지역기후모델을 이용한 2006년 7월 충주댐 유역 호우사상 재현 Reconstruction of July 2006 Heavy Rainfall Event Series in the Chungju Dam Watershed using a Regional Climate Model

이정훈* · 최정현** · 이옥정*** · 김상단****

Lee, Jeonghoon* · Choi, Jeonghyeon** · Lee, Okjeong*** · Kim, Sangdan****

Abstract

The approach that uses a regional climate model (RCM) is emphasized to prevent and reduce extreme rainfall events that are becoming more powerful due to climate change. This paper presented a preliminary study to produce Probable Maximum Precipitation (PMP) or mega-disaster scenarios using RCMs in Korea. The heavy rainfall event in July 2006, during which the highest average precipitation during the Changma season was recorded, was reconstructed using the Weather Research and Forecasting (WRF) model for the Chungju Dam watershed. Even when considering errors in the rainfall observation data, the WRF model could successfully reconstruct the July 2006 heavy rainfall event. It is expected that more reliable results will be obtained if the flow observation data is used in combination with a runoff model.

Key words : Extreme Rainfall Event, Regional Climate Model, Changma, WRF

요 지

기후변화로 인해 현재보다 강력해질 극한사상을 예방 및 저감하기 위해 최근 지역기후모델(Regional Climate Model, RCM)을 활용한 접근법이 부각되고 있다. 본 연구는 RCM을 이용하여 가능최대강수량 혹은 거대재난 시나리오를 생산하기 위한 기반연구이다. 충주댐 유역을 대상으로 장마철 기간 중 가장 높은 전국 평균 강수량을 기록했던 2006년 7월 강수량을 Weather Research and Forecasting (WRF) 모델을 이용하여 재현하고 모의능력을 평가하였다. 관측강우자료에 문제가 있는 점을 고려한다면 WRF는 해당기간의 강수량을 우수하게 재현하였다. 추후 유출모델과 결합하여 관측 유량 자료를 활용한다면 보다 신뢰성 높은 결과가 도출될 것으로 기대된다.

핵심용어 : 극한강우사상, 지역대기모델, 장마, WRF

1. 서 론

기후변화로 인해 강력해진 집중호우와 태풍은 세계적으로 재해발생 가능성 및 피해규모를 증가시키고 있다. 최근 106년(1912-2017) 동안 우리나라의 연평균기온은 10년마다 0.18 °C 상승하였으며, 연강수량은 10년마다 16.3 mm 증가하

였다. 또한 새벽, 주말 등 취약시간대 국지성 집중호우 등 극한기상이 빈번하게 발생하고, 과거의 기상관측 기록을 갱신하는 기상이변이 급증하고 있다(KMA, 2019). 따라서 기후변화로 인해 기존보다 강력해질 재해를 예방 및 저감하기 위한 대비가 필요한 실정이다.

국외에서는 기존보다 강력한 자연재해, 즉 가능최대강수

*정회원, 클리블랜드주립대학교 토목환경공학과 박사후연구원(E-mail: j.lee25@csuohio.edu)

Member, Research Scholar, Department of Civil and Environmental Engineering, Cleveland State University

**정회원, 부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학 전공 박사과정(E-mail: jeonghyeon202@naver.com)

Member, Ph.D. Student, Division of Earth Environmental System Science (Major in Environmental Engineering), Pukyong National University

***정회원, 부경대학교 환경연구소 전임연구원(E-mail: lover1804@nate.com)

Member, Research Scholar, Institute of Environmental and Marine Science, Pukyong National University

****교신저자, 정회원, 부경대학교 환경공학과 교수(Tel: +82-51-629-6529, Fax: +82-51-629-6523, E-mail: skim@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

량(Probable Maximum Precipitation, PMP)과 같은 거대재난을 대비하기 위한 연구가 활발히 진행되어오고 있으며 최근 지역기후모델(Regional Climate Model, RCM)을 이용하는 접근법이 새롭게 부각되고 있다(Dettinger et al., 2012; Lee et al., 2017a; Choi et al., 2018; Ishida et al., 2018). RCM을 이용한 접근법은 과거에 발생한 극한호우를 기반으로 이루어지기 때문에 과학적 타당성뿐 아니라 정책 구현 시 일반 대중들에게 보다 이해하기 쉽게 설명하는 것이 가능하다는 장점을 지니고 있다. 이러한 접근법을 기반으로 정책 및 실무적으로 적용하려는 움직임을 보이고 있으며, 실제로 거대재난 대비를 위한 실무적인 자료로 사용된바 있다(Dettinger et al., 2012; Choi et al., 2018).

국내에서도 RCM을 이용하여 과거 극한호우를 재현하고 살펴본 연구는 다수 존재하지만, 이는 예보에 중점을 둔 기상학적 목적에서의 수행된 연구들로 강수량을 중점에 둔 방재적인 목적에서 사용하기에는 어려움이 있다(Lee et al., 2015). 재해예방 및 대비를 위한 연구도 일부 수행된 바 있으나, 단기집중호우 및 태풍 재현이나 최대화 방법에 대한 연구로 우리나라 여름철 강수의 특징인 장마에 대한 연구는 미진한 실정이다.

우리나라 연총강수량의 50~60%는 여름철 강수가 차지하며, 80 mm 이상의 강수가 7월과 8월에 60% 이상 집중되는 특징을 가진다. 우리나라 여름철 강수의 특징인 장마(Changma)는 동아시아 몬순(East Asian monsoon) 시스템의 일부로 장마기간에 발생하는 정체전선과 동반된 깊은 대류운 시스템에 의해 집중호우가 발생된다. 장마로 인한 재해는 전체 기상재해 발생 빈도에서 약 30%를 차지하며, 장마기간인 7월에 집중되는 경향을 보인다(KMA, 2011). 1993년~2010년 동안 호우로 인한 피해 규모는 전체 기상재해(약 22조 1,176억 원)의 약 31% (6조 8,460억 원)을 차지하고 있으며, 태풍(10조 8,745억 원) 다음으로 큰 피해를 입히는

것으로 알려져 있다. 따라서 한반도의 여름철 강수 특성을 잘 이해하는 것은 재해저감 차원에서도 매우 중요한 일이다(In et al., 2014).

따라서 본 연구에서는 장마철이라는 긴 기간 동안의 강우사상을 RCM으로 재현하여 추후에 수행될 거대재난 시나리오나 PMP 산정을 위한 기반자료를 구축하고자 한다. 대상기간은 중부지방에 기록적인 강우량이 발생했던 2006년 7월을 대상으로 하였으며, 수도권을 비롯한 댐 하류 지역에 막대한 영향을 미치는 충주댐의 중요성을 고려하여 대상유역으로 선정하였다.

2. 연구 방법

2.1 대상 유역

연구 대상 유역은 충주댐 유역으로써 한강유역에 속해 있으며, 상류에는 평창강 유역과 남한강 상류 유역이 위치하고 있다. 본 연구에서 의미하는 충주댐 유역은 상류 유역을 포함하는 것으로 3개의 단위유역(남한강 상류, 평창강, 충주댐)으로 구성된다. 전체 유역면적은 6,662 km², 평균표고는 616.7 El. m, 평균경사는 14.2 %이다(Lee, Jo, et al., 2017). 충주댐 유역의 위치와 하천망 및 단위유역도는 Fig. 1과 같다.

2.2 대상 호우사상

2006년 장마는 평년보다 1주일 더 지속되었으며, 강우량도 평년보다 많았다. 특히 강우량은 평년의 약 2배 정도를 기록하였다. Fig. 2는 2000년부터 2017년까지 전국 76개 지점의 중관기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)의 7월 강수량을 평균한 결과로 2006년 7월 강수량이 상대적으로 높은 수치를 기록한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 1. Chungju Dam Watershed

Fig. 2. July Average Rainfall of ASOS in Korea (2000-2017)

우리나라에 상륙하지는 않았으나 장마기간 동안 3개의 태풍(EWINIAR, BILIS, KAEMI)이 지속적으로 많은 수증기를 한반도 쪽으로 공급하여 장마전선을 활성화 시키는 역할을 하였으며, 이로 인해 장마전선은 우리나라와 일본 규슈 지방에 정체하면서 집중호우의 원인이 되었다(Cha et al., 2007). 특히 중부지방을 중심으로 기록적인 강수량을 나타내었으며, 재방 붕괴, 농경지 및 주거지역 침수 등 다양한 피해를 야기하였다. 대상 유역이 속하는 한강수계의 다목적댐 유역(소양강댐, 충주댐, 황성댐)의 평균 강수량은 898.8 mm로 예년 322.3 mm에 비해 약 3배 정도 증가한 수치이며, 특히 충주댐의 경우 7월 10일부터 22일 동안 유역 평균강수량이 예년에 비해 337%나 높은 수치를 기록하였다.

2.3 RCM 구축

2.3.1 Weather Research and Forecasting model (WRF)

본 연구에서 사용한 RCM은 WRF 모델로 대기 연구와 예보를 목적으로 개발되었다. WRF는 미국의 국립해양 대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)과 국립대기연구소(National Center for Atmospheric Research, NCAR), 그리고 해외대학 등 150개 이상의 기관의 협력으로 개발된 커뮤니티형 모델이며, 수십 미터에서 수천 킬로미터까지 다양한 공간적 해상도를 지원하여 광범위하게 적용가능한 중규모 지역기후모델이다.

WRF는 크게 두 단계로 나누어 구동된다(Fig. 3). 우선 전처리 시스템(WRF Pre-processing System, WPS)은 모의 지역의 입력자료에서 WRF 모델 구동에 필요한 변수를 추출 및 정리한다. WRF ARW는 WPS에서 생성된 변수를 바탕으로 초기조건 및 경계조건을 생성하고, 이를 기반으로 모의를 실행한다. WRF에 대한 보다 자세한 사항은 Skamarock et al. (2008) 및 Lee et al. (2017a, 2017b) 을 참고할 수 있다.

Fig. 3. WRF Modeling Flow Chart (Lee et al., 2017a)

2.3.2 도메인 구성

모델의 모의영역은 한반도를 중심으로 총 3개의 도메인으로 구성하였으며, 27 km (D01), 9 km (D02) 그리고 3 km (D03)의 수평해상도를 가진다(Fig. 4). 모든 도메인은 총 30층의 연직격자로 구성하였으며, 상한은 50 hPa로 설정하였다. 장마전선에 영향을 주는 기단을 고려할 수 있도록 D01과 D02는 넓게 설정하였으며, 실질적으로 결과분석에 사용될 D03도 선행연구들에 비해 넓은 영역으로 설정하였다. 중첩격자기법은 상위 도메인(예를 들면 본 연구의 D01)이 하위 도메인(D02)으로 영향을 미치는 단방향 중첩격자기법을 적용하였다.

Fig. 4. Domain Configuration

2.3.3 모의기간 및 입력자료

본 연구에서는 2006년 07월 01일 00시부터 07월 31일 18시(UTC 기준)까지로 모의기간을 설정하였다. 입력자료는 1° 간격 격자의 National Center for Environmental Prediction (NCEP) FNL 재분석 자료를 사용하여 초기조건 및 경계조건을 생성하였다. 추가적으로 0.5° 격자 간격의 해수면 온도자료(RTG_SST, Real-Time, Global, Sea Surface Temperature analysis)와 지상 기상관측자료(NCEP ADP Global Surface Observational Weather Data), 고층 기상관측자료(NCEP ADP

Upper Air Observational Weather Data)를 이용하여 초기조건 및 경계조건을 개선하였다.

2.3.4 도메인 및 물리옵션

WRF 모델 내에서 Universal Time Coordinated (UTC)를 사용하는 것을 고려하여 본 연구에서는 2006년 07월 01일 00시부터 07월 31일 18시(UTC 기준)까지로 모의기간을 설정하였다. 최적물리옵션 탐색을 위해 강우 발생에 큰 영향을 미치는 미세물리(microphysics), 적운모수화(cumulus parameterization), 그리고 행성경계층(planetary boundary

layer) 물리옵션을 조합하여 다양한 수치실험을 수행하였으며, 2006년 7월 충주댐 강수량을 상대적으로 가장 잘 재현하는 것으로 판단되는 물리옵션별 scheme을 선택하였다. 최종적으로 구축된 WRF 모델에 대한 정보는 Table 1과 같다.

3. 연구결과 및 분석

3.1 누가 강우량

WRF 모델을 이용하여 모의된 누가강우량의 공간적인 분포를 관측 강우자료와 비교하였으며, 결과는 Fig. 5와

Table 1. Summary of WRF Model Configuration

Model	WRF V3.9		
Domain	D01	D02	D03
Horizontal grid size	27 km	9 km	3 km
Dimension	135 × 111 × 30	205 × 184 × 30	214 × 304 × 30
Nesting method	One-way		
Initial and boundary condition	<ul style="list-style-type: none"> - NCEP FNL reanalysis data - Real-Time, Global, Sea Surface Temperature analysis data - NCEP ADP Global Surface Observational Weather Data - NCEP ADP Global Upper Air Observational Weather Data 		
Microphysics	Thompson graupel scheme		
Cumulus parameterization	Tiedtke scheme		
Planetary boundary layer	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE scheme		
Land surface model	Noah Land Surface Model		
Integration period	0000 UTC 01 ~ 1800 UTC 31 July 2006		
Time step	60	20	6

Fig. 5. Comparison of Observed and Simulated Total Accumulated Rainfall Depth (July 2006)

같다. 이때, 붉은색으로 표시된 지역은 충주댐을 나타낸다. 관측자료는 2006년 7월 강우자료가 존재하는 전국 76개 지점의 중관기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)과 457개 지점의 자동관측시스템(Automatic Weather System, AWS)의 자료를 Kriging 기법을 사용하여 공간적으로 분포시킨 결과이다. Kriging 기법을 사용하여 지점 관측자료를 공간적으로 분포시키는 과정에서 발생하는 불확실성을 고려하더라도 모의 결과는 전반적으로 관측 강우자료에 비해 과대 추정된 것을 확인할 수 있으며, 중부지방의 집중호우 지역이 관측자료에 비해 남쪽으로 치우쳐진 것을 확인할 수 있다. 이는 여러 가지 원인이 있겠지만, 다양한 종류의 지점 관측자료로 개선을 했다고 해도 1°격자라는 저해상도의 입력자료에서 기인한 불확실성과 이를 기반으로 장기간에 대한 수치모의가 수행됨에 따라 발생하는 모델의 모의능력 한계가 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

3.2 유역 평균강우량

연구대상지역인 충주댐 유역의 공간평균 일강수량을 살펴본 결과는 Fig. 6과 같다. 이때 Fig. 6(c)는 충주댐 단위유역을 의미하며, (d)는 상류에 위치하는 남한강상류 단위유역

및 평창강 단위유역을 포함한 충주댐 유역을 의미한다. 일단 위 시계열을 살펴보면 전반적으로 시간적인 분포 및 강우량을 합리적으로 재현하지만 7월 11일에 해당하는 모의강우량이 과다 추정되는 것을 확인할 수 있으며, 월말에 해당하는 28-29일 또한 다소 과소추정되었다.

이에 대한 원인을 분석하기 위해 입력자료, 관측자료 및 기타 여러 가지 수문정보를 살펴보았다. 국가수자원관리종합정보시스템(<http://wamis.go.kr>)에서 제공하는 2001년부터 2010년까지 7월의 충주댐 유입량과 유역 평균강우량 자료로부터 유출비를 산정하였으며 이에 대한 결과는 Table 2와 같다.

연구기간에 해당하는 2006년 7월의 경우 유출비가 0.95였으며, 2004년에도 0.92라는 높은 수치를 기록하였다. 이는 소규모 도시배수분구나 도로에서 가능한 결과로 대규모 자연유역에서는 현실적으로 납득하기 어려운 결과이다. 서로 다른 수문기상조건을 고려하더라도 다른 연도의 결과에 비해 과도한 결과라 할 수 있다. 일반적으로 댐 유입량은 저수위를 기반으로 계산되므로 상대적으로 정확하다는 점을 고려한다면, 충주댐 유역 내에서 국지적으로 발생하는 집중호우를 현재의 강우관측지점이 포착하지 못한다고 가정하는 것이 타당할 것이다.

(a) Upstream of South Han River unit watershed

(b) Pyeongchang River unit watershed

(c) Chungju Dam unit watershed

(d) Chungju Dam watershed

Fig. 6. Observation and Simulation Daily Rainfall of Chungju Dam Watershed

Table 2. Chungju Dam inflow, Rainfall and Runoff Coefficient in July (2001-2010)

Observation year (yyyy/mm)	Dam inflow (mm/month)	Rainfall (mm/month)	Runoff ratio
2001/07	109.24	204.91	0.5331
2002/07	95.57	224.75	0.4252
2003/07	259.91	347.20	0.7486
2004/07	380.18	411.06	0.9249
2005/07	251.98	344.10	0.7323
2006/07	866.52	914.19	0.9479
2007/07	177.65	280.24	0.6339
2008/07	184.87	322.09	0.5740
2009/07	361.32	470.89	0.7673
2010/07	31.54	128.65	0.2451

따라서 관측된 강우정보만을 사용하다는 것은 한계가 있다고 판단하고 전 지구단위 강우자료를 획득하여 분석해 보았다. 획득된 전 지구단위 자료는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)에서 제공하는 ERA-20C 자료(공간해상도: 1° 격자, 시간해상도: 3 hr)와 CPC Global Unified Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation 자료(공간해상도: 0.5° 격자, 시간해상도: Daily)이다. ERA-20C 자료의 경우 대상기간동안의 우리나라 강수량이 과소 추정되어 있었으며, CPC Global Unified Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation 자료(CPCG data)의 경우에도 낮은 공간해상도로 인해 관측 강우정보의 한계를 극복할 수 있는 경향성 및 특징을 확보할 수 없었다(Fig. 7).

이에 본 연구에서는 7월 11일 관측 강우자료는 결측치로

가정하고 7월 11일의 관측 및 모의자료를 제외하고 연구를 진행하였다. 수정된 관측자료와 WRF 모의자료간의 상관성을 판단하기 위해 회귀분석을 실시한 결과는 Fig. 8과 같다. 충주댐 단위유역 충주댐 유역 전체에 대한 결정계수 (R^2)는 약 0.79로 비교적 잘 재현된 것을 확인 할 수 있다.

대기모형을 이용하여 강수량을 정확하게 추정하는 것은 매우 어려운 일으로 모델의 격자크기, 초기조건 등이 조금만 변화해도 다른 결과가 도출된다. 또한, 본 연구에서는 한달이라는 장기간의 모의를 수행하였기에 때문에 월말의 결과는 보다 큰 불확실성을 가지게 된다. 하지만 본 연구는 강우를 완벽하게 재현하는 것이 아니라 PMP 혹은 거대재난 시나리오를 생산하는 것이 최종목적임에 따라 강우의 경향성을 합리적인 수준으로 재현하고자 하였기에 최종목적의 달성

Fig. 7. Comparison of Observed and CPCG Data Total Accumulated Rainfall Depth (July, 2007)

Fig. 8. Regression of Observed and Simulated Daily Space-averaged Rainfall Depth

에는 무리가 없으리라 판단된다.

4. 결 론

기후변화로 인해 보다 강력해질 극한사상을 예방 및 저감하기 위해 국내외적으로 다양한 연구가 수행되고 있다. 본 연구에서는 최근 부각되고 있는 RCM을 활용한 접근법을 이용하여 PMP 혹은 거대재난 시나리오를 생산하기 위한 기반연구로서 한국 여름철의 특징인 장마철 강수량을 재현하고 모의능력을 평가하고자 하였다. 수도권을 비롯한 댐 하류 지역에 막대한 영향을 미치는 충주댐 유역을 연구유역으로 선정하고, 장마철 기간 중 가장 높은 전국 평균 강수량을 기록했던 2006년 7월 강수량을 대상으로 연구를 수행하였다. 저해상도(1° 간격)인 NCEP FNL 재분석 자료를 개선하기 위해 다양한 지점 관측자료를 이용하여 초기조건 및 경계조건을 생성하였다. 다양한 수치모의를 실시한 결과 Thompson graupel scheme, Tiedtke scheme 그리고 Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE scheme 조합이 최적 물리옵션 조합으로 나타났다. 하지만 대상유역의 2006년 7월 11일에 해당하는 강수량을 과다추정하였으며, 월말에 해당하는 28-29일 강수량은 과소

추정하는 한계를 보여주었다. 이는 저해상도의 입력자료 장기간의 수치모의로 인한 오차 등 여러 가지 원인이 존재하겠지만, 관측 강수량 자체의 문제가 가장 클 것으로 판단된다. 해당기간 충주댐 유입량과 유역 평균강수량 자료로부터 산정된 유출비가 0.95로 이는 충주댐 규모의 자연유역에서는 현실적으로 발생하기 어려운 수치이다. 이는 현재 강우관측지점으로는 국지적으로 발생하는 집중호우를 포착하지 못할 수 있다는 가능성을 제시하며, 이에 대한 개선사항을 위한 추가적인 연구가 필요하리라 판단된다.

따라서 2006년 7월 11일에 해당하는 강수량은 제외하고 분석을 수행한 결과, R^2 는 약 0.79로 모의 자료가 관측자료를 비교적 잘 재현하는 것으로 나타났다. 본 연구는 강우 관측자료를 완벽하게 재현하는 것이 아니라 PMP 혹은 거대재난 시나리오를 생산하는 것이 최종목적이기 때문에 강우의 경향성을 합리적인 수준으로 재현 RCM 기반 최대화 및 전이기법이 정립된다면 연구의 최종목적 달성에는 무리가 없을 것으로 판단된다.

자료 자체에 문제가 있으면 아무리 뛰어난 모델을 사용하더라도 신뢰성 있는 결과가 나오기 어렵다. 본 연구에서는 유역을 대표하기 어려우리라 예상되는 공간평균 강우자료의

한계를 극복하기 위해 가능한 자료를 분석하여 대상 호우사상을 재현하였다. 이러한 결과를 보완하기 위해서는 추후 유출모델과 결합하여 유출량 자료를 기반으로 역 추적하여 호우사상을 재현하는 연구가 수행될 필요가 있다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물 관리 사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호 83073).

References

- Cha, E.J., Lee, K.H., Park, Y.H., Park, J.S., Shim, J.K., In, H.J., et al. (2007). Characteristics of typhoon in 2006 and improvement of typhoon forecast. *Atmosphere*, Vol. 17, No. 3, pp. 299-314.
- Choi, J., Lee, J., Jeong, H., Jang, J., and Kim, S. (2018). Effect of improvement of initial and boundary conditions in WRF model on simulating typhoon rainfall. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 2, pp. 445-454.
- Dettinger, M.D., Ralph, F.M., Hughes, M., Das, T., Neiman, P., Cox, D., et al. (2012). Design and quantification of an extreme winter storm scenario for emergency preparedness and planning exercises in California. *Natural Hazards*, Vol. 60, No. 3, pp. 1085-1111.
- In, S., Han, S., Im, E., Kim, K., and Shim J. (2014). Study on temporal and spatial characteristics of summertime precipitation over Korean Peninsula. *Atmosphere*, Vol. 24, No. 2, pp. 159-171.
- Ishida, K., Kavvas, M.L., Chen, Z.R., Dib, A., Diaz, A.J., Anderson, M.L., et al. (2018). Physically based maximum precipitation estimation under future climate change conditions. *Hydrological Processes*, Vol. 32, No. 20, pp. 3188-3201.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2011). Changma whitebook. KMA, Seoul, Korea.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2019). 2018 abnormal climate report. KMA, Seoul, Korea.
- Lee, J., Choi, J., Jeong, H., and Kim, S. (2017a). Preliminary study for physically based estimation of maximum precipitation using the regional climate model in Korea: Reconstruction of typhoon RUSA rainfall. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 1, pp. 401-411.
- Lee, J., Choi, J., Lee, O., Yoon, J., and Kim, S. (2017b). Estimation of probable maximum precipitation in Korea using a regional climate model. *Water*, Vol. 9, No. 4, Article No. 240, pp. 1-12.
- Lee, J., Jang, S., and Kim, S. (2015). Evaluation of the WRF model in reproducing the spatio-temporal pattern of a heavy rainfall event. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 5, pp. 255-265.
- Lee, O., Jo, D.J., and Kim, S. (2017). Future PMP estimation of Chungjudam watershed under KMA climate change scenarios. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 1, pp. 365-373.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M., et al. (2008). *A description of the advanced research WRF version 3*. No. NCAR Technical Note TN-475+STR.

Received	July 3, 2019
Revised	July 4, 2019
Accepted	July 22, 2019