



## 단기 강우예측 정보를 이용한 도시하천 유출모의 적용

### Application of Urban Stream Discharge Simulation Using Short-term Rainfall Forecast

양유빈\* · 임창묵\* · 윤선권\*<sup>†</sup>

Yhang, Yoo Bin · Lim, Chang Mook · Yoon, Sun Kwon

#### Abstract

In this study, we developed real-time urban stream discharge forecasting model using short-term rainfall forecasts data simulated by a regional climate model (RCM). The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecasting System (CFS) data was used as a boundary condition for the RCM, namely the Global/Regional Integrated Model System (GRIMs)-Regional Model Program (RMP). In addition, we make ensemble (ESB) forecast with different lead time from 1-day to 3-day and its accuracy was validated through temporal correlation coefficient (TCC). The simulated rainfall is compared to observed data, which are automatic weather stations (AWS) data and Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA 3B43; 3 hourly rainfall with 0.25°×0.25° resolution) data over midland of Korea in July 26-29, 2011. Moreover, we evaluated urban rainfall-runoff relationship using Storm Water Management Model (SWMM). Several statistical measures (e.g., percent error of peak, percent error of volume, and time of peak) are used to validate the rainfall-runoff model's performance. The correlation coefficient (CC) and the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) are evaluated. The result shows that the high correlation was lead time (LT) 33-hour, LT 27-hour, and ESB forecasts, and the NSE shows positive values in LT 33-hour, and ESB forecasts. Through this study, it can be expected to utilizing the real-time urban flood alert using short-term weather forecast.

**Keywords:** CFS; GRIMs-RMP; Short-term rainfall Forecast; Urban discharge

#### 1. 서론

최근 도시지역의 국지성 집중호우에 따른 침수피해 발생의 빈도와 강도가 날로 증가하고 있어 집중호우 예측의 선형 시간 확보에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 매년 반복되고 있는 도시지역의 침수 피해를 줄이고 내수침수 위험을 최소화하기 위해서는 가용한 기상정보를 활용하여 사전에 강수를 예측하고 정보의 정확도 향상 연구 수행을 통한 홍수예·경보 시스템에 적용하는 방안이 대책으로 활용될 수 있을 것이다. 최근 중규모 모형을 이용하여 단기 혹은 계절 규모의 강수 모의에 대한 실험을 수행하여 그 사례에 대한 원인을 분석하고 민감도 실험 등을 통해 모형의 정확도를 개선하려는 선형 연구들은 있었으나 (Byun et al., 2011; Fiori et al., 2014; and Jiehua et al., 2015), 여름철 집중호우를 대상으로 실시간 예측 자료를 이용한 단기 강수예측 연구를 실시한 결과는 그리 많지 않은 실정이며, 더욱이 이러한 실시간 단기 예측 자료

를 이용하여 도시지역 침수 예·경보에 활용한 사례는 드물다.

지역기후모형을 이용하여 한반도 지역에 발생한 강수에 대한 최근 연구들을 살펴보면, Lee and Lee (2006)는 2003년 8월 23~25일 기간 동안 서울지역에서 나타난 집중호우와 대류성 강수에 의하여 2003년 7월 24~25일 기간 동안 우리나라 중·남부 지역에서 발생한 폭우 사례를 중심으로 WRF (Weather Research and Forecasting) 모형 기반의 강수 예측 실험을 실시하고, 적분 시간 간격에 따른 민감도를 분석하였다. Lee and Hong (2006)은 지형 효과가 강수 모의에 미치는 영향을 살펴보기 위해 2005년 6월 26~27일 기간 동안 우리나라 경기도 양동 지방에서 발생한 집중호우 사례에 대하여 NCEP/DOE (National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy) 재분석자료를 초기 및 경계조건으로 사용하여 WRF v2.1.2 모형의 강수 모의실험을 수행하였다. Byun et al. (2011)은 KAF-WRF (Korea Air Force - Weather Research and Forecasting) 모형을 이용하여 2009년 여름철 (6~8월) 해면 기압과 500 hPa의 온도, 지위고도, 바람장과 더불어 강수에 대한 모의 실험을 실시하였고, AWS에서 관측된 강수 자료와 비교 및 검증함으로써 예측의 정확성을 분석하였다.

또한, 한반도를 제외한 다른 지역에 대한 연구로 Yuan et al. (2012)은 WRF 모형을 기반으로 NCEP Climate Forecast System (CFS; Saha et al., 2006) 예측자료를 이용하여 중국

\* Climate Research Department, APEC Climate Center

† Corresponding author

Tel.: +82-51-745-3990 Fax: +82-51-745-3999

E-mail: skyoon@apcc21.org

Received: October 24, 2016

Revised: January 2, 2017

Accepted: February 28, 2017

대륙에서의 1982~2008년 겨울철(12~2월) 강수에 대한 앙상블 상세 계절 예측을 수행하였으며, CPC (Climate Prediction Center) 일 강수자료를 이용하여 실험 결과와의 비교 및 검증 을 실시하고 물리과정 등에 대한 민감도와 그 영향을 연구하였다. Ahasan and Khan (2013)은 2010년 7월 29일 북동 파키스탄에서 발생한 집중호우에 대하여 NCEP FNL (Global Final Analysis) 재분석자료를 경계조건으로 WRF 모형에서의 강수 예측 실험을 실시하였고, PMD (Pakistan Meteorological Department)의 관측 자료와 Mateo-5 위성 구름 영상을 통한 비교 및 검증과 더불어 해면기압과 상하층 바람장 및 발산장, 습도, 연직 바람 시어, 하층 상대 소용돌이도, CAPE (Convective Available Potential Energy) 및 CINE (Convective Inhibition Energy) 등을 분석하여 역학적 강수 구조를 파악하였다. Ji et al. (2014)은 WRF 모형의 다중 물리과정 앙상블을 통해 ECLs (East Coast Lows)라 알려진 폭풍계의 8가지 사례에 대하여 강수를 예측하고, 각 물리과정 앙상블에 대한 민감도를 분석하였다. Fiori et al. (2014)은 2011년 11월 리구리아해와 제노바에 걸쳐 나타난 집중호우 사례를 대상으로 ARW-WRF 모형을 이용한 강수를 모의하였고, 미세물리과정과 적은 모수화 방안 등에 따른 민감도 평가 및 ICPD (Italian Civil Protection Department) 관측장을 통한 비교 검증을 수행하였다. Jiehua et al. (2015)은 WRF와 CCSM4 (Community Climate System

Model version 4.0) 모형을 이용하여 중국의 1998년 여름철 강수에 대한 역학적 상세 예측 실험을 실시하였다.

이와 같이 중규모 모형을 이용하여 단기 혹은 계절 규모의 강수 모의에 대한 실험에 대한 선행 연구들은 있었으나, 실제 실시간 예측 자료를 이용한 단기 예측 연구들은 많지 않다. 더욱이 이러한 실시간 단기 예측 자료를 이용한 도시 유역에서의 홍수예측 적용관련 연구사례는 극히 드문 실정이다. 따라서 본 연구에서는 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)에서 제공하는 전 지구 실시간 기상예측 자료인 CFS를 경계조건으로 하여 Global/Regional Integrated Model System (GRIMs) - Regional Model Program (RMP) 단기 기상 예측 시스템을 통해 서울 지역의 강수량을 예측하고, 한반도 유역의 집중호우 적용성 평가를 수행하였다. 단기 강우 시뮬레이션 결과의 강우예측 정확도 검증을 위하여 2011년 7월 집중호우 사례연구를 통한 지상기상자동관측시스템 (Automatic Weather System, AWS)의 분단위 강우관측 결과와 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 위성관측 자료와 비교·분석 하였으며, 서울특별시 우이천 유역을 대상으로 도시 유출 모의의 적용을 통한 선행시간 확보로 홍수 예·경보 가능성을 평가하였다. 본 연구의 전체적인 연구 흐름도를 정리하면 다음 Fig. 1과 같다.

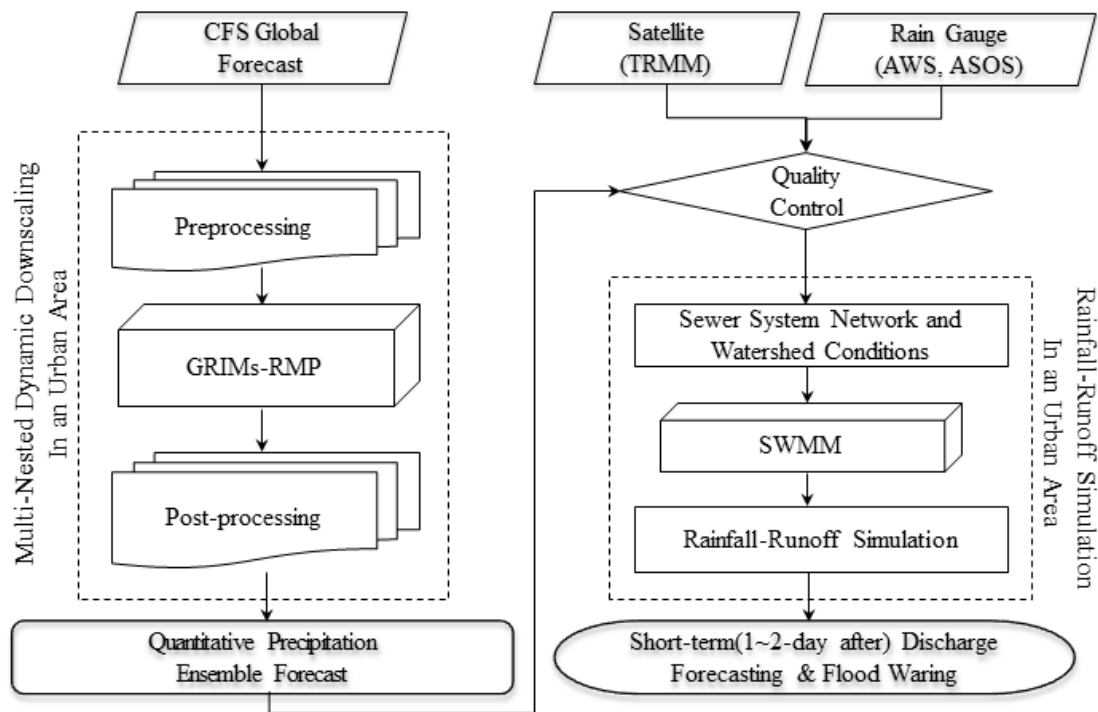


Fig. 1 Flow chart of study

## II. 연구 자료 및 방법

### 1. 대상 유역

본 연구의 대상유역은 서울특별시 북동쪽에 위치한 우이천 유역이며, 유역면적 27.05 km<sup>2</sup>, 유로연장 11.75 km의 전형적인 도시하천 유역이다. 이 지역은 지난 1998년, 2001년, 2003년, 2010년, 그리고 2011년에 침수피해가 있었던 곳으로 도시 침수 재해관리를 위하여 지속적인 모니터링이 필요한 지역이다. 우이천 유역의 유역경계는 서쪽으로는 북한산, 북쪽으로 도봉산, 남쪽으로는 성북구와 경계를 이루고 있으며, 유역의 분수령은 서·북측으로 경기도 의정부시와 경계를 이루는 북한산(EL. 386 m), 도봉산(EL. 721 m)에서 각 유역의 분수령을 형성하고 있다. 하천의 유로형상은 대체적으로 수지상이며, 하류로 진행함에 따라 유역폭이 좁아 대부분의 유역이 상류에 편중되어 있으며, 일부 구간은 S자형의 사행을 이루고 있으나 대체로 굴곡이 없는 구간이다. 우이천은 대동천, 가오천, 화계천

의 지류와 각각 만나 중랑천으로 흘러 들어가는 하천으로서 중랑천 제1지류이다. Fig. 2 (a)와 (b)는 적용대상유역의 위치도 및 소배수분구 하수관거 시스템 배수체계도를 나타내고 있다.

### 2. 사용 자료

#### 가. AWS 자료

기상청에서 운영하는 무인자동기상관측 장비 (Automatic Weather Station, AWS)는 우리나라 전역 477개 지점에 대해서 상세한 기상관측 정보를 매분 단위로 제공하고 있다. 본 연구에서는 도시지역에 비교적 집중하여 분포하고 있는 기상청 AWS 강우관측 자료를 단기 강우예측 결과의 검증용으로 사용하였으며, 적용대상유역의 면적평균 강우량을 대표할 수 있는 4곳 (도봉: 406, 노원: 407, 동대문: 408, 성북: 414)의 AWS관측 지점을 선정하였다.

Fig. 3은 우이천 유역 인근 AWS 관측 지점 위치도와 티센 (Thiessen) 폴리곤을 작성한 결과이며, 2011년 7월 27일 집중

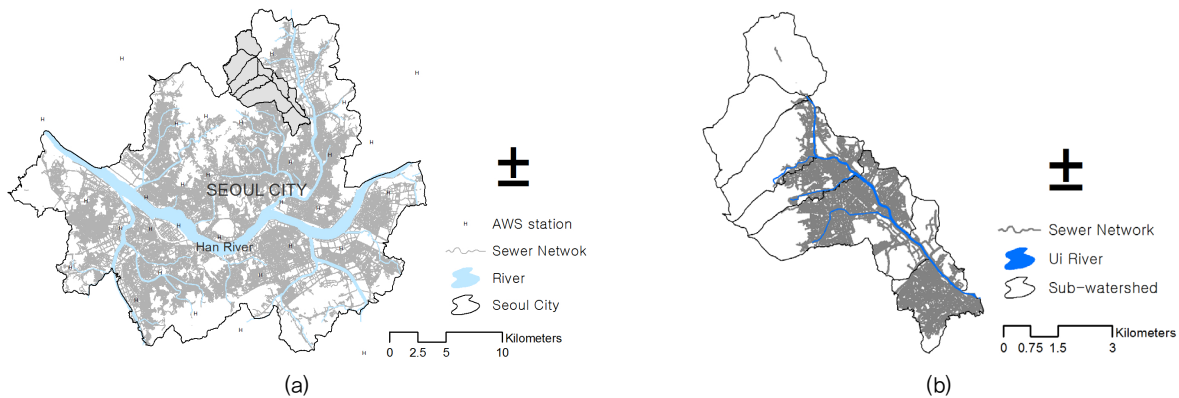


Fig. 2 Study area of the Uicheon watershed: (a) shows location of Uicheon stream, and (b) shows drainage sewer system

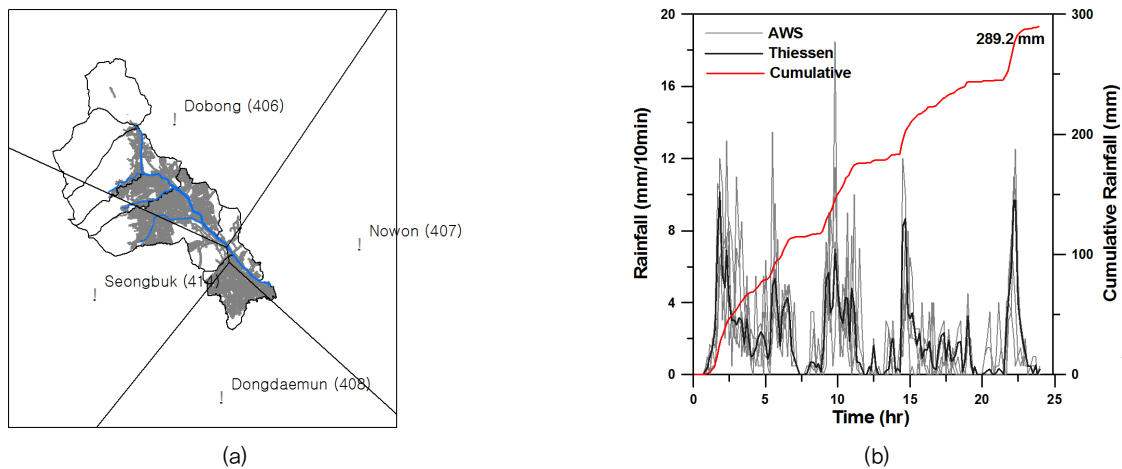


Fig. 3 Thiessen polygon network and observed areal rainfall hyetograph over Uicheon basin: (a) shows AWS locations and their Thiessen polygon network, and (b) shows observed AWS rainfall in Jul-27, 2011

호우 당시 10분 단위 AWS면적 평균 강우량과 누가우량을 나타낸 결과이다. 우이천 유역 면적평균 강우량을 대표할 수 있는 티센 면적 가중치는 도봉 (406) 지점이 0.602로 가장 크게 나타났으며, 성북구 (414) 0.274, 동대문 (408) 0.075, 노원 (407) 0.049 순으로 분석되었다 (Table 1).

나. TRMM 자료

Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 위성에 기반한 TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA 3B43; 3 hourly rainfall with 0.25°×0.25° resolution)는 현재 가장 널리 이용되는 위성으로부터 산출된 전구 (50S-50N) 강수량 자료이다 (Huffman et al., 1997). 강수량 산출 과정에서 사용되는 TRMM microwave imager (TMI)의 육지 강수량 산출 알고리즘이 주로 미국 중부에서의 데이터베이스를 토대로 개발되어 한국에서 약간의 오차를 가지고 있기는 하지만 (Ryu et al., 2011), TMPA의 산출 과정 중 지상관측지점 (rain gage)에 스케일링 하는 과정이 있으므로 다른 여러 강수 자료와 비교했을 때 TMPA가 지상관측자료와 가장 유사한 값을 보였다 (Sohn et al., 2010). 따라서, 본 연구에서는 예측된 강수를 검증하기 위해 TMPA 강수 자료를 이용하였다.

다. CFS 자료

Climate Forecast System (CFS)는 전 지구의 해양과 지면, 그리고 대기의 상호작용을 역학적으로 모의하는 시스템이다. 이 모형은 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)에서 여러 연구자들에 의해 개발되었으며, 다양한 기상변수들에 대하여 0.5° (약 56 km) 해상도의 3시간 단위 정보를 실시간으로 약 6개월 예측 까지 제공하고 있다(<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/climate-forecast-system-version2-cfsv2>). 본 연구에서는 CFS를 지역기후모형의 초기 및 경계조건으로 사용하여 한반도 영역에 대한 평가를 실시하였으며, 지역기후 모형을 통하여 모의된 결과는 TRMM 관측 자료와 비교·검증하였다. 이는 실시간 단기기상예측 정보를 활용한 도시 홍수 예·경보 시스템 구축의 입력 자료로 활용이 가능하다.

3. 사용모형

가. GRIMs-RMP 모형

단기 기상예측을 위하여 사용된 Global/Regional Integrated Model System (GRIMs; Hong et al., 2013) 모형은 전구 모형과 지역 기후 모형이 한 시스템에 들어있는 Multi-Scale 모형

Table 1 Location of weather stations and their Thiessen's weighting

Station ID	Station Name	Longitude (dd)	Latitude (dd)	Altitude (EL, m)	Thiessen's Weighting
406	Dobong	127.0352	37.6633	56.0	0.602
407	Nowon	127.0894	37.6194	53.0	0.049
408	Dongdaemun	127.0501	37.5772	35.0	0.075
414	Seongbuk	126.9993	37.6105	127.0	0.274

Table 2 GRIMs-RMP physics package

Physical parameterization	V3.1
Deep convection	RAS
Shallow convection	Hong et al. (2012)
Cloud microphysics	Hong et al. (1998)
Longwave radiation	Chou et al. (1999)
Shortwave radiation	Chou and Lee (2005), Chou and Suarez (1999)
Cloudiness	Ham et al. (2009), Hong et al. (1998)
Vertical diffusion	Hong et al. (2006), Noh et al. (2003)
Stable boundary layer	Hong (2010)
Orographic gravity wave drag	Hong et al. (2008), Kim and Arakawa (1995)
Convective gravity wave drag	Jeon et al. (2010), Chun and Baik (1998)
Land surface layer	Yhang and Hong (2008a), Ek et al. (2003)
Ocean surface layer	Kim and Hong (2010)
Ozone chemistry	Prognostic

이며, 그 중 지역기후모형 (Regional Model Program; RMP)은 Hong and Leetmaa (1999)에 의하여 그 열개가 확립된 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Regional Spectral Model (RSM; Juang et al., 1997)에서 발전된 모형이다. GRIMs-RMP는 전구분광모형과 같은 역학 및 물리과정을 가지고 있어서 자원을 절약할 수 있으며 측면 경계 문제가 감소되는 장점을 가지고 있다 (Juang et al., 1997). 또한 Spectral 계산에 있어서 Perturbation Method (spectral filter)를 사용함으로써 경계자료의 Large-Scale 패턴은 유지하면서 고분해능 자료를 생산할 수 있다. 이러한 지역기후 수치모의는 역학적 Down-Scaling을 하는 방법으로 통계적 방법으로는 얻을 수 없는 중규모의 비선형 과정을 표현할 수 있으며, 같은 컴퓨팅 자원으로 원하는 지역의 고해상도 정보를 제공할 수 있다. 실험에 적용된 GRIMs-RMP의 물리과정은 Table 2와 같으며, 동아시아 지역에 대해 계절규모 (Yhang and Hong 2008a, Yhang and Hong, 2008b), 지역기후 시나리오 생산 (Lee et al., 2013), 집중호우와 같은 극한 기후값의 모의 (Lee and Hong, 2013)에서도 그 성능이 검증되었다.

GRIMs-RMP의 초기 및 경계조건으로는 실시간 다운로드 가능한 NCEP CFS 자료를 이용하였다. 실험 영역은 우리나라, 일본, 중국 일부를 포함한 동아시아 영역이며, 수평해상도는 12.5 km를 적용하였다. 실험기간은 2011년 7월 25일 00UTC 출발부터 6시간 간격으로 초기조건을 다르게 하여 선행시간

(Lead Time)에 따른 차이를 살펴보고자 하였다. 모든 실험은 2011년 7월 29일 00UTC까지 모의하였으며, 실험결과는 3시간 간격으로 생산되었다.

나. SWMM 모형

도시구역의 강우-유출 해석 시 우수관거 형태와 용량 등을 고려한 유출해석이 가능한 모형 선정이 중요하며, 도시하천의 홍수량 해석에는 주로 Storm Water Management Model (SWMM) 모형이 사용된다. 본 연구에서는 SWMM모형을 선정하여 구역의 배수계통도와 하수관망도, 토지피복도, 수치지형도 등을 종합적으로 고려하여 소유역 분할 및 모형 입력 자료를 구축하였다. 대상구역인 우이천 구역은 총 9개 배수분구 (우이1, 우이2, 수유1, 수유2, 쌍문2, 창동2, 장위, 월계1, 월계2)로 구성되어 있으며, 전체 구역에는 64개의 토출구가 존재하며, 이중 관경의 크기와 배수계통의 길이 등을 고려하여 총 46개의 유출구로 간략화하여 모형의 입력 자료를 구축하였다. 소유역 분할은 총 113개로 실시하였으며, 각 소유역별 관망자료는 서울특별시에서 제공하는 공공 하수도 관망도를 토대로 배수분구, 배수계통 및 배수유역을 구분하였다. 다만, 우이천 유역 말단에 해당하는 월계2 배수분구는 하수관거의 배수구조와 지형여건을 고려하여 일부 유역에서 제외하였다.

Fig. 4는 우이천 유역의 유출 분석을 위한 Runoff 블럭과

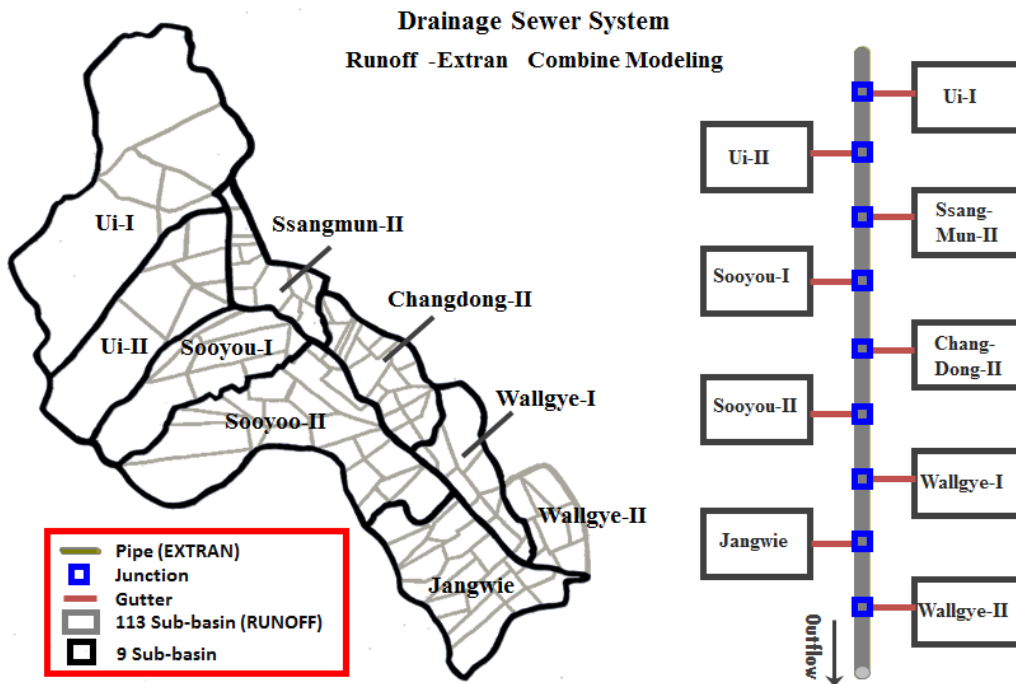


Fig. 4 Runoff-Extran Combined Drainage Sewer Network in the Uicheon Basin

Extran 블럭을 결합한 배수분구 모식도를 나타내며, 우이천 유역의 배수계통 현황과 소유역 분할 결과를 나타낸 결과도 같이 제시하였다. 우이천 유역의 시가화 면적은 1,387.69 ha 이며, 하수관거는 전체 길이 437,169 m이다. 이 중 419,509 m가 우수와 오수를 동시에 처리하는 합류식 관거로 이루어져 있으며, 분류식 관거는 우수관 1,524 m, 오수관 2,352 m로 전체 하수관거 길이에 비하여 짧고 거의 사용되지 않아 제외하였으며, 차집관거는 13,784 m를 사용되었다. 실제 강우 사상에 대한 유량측정 성과를 반영하여 우이천 유역에 구축된 SWMM 모형을 검·보정한 결과는 Kim et al. (2013)과 Yoon et al. (2016)의 연구에서 확인할 수 있으며, 본 논문에서는 따로 제시하지 않았다.

### III. 적용 결과

#### 1. 단기 강우 예측결과

Fig. 5는 선행시간 6시간 간격의 8개 모의실험 예측의 2011년 7월 27일 일누적 강수량을 나타낸 결과이다. 관측 데이터는 서울을 포함한 한반도 중부 지방에 많은 비를 나타내고 있다 (Fig. 5a). 7월 25일 00UTC 시작 실험 (Fig. 5b)과 25일 06UTC 시작 실험 (Fig. 5c), 26일 18UTC 시작 실험 (Fig. 5i)을 제외한 나머지 실험들은 중부지방의 강수를 관측값과 유사하게 모의하는 것으로 보인다. 강수예측 선행시간이 짧아짐에 따라 강수대의 위치가 점차 남쪽으로 위치하는 경향을 보였으며, 강수예측 선행시간을 줄이는 것이 항상 좋은 결과를 보장하는 것이 아니라는 것을 보여준다.

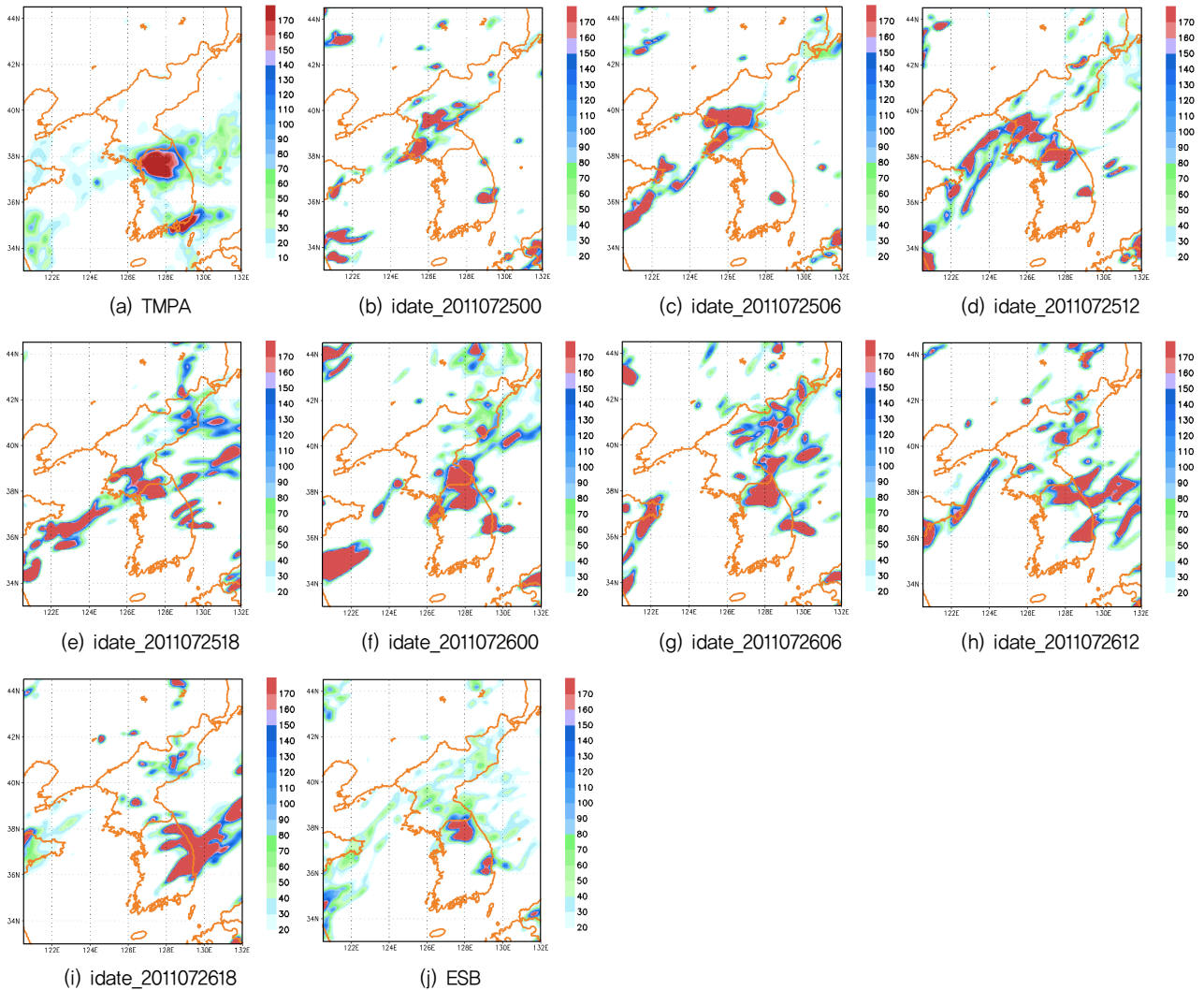


Fig. 5 Twenty-four-hour accumulated precipitation at 1500UTC 27 July 2011

8개의 실험 중 강수코어의 위치가 관측과 유사한 6개의 실험들로부터 예측된 강수량의 시계열은 Fig. 6 (a)와 같다. 관측 데이터에서 강수 코어가 위치한 지역에 대해 평균 강수량을 계산하였으며, 관측 자료에서는 26일 21UTC와 27일 12UTC에 강수의 최대치가 나타났다. 7월 25일 12UTC 시작 실험(LT33)이 첫 번째 피크를 예측하였으나 관측에 비해 높은 강수량을 보였다. 두 번째 피크는 7월 26일 12UTC 시작 실험(LT09)이 그 타이밍과 강수량을 관측과 유사하게 예측하였다. 초기 조건이 달라짐에 따라 각 실험이 예측한 강수량과 강수 타이밍은 차이를 보는 것으로 분석되었다.

예측성의 평가는 예측값과 관측값의 선형상관성을 분석하기 위해 TCC를 사용하였다. TCC는 Pearson's Correlation Coefficient를 이용하여 계산하였으며, 동일 변량에 대한 관측과 예측을 비교한 경우 1에 가까울수록 높은 예측성을 보임을 의미한다. TCC의 계산식은 다음 Eq. (1)~(4)와 같다.

$$TCC = \frac{cov(F, O)}{S_F S_O} \quad (1)$$

$$cov = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O}) \quad (2)$$

$$S_F = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2} \quad (3)$$

$$S_O = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

여기서,  $cov$ 는 공분산,  $S_O$ 는 관측값의 표준편차,  $S_F$ 는 예

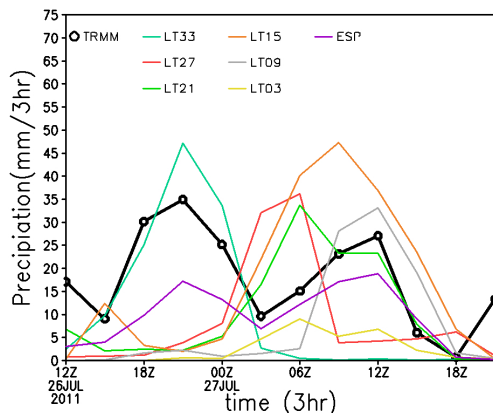
측값의 표준편차를 의미한다. 또한  $O_i$ 는 관측값,  $F_i$ 는 예측값을 의미하며,  $\bar{O}$ 는 관측값의 평균,  $\bar{F}$ 는 예측값의 평균,  $n$ 은 총 관측 및 예측 횟수를 의미한다.

Fig. 6 (b)는 TRMM의 TMPA와 각 선행시간별 강수예측 모의실험에 대한 TCC값을 계산한 결과이다. 관측 데이터의 첫 번째 강수 피크를 가장 유사하게 예측한 7월 25일 12UTC 시작 실험(LT33)의 상관계수가 가장 높은 값을 보였고, 전반적으로 선행시간에 따른 강수예측의 상관성은 작은 것으로 나타났다. 다만, 본 모의 실험을 통하여 얻게 된 주요한 결과 중 하나는 도심지역에 적용가능한 공간규모의 단기강수 예측성은 초기조건에 민감하게 반응하는 것으로 파악되며, 초기 조건에 따른 민감도를 줄이고 예측성을 확보하기 위한 앙상블(Ensemble) 방법의 적용 필요성이다.

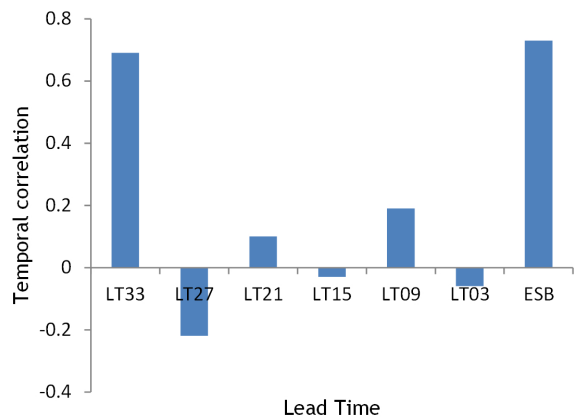
따라서 본 연구에서는 상관계수가 양의 값을 보이는 실험들(LT33, LT21, LT09)을 멤버로 하여 동일한 가중치를 적용하여 앙상블을 구성하였다(Fig. 5j). 그 결과 관측에 비해 강수대가 나타나는 영역이 줄어들었으나, 모든 실험에서 나타났던 북쪽의 강수가 줄어들었으며, 관측과 동일한 시점에서 중부지방의 강수량 피크가 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 확인하였다. 첫 번째 피크의 강수량이 관측 데이터에 비해 과소 모의 되었으나, 강수 타이밍을 관측 강수와 가장 유사하게 모의함으로써 단일 실험으로 가장 높은 예측성을 보인 LT33 실험보다 높은 상관관계를 보임을 확인하였다(Fig. 6b).

## 2. 도시유출 모형 적용 결과

Fig. 7은 2011년 7월에 발생한 집중호우 사상 중에서 단일 호우사상을 추출하여 SWMM 모형에 예측강우량을 적용하여 강우-유출 모의를 실시한 결과이다. 강우-유출 모의에 적



(a) Time-series



(b) Temporal correlation

Fig. 6 Time-series of 3-hour precipitation (mm) over the precipitation core (126.2°E–128.2°E, 37.2°N–38.2°N) obtained from the TMPA observation and experiments with different initial time (Fig. 6a). And Fig. 6 (b) shows temporal correlations of precipitation over the precipitation core between the TMPA and each experiments

용된 관측 강우량은 유역평균 AWS 10분단위 강수량이며, 관측 유량은 대학과 연계한 하천관리 연구용역의 일환으로 선정된 우이천 유역의 수위-유량 관계곡선식에 한강홍수통제소 자동수위 관측계가 위치해 있는 월계2교 지점의 수위관측 자료를 적용하여 산정한 유출값을 사용하였다. 또한 SWMM 강우유출 모형에 TRMM의 TMPA 자료를 통하여 산정한 유출량 값과, CFS 자료와 지역기후 모형을 이용하여 각 선행시간(LT33, LT27, LT21, LT15, LT09, LT03) 별로 예측한 유출량 결과이다.

관측과 예측의 기본적인 통계적 평가 수단으로 첨두유량 퍼센트(%) 오차(PEP: percent error of peak), 유출용적 퍼센트(%) 오차(PEV: percent error of volume), 그리고 첨두유량 발생시간(Tp) 퍼센트(%) 오차(PETP: percent error of time of peak)를 적용하여 도시유출 모형에 의한 유량예측의 정확도를 평가하였다. PEP, PEV, PETP의 계산식은 다음 Eq. (5)-(7)과 같다.

$$PEP = \frac{Q_{pf} - Q_{p0}}{Q_{p0}} \times 100(\%) \quad (5)$$

$$PEV = \frac{V_f - V_0}{V_0} \times 100(\%) \quad (6)$$

$$PETP = \frac{T_{pf} - T_{p0}}{T_{p0}} \times 100(\%) \quad (7)$$

여기서,  $Q_{pf}$ 와  $Q_{p0}$ 는 예측 및 관측 첨두유량이고  $V_f$ 와  $V_0$ 는 예측 및 관측 유출용적이며  $T_{pf}$ 와  $T_{p0}$ 는 예측 및 관측 첨두 유량의 발생시간이다.

또한 관측값과 예측 값의 정확성을 검증하기 위하여 Nash-Sutcliffe 효율성계수를 이용하였다. NSE 값이 음의 값을 갖으면 예측된 결과 나쁘거나 일관성이 없음을 의미하며, 양의 값을 갖으면 예측된 결과를 사용하는 것이 관측값의 평균을 사용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있음을 의미하고, 1에 가까울수록 이상적인 결과를 의미한다. NSE의 계산식은 다음 Eq. (8)과 같다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - F_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

여기서  $N$ 은 자료의 개수,  $O_i$ 는 관측유량,  $F_i$ 는 예측유량,  $\bar{O}$ 는 관측유량의 평균값을 나타낸다.

Table 3은 관측 유출량과 예측 유출량에 대한 PEP, PEV, PETP, 그리고 NSE 분석을 통하여 예측의 정확도를 통계적으로 평가하였으며, 관측과 예측 수문곡선의 상관정보를 파악하기 위하여 상관계수와 결정계수( $R^2$ )를 산정한 결과이다. 분석결과, 첨두유량 예측은 -38.0%~+26.4%의 근소차

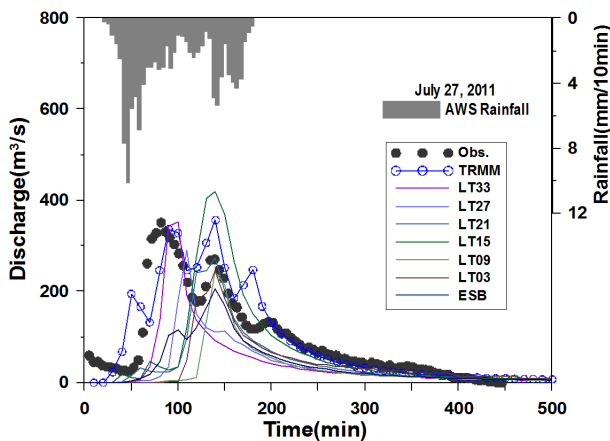


Fig. 7 Rainfall-Runoff simulation between observed and forecast discharge in the Uicheon Basin

Table 3 Statistical comparison between observed and forecasted discharge by a set of short-term rainfall forecasting experiments during July 27, 2011

Rainfall Forecasts	PEP (%)	PEV (%)	PETP (%)	NSE	CC	R <sup>2</sup>
TRMM	7.9	-0.4	55.6	0.69	0.88	0.77
LT 33	6.5	-54.2	11.1	0.33	0.83	0.70
LT 27	-12.2	-61.2	22.2	0.02	0.71	0.51
LT 21	-17.1	-51.7	55.6	-0.02	0.58	0.34
LT 15	26.4	-28.8	55.6	-0.09	0.58	0.34
LT 09	-26.2	-68.8	55.6	-0.42	0.44	0.19
LT 03	-25.8	-56.6	55.6	-0.20	0.48	0.23
ESB	-38.0	-58.3	55.6	0.14	0.80	0.63



이를 보이고 있음을 확인할 수 있었으며, LT33의 결과가 6.5% 오차로 가장 좋은 값을 보였다. 총 유출량의 체적 예측은 -58.3% ~ -0.4%의 차이를 보이면서 관측값에 비하여 모두 과소 추정되는 것으로 분석되었으며, TRMM의 결과가 -0.4%로 총 유출량의 체적이 관측과 가장 유사하게 예측되었다. 또한, 침투 발생시간 예측은 +11.1% ~ +55.6%의 차이를 보이고 있어 침투 발생시간이 관측에 비하여 모두 지연되어 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

다음으로 Nash-Sutcliffe 효율성계수를 산정한 결과 예측 결과에 따라 -0.42~0.69의 분포 값을 보이는 것으로 확인되었으며, TRMM이 0.69로 가장 양호한 결과를 나타내었다. 다만, Nash-Sutcliffe 효율성계수 값만을 보고 판단하였을 때,

LT27, LT15, LT09, LT03의 결과는 관측의 평균을 사용하는 것보다 좋지 않은 결과를 얻을 수 있는 것으로 판단되어 활용에 주의가 필요할 것으로 보이며, 선행 예측 시간이 긴 LT33과 LT27, 그리고 앙상블 예측(ESB) 결과가 비교적 양호한 유출량 예측 정보를 줄 수 있을 것으로 분석되나, 향후 보다 많은 폭우사상에 대한 사례 검증이 필요할 것으로 사료된다. 또한 관측수문곡선과 예측수문곡선의 상관정보를 파악하기 위하여 상관계수를 분석한 결과 0.44 ( $R^2=0.23$ )~0.88 ( $R^2=0.77$ )의 상관성을 보이는 것으로 분석되었으며, LT33과 LT27, 그리고 앙상블 예측(ESB) 결과가 비교적 양호한 상관성을 보이고 있음을 확인하였다.

Fig. 8은 관측과 예측 유출량의 1:1 대응 산포도를 나타내어

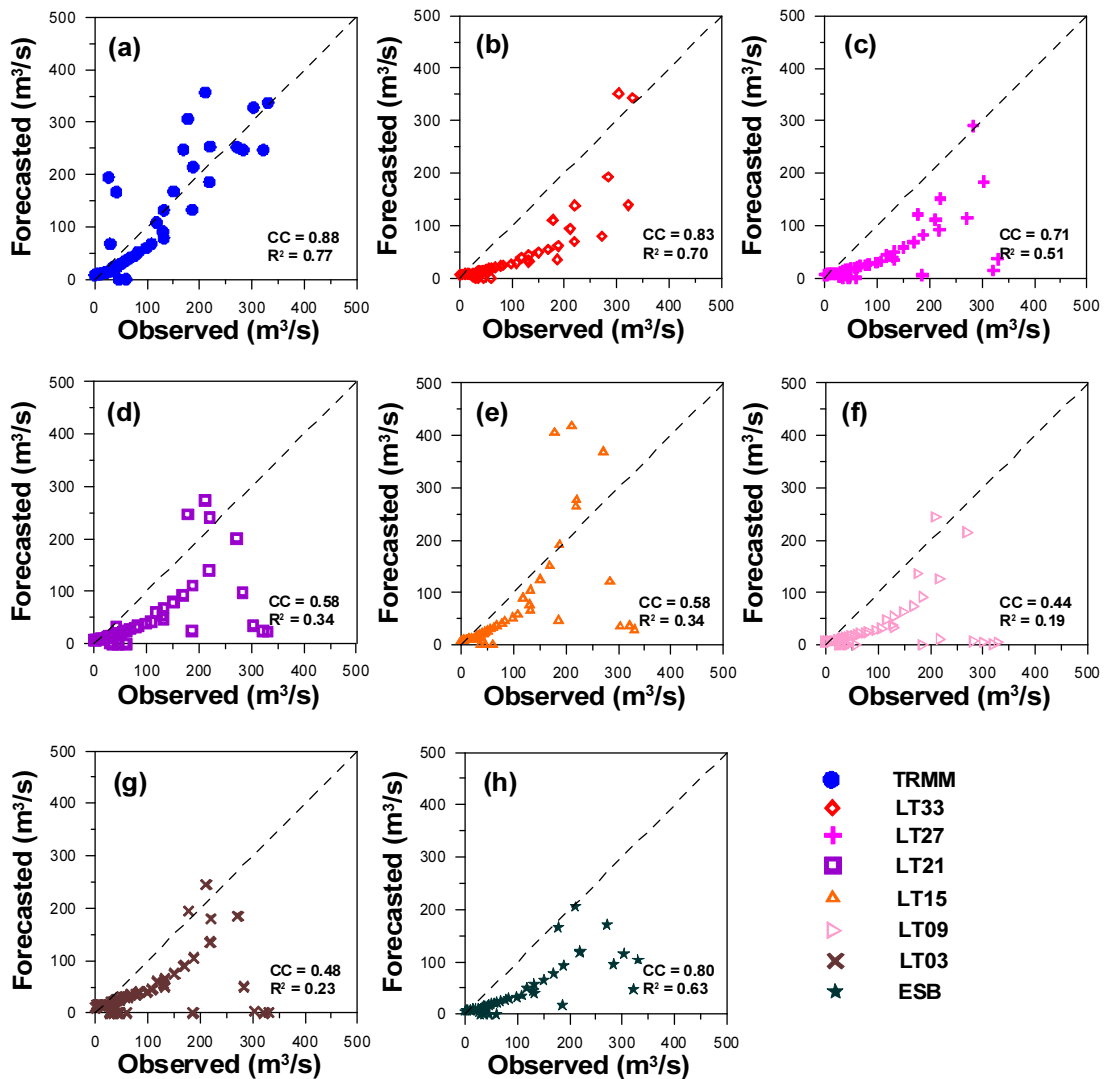


Fig. 8 Scatter plots between observed and forecasted discharge corresponding to different lead times. (a) to (h) show TRMM observation, experimental results associated with different lead times, and ESB forecast result, respectively

가시적으로 비교한 결과이다. Fig. 8 (a)의 TRMM 결과를 제외한 나머지 Fig. 8 (b)~(h)의 각 선행시간별 정량적인 예측 수문곡선의 결과가 관측값에 비하여 전반적으로 과소 추정되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 강우-유출모형의 입력으로 사용되는 지역기후 모형의 정량강우 예측이 한반도 영역에서의 전반적인 강우의 발생유무와 공간분포 패턴은 비교적 잘 묘사하고 있으나, 실제 폭우가 발생하는 도시 소규모 영역에서의 강우 발생 크기와 타이밍 추정의 정확도는 앞으로도 개선해야 할 사항이 있는 것으로 판단된다.

#### IV. 결론 및 토의

본 연구는 NCEP에서 제공하는 전 지구 CFS 기상예측 자료를 경계조건으로 사용하여 지역기후 모형인 GRIMs-RMP에 의한 서울 지역 단기(1~3일) 강수 예측을 실시하였다. 단기 강수예측 결과의 정확도 검증은 2011년 7월 집중호우 사례를 대상으로 하였으며, AWS 강우관측 결과와 TRMM 위성관측 자료를 활용하여 비교·검증하였다. 또한 서울 우이천 유역을 대상으로 SWMM을 이용한 도시유출 모의를 실시하여, 실제 홍수사상과 비교하였으며, 그 적용성을 평가하였다. 본 연구의 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) CFS자료를 이용하여 선행시간 6시간 간격의 강수예측 실험을 실시한 결과, 우리나라 중부지방의 극치강수 예측을 관측과 유사하게 모의하고 있는 것으로 분석되었으나, 반드시 강수예측 선행시간이 짧을수록 좋은 예측성을 나타내지 않을 수 있음을 모형 시뮬레이션 결과를 통하여 확인하였다.
- (2) 강수예측 결과의 선형상관성 분석을 위하여 TCC를 이용하였으며, 전반적으로 선행시간에 따른 강수예측의 상관성은 그리 크지 않았으나, 7월 25일 12UTC 시작 실험(LT33)의 TCC값이 관측과 가장 유사하게 나타났다. 다만, 도심지역에 적용가능한 공간규모의 단기강수 예측성은 모형의 초기조건에 민감하게 반응하는 것으로 파악되며, 초기조건 민감도를 줄이고 예측성 확보를 위한 앙상블 시스템의 적용이 필요할 것으로 분석된다.
- (3) 도시유출 모형을 통한 유출량 예측결과 침투유량 예측은 관측과 근소한 차이를 보이고 있음을 확인하였으나, 총 유출량의 체적 예측 및 침투 발생시간 예측은 관측에 비하여 비교적 차이가 발생하고 있음을 확인하였다. 강우-유출모형의 입력으로 사용되는 지역기후 모형의 정량강우 예측이 도시 소규모 영역에서 강우강도, 타이밍 예측의 정확도 개선 연구가 더욱 필요할 것으로 파악 된다.

- (4) 단기 강우예측 결과를 활용한 유출 수문곡선 예측의 상관계수는 비교적 크게 나타났으며, LT33과 LT27, ESB 결과에서 양호한 상관성을 보이고 있음을 확인하였다. 또한 NSE의 경우 선행 예측시간이 길었던 LT33과 ESB 결과에서 양호한 유출량 예측 정보를 줄 수 있을 것으로 분석되었다. 다만 이번 연구결과는 하나의 폭우 사상에 대한 예측 실험 결과로서, 보다 다양한 폭우사상을 적용하여 통계적 유의성을 갖는 실험 결과가 필요할 것이다.

본 연구는 CFS자료와 지역기후 모형을 이용한 단기 강우예측 시뮬레이션 및 도시유출 모의 적용으로 실시간 도시홍수 예·경보 활용의 진단연구 측면에서 의의가 있다. 현재 지상관측 및 레이더·위성 등의 관측정보 기반 초단기 강우예측은 상당한 기술수준에 도달해 있다고 판단되나, 지역기후 모형을 이용한 시뮬레이션 기반 단기 예측정보의 생산·제공은 아직 기술적 한계로 보완해야 할 사항이 많이 있는 것으로 파악된다. 하지만 가용한 기상·기후 예측 정보를 활용한 지속적인 개발과 이음새 없는 예측정보 제공 노력은 강우예측의 정확도 향상을 제고 시켜 도시유역의 발생 가능한 홍수 재난을 사전 예방하고 및 대비하는데 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(13AWMP-B066744-01)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. Ahasan, M. N. and A. Q. Khan, 2013. Simulation of flood producing rainfall event of 29 July 2010 over north-west Pakistan using WRF-ARW medel. *Natural Hazards* 69(1): 351-363.
2. Byun, U.-Y., S.-Y. Hong, H. Shin, J.-W. Lee, J.-I. Song, S.-J. Hahm, J.-K. Kim, H.-W. Kim, and J.-S. Kim, 2011. WRF-Based short-range forecast system of the Korea air force : Verification of prediction skill in 2009 summer. *Atmosphere* 21(2): 197-208.
3. Fiori, E., A. Comellas, L. Molini, N. Rebora, F. Siccardi, D. J. Gochis, S. Tanelli, and A. Parodi, 2014. Analysis and hindcast simulations of an extreme rainfall event in the Mediterranean area: The Genoa 2011 case. *Atmospheric Research* 138: 13-29.
4. Hong, S.-Y., H. Park, H.-B. Cheong, J.-E. E. Kim, M.-S. Koo, J. Jang, S. Ham, S.-O., Hwang, B.-K. Park, E.-C. Chang, and H. Li, 2013. The Global/Regional Integrated Model System (GRIMs). *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.* 49: 219-243.

5. Hong, S.-Y. and A. Leetmaa, 1999. An Evaluation of the NCEP RSM for Regional Climate Modeling. *J. Climate* 12: 592-609.
6. Huffman, G. J., R. F. Adler, D. T. Bolvin, G. Gu, E. J. Nelkin, K. P. Bowman, Y. Hong, E. F. Stocker, and D. B. Wolff, 2007. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J. Hydrometeor* 8: 38-55.
7. Ji, F., M. Ekström, J. P. Evans, and J. Teng, 2014. Evaluating rainfall patterns using physics scheme ensembles from a regional atmospheric model. *Theoretical and applied climatology* 115(1-2): 297-304.
8. Jiehua, Ma., H. Wang, and K. Fan, 2015. Dynamic downscaling of summer precipitation prediction over China in 1998 using WRF and CCSM4. *Advances in Atmospheric Sciences* 32(5): 577-584.
9. Junag, H.-M. H., S.-Y. Hong, and M. Kanamitsu, 1997. The NCEP Regional Spectral Model: An update. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 78: 2125-2143.
10. Kim, J. S., S. K., Yoon, and Y. I., Moon, 2013. Development of Rating Curve for High Water Level in an Urban Stream using Monte Carlo Simulation, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 33(4): 1433-1446.
11. Lee, D.-K. and K.-H. Lee, 2006. Sensitivity study of integration time-step size in simulation of heavy rainfall. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 42(6): 379-388.
12. Lee, J.-W. and S.-Y. Hong, 2006. A numerical simulation study of orographic effects for a heavy rainfall event over Korea using the WRF model. *Atmosphere* 16(4): 319-332.
13. Lee, J.-W. and S.-Y. Hong, 2013. Potential for added value to downscaled climate extremes over Korea by increased resolution of a regional climate model. *Theor. Appl. Climatol* DOI 10.1007/s00704-013-1034-6.
14. Lee, J.-W., S.-Y. Hong, E.-C. Chang, M.-S. Suh, and H.-S. Kang, 2014. Assessment of future climate change over East Asia due to the RCP scenarios downscaled by GRIMs-RMP. *Clim. Dyn.* DOI 10.1007/s00382-013-1841-6.
15. Ryu, G. H., B. J. Sohn, C. D. Kummerow, E.-K. Seo, and G. J. Tripoli, 2012. Rain rate characteristics over the Korean peninsula and improvement of the Goddard Profiling (GPROF) database for TMI rainfall retrievals, *Journal of Applied Meteorology* 51: 789-798.
16. Saha, S. et al., 2006. The NCEP Climate Forecast System, *J. Climate* 19: 3483-3517, doi:10.1175/JCLI3812.1.
17. Sohn, B. J., H.-J. Han, and E.-K. Seo, 2010. Validation of satellite-based high-resolution rainfall products over the Korean peninsula using data from a dense rain gauge network, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49: 701-714.
18. Yhang, Y.-B. and S.-Y. Hong, 2008a. Improved physical processes in a regional climate model and their impact on the simulated summer monsoon circulations over East Asia. *J. Climate* 21: 963-979.
19. Yhang, Y.-B. and S.-Y. Hong, 2008b. A simulated climatology of the East Asian summer monsoon using a regional spectral model. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.* 44: 325-339.
20. Yoon, S. K., J. S., Kim, and Y. I., Moon, 2016. Urban stream overflow probability in a changing climate: Case study of the Seoul Uicheon Basin, Korea, *Journal of Hydro-environment Research* doi:10.1016/j.jher.2015.08.001.