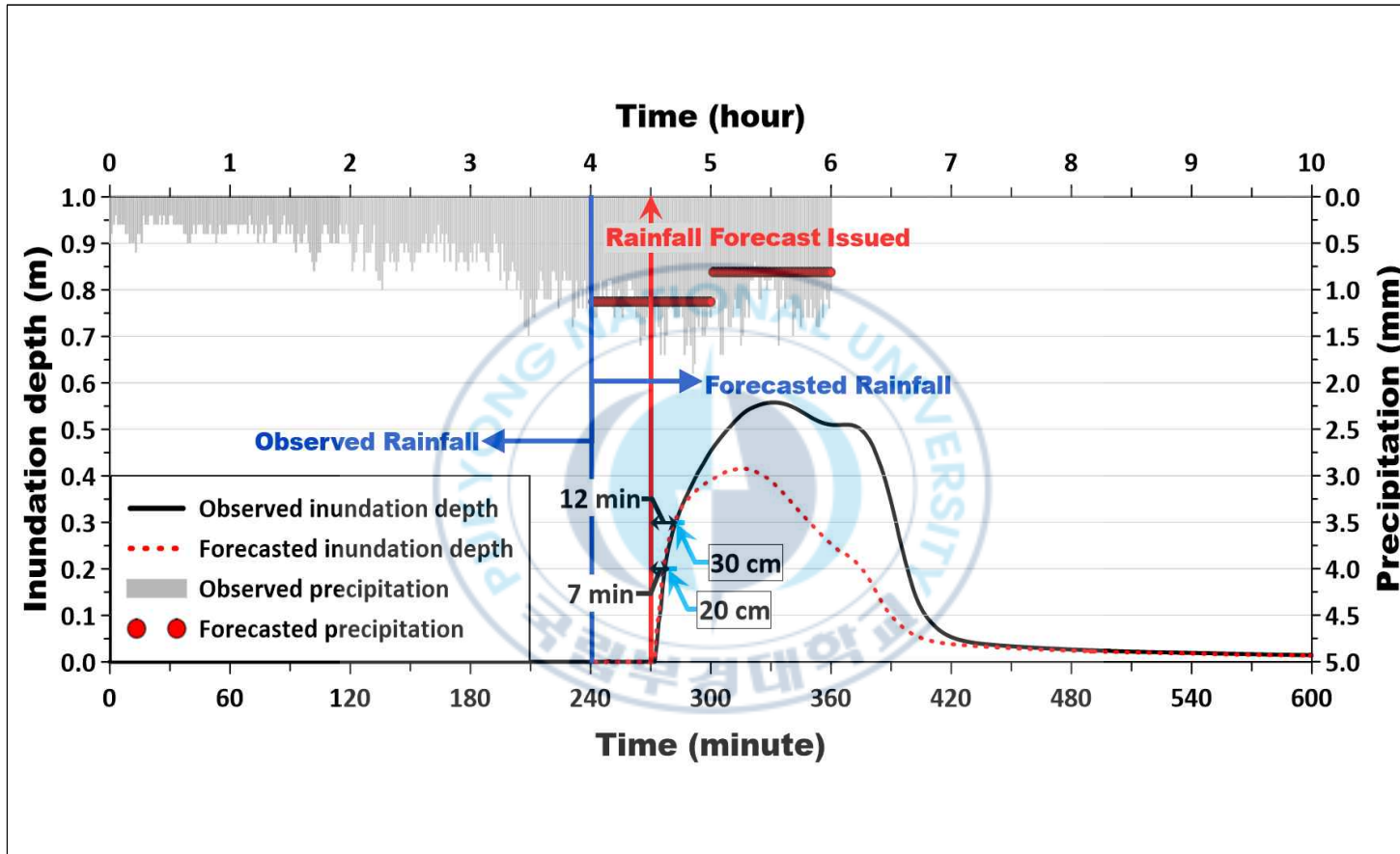


Fig. 7.7. Time series of the inundation depth at point E simulated using observed and forecasted precipitation data.

앞서 오천시장 인근 D, E 지점의 선행 예측 시간은 우방아파트 주변 A, B, C 지점에 비해 전반적으로 짧게 추정되었다. 특히 E 지점의 경우 위험 침수심 30 cm에 도달하는 선행 예측 시간은 12분에 불과해 침수 발생 전에 미리 대응하기에는 부족한 시간이었다. 이는 과거 초단기 예보강수량과 종관기상관측 강수량 간의 차이뿐만 아니라, 해당 지역이 세계천 상류의 복개구간 주변에 위치하여 세계천 범람의 직접적인 영향을 받아 침수가 가중되었기 때문으로 판단된다. Fig. 7.8은 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과이며, 오천시장 인근 D, E 지점의 침수 발생 시기에 나타난 침수 양상이다. Fig. 7.8과 같이 D 지점에서 4시 7분경에 침수가 발생한 후 세계천을 범람한 홍수가 E 지점으로 흘렀고, 4시 34분의 E 지점 침수 양상이 그림에 나타나 있다. 지면을 따라 급격하게 전파되는 홍수의 흐름을 고려하여 D 지점에서 침수가 예측될 때, D 지점 침수에 영향 받는 E 지점도 침수를 예보할 필요가 있다. 즉, D 지점이 초단기 강수 예보 시점인 3시 30분에 29분 뒤 위험 침수심 20 cm에 도달할 것으로 예측될 때, E 지점도 침수를 함께 예보함으로써 12분에 불과하는 짧은 선행 예측 시간의 한계를 보완하여, 침수에 선제적으로 대응 가능할 것으로 판단된다.

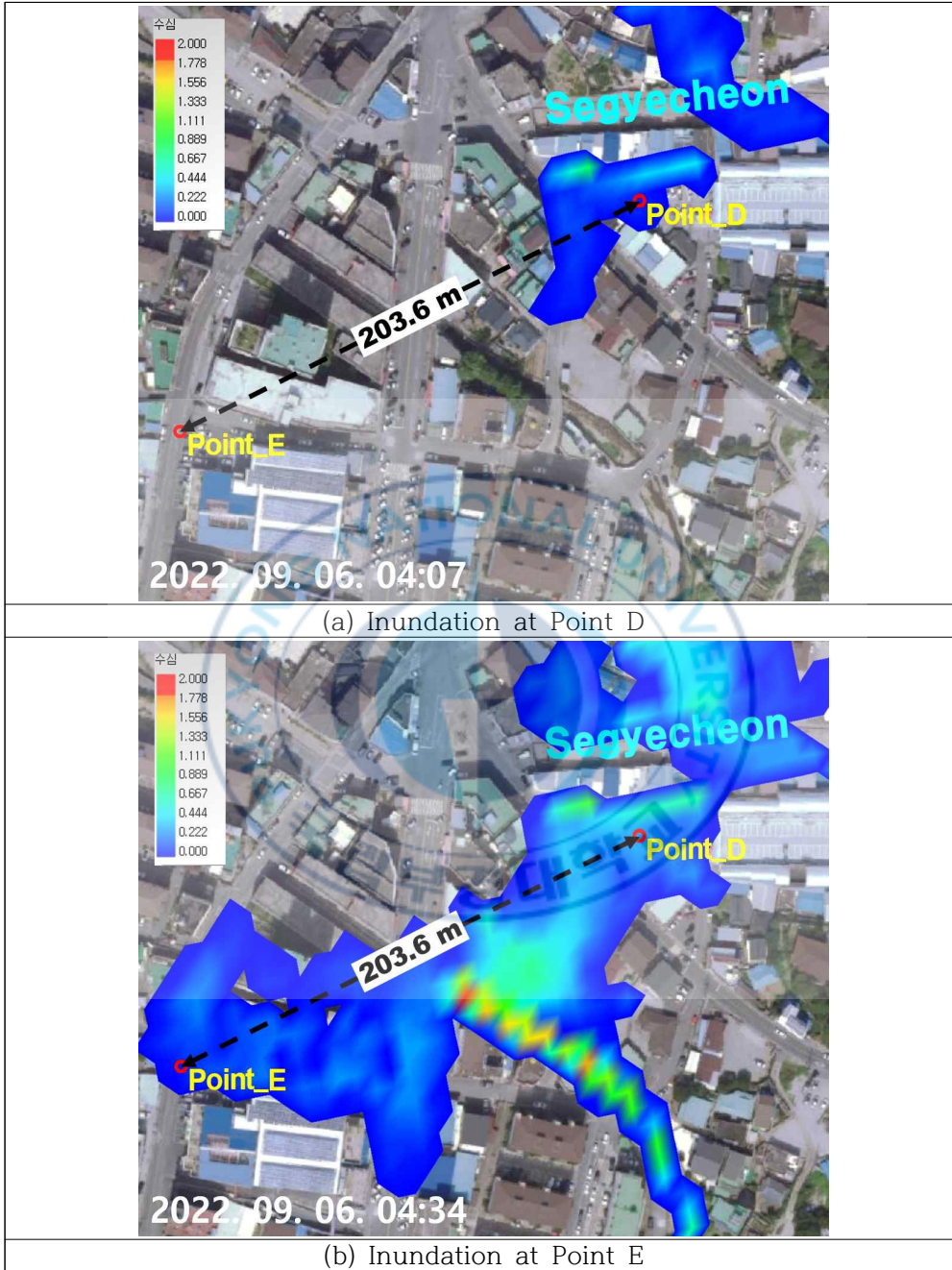


Fig. 7.8. Initial stages of inundation at points D and E in the simulation result using observed precipitation data.

제8장 결론 및 향후 연구

8.1 결론

본 연구는 기상청에서 제공하는 과거 초단기 예보의 강수 자료에 대해 예측 정확도를 평가하고, 이를 도시침수 모의 모형의 입력자료로 적용한 침수 모의 결과와 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과를 비교·분석하였다. 이후 두 침수 모의 결과로부터 도출된 1분 간격의 수위 시계열 데이터를 활용하여, 본 연구에서 정의한 위험 침수심에 이르기까지 소요 시간을 분석하고 선행 예측 시간을 추정하였다. 연구 대상 유역은 2022년 9월 6일 태풍 힌남노 내습 당시 내수 침수 및 하천 범람이 발생한 포항시 남구 냉천 하류 유역이다. 침수 모의는 Hwang et al.(2024)의 연구에서 내수 침수 및 하천 범람을 동시에 모의할 수 있도록 구축한 1차원/2차원 연계 침수 모의 모형을 활용하였다. 이 연구는 해당 침수 모의 모형에, 실제 침수 피해가 발생한 지역을 대상으로 5개(A, B, C, D, E)의 수위 시계열 데이터 출력 지점을 지정하고, 수두/유속 자료 저장 지점을 정의하는 Point 객체를 추가하였다. 전체 침수 모의 기간은 2022년 9월 6일 0시부터 10시까지이며, 3시 30분부터 8시 30분까지 발표된 초단기 예보의 강수 자료를 순차적으로 적용하여 침수 모의를 수행하였다.

과거 초단기 예보의 강수 자료에 대한 예측 정확도는 상응하는 종관기상관측 강수 자료와 시간 단위로 비교하고 정량적 평가 지표와 산포도 그래프를 활용하여 평가하였다. 비교에 사용된 종관기상관측 강수 자료는 2021년 6월 29일부터 2024년 12월 31일까지 전국 11개의 종관기상관측 지점에서 지점별로 상위 30위에 해당하는 일 합계 강수량의 발생일에 대해 1

시간 누적강수량 자료로 수집하였다. 또한, 과거 초단기 예보의 강수 자료는 협정세계시 기준의 1시간 누적강수량 자료로 제공되는 점을 고려하여, 종관기상관측 강수 자료와 상응하는 자료를 수집하였다. 예측 정확도 평가 결과, 과거 초단기 예보의 강수 자료는 예보기간 0~1시간에서 가장 높은 정확도를 가지며, 예보기간 1~2시간도 상대적으로 일정 수준의 정확도를 가지는 것으로 나타났다. 그러나 예보기간 2~3시간 이후부터 예측 정확도가 급격히 저하되는 것으로 나타났다. 이에 따라, 예보기간 2시간의 과거 초단기 예보 강수 자료를 침수 모의에 사용하였다.

과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과를, 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과와 초단기 예보 1시간 말 및 다음 1시간 말의 침수심과 침수면적을 가지고 비교하였다. 먼저 침수심은 수위 시계열 데이터 출력 지점 중 우방아파트 지역의 A, B, C 지점을 대상으로 비교하였다. 각 지점에 대하여 침수 발생 시각 직전 정각 이후 발표된 과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과를 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과와 비교하여, 절대 차이를 산정하였다. 이에 A, B, C 지점의 절대 차이는 각각 0~0.22 m, 0~0.24 m, 0~0.19 m로 나타났으며, 각 지점의 최대 절대 차이를 제외할 경우 모두 0.1 m 이하로 추정되어 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과와 유사하였다. 침수면적의 경우에는 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과에서 처음 하천이 범람한 시각 이후 발표된 과거 초단기 예보의 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과와 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과를 비교하여 상대 차이 비율을 산정하였다. 그 결과, 상대 차이 비율은 최소 0.05%에서 최대 37.38%로 나타났으며, 평균 9.11%로 전반적으로 종관기상관측 강수 자료를 적용한 침수 모의 결과와 유사하게 나타났다.

과거 초단기 예보 및 종관기상관측 강수 자료를 각각 적용한 침수 모의

결과로부터 도출된 1분 간격의 수위 시계열 데이터를 활용하여 초단기 강수 예보 시점부터 본 연구에서 정의한 위험 침수심에 이르기까지 소요 시간을 선행 예측 시간으로 추정하였다. 이때, 활용된 수위 시계열 데이터는 우방아파트 주변 A, B, C 지점과 오천시장 인근 D, E 지점에서 도출된 것이며, 본 연구에서 정의한 위험 침수심은 교통 통제를 위한 20 cm, 주거지 대피를 위한 30 cm, 보행 위험의 50 cm이다.

먼저 A, B, C 지점의 경우, 초단기 강수 예보 시점(5시 30분)부터 위험 침수심 20 cm, 30 cm, 50 cm에 도달하는 선행 예측 시간은 각각 9~49 분, 22~61분, 61~70분으로 추정되었다. 특히 위험 침수심 50 cm에 도달하는 선행 예측 시간은 최소 1시간 이상으로 추정되어 침수 발생 전에 미리 대응할 수 있다고 판단된다. 한편, D 지점의 경우, 초단기 강수 예보 시점(3시 30분)부터 위험 침수심 20 cm까지 29분의 선행 예측 시간이 추정되었다. 또한, E 지점은 초단기 강수 예보 시점(4시 30분)부터 위험 침수심 20 cm와 30 cm에 대해 각각 7분, 12분의 선행 예측 시간이 추정되었다. E 지점은 D 지점 주변의 세계천 범람수가 흐르는 곳이므로 D 지점에서 침수가 예측될 때, E 지점도 침수를 예보하여 그에 대응할 필요가 있었다.

본 연구의 결과는 향후 초단기 예보의 강수 자료를 활용한 도시침수 예보에 있어 참고 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나, 도시침수 예보의 현업에 사용되기 위해서는 초단기 예보의 예측 정확도 향상을 위한 지속적인 연구와 노력이 진행되어야 할 것이다.

8.2 향후 연구

본 연구는 과거 초단기 예보의 강수 자료가 기상청 기상자료개방포털에서 1시간 누적강수량 형태로 제공되므로 이를 침수 모의의 입력자료로 활용하기 위해 1분 단위의 강수 자료로 변환하여 사용하였다. 이 과정에서, 1시간 내에서 강수의 분포가 균일하다고 가정하여 1시간 누적강수량을 60으로 나누어 1분 단위의 강수 자료로 변환함에 따라 종관기상관측 강수 자료의 시간적 분포를 반영하지 못하였다. 이에 종관기상관측 강수 자료의 시간적 분포를 고려하여 입력자료를 구축한다면 침수 양상을 보다 정확하게 모의할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 과거 초단기 예보의 강수 자료에 대한 예측 정확도 평가 결과를 바탕으로 상대적으로 예측 정확도가 높은 예보기간 2시간의 초단기 예보 강수 자료만 활용하였기 때문에 선행 예측 시간을 추정함에 있어 한계가 있었다. 향후 기상청이 운영하는 수치예보모형의 성능이 향상되어 초단기 예보의 예측 정확도가 개선되고, 예보기간 2시간을 초과하는 초단기 예보 강수 자료도 신뢰성 있게 활용할 수 있다면, 더욱 긴 선행 예측 시간을 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- Ahn, Y., Oh, E. J., and Lee, Y. J. (2020). "Verification of accuracy of ultra-short-term forecast data by the Korea Meteorological Administration for predicting building performance - Focusing on Seoul, Busan, Daejeon, Gwangju, Jeju -." *Journal of Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*, Vol. 20, No. 5, pp. 143-149.
- Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) (2023). *2022 disasters in numbers*, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Brussels, Belgium.
- Chen, G., Hou, J., Zhou, N., Yang, S., Tong, Y., Su, F., Huang, L., and Bi, X. (2020). "High-Resolution Urban Flood Forecasting by Using a Coupled Atmospheric and Hydrodynamic Flood Models." *Frontiers in Earth Science*, Vol. 8, Article 545612.
- Choi C. K., Kang N., Noh, H. S., and Park K. H. (2024). "Establishing Flood Risk Criteria for Vehicles based on Flood Damage Assessment." *Journal of Digital Contents Society*, Vol. 25, No. 12, pp. 3707-3714.
- Daekyung Ilbo [Pohang] (2022). "2.5 Million Residents' Homes Swallowed by Flood." September 6.
- Gyeongsangbuk-do (2023). Basic river plan report for Naengcheon stream and one other stream.
- Hankyoreh [Seoul] (2022). "Eight missing due to underground parking lot

- flooding in Pohang apartment.” September 6.
- Hankyoreh [Seoul] (2023). “Flooded Osong underpass death toll rises to 9··18 casualties.” July 16.
- Huber, W. C., Dickinson, R. E. (1988). Storm Water Management Model-SWMM, version 4 user’s manual. US Environmental Protection Agency, Athens Georgia, USA.
- Hwang, D., Kang, T., Jin, Y., and Lee, S. (2024). “Simulation of compound flooding using TUFLOW’s 1D-2D coupling features.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 57, No. 7, pp. 451-460.
- Hwang, S. H., Yoon, J., Kang, N., and Kim, S. (2025). “Development of rainfall forecasts merging method for flood forecasting lead time.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 25, No. 1, pp. 39-48.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). *Climate Change 2021 The Physical Science Basis*, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Jang, G. S. (2008). An assessment of flood conveyance capacity of urban drainage network using XP-SWMM. Master’s Thesis, University of Inha.
- Jeonkukmaeil Newspaper [Seongnam] (2023). “Dongjak-gu activates storm and flood damage response system··Recovery of areas damaged by flood completed.” June 13.
- JoongAng Ilbo [Seoul] (2022). “A building that had been intact tilts in a waterbomb··Pohang shocked as Hinnamnor scratches through.” September 6.

- Kang, T., Lee, S., Jung, T., and Oh, J. H. (2010). "Inundation analysis of Suyoung.Mangmi lowland area using SWMM and FLUMEN." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 5, pp. 149-158.
- KBS News (2022). Naengcheon caused disaster... Full-scale discussion on disaster prevention measures, accessed 14 June 2025, <<https://news.kbs.co.kr/news/pc/view/view.do?ncd=5556789>>.
- Kim, H. I., Han, K. Y., and Lee, J. Y. (2020). "Prediction of urban flood extent by LSTM model and logistic regression." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 40, No. 3, pp. 273-283.
- Kim, H. I., Lee, Y. S., and Kim, B. H. (2021). "Real-time flood prediction applying random forest regression model in urban areas." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. S-1, pp. 1119-1130.
- Kim, J., Lee, W. (2015). "Flood inundation analysis in urban area using Xp-SWMM." *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 16, No. 1, pp. 29-36.
- Kim, J. P., Yoon, S. K., Kim, G., and Moon, Y. I. (2015). "Application of very short-term rainfall forecasting to urban water simulation using TREC method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 5, pp. 409-423.
- Kim, J. W., Boo, K. O., Choi, J. T., and Byeon, Y. H. (2018). *100 Years of Climate Change on the Korean Peninsula*. Government Publications Registration No. 11-1360620-000132-01, National Institute of Meteorological Sciences, pp. 16-19.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2015), Korea, accessed 25

- May 2025, <<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>>.
- Lee, C. H., Han, K. Y., and Choi, K. H. (2006). “DEM based urban inundation analysis model linked with SWMM.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 5, pp. 441-452.
- Lee, S., Jung, T., Lee, J. M., Lee, K. S. (2010). Lecture note for The 3rd SWMM-GE workshop.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS) (2016). Korea, accessed 25 June 2025, <<https://www.safekorea.go.kr/idsiSFK/neo/main/main.html>>.
- Moriiasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.” *Transactions of the ASABE*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
- Nate News [Seoul] (2025). “Gangnam-gu, mobilizes full effort for summer storm and flood damage response.” May 28.
- Nocut News [Seoul] (2022a). “What to do when your home floods?…Turn off the power and evacuate barefoot.” August 9.
- Nocut News [Seoul] (2022b). “Hinnamnor hits hard…Flood advisory issued for Hyeongsan River basin in Pohang and Gyeongju.” September 6.
- Park, H. J., Park, S. R., Kang, C. Y., Park, S. Y., Yang, C. Y., Ha, J. C., Kim, J. H., Yoon, S. J., Oh, S. M., Park, J. H., Koo, B. Y., Choi, S. B., Cho, I. H., Kim, M. K., Cho, J. H., and Won, D. J. (2025). *Verification of the 2024 Numerical Weather Prediction System*. Government Publications Registration No. 11-1360709-100013-10, Korea Meteorological Administration Numerical Modeling Center, Korea, pp.

2-10.

Park, J., Kang, T., and Lee, S. (2017). "Evaluation of accuracy depending on pipe network density in urban flood inundation analysis using the SWMM." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 1, pp. 71-78.

Pohang-si (2020) Comprehensive plans for maintaining small rivers.

Shin, J. Y., Lim, S. M., Kim, J. H., and Kim, T. W. (2014). "Analysis of urban flood damage characteristics using inland flood scenarios and flood damage curve." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 1, pp. 291-302.

Shon, T. S., Kang, D. H., Jang, J. K., and Shin, H. S. (2010). "A study of assessment for internal inundation vulnerability in urban area using SWMM." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 4, pp. 105-117.

Statistics Korea (2024). Urbanization phenomenon as seen from a statistical regional classification system. Press release. February 26.

Sun, D. K. (2021). Sensitivity analysis of XP-SWMM for inundation analysis in coastal area. Master's thesis, Pukyong National University, Korea.

WBM Oceanics (2018). TUFLOW classic/HPC user manual. user manual, Brisbane, Australia.

Xu, K., Han, Z., Xu, H., and Bin, L. (2023). "Rapid prediction model for urban floods based on a light gradient boosting machine approach and hydrological-hydraulic model." *International Journal of Disaster Risk Science*, Vol. 14, No. 1, pp. 79-97.

Yonhap News [Seoul] (2022a). “Pohang market and lodging flooded, isolating residents.” September 6.

Yonhap News [Seoul] (2022b). “Flooding of urban streams in many parts of Pohang…Flood Damage Widespread.” September 6.

Yoon, S. S., Bae, D. H., and Choi, Y. J. (2014). “Urban Inundation Forecasting Using Predicted radar Rainfall: Case Study.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 3, 117-126.





부 록 목 차

A. 종관기상관측 지점별 일 합계 강수량의 순위값(제3장 관련)

A.1 서울(108) 지점의 일 합계 강수량 및 발생일

A.2 부산(159) 지점의 일 합계 강수량 및 발생일

A.3 인천(112) 지점의 일 합계 강수량 및 발생일

A.4 대구(143) 지점의 일 합계 강수량 및 발생일

A.5 대전(133) 지점의 일 합계 강수량 및 발생일

A.6 광주(156) 지점의 일 합계 강수량 및 발생일

A.7 울산(152) 지점의 일 합계 강수량 및 발생일

A.8 수원(119) 지점의 일 합계 강수량 및 발생일

A.9 창원(155) 지점의 일 합계 강수량 및 발생일

A.10 제주(184) 지점의 일 합계 강수량 및 발생일

A.11 포항(138) 지점의 일 합계 강수량 및 발생일

Table A.1 Daily total precipitation and dates of occurrence at Seoul station.

Rank	Station		Date of occurrence	Daily total precipitation (mm)
	Number	Region		
1	108	Seoul	2022-06-30	176.2
2	108	Seoul	2022-08-08	129.6
3	108	Seoul	2024-07-18	128.8
4	108	Seoul	2022-08-09	123.1
5	108	Seoul	2022-09-05	120.0
6	108	Seoul	2022-07-13	114.5
7	108	Seoul	2022-06-23	103.0
8	108	Seoul	2024-07-17	98.8
9	108	Seoul	2023-07-13	91.6
10	108	Seoul	2023-08-10	86.1
11	108	Seoul	2024-07-22	79.9
12	108	Seoul	2021-08-31	77.4
13	108	Seoul	2022-10-03	76.0
14	108	Seoul	2023-07-14	72.7
15	108	Seoul	2021-09-21	68.1
16	108	Seoul	2021-07-19	67.4
17	108	Seoul	2022-08-19	66.1
18	108	Seoul	2024-07-02	65.1
19	108	Seoul	2023-06-29	63.8
20	108	Seoul	2021-08-21	62.8
21	108	Seoul	2023-07-04	61.8
22	108	Seoul	2021-07-03	60.0
23	108	Seoul	2023-07-11	58.3
24	108	Seoul	2022-11-12	57.9
25	108	Seoul	2023-08-29	54.8
26	108	Seoul	2024-09-20	54.5
27	108	Seoul	2022-08-03	51.1
28	108	Seoul	2023-04-05	50.3
29	108	Seoul	2024-05-05	48.3
30	108	Seoul	2023-07-09	47.5

Table A.2 Daily total precipitation and dates of occurrence at Busan station.

Rank	Station		Date of occurrence	Daily total precipitation (mm)
	Number	Region		
1	159	Busan	2024-09-21	378.5
2	159	Busan	2023-07-16	259.2
3	159	Busan	2024-07-24	176.3
4	159	Busan	2021-08-25	146.2
5	159	Busan	2021-07-07	137.5
6	159	Busan	2023-07-18	130.3
7	159	Busan	2021-07-06	121.3
8	159	Busan	2023-09-01	117.4
9	159	Busan	2023-08-10	108.9
10	159	Busan	2024-10-22	105.7
11	159	Busan	2022-04-26	101.8
12	159	Busan	2021-08-21	99.1
13	159	Busan	2023-05-06	98.9
14	159	Busan	2023-09-16	85.5
15	159	Busan	2022-03-26	80.3
16	159	Busan	2021-08-23	79.7
17	159	Busan	2023-01-13	77.1
18	159	Busan	2023-07-12	76.4
19	159	Busan	2022-09-06	69.2
20	159	Busan	2024-06-29	68.9
21	159	Busan	2021-07-04	66.2
22	159	Busan	2024-02-19	63.5
23	159	Busan	2022-07-18	63.1
24	159	Busan	2023-09-17	59.9
25	159	Busan	2023-08-24	58.3
26	159	Busan	2024-04-03	58.1
27	159	Busan	2023-03-23	56.0
28	159	Busan	2023-08-09	55.1
29	159	Busan	2024-07-14	54.9
30	159	Busan	2024-05-05	53.1

Table A.3 Daily total precipitation and dates of occurrence at Incheon station.

Rank	Station		Date of occurrence	Daily total precipitation (mm)
	Number	Region		
1	112	Incheon	2022-08-08	207.8
2	112	Incheon	2022-07-13	168.0
3	112	Incheon	2022-08-02	148.2
4	112	Incheon	2022-06-30	126.1
5	112	Incheon	2024-07-18	124.9
6	112	Incheon	2022-08-09	113.1
7	112	Incheon	2023-07-13	109.9
8	112	Incheon	2022-09-05	95.5
9	112	Incheon	2022-06-23	92.3
10	112	Incheon	2021-08-31	82.7
11	112	Incheon	2023-08-23	81.0
12	112	Incheon	2023-07-23	79.0
13	112	Incheon	2021-09-21	74.6
14	112	Incheon	2023-08-10	70.5
15	112	Incheon	2024-10-18	67.4
16	112	Incheon	2024-08-21	66.3
17	112	Incheon	2023-07-04	63.8
18	112	Incheon	2021-08-21	59.6
19	112	Incheon	2024-07-02	57.8
20	112	Incheon	2024-06-29	57.7
21	112	Incheon	2022-10-03	57.1
22	112	Incheon	2024-09-20	56.9
23	112	Incheon	2024-07-17	52.7
24	112	Incheon	2021-07-03	52.7
25	112	Incheon	2022-08-03	51.1
26	112	Incheon	2024-05-05	51.0
27	112	Incheon	2022-11-12	47.7
28	112	Incheon	2023-05-06	47.5
29	112	Incheon	2023-08-11	46.6
30	112	Incheon	2024-07-22	45.0

Table A.4 Daily total precipitation and dates of occurrence at Daegu station.

Rank	Station		Date of occurrence	Daily total precipitation (mm)
	Number	Region		
1	143	Daegu	2024-07-09	191.3
2	143	Daegu	2023-05-29	100.8
3	143	Daegu	2023-08-10	93.4
4	143	Daegu	2024-09-21	87.6
5	143	Daegu	2022-09-06	81.1
6	143	Daegu	2023-07-18	74.2
7	143	Daegu	2021-08-24	69.0
8	143	Daegu	2024-07-10	65.7
9	143	Daegu	2024-08-08	58.0
10	143	Daegu	2023-08-30	54.9
11	143	Daegu	2023-08-31	51.4
12	143	Daegu	2023-06-27	48.0
13	143	Daegu	2023-07-14	47.7
14	143	Daegu	2023-07-11	46.5
15	143	Daegu	2023-05-05	44.5
16	143	Daegu	2023-07-07	43.9
17	143	Daegu	2023-08-09	41.0
18	143	Daegu	2021-09-01	40.7
19	143	Daegu	2022-08-16	39.8
20	143	Daegu	2021-07-07	39.7
21	143	Daegu	2023-06-30	39.0
22	143	Daegu	2023-09-20	36.6
23	143	Daegu	2023-08-24	36.4
24	143	Daegu	2022-07-18	34.0
25	143	Daegu	2023-05-06	33.9
26	143	Daegu	2023-06-26	33.2
27	143	Daegu	2022-06-24	32.4
28	143	Daegu	2022-06-05	32.2
29	143	Daegu	2022-09-05	31.7
30	143	Daegu	2023-12-15	31.5

Table A.5 Daily total precipitation and dates of occurrence at Daejeon station.

Rank	Station		Date of occurrence	Daily total precipitation (mm)
	Number	Region		
1	133	Daejeon	2023-07-14	221.8
2	133	Daejeon	2022-08-10	192.9
3	133	Daejeon	2023-09-20	152.7
4	133	Daejeon	2023-08-10	143.3
5	133	Daejeon	2024-07-08	137.5
6	133	Daejeon	2024-09-21	131.2
7	133	Daejeon	2023-07-15	105.6
8	133	Daejeon	2024-07-10	88.6
9	133	Daejeon	2022-08-20	83.6
10	133	Daejeon	2023-05-05	83.3
11	133	Daejeon	2023-07-04	80.2
12	133	Daejeon	2023-07-18	73.0
13	133	Daejeon	2023-07-07	68.7
14	133	Daejeon	2021-08-23	65.0
15	133	Daejeon	2023-09-16	58.9
16	133	Daejeon	2022-08-11	58.2
17	133	Daejeon	2022-07-18	57.4
18	133	Daejeon	2024-07-02	57.0
19	133	Daejeon	2024-05-05	55.4
20	133	Daejeon	2023-06-26	54.5
21	133	Daejeon	2021-09-01	52.4
22	133	Daejeon	2023-06-29	50.8
23	133	Daejeon	2023-12-15	47.0
24	133	Daejeon	2022-09-05	46.5
25	133	Daejeon	2024-07-16	45.6
26	133	Daejeon	2024-09-20	45.6
27	133	Daejeon	2023-08-09	45.4
28	133	Daejeon	2024-06-29	45.1
29	133	Daejeon	2021-08-21	44.9
30	133	Daejeon	2023-08-30	44.4

Table A.6 Daily total precipitation and dates of occurrence at Gwangju station.

Rank	Station		Date of occurrence	Daily total precipitation (mm)
	Number	Region		
1	156	Gwangju	2023-06-28	153.3
2	156	Gwangju	2023-06-27	130.2
3	156	Gwangju	2021-07-06	119.5
4	156	Gwangju	2023-07-24	100.3
5	156	Gwangju	2023-05-05	95.7
6	156	Gwangju	2023-08-10	92.4
7	156	Gwangju	2023-07-11	87.6
8	156	Gwangju	2024-09-20	87.1
9	156	Gwangju	2023-08-18	74.5
10	156	Gwangju	2023-06-26	74.3
11	156	Gwangju	2023-07-17	66.6
12	156	Gwangju	2023-07-18	64.7
13	156	Gwangju	2024-05-05	61.9
14	156	Gwangju	2024-06-30	61.2
15	156	Gwangju	2024-09-21	60.2
16	156	Gwangju	2023-07-07	60.0
17	156	Gwangju	2021-08-06	59.4
18	156	Gwangju	2023-08-23	58.9
19	156	Gwangju	2023-07-15	56.3
20	156	Gwangju	2023-07-16	54.2
21	156	Gwangju	2022-07-18	54.1
22	156	Gwangju	2023-07-14	51.6
23	156	Gwangju	2022-09-05	50.7
24	156	Gwangju	2024-07-16	49.7
25	156	Gwangju	2023-07-23	48.0
26	156	Gwangju	2021-09-01	45.7
27	156	Gwangju	2021-08-02	45.3
28	156	Gwangju	2023-05-29	43.7
29	156	Gwangju	2024-06-29	43.3
30	156	Gwangju	2023-09-15	42.8

Table A.7 Daily total precipitation and dates of occurrence at Ulsan station.

Rank	Station		Date of occurrence	Daily total precipitation (mm)
	Number	Region		
1	152	Ulsan	2024-09-21	158.4
2	152	Ulsan	2023-08-10	146.3
3	152	Ulsan	2021-08-21	122.4
4	152	Ulsan	2022-09-06	110.4
5	152	Ulsan	2021-08-24	108.3
6	152	Ulsan	2023-08-24	105.3
7	152	Ulsan	2023-07-18	86.7
8	152	Ulsan	2022-07-18	69.4
9	152	Ulsan	2023-05-06	62.4
10	152	Ulsan	2023-09-17	61.9
11	152	Ulsan	2023-09-21	61.5
12	152	Ulsan	2024-07-09	61.3
13	152	Ulsan	2021-07-06	60.4
14	152	Ulsan	2023-05-29	59.0
15	152	Ulsan	2024-07-14	58.4
16	152	Ulsan	2024-10-22	58.3
17	152	Ulsan	2022-09-19	56.4
18	152	Ulsan	2022-06-05	53.8
19	152	Ulsan	2023-07-16	53.3
20	152	Ulsan	2022-04-26	53.0
21	152	Ulsan	2024-08-20	51.4
22	152	Ulsan	2022-09-05	51.1
23	152	Ulsan	2023-03-23	50.8
24	152	Ulsan	2023-12-15	50.6
25	152	Ulsan	2023-12-11	49.6
26	152	Ulsan	2024-04-03	49.4
27	152	Ulsan	2024-07-02	48.5
28	152	Ulsan	2022-06-27	47.9
29	152	Ulsan	2023-09-13	45.3
30	152	Ulsan	2023-07-07	43.8

Table A.8 Daily total precipitation and dates of occurrence at Suwon station.

Rank	Station		Date of occurrence	Daily total precipitation (mm)
	Number	Region		
1	119	Suwon	2022-06-30	285.0
2	119	Suwon	2022-08-09	192.8
3	119	Suwon	2024-07-18	151.9
4	119	Suwon	2022-07-13	139.1
5	119	Suwon	2022-08-08	129.4
6	119	Suwon	2022-09-05	120.4
7	119	Suwon	2024-09-20	94.8
8	119	Suwon	2023-08-10	91.6
9	119	Suwon	2023-07-23	86.3
10	119	Suwon	2022-08-11	83.7
11	119	Suwon	2023-07-14	80.8
12	119	Suwon	2024-06-22	72.8
13	119	Suwon	2024-09-21	72.4
14	119	Suwon	2021-09-01	70.9
15	119	Suwon	2022-06-23	65.0
16	119	Suwon	2023-07-13	64.5
17	119	Suwon	2024-07-02	62.7
18	119	Suwon	2023-07-18	60.7
19	119	Suwon	2023-06-29	58.6
20	119	Suwon	2022-08-03	55.5
21	119	Suwon	2024-10-18	55.0
22	119	Suwon	2022-08-30	54.7
23	119	Suwon	2023-11-06	54.5
24	119	Suwon	2022-06-15	52.7
25	119	Suwon	2024-07-23	50.9
26	119	Suwon	2024-08-21	50.4
27	119	Suwon	2023-07-11	49.6
28	119	Suwon	2023-05-06	46.8
29	119	Suwon	2024-05-05	45.5
30	119	Suwon	2022-06-29	45.2

Table A.9 Daily total precipitation and dates of occurrence at Changwon station.

Rank	Station		Date of occurrence	Daily total precipitation (mm)
	Number	Region		
1	155	Changwon	2024-09-21	397.7
2	155	Changwon	2023-08-10	190.2
3	155	Changwon	2021-08-21	168.2
4	155	Changwon	2021-07-07	152.7
5	155	Changwon	2021-07-06	148.7
6	155	Changwon	2023-05-05	136.5
7	155	Changwon	2021-08-23	131.8
8	155	Changwon	2024-09-20	131.7
9	155	Changwon	2023-09-16	128.0
10	155	Changwon	2023-08-24	119.7
11	155	Changwon	2023-07-16	117.9
12	155	Changwon	2022-09-06	97.9
13	155	Changwon	2024-05-05	94.9
14	155	Changwon	2024-10-22	88.2
15	155	Changwon	2022-03-26	85.9
16	155	Changwon	2023-07-18	83.0
17	155	Changwon	2022-07-18	81.4
18	155	Changwon	2024-06-29	75.0
19	155	Changwon	2024-02-19	74.3
20	155	Changwon	2022-04-26	69.3
21	155	Changwon	2023-07-07	69.0
22	155	Changwon	2024-03-28	67.6
23	155	Changwon	2023-08-09	64.1
24	155	Changwon	2023-04-05	62.6
25	155	Changwon	2023-01-13	62.6
26	155	Changwon	2022-08-24	56.4
27	155	Changwon	2024-04-03	56.3
28	155	Changwon	2023-07-14	54.8
29	155	Changwon	2022-06-05	54.8
30	155	Changwon	2024-07-02	54.4

Table A.10 Daily total precipitation and dates of occurrence at Jeju station.

Rank	Station		Date of occurrence	Daily total precipitation (mm)
	Number	Region		
1	184	Jeju	2024-11-01	238.4
2	184	Jeju	2022-09-05	174.0
3	184	Jeju	2021-07-31	155.3
4	184	Jeju	2021-09-17	155.0
5	184	Jeju	2022-08-17	94.3
6	184	Jeju	2024-06-20	92.9
7	184	Jeju	2021-09-14	89.6
8	184	Jeju	2023-06-25	80.9
9	184	Jeju	2024-06-27	74.7
10	184	Jeju	2023-05-04	74.0
11	184	Jeju	2022-06-24	71.4
12	184	Jeju	2023-06-30	68.8
13	184	Jeju	2021-09-16	63.8
14	184	Jeju	2024-07-10	61.7
15	184	Jeju	2023-08-23	58.2
16	184	Jeju	2021-08-14	57.7
17	184	Jeju	2023-07-22	52.0
18	184	Jeju	2023-05-03	50.7
19	184	Jeju	2022-09-02	49.3
20	184	Jeju	2022-07-30	48.3
21	184	Jeju	2023-08-30	47.7
22	184	Jeju	2022-07-31	47.3
23	184	Jeju	2022-06-05	45.0
24	184	Jeju	2023-07-08	43.5
25	184	Jeju	2023-09-16	43.0
26	184	Jeju	2024-01-20	41.1
27	184	Jeju	2023-07-03	40.5
28	184	Jeju	2023-07-18	38.2
29	184	Jeju	2021-09-02	37.8
30	184	Jeju	2024-06-29	36.6

Table A.11 Daily total precipitation and dates of occurrence at Pohang station.

Rank	Station		Date of occurrence	Daily total precipitation (mm)
	Number	Region		
1	138	Pohang	2022-09-06	342.4
2	138	Pohang	2023-08-10	154.2
3	138	Pohang	2021-08-24	127.1
4	138	Pohang	2024-07-09	123.4
5	138	Pohang	2024-09-21	89.9
6	138	Pohang	2024-07-10	74.8
7	138	Pohang	2023-07-18	74.1
8	138	Pohang	2023-05-29	66.6
9	138	Pohang	2023-08-24	64.3
10	138	Pohang	2021-09-01	56.8
11	138	Pohang	2021-07-08	56.6
12	138	Pohang	2021-07-07	56.2
13	138	Pohang	2021-10-09	53.9
14	138	Pohang	2023-07-07	53.6
15	138	Pohang	2022-11-22	52.7
16	138	Pohang	2023-12-15	51.2
17	138	Pohang	2021-08-14	50.7
18	138	Pohang	2021-10-06	49.3
19	138	Pohang	2022-09-02	47.9
20	138	Pohang	2021-08-17	43.9
21	138	Pohang	2021-09-30	41.1
22	138	Pohang	2022-08-30	40.2
23	138	Pohang	2023-03-23	38.2
24	138	Pohang	2022-09-19	36.7
25	138	Pohang	2022-09-05	36.3
26	138	Pohang	2021-09-29	36.1
27	138	Pohang	2022-08-20	35.1
28	138	Pohang	2021-08-18	35.0
29	138	Pohang	2023-06-26	34.9
30	138	Pohang	2022-06-24	34.8

감사의 글

2022년 3월, 수자원시스템 연구실에 학부 연구생으로 들어가고 싶어 이상호 교수님 방문 앞을 쭈뼛거리며 서성이던 학생이, 대학원까지 진학하여 본 논문을 완성하고 어느덧 졸업을 앞두고 있습니다. 논문에 도움을 주신 모든 분의 삶에 늘 행운이 가득하길 바라며, 짧은 지면을 통해서라도 감사하는 마음을 꼭꼭 눌러 담아 전하려 합니다.

우선, 항상 뒤에서 묵묵히 제가 하는 일을 믿고 응원해 주시며 아낌없이 지원해 주신 부모님께 진심으로 감사드립니다. 저에 대한 부모님의 변함없는 믿음과 헌신 덕분에 끝까지 힘을 낼 수 있었습니다. 앞으로도 그 믿음에 보답하여 자랑스러운 아들이 되겠습니다.

학부 연구생으로 수자원 시스템 연구실에 들어온 이후 대학원 졸업까지 3년이 넘는 기간 동안 학문적으로 큰 가르침과 경제적으로 지원을 해주셨던 저의 지도교수님이신 이상호 교수님께 진심으로 감사드리며 존경합니다. 항상 덤벼거리며 꼼꼼하지 못해 교수님의 기대에 미치지 못하는 모습을 자주 보여드린 것 같아 늘 죄송한 마음입니다. 그런 저에게 아낌없는 조언과 지도를 해주신 덕분에 여기까지 올 수 있었습니다. 또한, 바쁘신 와중에도 제 학위논문을 하나하나 세심하게 짚어가며 지도해 주신 덕분에 본 논문을 완성할 수 있었습니다. 교수님의 가르침과 조언을 잊지 않고 늘 마음에 새기며, 앞으로 사회에 나가서도 교수님의 제자로서 자부심을 가지고, 언제나 최선을 다하겠습니다. 아울러, 바쁜 일정 속에서도 흔쾌히 제 학위 논문을 검토해 주시고 심사를 맡아주신 김수한 교수님과 김열우 교수님께 진심으로 감사드립니다.

학부 연구생 시절 처음 연구실에 들어와 모든 것이 낯설고 서툴렀던 저에게 연구실에 잘 적응할 수 있도록 이끌어 주시고, 한국농어촌공사로 가

시기 전까지 1년 반이라는 시간 동안 좋은 추억을 만들어주신 진영규 박사님께 감사드립니다. 그리고 연구실에 들르실 때마다 늘 따뜻하게 격려해 주시고 조언을 아끼지 않으셨던 정태훈 선배님께 감사의 마음을 전합니다. 또한, 연구실에서 대학원 생활을 함께했고, 혼자 연구실에 남아 있는 저에게 졸업 후에도 격려와 조언을 해주었던 선배 황동규의 앞날에 늘 행운이 가득하길 바랍니다. 아울러 학부 시절부터 대학원까지 함께하며 서로에게 많은 힘이 되어주었고, 먼저 졸업한 후에도 한결같이 응원해줬던 동기 윤선민에게 고마움을 전합니다.

연구실에 있는 동안 다양한 작업을 함께 하면서 잦은 실수를 반복하고 부족함이 많았던 저에게 쓴소리 한번 하지 않으시고 하나부터 열까지 차근 차근 알려 주시며 수많은 조언을 아끼지 않으셨던 강태욱 박사님께 진심으로 감사드립니다. 대학원 생활을 하며, 진로와 연구, 논문에 대한 걱정으로 흔들릴 때마다, 박사님은 가장 가까이에서 함께 고민해 주시고 따뜻하게 이끌어 주시는 든든한 선배이자 진심으로 의지할 수 있는 버팀목이 되어 주셨습니다.

감사한 분들을 생각하며 글을 쓰는 이 순간, 평소와 다름없이 연구실의 밤을 지키고 있지만, 오늘 마주한 새벽의 어스름은 유난히 낮설게 느껴집니다. 익숙해진 대학원 생활이 어느새 졸업이라는 끝을 향하고 있음을, 오늘의 낮설 속에서 비로소 실감하게 되는 것 같습니다. 부경대학교 토목공학과에 첫발을 디딘 뒤 학부 시절의 설렘부터 대학원 졸업까지 7년이라는 시간 동안 정말 많은 사람을 만나며 배움과 경험을 쌓았습니다. 때로는 주저앉고 싶었던 순간도 있었지만 많은 분의 격려와 가르침 덕분에 끝까지 걸어올 수 있었습니다. 저는 이제 이 시간을 자양분 삼아 사회라는 새로운 길에 첫걸음을 내딛으려 합니다. 지금의 제가 있기까지 크고 작은 도움을 주신 모든 분께 다시 한번 진심으로 감사드리며, 앞으로도 부끄럽지 않은

아들이자, 친구이자, 선후배이자, 제자가 되기 위해 끊임없이 성장하고 정진하겠습니다. 끝으로, 이제 저를 대신해 나래관의 밤을 지켜갈 부경대학교 토목공학과와 모든 대학원생 여러분께 응원의 마음을 전하며, 여러분의 대학원 생활에 언제나 값진 배움과 좋은 결과가 함께하길 바랍니다.

2025. 7.07

정철웅

