



## Performance comparison of rainfall and flood forecasts using short-term numerical weather prediction data from Korea and Japan

Yu, Wansik<sup>a</sup> · Yoon, Seongsim<sup>b</sup> · Choi, Mikyoung<sup>a</sup> · Jung, Kwansue<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>International Water Resources Research Institute, Chungnam National University

<sup>b</sup>WISE Institute, Hankuk University of Foreign Studies

<sup>c</sup>Department of Civil Engineering, Chungnam National University

Paper number: 17-048

Received: 29 May 2017; Revised: 21 June 2017; Accepted: 21 June 2017

### Abstract

This study evaluated the accuracy of rainfall and flood forecasts in Sancheong basin with three rainfall events such as typhoon and stationary front by using LDAPS provided by Korea Meteorological Agency and MSM provided by Japan Meteorological Agency. In the rainfall forecast result, both LDAPS and MSM showed high forecast accuracy for wide-area prediction such as typhoon event, but local-area prediction such as stationary front has a limit to quantitative precipitation forecast (QPF). In the flood forecast result, the forecast accuracy was improved with the increase of the lead time, and it showed the possibility of LDAPS and MSM in the field of rainfall and flood forecast by linking meteorology and water resources.

**Keywords:** Rainfall and flood forecasts, Numerical weather prediction, LDAPS, MSM

## 한일 단기 수치예보자료를 이용한 강우 및 홍수 예측 성능 비교

유완식<sup>a</sup> · 윤성심<sup>b</sup> · 최미경<sup>a</sup> · 정관수<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>충남대학교 국제수자원연구소, <sup>b</sup>한국외국어대학교 차세대도시농림융합기상사업단, <sup>c</sup>충남대학교 토목공학과

### 요 지

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 국지예보모델(LDAPS)과 일본 기상청의 중규모모델(Meso-Scale Model, MSM)을 이용하여 태풍 및 정체 전선 등 3개의 강우사상과 남강댐 유역 내 산청 유역에 대해 강우 및 홍수 예측 정확도를 평가하고 비교·검토하였다. 강우예측 정확도 평가 결과, LDAPS와 MSM 모두 태풍 사상과 같은 광역적인 예측에 대해서는 예측 정확도가 높은 것으로 나타났으나, 정체전선과 같이 국지적으로 발생하는 강우사상의 경우 예측 오차가 많이 발생하는 것으로 나타났다. 홍수예측 정확도 평가 결과, 선행시간이 증가함에 따라 점점 예측 정확도가 향상되는 것을 확인할 수 있었으며, LDAPS와 MSM 모두 기상 및 수자원간의 연계를 통하여 강우 및 홍수 예측 분야에서의 활용 가능성을 확인할 수 있었다.

**핵심용어:** 홍수예측, 강우예측, 수치예보, 국지예보모델, 중규모모델

## 1. 서 론

태풍에 의한 재해는 우리나라에서 발생하는 자연재해 중 발생빈도가 가장 높은 것으로 나타나며, 최근 들어 태풍 및 집중호우로 인한 홍수가 급증하고 있는 실정이다(MPSS, 2014).

대표적으로 2016년 10월 우리나라에 상륙한 제18호 태풍 ‘차바’는 관측된 최대 풍속이 49.0 m/s로 한반도 상륙 시 최대풍속 부분에서 역대 2번째로 큰 값을 기록하기도 하였으며, 도시 홍수 및 하천 범람 피해를 유발하였다. 이러한 홍수피해를 경감하기 위해서는 치수사업 등과 같은 구조적인 대책도 필요하지만, 정확한 홍수 예·경보를 통한 대비시간의 확보 등과 같은 비구조적인 대책도 중요하며, 홍수 예·경보를 통한 선행시간(Lead time) 확보를 위해 강우 및 홍수예측 시스템 구축이

\*Corresponding Author. Tel: +82-42-821-5675  
E-mail: ksjung@cnu.ac.kr (K. Jung)

하나의 대안으로 대두되고 있다(WMO, 2011; Yu et al., 2014).

강우예측 기법으로는 레이더(Radar)를 통해 관측된 자료를 외삽하는 초단기 강우예측기법이 최근까지 많이 수행되어 왔다(Yoon et al., 2010; Nakakita et al., 2012). 하지만 컴퓨터 계산 능력이 향상되면서 수치예보(Numerical Weather Prediction, NWP) 모델을 이용한 강우예측 및 수문학적 적용에 관한 연구들이 대두되고 있다. 수치예보모델은 역학·물리 방정식을 사용하여 현재의 대기상태에 대한 정보에서 앞으로의 대기상태에 대한 정보를 계산하여 예측을 수행한다(Golding, 2009; Cuo et al., 2011).

국외의 경우 수치예보모델을 이용한 기상-수자원 연계 시스템을 개발하여 홍수 예·경보의 현업화를 위한 다양한 프로젝트가 수행되고 있다. 1999년 유럽에서 기상 및 수문분야의 연구자들이 앙상블 예측을 이용한 조기 홍수 예보에 관한 프로젝트인 EFFS (European Flood Forecasting System, 1999~2003)이 처음으로 수행되었으며, 후속 연구로 EFAS (European Flood Alert System)을 수행하였다(De Roo et al., 2003; Kwadijk, 2003; Bartholmes and Todini, 2005). 2004년에는 수치예보모델의 수문-기상학적 적용에 대한 국제적 주도권을 가져가기 위해 HEPEX (Hydrological Ensemble Prediction System) 프로젝트를 수행하였다(Schaake et al., 2006; Schaake et al., 2007; Thielen et al., 2008). 한국과 근접해 있는 일본의 경우 1959년부터 수치예보를 실시하였고 최근에는 기상예보의 목적에 따라 다양한 수치예보모델을 운영하고 있으며, 현업 수치예보모델의 개선과 수자원 분야와의 연계를 통한 강우 및 홍수예측 등의 다양한 연구가 수행되고 있다(Terada et al., 2004; Saito et al., 2006; Saavedra Valeriano et al., 2010; Yu, 2014).

국내의 경우 기상분야에서 현업 수치예보모델의 개선을 통한 지속적인 연구는 수행되고 있으나 기상 및 수자원간의 연계성을 통한 홍수 예·경보 등의 연구는 아직은 미흡한 실정이다. 국내에서 수치예보모델을 이용하여 수자원에 적용한 연구 중 Byun (2009)은 기상정보의 수자원 활용 가능성을 검토하기 위해 한국 기상청에서 정보를 제공하고 있는 지역예보 모델(Regional Data Assimilation and Prediction System, RDAPS) 자료를 이용하여 댐 지점별 강우 예측 정확도를 분석하였으며, 강우-유출 모형과 연계하여 댐 유입량을 예측하고 적용성을 평가하였다. 적용성 평가 결과 RDAPS는 공간 해상도가 30 km로 홍수 예·경보 등의 수자원 분야에 적용에는 무리가 있으며, 고해상도의 단기 예측 모델 개발이 필요함을 언급하였다. Lee et al. (2011)은 한국 기상청의 RDAPS 자료와 Ensemble Streamflow Prediction (ESP) 분석을 수행하여 그

적용성을 검토하였으며, 더욱 정밀한 유량을 예측을 모의하기 위해서는 RDAPS의 강우예측 정확도 및 시간분해능의 개선이 필요하다고 언급하였다. Yu et al. (2016a)은 국지예보모델(Local Data Assimilation and Prediction System, LDAPS) 자료를 이용하여 한탄강 유역에 적용하여 수치예보자료의 적용 가능성을 분석하였다. LDAPS 예측강우와 지상강우의 유역평균강우량을 비교한 결과 높은 상관성을 나타내어 예측강우의 활용 가능성을 확인하였다. 또한 일본 수치예보모델의 국내 적용성을 평가하기 위해 Yu et al. (2016b)은 한국을 예측도메인에 포함하는 일본 기상청의 중규모 모델(Meso-Scale Model, MSM)을 이용하여 태풍 ‘산바’에 대해 남강댐 유역 내 8개 소유역을 대상으로 강우 및 홍수 예측 정확도를 평가하였다. 연구를 통해 Yu et al. (2016b)은 MSM이 국내의 강우 및 홍수예측에 적용 가능성이 있다고 판단하였으며, 국내의 LDAPS와 같이 홍수 예·경보에 기초자료를 제공함으로써 향후 유역관리 등을 위한 기초자료로 활용 가능하다고 판단하였다. 하지만 MSM 및 LDAPS의 적용을 위해서는 두 자료간의 비교 연구가 필요하며, 다양한 강우 사상의 고려를 통한 적용성 및 제약성 평가 등의 후속 연구가 필요하다고 언급하였다.

따라서 본 연구에서는 수치예보모델을 이용하여 기상 및 수자원 간의 연계성을 통한 강우 및 홍수 예측에 활용방안을 검토하기 위해 한국 기상청에서 제공하는 국지예보모델(LDAPS)과 예측도메인에 한국을 포함하는 일본 기상청의 중규모 모델(MSM)을 이용하여 남강댐 유역 내 산청 유역에 대해 강우 및 홍수 예측 정확도를 평가하고 비교·검토하였다. 본 연구에서 적용한 LDAPS와 MSM은 사용하는 수치모델, 물리과정 매개변수, 자료동화 기법 및 지배 방정식 등이 다르기 때문에 직접적인 비교를 하는데 무리가 있지만 국내의 강우 및 홍수 예측 분야에서의 각 수치예보모델의 활용성을 검토하고자 한다.

## 2. 연구범위 및 방법

### 2.1 수치예보(NWP) 자료

#### 2.1.1 LDAPS

한국 기상청(KMA)에서는 기상예보를 위해 영국 기상청(Met Office)이 개발한 통합형 수치예보모델(Unified Model, UM)을 도입하여 사용하고 있으며, 예보 지역에 따라 전지구 예보모델(Global Data Assimilation and Prediction System, GDAPS), 지역예보모델(RDAPS), 국지예보모델(LDAPS) 등으로 구분된다. 국내의 통합 수치예보모델은 UM을 사용하였기 때문에 영국 지역에 최적화되어 개발되어 있으므로

현재는 우리나라를 포함한 동아시아 지역의 지형조건, 지표 이용도, 해수면 온도 등을 최적화하는 작업을 지속적으로 진행 중에 있다. 본 연구에서는 기상청 수치예보모델에서 고해상도 공간분해능을 가진 LDAPS를 이용하여 강우 및 홍수예측 정확도를 평가하였다. LDAPS의 공간 해상도는 1.5 km이며, 연직으로 40 km까지 70층으로 구성되며, 예측 도메인은 한반도를 중심으로 중국, 일본 일부 지역에 대하여 602 × 781 개의 격자로 구성된다. 고해상도 모델의 경우 적은 모수화(Coective scheme)를 사용하지 않고도 강수 현상과 연관된 대류를 구현할 수 있다. 따라서 LDAPS도 미세물리과정으로 강수현상을 모사할 수 있어 적은모수화를 적용하지 않는다. 또한 3시간 간격으로 전지구예보모델인 GDAPS로부터 경계조건을 제공받아 1일 8회(00, 06, 12, 18 KST: 3시간 예측; 03, 09, 15, 21 KST: 36시간 예측) 예측을 수행하며, 자료동화기법으로는 3차원 변분법(3-Dimensional Variational Method, 3DVAR)을 이용한다. 본 연구에서는 선행시간(Lead time)에 따른 강우 및 홍수예측의 정확도 변동성을 평가하기 위해 03, 09, 15, 21 KST의 36시간 예측 자료를 이용하여 연구를 수행하였다.

2.1.2 Meso-Scale Model

일본 기상청(JMA)에서는 기상예보의 목적에 따라 다양한 수치예보모델을 운영하고 있으며, 예보지역 및 공간 해상도에 따라 전지구예보모델(Global Spectral Model, GSM), 지역예보모델(Regional Spectral Model, RSM), 중규모 모델(MSM) 등으로 구분된다. RSM의 경우에는 컴퓨터 계산능력의 향상으로 MSM으로 대체되어 2007년 12월부터 예측이 중지되었다. 본 연구에서는 단기의 폭우 등 재해를 가져오는 기상현상을 예보하고 수자원 분야와의 연계 연구가 이루어지고 있는 MSM을 이용하여 강우 및 홍수예측 정확도를 평가하고, 한국의 LDAPS 결과와 비교·검토하였다. MSM의 공간 해상도는 5 km이며, LDAPS와 달리 Kain-Fritsch 적운모수

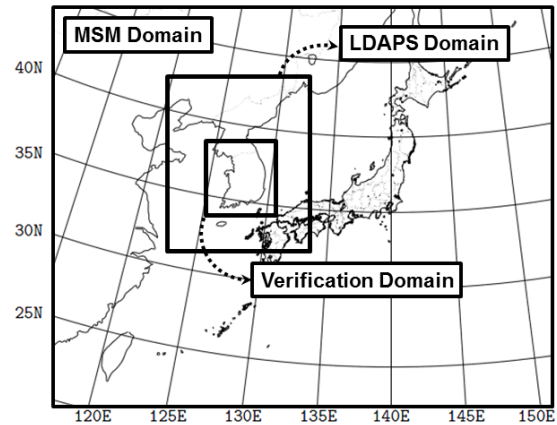


Fig. 1. Forecast and Verification domains of LDAPS and MSM

화 기법을 이용하여 대류를 명시적으로 해석한다. MSM은 연직으로 약 22 km까지 50층으로 구성되며, 예측 도메인은 일본을 중심으로 한국 전역과 중국 일부 지역에 대하여 481 × 505 개의 격자로 구성된다. 또한 3시간 간격으로 GSM으로부터 경계조건을 제공받아 2013년 이전에는 1일 8회 3시간 간격으로 33시간과 15시간 예측을 반복적으로 수행하였으나, 2013년 이후에는 1일 8회 3시간 간격으로 39시간 예측자료를 제공하며, 자료동화 기법으로는 4차원 변분법(4-Dimensional Variational Method, 4DVAR)을 이용한다. 본 연구에서는 MSM의 모든 예측자료를 사용하지 않고 LDAPS와의 초기시간을 동일하게 하기 위해 03, 09, 15, 21 KST의 39시간 예측 자료를 이용하여 LDAPS의 결과와 비교하였다. Fig. 1은 LDAPS와 MSM의 예측 도메인과 공간 예측 정확도 검증을 위한 도메인을 나타내며, Table 1은 LDAPS와 MSM의 제원을 나타낸다.

2.2 대상유역 및 강우사상

LDAPS와 MSM의 예측 정확도를 평가하기 위한 대상유역은 낙동강 수계의 남강댐 유역 내 산청 수위관측소를 출구로

Table 1. LDAPS and MSM specifications

| Model                 | LDAPS   | MSM                       |
|-----------------------|---|---------------------------|
| Horizontal resolution | 1.5 km  | 5 km                      |
| Grid points           | 602 × 781   | 481 × 505                 |
| Vertical / Top        | 70 layers / 39 km   | 50 layers / 21.8 km       |
| Forecast period       | 3 hour (03, 09, 15, 21 KST)<br>36 hour (00, 06, 12, 18 KST) | 39 hour (3 hour interval) |
| Convective scheme     | -   | Kain-Fritsch scheme       |
| Initial condition     | 3DVAR   | 4DVAR                     |
| Lateral boundary      | GDAPS   | GSM                       |

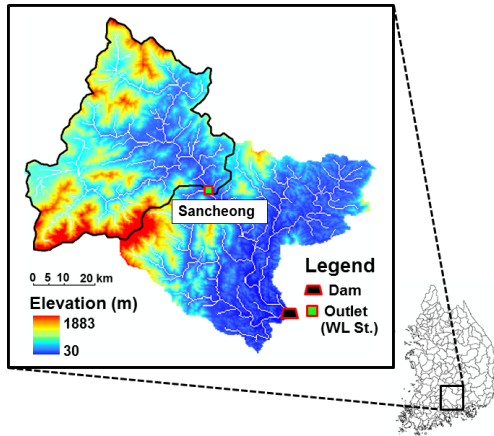


Fig. 2. Study site for rainfall and flood forecasts

하는 산청유역이다(Fig. 2). 산청 지점은 1976년 3월에 관측을 개시하여 많은 수문자료를 보유하고 있으며, 기존 연구를 통해 수위-유량 관계곡선식의 검증되었고, 강우-유출 모의가 이루어진 바 있다(Yu et al., 2016b). 산청 유역의 유역면적은 1,134.1 km<sup>2</sup>으로 남강댐 유역면적 2,282 km<sup>2</sup>의 49.7%에 해당하며, 유역평균고도는 EL. 552.51 m로 산지 유역이다.

본 연구에서는 Table 2와 같이 2014년 8월 초순 중심기압이 980 hPa를 기록한 제12호 태풍 ‘나크리’(Nakri), 8월 하순 북태평양 기단과 시베리아 기단 사이에 저기압의 형성으로 인한 정체전선에 따른 집중호우, 2016년 10월 남부지방에 큰 피해를 입힌 제 18호 태풍 ‘차바’(Chaba) 3개의 호우사상을 대상으로 LDAPS와 MSM의 예측 성능을 비교·검토하였다. Table 2의 총 강우량은 강우기간 동안의 국토해양부 및 한국수자원공사가 관리하는 39개의 강우 관측소 자료를 이용하여 Thiessen 기법으로 산정된 산청유역 내 유역평균 강우량의 총 강우량을

나타낸다. 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 MSM와 LDAPS와의 초기시간을 일치시키고자 03, 09, 15, 21 한국중앙 표준시(Korea Standard Time, KST)의 예측 자료를 이용하였으며, 강우 및 홍수 예측 평가에 사용된 3개의 강우사상의 수치예보자료 초기시간은 Table 3과 같다.

### 2.3 분포형 강우-유출 모형

본 연구에서는 사면의 지표 및 지표하 흐름을 고려하는 분포형 강우-유출 모형인 KWMSS (Kinematic Wave Method for Subsurface and Surface flow; Tachikawa et al., 2004) 모형을 사용하였다. 강우-유출 모의는 수치지도를 통해 생성된 DEM, 흐름도(Flow direction map), 흐름누적도(Flow accumulation map) 등의 지형정보와 격자기반의 공간분포형 강우를 고려하여 유출을 계산하며, 개념적인 수위-유량 관계식을 이용하여 사면에서의 각 격자별 지표 및 지표하 흐름을 계산한다(Fig. 3).

흐름해석을 위한 지배방정식은 1차원 운동파 방정식을 기반으로 하고 있으며, DEM을 기반으로 사면과 하도의 두가지 요소로 지배방정식이 구성된다. 각 격자는 비포화(Unsaturated) 및 포화(Saturated), 두 개의 층으로 구분되며, 강우시 각 격자에서 수심증가에 따른 단위폭당 유량  $q$ 는 Eq. (1)과 같이 수위-유량 관계식으로 나타낼 수 있으며, 모의를 위한 연속방정식은 Eq. (2)와 같다.

$$q = \begin{cases} v_c d_c (h/d_c)^\beta & : 0 < h \leq d_c \\ v_c d_c + v_a (h - d_c) & : d_c < h \leq d_s \\ v_c d_c + v_a (h - d_c) + \alpha (h - d_s)^m & : d_s < h \end{cases} \quad (1)$$

Table 2. Selected events for rainfall and flood forecasts

| Event no. | Rainfall duration              | Total rainfall (mm) | Event type       |
|-----------|--------------------------------|---------------------|------------------|
| 1         | 2014.08.01.15:00 ~ 08.04.02:00 | 176.6               | Typhoon ‘Nakri’  |
| 2         | 2014.08.17.00:00 ~ 08.19.11:00 | 125.3               | Stationary front |
| 3         | 2016.10.04.00:00 ~ 10.06.11:00 | 89.6                | Typhoon ‘Chaba’  |

Table 3. LDAPS and MSM forecast sets

| Start no. | Forecast start time of LDAPS and MSM |                  |                  |
|-----------|--------------------------------------|------------------|------------------|
|           | Event 1                              | Event 2          | Event 3          |
| 1         | 2014/08/01/15:00                     | 2014/08/17/03:00 | 2016/10/04/03:00 |
| 2         | 2014/08/01/21:00                     | 2014/08/17/09:00 | 2016/10/04/09:00 |
| 3         | 2014/08/02/03:00                     | 2014/08/17/15:00 | 2016/10/04/15:00 |
| 4         | 2014/08/02/09:00                     | 2014/08/17/21:00 | 2016/10/04/21:00 |

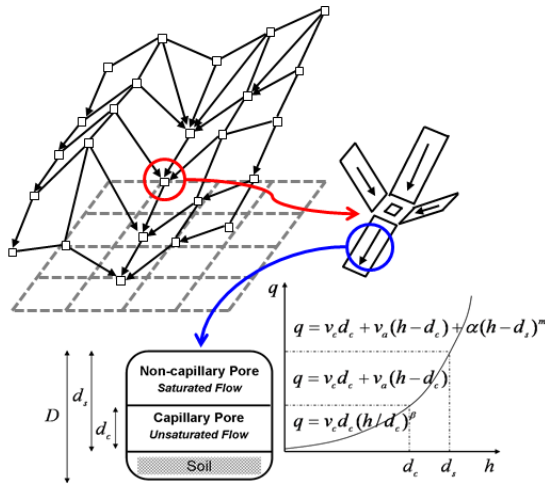


Fig. 3. Conceptualization of spatial flow movement and stage-discharge relationship of KWMSS model

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(x,t) \tag{2}$$

여기서,  $v_c = k_c i$ ,  $v_a = k_a i$ ,  $k_c = k_a / \beta$ ,  $\alpha = \sqrt{i} / n$  ( $m^{1/3}/s$ ),  $q$ 는 단위 폭당 유량( $m^2/s$ ),  $h$ 는 수심(m),  $i$ 는 경사,  $k_c$ 는 비포화대층의 투수계수( $m/s$ ),  $k_a$ 는 포화대층의 투수계수( $m/s$ ),  $d_c$ 는 비포화대층의 두께(m),  $d_s$ 는 비포화대층과 포화대층의 두께(m),  $n$ 은 조도계수( $m^{-1/3}$ ),  $\beta$ 는 투수율( $k_a/k_c$ ),  $m$ 은 5/3로 하도의 형상을 나타내는 상수이다.

많은 연구에서 KWMSS 모형을 이용한 강우-유출 모의가 수행되었으며, 유역 특성을 고려한 신속한 분석과 단기 유출 분석에 효과적임을 나타내었다. KWMSS 모형에 대한 보다 상세한 내용은 Tachikawa et al. (2004), Sayama et al. (2006), Kim et al. (2009), Yu (2014) 및 Yu et al. (2015)에 기술되어 있다. 본 연구에서는 KWMSS 모형의 매개변수 보정을 위하여 각 강우사상에 대하여 전역최적화 기법인 SCE-UA (Duan et al., 1992)를 이용하여 목적함수 RMSE (Root Mean Square Error)를 최소로 하는 최적 매개변수를 산정하였으며, 최적 매개변수를 이용하여 LDAPS와 MSM 유출량 예측을 수행하여 예측 성능을 비교·검토하였다.

**2.4 강우 및 홍수예측 평가방법**

LDAPS와 MSM의 예측 성능 비교를 위한 검증 방법은 강우 예측 및 유출량 예측 검증 두 가지로 나뉜다. 우선, 국토해양부 및 한국수자원공사가 관리하는 39개 우량 관측소의 시간별 지점 강우량 자료를 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 취득한 후, GIS상에서 Thiessen기법을 이용한 공간분포

Table 4. Rain contingency table

| Verifying analysis |         | Predicted rainfall |       |
|--------------------|---------|--------------------|-------|
|                    |         | No rain            | Rain  |
| Observed rainfall  | No rain | Zero               | False |
|                    | Rain    | Miss               | Hit   |

강우자료로 변환하여 산청유역 내 유역평균강우량을 산정하였으며, 이 값과 LDAPS와 MSM의 유역평균강우량을 비교하였다. 또한, 기상청에서 제공하는 레이더 합성 반사도 자료를 Marshall & Palmer 공식(Marshall and Palmer, 1948)을 이용하여 강우로 변환하여 공간적인 강우예측 정확도를 평가하는데 사용하였다. 본 연구에서 레이더 강우자료는 강우의 공간적 분포 정보만을 활용하므로 강우량의 정량적 개선을 별도로 수행하지 않았다. 유출량 예측자료의 검증을 위해 산청수위관측소의 해당년도의 수위-유량 관계곡선식을 이용하여 수위자료를 유량 Q ( $m^3/s$ )자료로 변환하여 유출구에서의 실측유량 값을 산정하였다.

유역평균강우량 예측 정확도를 비교하기 위해 본 연구에서는 상관계수(Correlation Coefficient, CC), 총 강우량의 오차를 평가하기 위해 편의(BIAS) 및 오차(Total Error, TE)를 이용하였다. CC는 -1.0에서 1.0사이에서 분포하며, 양의 상관관계가 있을때는  $CC > 0$ , 음의 상관관계가 있을때는  $CC < 0$ 을 나타낸다. BIAS는 총 강우량의 과소 또는 과대 예측을 평가하기 위해 이용하였으며,  $BIAS > 1$ 의 경우 총 강우량의 과대예측을 나타내고,  $BIAS < 1$ 의 경우 과소 예측을 나타낸다. 총강우량 오차(TE)는  $TE > 0$ 의 경우 과소예측을 나타내고,  $TE < 0$ 의 경우 과대예측을 나타낸다. 또한, 강우의 공간 예측 정확도를 비교하기 위해 임계성공지수(Critical Success Index, CSI)를 사용하였으며, 강우의 공간 예측 정확도의 정성적인 평가는 예측강우와 관측강우의 존재 유무의 행렬로 이루어진 강우분할표(Rain contingency table)에 기초하여 산정하였다(Table 4). CSI는 정확히 예측했던 사건 수를 예보이거나 관측이던 간에 사건 발생과 관련된 총 수를 합하여 나눈 것이다. CSI는 사건이 발생하지 않는다고 예보했고 실제 발생하지 않은 경우의 수에 영향을 받지 않는다. 따라서 사건의 빈도수에 따라 좌우되는 경향이 있다(Yoon and Bae, 2010). 마지막으로 유출량 비교를 위해서 상관계수와 Nash-Sutcliffe 효율계수(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)를 이용하였다. 또한, 관측과 예측유량의 상대적 차이도 중요하지만, 홍수시의 유량은 절대적 양이 매우 중요하므로 총유출량 오차를 추가 분석하였다. NSE는 관측값과 산정값간의 정확성을 검증하는데 주로 사용되는 계수로 음의 값은 산정값이 나쁘거나 관측



값이 일관성이 없음을 의미하며, 양의 값은 산정값을 사용하는 것이 관측값의 평균을 사용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있음을 의미하고 1이 가장 이상적인 결과이다. 강우 및 홍수 예측 정확도를 평가하기 위한 관계식은 Eqs. (3)~(7)과 같다.

$$CSI = \frac{Hit}{Hit + Miss + False} \quad (3)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (4)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

$$TE = O_i - P_i \quad (7)$$

여기서,  $N$ 은 자료수,  $O_i$ 는 관측값,  $P_i$ 는 예측값,  $\bar{O}$ 와  $\bar{P}$ 는 자료별 평균값을 나타낸다.

### 3. 적용 결과

#### 3.1 강우예측 정확도 평가

Fig. 4는 남강댐 유역 내 지상 강우관측소 자료를 이용하여 산정한 산청 유역평균강우량과 LDAPS와 MSM의 강우자료로 산정한 유역평균강우량을 비교한 것이다. 앞서 언급한 바와

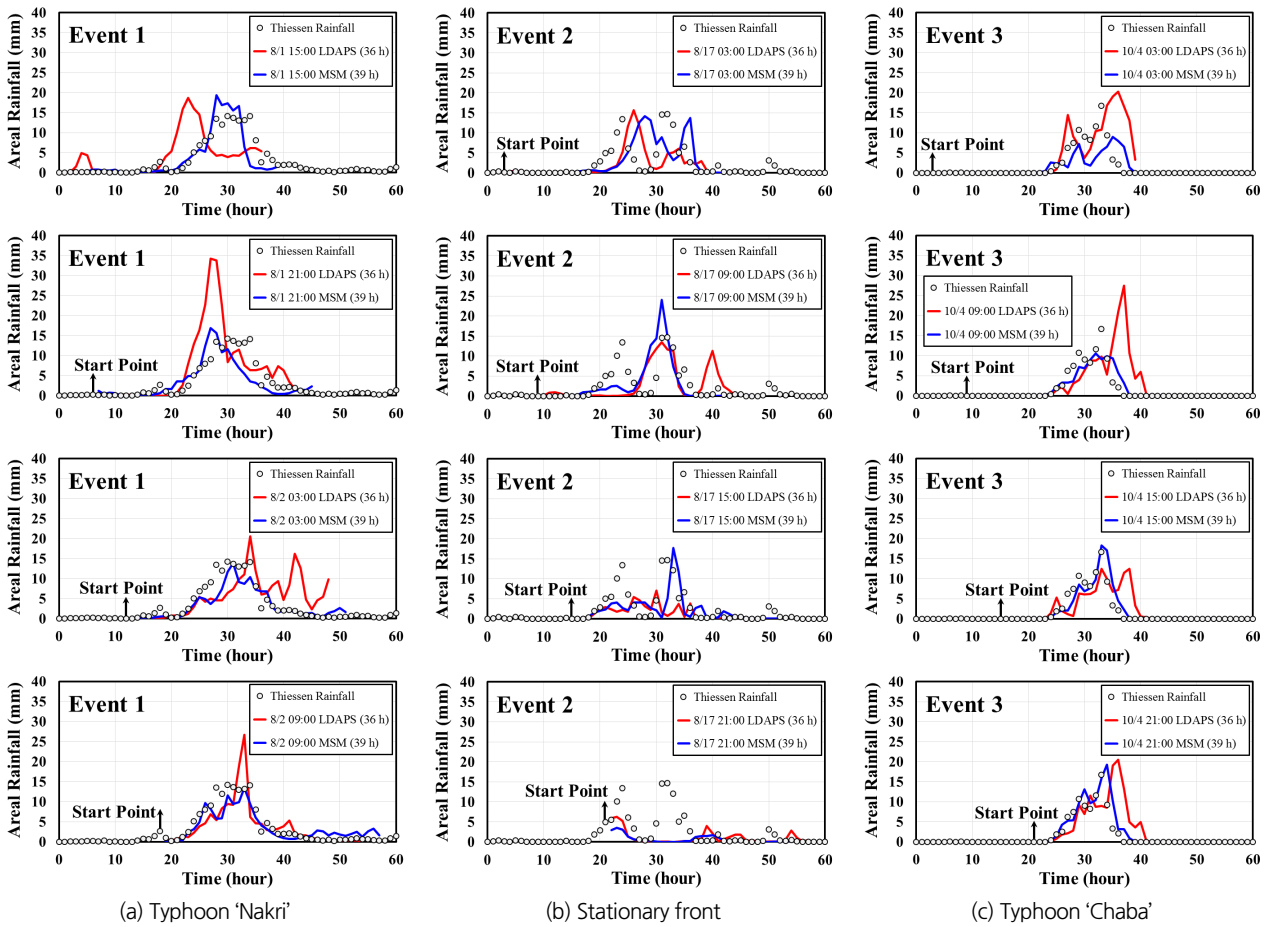


Fig. 4. Comparison of areal rainfall with LDAPS and MSM

같이 2014년 태풍 ‘나크리’와 정체전선, 2016년 태풍 ‘차바’ 등 3개의 강우사상에 대한 Table 3의 4개의 초기시간에 대한 선행시간에 따른 결과를 나타낸다. 또한 Fig. 4에 표시된 Start Point는 각각의 강우사상에서 LDAPS와 MSM의 예측 시작 시간을 나타낸다.

2014년 태풍 ‘나크리’(Event 1)의 첫 번째 예측결과(2014/08/01/15:00 Start)를 살펴보면 LDAPS의 경우 산청 유역에 강우가 발생하기 전에 예측강우가 발생하여 시간적 오차가 발생하는 것으로 나타났으며, 강우의 침투깊은 관측강우와 유사하게 발생하는 것으로 나타났다. MSM의 경우 선행시간 20시간 후에도 관측강우의 패턴과 유사한 예측 결과를 보였으며, 강우의 침투깊에서도 관측 강우와 유사하게 나타났다. 6시간 후 새로 갱신되는 두 번째 예측결과(2014/08/01/21:00 Start)를 살펴보면 LDAPS의 경우 강우의 발생시점을 잘 예측하고 있으나, 강우의 침투깊에서 과대 예측하는 것으로 나타났다. MSM의 경우 앞선 첫 번째 예측과 같이 강우 발생 초기부터 패턴을 잘 따르고 있으나, 강우의 침투깊 부분에서는 다소 과소 예측함을 알 수 있었다. 세 번째의 예측결과(2014/08/02/03:00 Start)에서는 LDAPS와 MSM이 강우의 침투깊 부분까지는 유사한 예측 패턴을 보이고 있으나, 침투깊 이후에는 MSM의 경우 패턴을 잘 예측하는 반면 LDAPS의 경우 강우 예측의 변동성을 보이고 있다. 마지막 네 번째 예측결과(2014/08/02/09:00 Start)에서는 LDAPS와 MSM의 예측 결과 패턴이 유사하게 나타나고 있으나, 침투깊 부분에서 LDAPS가 과대 예측하고 있음을 알 수 있다. 2014년 정체전선(Event 2)에서 산청 유역 내 관측강우에 대한 결과를 살펴보면 20시간에서 30시간, 30시간에서 40시간 두 개의 침투강우가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째 예측결과를 보면 LDAPS와 MSM의 예측강우가 관측강우에 비해 침투강우 발생 시점이 지연된 것을 알 수 있으며, 정량적으로는 LDAPS가 MSM에 비해 두 번째 침투강우를 과소 예측함을 알 수 있다. 두 번째 예측결과에서는 LDAPS와 MSM 모두 첫 번째 관측 강우 침투깊을 재현하지 못하였으나, 두 번째 침투깊에서는 그 패턴을 잘 재현하고 있다. 또한 LDAPS의 경우 두 번째 침투 깊에서 정량적으로도 잘 예측함을 보였으며, MSM은 10 mm 정도의 과대 예측함을 보였다. 세 번째 예측 결과에서는 MSM이 두 번째 침투깊에서 관측강우와 유사하게 나타났으나, LDAPS와 같이 전체적으로 과소예측하고 있으며, 마지막 네 번째 예측결과에서는 LDAPS와 MSM 모두 강우를 재현하지 못하고 있다. 이에 대한 원인으로서는 갱신되는 시점에서 수치 예보모델의 초기조건을 안정화하는 스핀업의 영향으로 예측 결과가 불안정해진 것으로 사료된다. 네 번째의 예측 결과의

예측 시작시간(2014/08/01/21:00 Start)에는 LDAPS와 MSM 모두 전지구예보모델로부터 경계조건을 제공받아 새로운 예측을 수행하게 된 것으로, 이 시각에는 정체전선에 의해 산청 유역에 강우가 발생하고 있다. 따라서 대기 조건은 매우 불안정하고, 대기는 비선형(Non-linear) 및 혼돈(Chaotic) 시스템이므로 초기 조건의 조금의 변형에도 예기치 않은 결과가 발생할 수 있다. 2016년 태풍 ‘차바’(Event 3)의 첫 번째 예측결과를 살펴보면 MSM의 경우 관측강우에 비해 과소예측하였으며, LDAPS는 관측강우와 시간적 오차가 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 두 번째 예측결과에서도 LDAPS는 시간적 오차가 발생하였으며, 관측강우와 MSM에 비해 과대예측하는 것으로 나타났다. 세 번째와 네 번째의 예측결과에서는 MSM은 관측강우와 유사한 패턴을 나타냈으며, LDAPS의 경우 강우 발생시기는 관측강우와 유사하게 나타났으나, 침투강우 발생 시점이 지연된 것을 알 수 있다. LDAPS와 MSM의 산청 유역평균강우량 예측결과(Fig. 4)를 통해 태풍 사상과 같은 광역적 범위 대해서는 예측 정확도가 높은 것으로 나타났으나, 정체전선과 같이 특정 지역에 국지적으로 발생하는 강우사상에 대해서는 강우의 정량적인 예측에 제약이 따르며 불확실성이 많이 내포되는 것을 알 수 있다.

Table 5는 Fig. 4의 지상강우관측소의 유역평균강우량과 LDAPS 및 MSM의 예측 유역평균강우량 사이의 상관계수(CC)와 총 강우량의 편의(BIAS) 및 오차(TE)를 비교한 것이다. CC, BIAS 및 TE는 음영으로 구분하였으며, CC의 경우 1에 가까울수록 짙은색을 나타내고 BIAS는 1을 기준으로 과소예측인 경우 옅은색, 과대예측인 경우 짙은색으로 구분하였다. 또한 TE의 경우 과소예측인 경우 짙은색, 과대예측인 경우 무색으로 구분하였다. 상관계수의 경우 태풍 ‘나크리’와 ‘차바’에서 LDAPS와 MSM은 예측자료가 업데이트 됨에 따라 점차 증가하는 경향을 보였다. MSM의 경우 태풍 사상에 대해 전체적으로 0.8 이상의 값을 나타냈으며, LDAPS의 경우 태풍 사상에 대해 각각 0.538, 0.446의 상관계수의 값을 나타내 MSM에 비해 정확도가 낮게 산정되었다. 정체전선의 경우 LDAPS와 MSM이 전체적으로 0.284와 0.38의 값으로 태풍 사상에 비해 예측 정확도가 낮게 나타났다. 총 강우량 편의(BIAS)를 살펴보면 LDAPS의 경우 태풍 사상에 대해서 총 강우량을 과대예측하는 경향을 나타냈으며, MSM은 태풍 ‘나크리’에 대해서는 0.839, 태풍 ‘차바’에 대해서는 과소 예측과 과대 예측이 상쇄되어 0.999의 결과로 재현성이 높은 것으로 나타났다. 또한 상관계수의 결과와 마찬가지로 정체전선의 경우 LDAPS와 MSM 모두 두 번째 업데이트 결과까지는 1의 값에 가까워 총 강우량에 대해서는 높은 재현성을 보여주고

Table 5. Areal rainfall verification using CC, BIAS and TE with update time

| Forecast no. | Event | Typhoon “Nakri” |       | Stationary front |       | Typhoon “Chaba” |       |
|--------------|-------|-----------------|-------|------------------|-------|-----------------|-------|
|              |       | LDAPS           | MSM   | LDAPS            | MSM   | LDAPS           | MSM   |
| CC           | 1     | 0.262           | 0.845 | 0.292            | 0.250 | 0.507           | 0.594 |
|              | 2     | 0.667           | 0.767 | 0.395            | 0.602 | 0.281           | 0.871 |
|              | 3     | 0.481           | 0.900 | 0.242            | 0.454 | 0.599           | 0.906 |
|              | 4     | 0.757           | 0.905 | 0.238            | 0.297 | 0.487           | 0.905 |
|              | Total | 0.538           | 0.832 | 0.284            | 0.380 | 0.446           | 0.816 |
| BIAS         | 1     | 1.052           | 0.941 | 0.766            | 1.069 | 1.711           | 0.737 |
|              | 2     | 1.525           | 0.831 | 0.905            | 0.909 | 1.484           | 0.943 |
|              | 3     | 1.138           | 0.761 | 0.435            | 0.713 | 1.128           | 1.062 |
|              | 4     | 0.882           | 0.837 | 0.353            | 0.190 | 1.430           | 1.255 |
|              | Total | 1.150           | 0.839 | 0.614            | 0.722 | 1.438           | 0.999 |
| TE (mm)      | 1     | -7.4            | 8.5   | 26.2             | -7.7  | -63.7           | 23.6  |
|              | 2     | -83.5           | 26.9  | 10.9             | 10.4  | -43.3           | 5.1   |
|              | 3     | -22.6           | 39.2  | 66.8             | 33.9  | -11.4           | -5.5  |
|              | 4     | 19.1            | 26.3  | 72               | 90.1  | -38.4           | -22.8 |
|              | Total | -94.4           | 100.9 | 175.9            | 126.7 | -156.8          | 0.4   |

있으나, 세 번째와 네 번째의 업데이트 결과에서는 그 값이 감소하여 총 강우량을 과소 예측하는 것으로 나타났다. 총 강우량 오차(TE)를 살펴보면 태풍 사상의 LDAPS는 시간적 오차가 발생하여도 총량에 대해서는 과대예측하는 경향을 나타냈으며, MSM은 Fig. 4와 같이 관측강우와 유사한 패턴을 보이고 있으나 전체적으로 과소예측하는 경향을 나타냈다. 정체전선의 경우 LDAPS와 MSM 모두 총량에 대해서 전체적으로 과소예측함을 알 수 있다. Table 5를 통해 앞서 언급한 바와 같이 태풍 사상과 같이 광역적으로 강우가 발생하는 경우에는 강우예측에 있어 높은 재현성을 나타내고 있으나, 정체전선 등 국지적으로 강우가 발생하는 경우에는 예측 재현성에 많은 오차를 내포하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 기상청에서 제공하는 레이더 합성 강우장을 이용하여 LDAPS와 MSM의 1 mm 임계값(threshold)에 대한 CSI를 분석한 결과이다. 본 연구에서는 기상청 레이더 합성 강우의 공간 분해능 1 km와 동일하게 맞추기 위해 Fig. 1의 검증도메인 내 1.5 km의 LDAPS와 5 km의 MSM을 1 km로 선형 보간하여 CSI를 분석하였다.

Fig. 5의 2014년 태풍 ‘나크리’(Event 1)의 첫 번째 예측결과를 살펴보면 선행시간 15시간까지는 태풍의 강한 강우 영역이 한반도에 상륙하지 않아 많은 강우가 발생하고 있지는 않지만, 대기의 불안정으로 인하여 강우가 조금씩 발생하고 있는 상황이다. 이로 인해 LDAPS와 MSM 모두 낮은 CSI 값을 보였으며, 본격적으로 강우가 발생하기 시작한 15시간이

후에는 LDAPS와 MSM 모두 CSI 값이 증가함을 보였다. MSM의 경우 선행시간 20시간에 0.8에 가까운 CSI 값을 보였으며, LDAPS에 비해 예측시간 동안 전체적으로 높은 값을 나타냈다. 두 번째 예측자료 결과를 살펴보면 LDAPS는 첫 번째 예측 결과에 비해 CSI 값이 증가하는 것으로 나타났으며, 선행시간 12시간에 0.6에 가까운 값으로 MSM과 비슷한 결과를 나타냈다. 세 번째와 네 번째의 예측결과를 살펴보면 LDAPS와 MSM 모두 강우가 발생하는 구간에 대해서 0.6 정도의 CSI 값을 나타냈으며, MSM이 LDAPS 보다 전체적으로 높은 값을 보여주고 있다. 2014년 정체전선(Event 2)의 첫 번째의 예측결과에서는 강우가 발생하는 구간에 대하여 LDAPS와 MSM이 0.4 정도의 CSI 값을 보여주고 있으며, 두 번째 예측결과에서는 MSM이 0.4 정도의 CSI 값을 보여주고 있는 반면 LDAPS의 경우 선행시간이 20시간 이후에는 MSM과 동일한 결과를 나타냈으나 선행시간 5시간과 15시간 구간에서는 MSM에 비해 과소 산정되는 결과를 나타냈다. 세 번째와 네 번째 갱신된 예측결과를 살펴보면 LDAPS와 MSM이 동일한 결과를 나타내고 있으며, 유역평균강우량의 결과(Fig. 4 and Table 5)와 마찬가지로 예측 결과에 태풍 사상에 비해 과소 산정되는 결과를 나타냈다. 2016년 태풍 ‘차바’(Event 3)에 대한 CSI 결과를 살펴보면 LDAPS와 MSM이 강우가 발생하는 구간에 대해서 유사한 패턴을 보여주고 있으나, MSM이 강우가 발생하기 시작하는 구간과 강우가 종료되어가는 구간에서 LDAPS에 비해 높은 CSI 결과를 나타내었다.



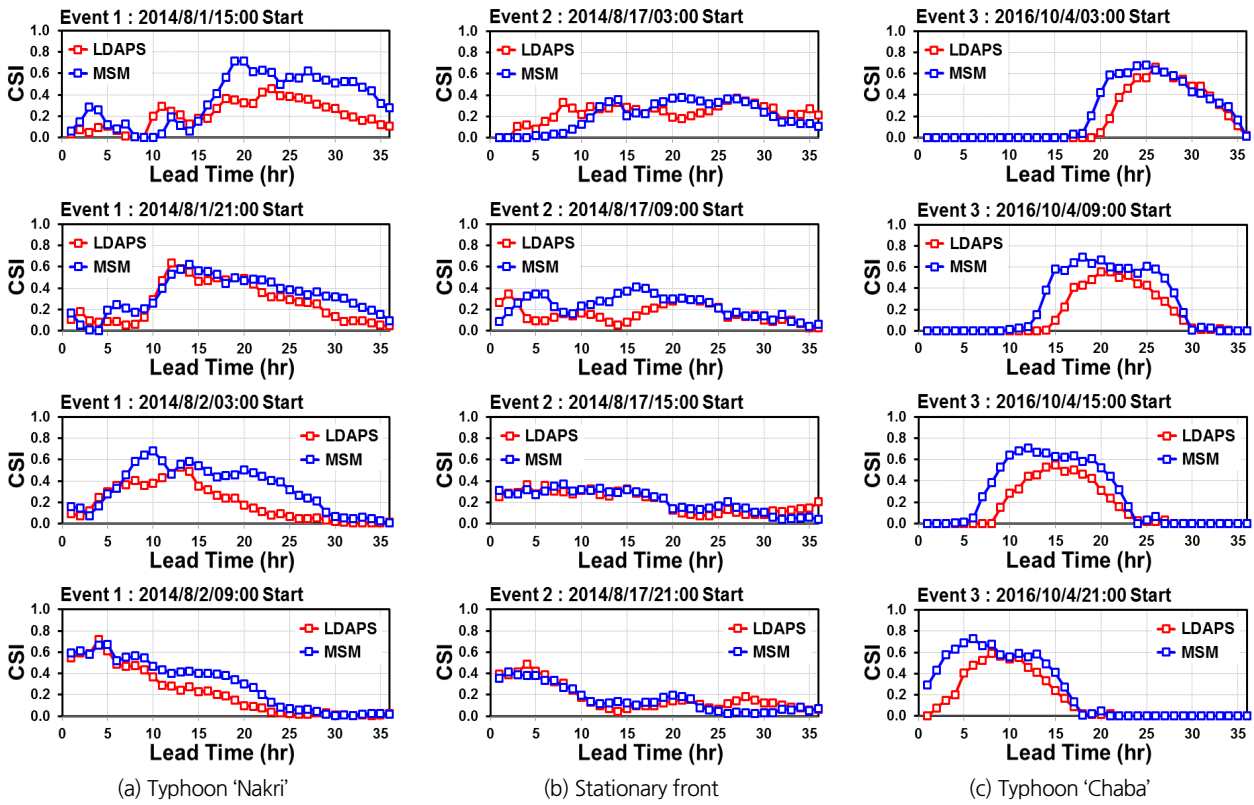


Fig. 5. CSI comparison of LDAPS and MSM (threshold: 1.0 mm)

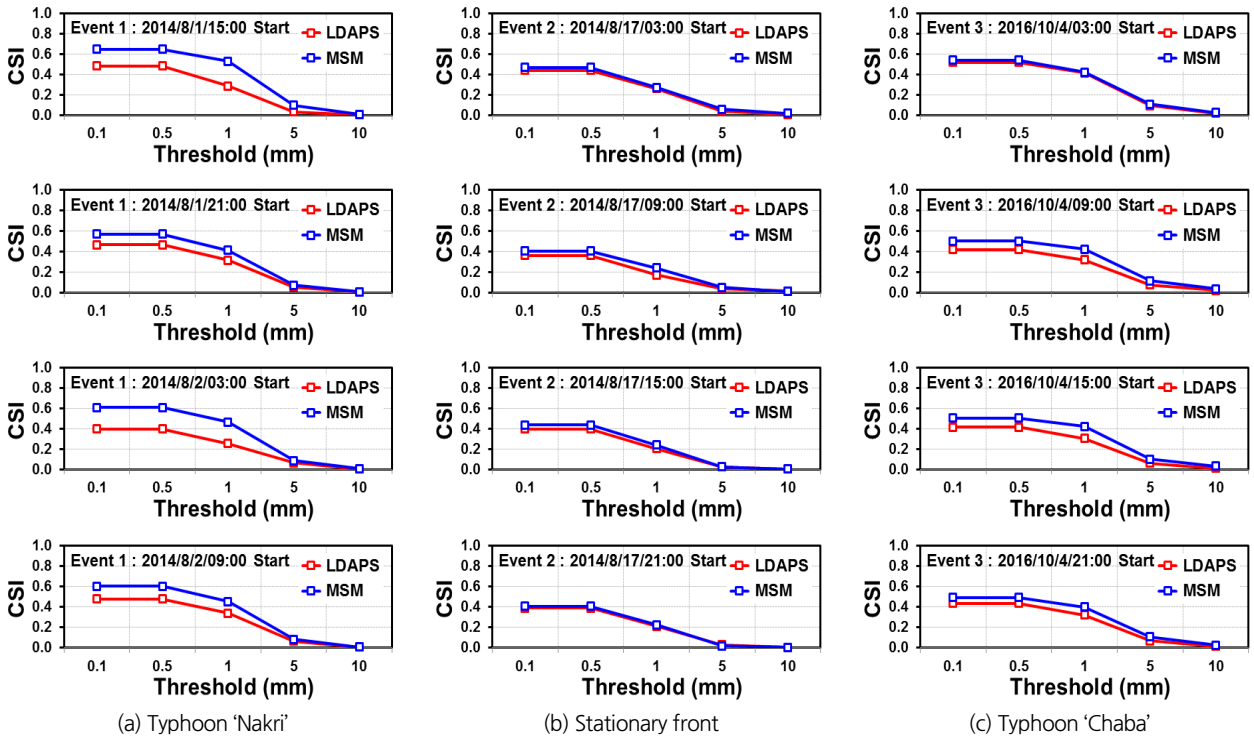


Fig. 6. CSI comparison of LDAPS and MSM with threshold values

Table 6. Discharge verification using CC, NSE and TE with update time

| Forecast no. | Event | Typhoon “Nakri” |         | Stationary front |         | Typhoon “Chaba” |         |
|--------------|-------|-----------------|---------|------------------|---------|-----------------|---------|
|              |       | LDAPS           | MSM     | LDAPS            | MSM     | LDAPS           | MSM     |
| CC           | 1     | 0.557           | 0.955   | 0.822            | 0.909   | 0.954           | 0.943   |
|              | 2     | 0.792           | 0.875   | 0.842            | 0.885   | 0.740           | 0.922   |
|              | 3     | 0.658           | 0.937   | 0.872            | 0.906   | 0.731           | 0.944   |
|              | 4     | 0.951           | 0.960   | 0.134            | 0.394   | 0.797           | 0.947   |
|              | Total | 0.694           | 0.905   | 0.659            | 0.702   | 0.790           | 0.846   |
| BIAS         | 1     | -0.028          | 0.88    | 0.568            | 0.82    | 0.636           | 0.407   |
|              | 2     | -0.207          | 0.717   | 0.636            | 0.781   | -0.393          | 0.811   |
|              | 3     | 0.358           | 0.69    | 0.086            | 0.576   | 0.449           | 0.874   |
|              | 4     | 0.816           | 0.693   | -0.535           | -0.668  | -0.337          | 0.626   |
|              | Total | 0.293           | 0.749   | 0.246            | 0.434   | 0.095           | 0.702   |
| TE<br>(cms)  | 1     | -7123.1         | -2860.9 | 1944.7           | -1366.7 | -3357.0         | 3188.7  |
|              | 2     | -13917.3        | 772.5   | 3795.0           | -453.9  | -6196.4         | 886.9   |
|              | 3     | -12.9           | 5276.4  | 10200.6          | 5325.2  | -2582.6         | -2089.4 |
|              | 4     | 2583.3          | 4769.9  | 13229.8          | 14975.5 | -10647.8        | -6990.5 |
|              | Total | -18470.0        | 7957.9  | 29170.1          | 18480.1 | -22783.8        | -5004.3 |

Fig. 6은 레이더 합성 강우장과 LDAPS 및 MSM의 0.1에서 10 mm까지 각각의 threshold에 대해 CSI를 분석한 결과이다. 각각의 threshold에 해당하는 CSI 값은 각각의 강우사상에 산청 유역 내 강우가 발생하는 구간에 대한 CSI 평균값을 나타낸다. Fig. 5를 통해 threshold가 증가함에 따라 CSI가 감소되는 경향을 알 수 있으며, 정체전선의 경우 LDAPS와 MSM이 거의 동일한 결과를 나타낸 반면 태풍 사상에 대해서는 MSM이 LDAPS에 비해 0.1 이상 높은 CSI 값을 나타냈다.

Figs. 4 and 5와 Tables 5 and 6에서 제시한 바와 같이 LDAPS와 MSM의 강우예측 정확도는 MSM이 LDAPS에 비해 약간 높은 정확도를 보이는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 보인 이유는 MSM은 Kain-Fritsch 적운모수화 기법을 이용하여 대류를 명시적으로 해석하고 5 km의 공간 해상도를 1 km로 선형 보간하여 1.5 km의 공간 해상도를 1 km로 선형 보간한 LDAPS에 비해 넓은 영역에 대해 강수를 표현할 수 있어 태풍과 같은 광역적인 강우 사상에 더 높은 정확도를 나타내는 것으로 판단된다.

### 3.2 홍수예측 정확도 평가

Fig. 7은 Fig. 4의 LDAPS와 MSM의 강우예측 정보를 이용한 산청유역에 대한 홍수예측 검증결과이다. 2014년 태풍 ‘나크리’(Event 1)의 첫 번째 예측결과를 살펴보면 LDAPS의 경우 Fig. 4의 결과에 따라 시간적 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 예측유량 역시 과소예측하는 것으로 나타났다. MSM

의 경우 선행시간 30시간 이후에도 관측 유량과의 패턴과 유사한 예측결과를 보였지만 침투유량이 발생하는 구간에서는 과소예측을 나타냈다. 두 번째 갱신된 예측결과에서는 MSM은 유량 침투값에 비해 과소예측하는 반면 LDAPS는 침투유량 발생시간은 MSM과 동일하지만 관측 유량에 비해 과대예측하는 것을 알 수 있다. 세 번째와 네 번째 갱신된 예측결과를 살펴보면 MSM의 경우 침투시간은 잘 예측하는 반면 과소예측하는 경향을 나타냈으며, LDAPS의 경우 세 번째의 예측결과에서는 MSM과 침투시간까지는 유사한 예측결과를 나타냈으나, 침투시간 이후에는 과대예측하는 경향을 나타냈으며, 네 번째 예측결과에서는 LDAPS가 MSM과 유사한 패턴을 보이거나 MSM보다 높은 정확도를 보이고 있다. 2014년 정체전선(Event 2)의 첫 번째 예측결과에서 MSM은 유량의 상승부에서는 관측유량 패턴을 잘 예측하였으나, 침투유량 발생구간에서 과소예측하였으며, LDAPS 역시 유량이 증가하는 시점은 잘 예측하고 있으나, 30시간 이후에는 과소예측하는 것으로 나타났다. 두 번째 갱신된 예측결과에서는 MSM은 첫 번째 예측결과와 마찬가지로 유량의 증가패턴은 잘 재현하고 있지만 35시간부터 과소예측을 나타냈으며, LDAPS 역시 첫 번째 예측결과와 유사하게 과소예측을 나타냈다. 세 번째 예측 결과에는 LDAPS와 MSM 모두 관측유량에 비해 과소예측하였으며, 네 번째 예측결과에서는 Fig. 4와 나타난 바와 같이 유역평균강우량을 예측하지 못함으로써 홍수예측에서도 유량을 적절히 모의하지 못하고 있다. 마지막 2016년 태풍

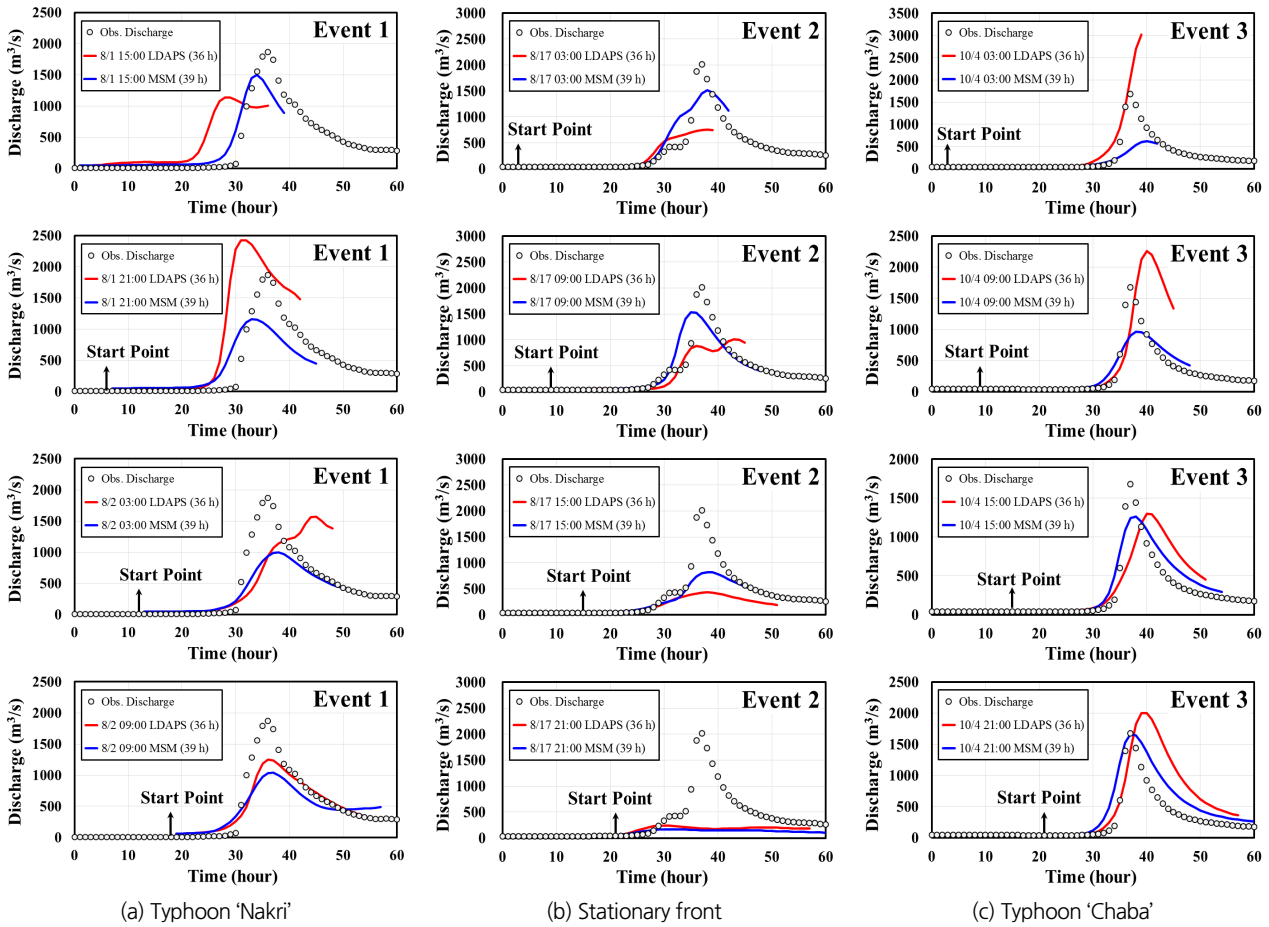


Fig. 7. Comparison of flood forecasting with LDAPS and MSM

‘차바’(Event 3)에 대한 예측결과를 살펴보면 LDAPS의 경우 첫 번째와 두 번째 예측결과에서는 과대예측하고 있으나, 갱신됨에 따라 세 번째의 예측결과에서는 첨두시간 오차가 발생하고는 있지만 관측유량을 어느 정도 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. MSM도 마찬가지로 예측이 갱신됨에 따라 유량의 예측 정확도가 증가하고 있으며, 세 번째에서는 첨두유량 발생시간을 정확히 예측하였으며, 관측 유량을 잘 재현하는 것으로 나타났다. 네 번째 예측결과에서 MSM은 관측유량의 첨두 발생시간과 첨두유량을 높은 정확도로 예측하는 것을 알 수 있으며, LDAPS의 경우 첨두시간과의 시간적 오차가 발생하고 과대예측하였으나, 유량 패턴을 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 7의 LDAPS와 MSM 강우예측 정보를 이용한 홍수예측 결과 선행시간이 증가함에 따라 관측유량 패턴을 적절히 재현하는 결과를 보여주며, 이를 통해 수치예보를 이용한 홍수예측 적용 가능성을 확인할 수 있다.

Table 6은 Fig. 7의 관측 유량과 LDAPS 및 MSM의 예측 유량 사이의 상관관계수, Nash-Sutcliffe 효율계수 및 총유출량

오차를 비교한 것이다. Table 5와 마찬가지로 CC, NSE 및 TE 값에 따라 음영으로 구분하였으며, CC의 경우 1에 가까울수록 짙은색을 나타내고 NSE는 음수의 경우 옅은색, 1에 가까울수록 짙은색, TE의 경우 과소예측인 경우 짙은색, 과대예측인 경우 무색으로 구분하였다. CC의 경우 모든 강우사상에 대해 전체적으로 0.65 이상의 높은 값을 보였으며, 각각의 갱신된 예측결과를 살펴보면 MSM의 경우 정체전선의 네 번째 갱신된 예측결과를 제외하고는 0.9 이상의 값을 나타내었다. LDAPS의 경우 태풍 ‘나크리’ 강우사상에서는 예측결과가 갱신됨에 따라 CC가 증가하는 경향을 보였으며, 네 번째 예측결과에서는 0.951의 높은 값을 나타내었다. 또한 태풍 ‘차바’ 강우사상에서는 첫 번째 예측결과에서는 0.954의 높은 값을 나타냈으며, 예측결과가 갱신됨에 따라 0.7 이상의 값을 보였다. 하지만 앞선 Fig. 7의 정체전선 강우사상의 LDAPS 결과에서는 과소예측의 결과를 보였으나 CC의 계산결과 세 번째 예측결과까지 0.9에 가까운 값을 보였다. 이는 CC의 경우 관측 자료와 예측자료의 상관관계, 즉 과소 또는 과대예측과 관계

없이 패턴을 잘 묘사하고 있으면 양의 상관관계를 나타내므로, 본 연구에서는NSE를 통해 LDAPS와 MSM의 홍수 예측 값과 관측값 사이의 정량적 정확도를 평가하였다. NSE의 결과를 살펴보면 Fig. 7의 홍수예측 검토에서 나타난 것과 같이 MSM은 태풍 ‘나크리’와 ‘차바’에서 전체적으로 0.7 이상의 정확도를 나타냈으며, LDAPS의 경우 0.293과 0.095의 값을 나타냈다. 또한 Fig. 7과 마찬가지로 정체전선 강우사상에 대해서는 LDAPS와 MSM이 각각 0.246와 0.434로 낮은 NSE 값을 나타냈으며, LDAPS는 MSM과 비교할 때 각각의 강우 사상에서 음의 값을 나타내는 예측결과도 보였다. 총 유출량 오차(TE)의 결과를 살펴보면 태풍사상에 대해서 LDAPS는 침투유량을 재현하지 못하였지만 대부분 과대예측하는 것으로 나타났다. 이는 유출량이 관측유량보다 먼저 발생하거나, 관측유량이 감소하는 구간에서 많은 유출량을 발생하는 시간적 오차에 의한 것으로 이는 예측 강우의 오차로부터 기인한 것으로 판단된다. MSM은 첫 번째 태풍 ‘나크리’의 경우 대부분 과소예측하였으며, 태풍 ‘차바’에서는 초기에 과소예측하였으나, 업데이트 됨에 따라 점점 관측 침투유량과 가까워지고 이후 과대예측하는 것으로 나타났다. 정체전선의 경우 총 강우량의 결과와 마찬가지로 전체적으로 과소예측함을 알 수 있다.

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 수치예보자료를 통한 강우 및 홍수 예측 적용성을 검토하기 위해 한국 기상청에서 제공하는 국지예보모델(LDAPS)과 일본 기상청의 중규모 모델(MSM)의 예측강우를 산청유역 내 지상관측강우의 유역평균강우량과 비교하였으며, 한반도 검증 영역에 대해서 기상청의 레이더 강우를 이용한 CSI 분석을 통해 공간적인 강우예측 정확도를 평가하였다. 또한 산청 수위관측소의 관측유량 자료를 이용하여 LDAPS와 MSM의 홍수 예측 정확도를 비교·검토하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

1) 지상관측강우의 유역평균강우량을 이용한 강우예측 정확도 평가 결과, LDAPS와 MSM은 태풍 사상과 같은 광역적인 예측에 대해서는 예측 정확도가 높은 것으로 나타났으나, 정체전선과 같이 국지적으로 발생하는 강우사상의 경우 태풍 사상에 비해 예측 오차가 많이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 MSM의 경우 태풍 사상은 전체적으로 0.8 이상의 상관계수 값을 나타냈으며, LDAPS는 0.5 정도로 MSM에 비해 정확도가 낮게 산정되었다.

2) 레이더 강우분포와의 비교를 통한 강우예측 정확도 평가 결과, MSM이 LDAPS에 비해 다소 높은 정확도를 보이는 것으로 나타났다. 이는 MSM은 적은모수화 기법을 이용하여 대류를 명시적으로 해석하고, 5 km의 공간 해상도로 인해 LDAPS에 비해 넓은 영역에 대해 강수를 표현할 수 있어 태풍과 같은 광역적인 강우 사상에 더 높은 정확도를 나타내는 것으로 판단된다.

3) 홍수예측 정확도 평가 결과, 강우예측 정확도 평가와 마찬가지로 수치예보 결과가 갱신됨에 따라 정확도가 향상되는 것을 알 수 있었으며, 정체전선과 같이 국지적인 예측보다는 태풍과 같은 광역적인 예측에 그 활용 가능성이 더 높을 것으로 판단되었다. 또한 선행시간이 증가함에도 관측 유량 패턴을 적절히 재현하고 예측 정확도가 향상되었으며, 수치예보를 활용한 홍수 예측 분야에 적용할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 이용한 LDAPS와 MSM은 앞서 언급한 바와 같이 사용하는 수치모델, 물리과정 매개변수, 자료동화 기법 및 지배 방정식 등이 다르고, 3개의 강우사상 및 하나의 유역에 대해 검토하였기 때문에 어느 수치예보자료의 정확도가 더 높다는 결론을 내는데 무리가 있다. 하지만 LDAPS와 MSM 자료 모두 기상 및 수자원 간의 연계를 통하여 강우 및 홍수 예측 분야에 활용 가능성이 있다고 판단되며, 홍수 예·경보 및 향후 유역관리 등을 위한 기초자료로 활용 가능하다고 판단된다. 또한 3개의 강우사상을 통해 호우형태에 따른 예측특성을 단정하는 것은 무리가 있으며, 추후 여러 호우특성별 강우사상에 적용을 통한 검증이 필요할 것으로 판단된다. 추가적으로 LDAPS 및 MSM의 예측 정확도를 위한 예측자료의 정확도 향상 기법 또는 수치예보의 불확실성을 평가할 수 있는 확률론적 예보 등의 후속 연구가 필요하다고 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 물관리연구사업의 연구비지원 (17 AWMP-B079625-04)에 의해 수행되었습니다.

#### References

Bartholmes, J., and Todini, E. (2005). "Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 9, pp. 333-346.

- Byun, D. H. (2009). *Dam inflow forecasts using short-term numerical weather forecast data*. Master dissertation, Sejong University, Seoul, Korea.
- Cuo, L., Pagano, T. C., and Wang, Q. J. (2011). "A review of quantitative precipitation forecasts and their use in short- to medium-range streamflow forecasting." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 12, pp. 713-728.
- De Roo, A. P. J., Gouweleeuw, B., Thielen, J., Bartholmes, J., Bongioanni-Cerlini, P., Todini, E., Bates, P. D., Horritt, M., Hunter, N., Beven, K., Pappenberger, F., Heise, E., Rivin, G., Hils, M., Hollingsworth, A., Holst, B., Kwadijk, J., Reggiani, P., Van Dijk, M., Sattler, K., and Sprokkereef, E. (2003). "Development of a European flood forecasting system." *International Journal of River Basin Management*, Vol. 1, No. 1, pp. 49-59.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V. K. (1992). "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models." *Water Resources Research*, Vol. 284, pp. 1015-1031.
- Golding, B. W. (2009). "Review - long lead time flood warnings: reality or fantasy?" *Meteorological Applications*, Vol. 16, pp. 3-12.
- Kim, S., Tachikawa, Y., Sayama, T., and Takara, K. (2009). "Ensemble flood forecasting with stochastic radar image extrapolation and a distributed hydrologic model." *Hydrological Processes*, Vol. 23, pp. 597-611.
- Kwadijk, J. (2003). *EFFS - European Flood Forecasting System*. Final Report of Contract EVG1-CT-1999-00011 (<http://effs.wdelft.nl>).
- Lee, S. J., Jeong, C. S., Kim, J. C., and Hwang, M. H. (2011). "Long-term streamflow prediction using ESP and RDAPS model." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 12, pp. 967-974.
- Marshall, J. S., and Palmer, W. M. (1948). "The distribution of raindrops with size." *Journal of Meteorology*, Vol. 5, pp. 165-166.
- MPSS (Ministry of Public Safety and Security) (2014). *Chronology of disasters*.
- Nakakita, E., Yoshikai, T., and Kim, S. M. (2012). "Application of error-ensemble prediction method to a short-term rainfall prediction model considering orographic rainfall." *Proceedings of 2011 International Weather Radar and Hydrology symposium*, Exeter, UK, Vol. 351, pp. 311-316.
- Saavedra Valeriano, O. C., Koike, T., Yang, K., Graf, T., Li, X., Wang, L., and Han, X. (2010). "Decision support for dam release during floods using a distributed biosphere hydrological model driven by quantitative precipitation forecasts." *Water Resources Research*, Vol. 46, W10544.
- Saito, K., Fujita, T., Yamada, Y., Ishida, J., Kumagai, Y., Aranami, K., Ohmori, S., Nagasawa, R., Kumagai, S., Muroi, C., Kato, T., Eito, H., and Yamazaki, Y. (2006). "The operational JMA nonhydrostatic meso-scale model." *Monthly Weather Review*, Vol. 134, pp. 1266-1298.
- Sayama, T., Tachikawa, Y., Takara, K., and Ichikawa, Y. (2006). "Development of a real-time distributed flood prediction system in a flow regulated river basin." *Proceedings of the third APHW Conference on 'Wise Water Resources Management towards Sustainable Growth and Poverty Reduction*.
- Schaake, J., Franz, K., Bradley, A., and Buizza, R. (2006). "The hydrologic ensemble prediction experiment (HEPEX)." *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Vol. 3, pp. 3321-3332.
- Schaake, J., Hamill, T. H., Buizza, R., and Clark, M. (2007). "HEPEX: the hydrological ensemble prediction experiment." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 88, No. 10, pp. 1541-1547.
- Tachikawa, Y., Nagatani, G., and Takara, K. (2004). "Development of stage-discharge relationship equation incorporating saturated-unsaturated flow mechanism." *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 48, pp. 7-12.
- Terada, M., Kataoka, K., Ikebuchi, S., Nanakita, E., Oishi, S., Fujita, A., and Takada, N. (2004). "The development of short-term rainfall prediction system in mountainous region by the combination of extrapolation model and meso-scale atmospheric model." *Proceeding of Six International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar*, Melbourne, Australia.
- Thielen, J., Schaake, J., Hartman, R., and Buizza, R. (2008). "Aims, challenges and progress of the Hydrological Ensemble Prediction Experiment (HEPEX)." *Atmospheric Science Letters*, Vol. 9, pp. 29-35.
- World Meteorological Organization (2011). *Manual on flood forecasting and warning*. (WMO-No. 1072), Geneva, Switzerland.
- Yoon, S. S., and Bae, D. H. (2010). "The applicability assesment of the short-term rainfall forecasting using translation model." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 8, pp. 38-42.
- Yu, W., Moon, H., Jeong, A., Kim, S., and Jung, K. (2016b). "Assessment of rainfall and flood forecasts using numerical weather prediction data." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 16, No. 6, pp. 78-89.
- Yu, M. S., Lee, Y. M., and Yi, J. E. (2016a). "Flood inflow forecasting on Hantan river reservoir by using forecasted rainfall." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 49, No. 4, pp. 327-333.
- Yu, W. (2014). *Ensemble flood forecasting using high-resolution ensemble NWP with radar based prediction considering rainfall forecast uncertainty*. Ph. D. dissertation, Kyoto University, Japan, Chapter 3.
- Yu, W., Nakakita, E., Kim, S., and Yamaguchi, K. (2014). "Accuracy improvement of flood forecasting using pre-processing of ensemble numerical weather prediction rainfall fields." *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 70, pp. I\_151-I\_156.
- Yu, W., Nakakita, E., Kim, S., and Yamaguchi, K. (2015). "Improvement of rainfall and flood forecasts by blending ensemble NWP rainfall with radar prediction considering orographic rainfall." *Journal of Hydrology*, Vol. 531, pp. 494-507.