

Multi-GCMs의 기후시나리오를 이용한 홍수특성변화 평가

Assessment on Flood Characteristics Changes Using Multi-GCMs Climate Scenario

손경환* / 이병주** / 배덕효***

Son, Kyung Hwan / Lee, Byong Ju / Bae, Deg Hyo

Abstract

The objective of this study is to suggest an approach for estimating probability rainfall using climate scenario data based GCM and to analyze changes of flood characteristics like probability rainfall, flood quantile and flood water level under climate change. The study area is Namhan river basin. Probability rainfalls which is taken 1440 minutes duration and 100-year frequency are estimated by using IPCC SRES A2 climate change scenario for each time period (S0: 1971~2000; S1: 2011~2040; S2: 2041~2070; S3: 2071~2100). Flood quantiles are estimated for 17 subbasins and flood water level is analyzed in the main channel from the downstream of Chungju dam to the upstream of Paldang dam. Probability rainfalls, peak flow from flood quantile and water depth from flood water level have increase rate in the range of 13.0~15.1 % based S0 (142.1 mm), 29.1~33.5% based S0 (20,708 m³/s), 12.6~13.6% in each S1, S2 and S3 period, respectively.

Keywords : climate scenarios, GCM, probability rainfall, flood quantile, flood water level, The Namhan river

요 지

본 연구의 목적은 GCM으로부터 생산된 기후시나리오자료를 이용하여 미래 확률강우량을 산정하는 방법을 제안하고 미래기간의 확률강우량, 홍수량, 홍수위 산정을 통해 기후변화로 인한 홍수특성변화를 정량적으로 분석하는데 있다. 대상유역으로 남한강 상류유역을 선정하였으며, 기후시나리오자료는 13개 GCMs으로부터 IPCC SRES A2 기후시나리오 자료를 구축하였고 자료기간은 총 130년(1971~2100년)이다. 확률강우량은 4개 자료기간(S0: 1971~2000년; S1: 2011~2040년; S2: 2041~2070년; S3: 2071~2100년)으로 구분하여 강우지속기간 1440분의 100년 빈도 확률강우량을 산정하였다. 또한 17개 소유역에 대해 확률홍수량을 산정하고 충주댐 직하류부터 팔당댐 직상류까지의 주하도 구간에 대해 홍수위 분석을 수행하였다. 남한강유역은 과거기간의 확률강우량 142.1 mm에 비해 13.0~15.1% 증가, 첨두홍수량은 20,708.0 m³/s에 비해 29.1~33.5% 증가, 홍수위는 구간평균 12.6~13.6% 증가하는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 기후시나리오, GCM, 확률강우량, 확률홍수량, 홍수위, 남한강

* 세종대학교 토목환경공학과 박사과정

Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul, Korea

** 교신저자, 세종대학교 토목환경공학과 공학박사 (e-mail: bjlee0704@paran.com)

Corresponding Author, Ph.D., Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

*** 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 교수

Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul, Korea

1. 서론

정부 간 기후변화 협의체 (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) 제 4차 종합보고서는 지구온난화로 인하여 지난 100년 (1906~2005) 동안 지구의 평균기온은 약 0.7°C 상승하였으며, 이러한 추세는 1990년 이후 더욱 급격해지는 것으로 제시하였다 (IPCC, 2007). 최근 50년 동안 우리나라 강수량을 분석한 결과 전국적으로 강수일수는 감소하고 일강수량 80 mm 이상인 호우발생 빈도는 증가하는 경향이 있는 것으로 나타났다 (기상연구소, 2004; Jung et al., 2010). 또한 남부지방에서는 연강수량이 7% 증가하고 연강수일수는 14% 감소하며 강우강도는 18% 증가하는 것으로 알려져 있다 (Choi, 2002). 이상의 결과를 종합해 볼 때, 우리나라는 기후변화의 영향으로 강우발생일수 감소, 연 강수량 증가, 강우강도 증가 현상이 나타남을 예상할 수 있으며 특히, 강우강도의 증가와 강우발생일수의 감소는 각각 홍수와 가뭄의 발생가능성을 증가시킨다고 할 수 있다 (Bae et al., 2008a). 실제 1999년의 집중호우, 2002년 태풍 ‘루사’, 2003년 태풍 ‘매미’, 2006년 집중호우 및 2007년 태풍 ‘나리’ 등의 원인으로 홍수피해가 있었으며 가뭄의 경우에도 1994, 2001, 2002년 피해를 비롯하여 2008년 태백시 가뭄 발생 등 근래에 들어 홍수와 가뭄에 대한 피해가 빈발하고 있다.

현재 기후변화로부터 증가하는 기상재해를 경감하기 위한 방법으로 홍수 및 가뭄 조기경보시스템 등의 비구조적 대책과 다목적댐 및 다기능 보 설치, 하도준설, 제방보강 등의 구조적 대책이 마련되고 있는 실정이다. 다만, 이러한 대책들을 수립하는데 있어서 기후변화의 영향을 고려할 수 있는 방안이 체계적으로 수립되고 있지 못할 뿐만 아니라 구조물 설계 시 기후변화에 따른 정량적 평가도 이루어지지 못한 실정인바 기후변화에 대한 과학적인 영향평가가 필요한 상황이다.

최근 기후변화에 따른 피해가 가속화 되면서 국내외 수문분야에서는 기후변화에 따른 수자원 연구가 다양하게 진행되고 있으나 (Bae et al., 2008b; Im et al., 2009) 수공 구조물 설계 시 기후변화 영향을 적용할 수 있는 방안에 대한 연구는 미진한 상태이다. 김병식 등 (2008)은 하나의 GCM에서 생산된 기후시나리오로부터 Quantile mapping 방법을 적용하고 빈도별 강수량을 산정하여 IDF 곡선을 작성한 바 있다. 국외 사례의 경우 Cameron et al. (2000)은 HadCM2 모델과 강우-유출모형인 TOPMODEL을 이용하여 15개 기후시나리오에 대한 홍수빈도해석을 수행하였으며 Kay et al. (2006)은 RCM을 PDM (Probability Distributed Rainfall-Runoff Model)과 연계하여 유출해석을 수행하고 홍수빈도해석을 통한 과거대비 미래 홍수

량의 변동성을 분석한 바 있다. 또한 Maillhot et al. (2007)은 CRCM (Canadian Regional Climate Model)의 기후시나리오를 토대로 IDF 곡선을 작성하여 지속기간별 재현기간별 강우량이 현재에 비해 크게 증가한 것을 규명한 바 있다.

이와 같이 기후변화 영향을 고려한 강우 및 홍수특성 분석과 관련한 연구가 다양하게 수행되고 있으나, 국내의 경우 대체로 시나리오별 강우의 변동성 분석에만 국한되어 있으며 실제 설계홍수량 및 홍수위 변화에 대해 분석한 사례는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 미래 기후변화를 고려한 확률강수량 산정방법을 제안하고 다중 GCMs로부터 생산된 기후시나리오를 이용하여 미래 확률강수량, 홍수량, 홍수위에 대한 변화를 정량적으로 분석하고자 한다.

2. 기후변화를 고려한 홍수변화 분석 방법

본 연구에서는 미래 기후변화 영향을 고려한 확률강수량 산정 방법을 제안하고 확률강수량으로부터 산정한 확률홍수량과 홍수위의 변동성을 분석하고자 한다. 연구수행절차는 크게 과거기간과 미래기간의 강우자료를 이용한 확률강수량, 홍수량, 홍수위 산정과정으로 구분된다. 여기서 가장 초점이 되는 부분은 미래기간의 확률강수량 산정이며 이를 제외한 과거기간의 확률강수량, 홍수량, 홍수위 산정 방법은 현재 국내에서 적용되고 있는 방법과 동일한 방법을 적용하여 산정하고자하며 구체적인 방법은 논의로 하고자 한다.

GCM은 역학적, 물리적 과정에 기초하여 온실가스 배출시나리오에 따른 대기/해양/지표에서의 변화를 객관적으로 제공할 수 있는 유일한 도구이다. 그러나 각각의 GCM은 각기 다른 역학체계와 격자크기 및 매개변수화 과정, 물리과정으로 인해 모델별로 모의결과의 차이가 발생한다 (IPCC, 2001). 따라서 하나의 GCM 결과를 이용하는 것은 해당 모형의 bias 또는 random error가 모의결과에 지배적인 영향을 미칠 수 있으므로 다양한 GCMs 결과를 활용하여 미래를 예측하고 변동성을 평가할 필요가 있다.

GCM으로부터 생산된 기후시나리오 자료가 과거 관측자료와 유사하게 극치호우를 모의하는 경우는 기존의 방법과 동일한 방법으로 연최대치계열의 자료를 구축하여 강우빈도해석을 통해 확률강수량을 산정할 수 있으나, 현재 IPCC DDC에서 제공하는 GCM의 공간해상도는 대략 100 km 이상의 해상도를 가지기 때문에 국지성 호우, 태풍 등과 같은 극치호우의 생성과 소멸을 설명하지 못하고 있는 실정이다. 최근 일본에서는 극치사상이 반영된 20 km

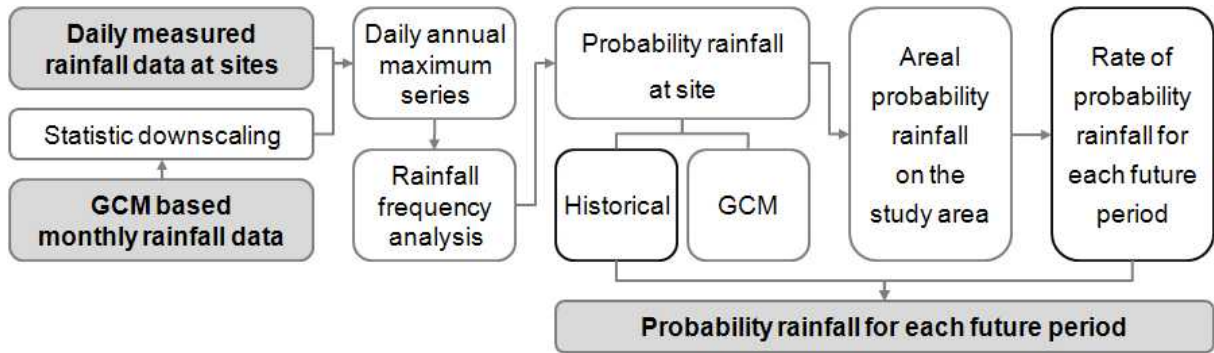


Fig. 1. Flow Chart of Probability Rainfall Estimation Based on Climate Scenario

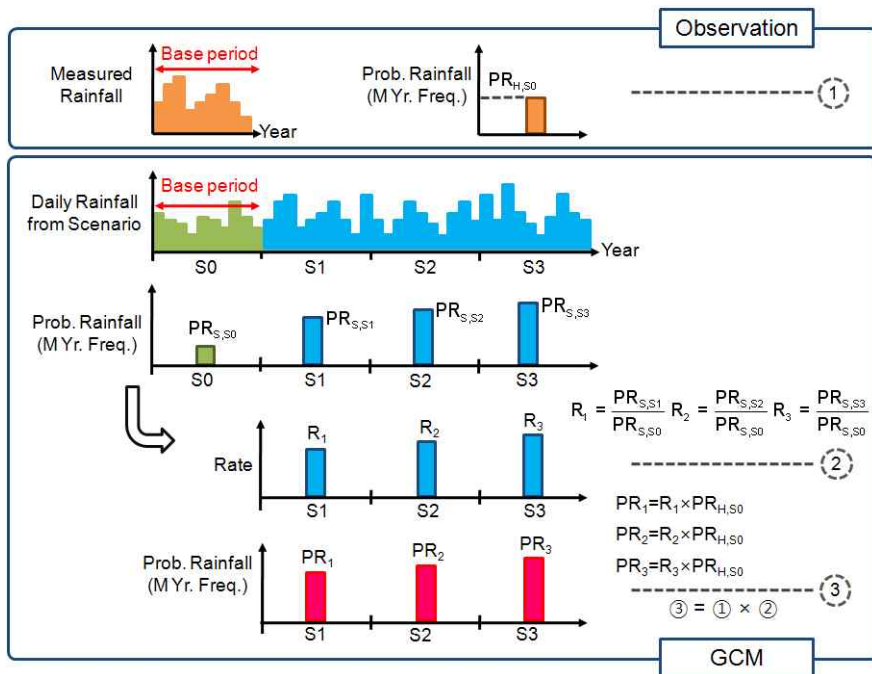


Fig. 2. Procedure of Simple Weighted Rate Method

해상도의 기후시나리오를 생산하고 있으나 (kusunoki, 2006), 현재 국내에서는 고성능 컴퓨팅 자원의 한계로 인해 고해상도 기후시나리오 자료를 생산하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 GCM으로부터 생산된 기후시나리오를 이용할 경우 편차보정과정이 필요하며 본 연구에서 적용하고자 하는 다중 기후시나리오도 이와 동일한 경우라 할 수 있다. GCMs로부터 생산된 기후시나리오를 이용한 확률강우량 산정 절차는 Fig. 1과 같다.

우선 강우관측지점에 대한 과거 일단위 관측강우자료와 기후시나리오 자료를 수집한다. 이때 기후시나리오 자료는 관측지점에 대한 월 단위 자료이기 때문에 역학적·통계적 상세화기법을 통해 일 단위 자료로 변환해야 한다. 두 종류의 자료들로부터 일단위 연최대치계열의 자료를 구축하고 강우빈도해석을 통해 지점 확률강우량을 산정한다. 이때 기후시나리오의 경우는 자료기간을 과거와

미래기간으로 구분하여 확률강우량을 산정하도록 한다. 이 과정에서 산정된 확률강우량은 지점확률강우량이며 지역의 확률홍수량을 산정하기 위해서는 면적확률강우량으로 변환해야 한다. 면적확률강우량은 티센법, 등우선법 등을 이용하여 지역평균 확률강우량을 산정한 후 지역면적에 상응하는 면적환산계수 (areal reduction factor; ARF)를 적용하여 산정하게 된다. 마지막으로 기후시나리오를 이용하여 산정된 확률강우량으로부터 과거기간 대비 미래기간의 확률강우량 변화율을 산정하고 관측자료로부터 산정된 확률강우량에 적용함으로써 미래기간의 확률강우량을 산정하게 된다. 본 연구에서는 이러한 방법을 단순변화율가중법 (simple weighted rate method)이라 명명하기로 한다.

Fig. 2는 앞서 기술한 기후시나리오를 이용한 미래기간의 확률강우량 산정절차를 나타낸 것이다. 그림에서 S0는

과거, S1, S2, S3은 미래의 자료이용기간을 의미한다. $PR_{H,S0}$ 는 과거 관측자료를 이용한 확률강우량이며 $PR_{S,S0}$, $PR_{S,S1}$, $PR_{S,S2}$, $PR_{S,S3}$ 은 각각 S0, S1, S2, S3 기간에 대해서 기후시나리오를 이용하여 산정한 확률강우량을 의미한다. R_1, R_2, R_3 은 S0 기간 대비 각 미래기간의 확률강우량 변화율이며 M은 특정 확률빈도를 의미한다. 최종적으로 미래기간의 확률강우량 PR_1, PR_2, PR_3 는 $PR_{H,S0}$ 와 각 기간의 변화율 R_1, R_2, R_3 의 곱으로부터 산정할 수 있다.

3. 대상유역 및 자료수집

3.1 대상유역

본 연구에서는 우리나라 제1권역인 한강권역의 분류 중상류 유역인 남한강유역을 대상유역으로 선정하였다. 남한강의 홍수관리는 수도권의 치수대책과 직접적인 관계가 있다고 할 수 있으며 특히 본 연구의 결과가 향후 기후변화를 고려한 한강유역의 치수계획사업 등의 국가 정책 수립에 기초자료로 활용될 수 있다는 측면에서 그 의미가 있다고 하겠다. Fig. 3은 대상유역 현황을 도시한 것이다.

남한강 유역면적은 한강 유역면적 $23,292.8 \text{ km}^2$ 의 53.3%에 해당하는 $12,407.6 \text{ km}^2$ 이며 유로연장은 최원유로연장 393.0 km, 주하도연장 284.9 km이다. 상류유역에는 충주댐을 비롯하여 괴산댐, 횡성댐이 위치하고 있으며 하천유

지유량, 홍수조절, 생공농업용수 공급 등의 기능을 수행하고 있다.

통상 일정크기 이상의 대유역에 대해서 유출모의를 수행하기 위해서는 전체유역을 하천의 형상을 고려하여 적정 크기의 면적으로 분할할 필요가 있다. 건설교통부(2004)에서는 강우-유출해석을 목적으로 한강유역을 총 44개의 단위유역으로 구분한 바 있으며 본 연구에서도 자료구축 및 결과검토의 편의성을 위해 단위유역과 동일하게 소유역을 구성하였다. 소유역 분할 결과 한강 44개 소유역 중 17개 유역이 남한강 유역에 포함되는 것으로 파악되었다.

3.2 관측강우자료 수집 및 분석

강우빈도해석을 위해서는 통상 30년 이상의 시계열 강우자료가 필요하다. 본 연구에서는 기상관측소 자료구축 현황과 기후시나리오의 기준기간(1971~2000년)을 감안하여 1973년 이전에 설치 및 운영되고 있는 12개 관측소를 선정하였다. 수집된 자료는 일단위이며 자료기간은 28년(1973~2000년)으로 한정하였다. Table 1은 12개 관측소에 대한 일 단위 연최대치계열 자료로부터 산정한 최소값(MIN), 최대값(MAX), 평균값(AVE)을 산정한 결과이다. 평균 연최대강우량은 대관령 관측소가 168.5 mm로 가장 많으며 울진 관측소가 101.1 mm로 가장 적은 것으로 나타났다. 또한 12개 관측소의 연최대강우량에 대한 전체 평균값은 126.0 mm로 확인되었다.

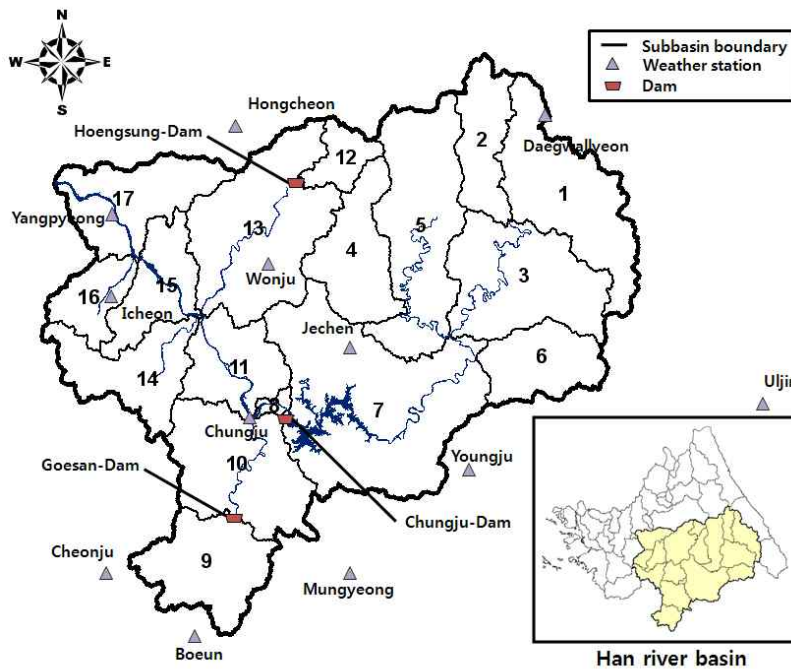


Fig. 3. Study Area

3.3 기후시나리오 구축

현재 국립기상연구소에서는 IPCC AR4에서 이용된 23개 GCM 중 13개 모델에 대해서 A2, A1B, B1의 배출시나리오에 대한 월단위 기후시나리오 자료를 구축한 상황이며 Table 2는 13개 GCMs에 대한 제원을 나타낸 것이다.

Table 1. Analysis of Daily Annual Maximum Rainfall Series for Each Site

Station	Min	Max	Ave
Daegwallyeong	72.7	349.0	168.5
Wonju	72.8	250.5	128.8
Chungju	51.0	263.0	118.3
Uljin	41.4	279.0	101.1
Cheongju	61.5	293.0	116.4
Yangpyeong	52.0	346.0	136.4
Icheon	65.0	273.6	136.9
Hongcheon	55.0	276.0	128.3
Jecheon	40.5	276.5	123.7
Boeun	50.8	407.5	131.8
Yeongju	58.9	259.5	120.1
Mungyeong	50.8	173.3	101.3
Ave	56.0	287.2	126.0

Table 2. Feature and Resolution of 13 GCMs

No.	Model (agency:version)	Abb.	Country	Resolution	
				Atm.	Ocn.
1	BCCR: BCM2	BCR	Norway	128 × 64	360 × 180
2	CCCMA: CGCM3_1-T47	CCM	Canada	96 × 48	192 × 96
3	CNRM: CM3	CNR	France	128 × 64	180 × 170
4	CSIRO: MK3	CSR	Australia	192 × 96	192 × 189
5	GFDL: CM2	GF0	USA	144 × 90	360 × 200
6	GFDL: CM2_1	GF1	USA	144 × 90	360 × 200
7	INM: CM3	INM	Russia	72 × 45	144 × 84
8	IPSL: CM4	IPS	France	96 × 72	180 × 170
9	NIES: MIROC3_2_MED	MIM	Japan	128 × 64	256 × 192
10	CONS: ECHO-G	MIU	Germany / Korea	96 × 48	128 × 117
11	MPIM: ECHAM5	MPI	Germany	192 × 96	144 × 111
12	MRI: CGCM2_3_2	MRI	Japan	128 × 64	144 × 111
13	UKMO: HADGEM1	UKC	UK	192 × 144	360 × 216

본 연구에서는 기후시나리오 자료로부터 산정된 확률강우량과 확률홍수량에 대한 변동성을 평가하기 위해 13개 GCMs의 기후시나리오 자료를 모두 수집하였으며 수집된 자료의 기간은 130년(1971~2100년)이다. 온실가스 배출 시나리오는 A2 배출시나리오를 채택하였으며 이는 CO₂ 농도가 2100년에 820ppm까지 증가되며 지속적인 인구성장과 지역적으로 편중된 경제성장을 가정한 것으로서 기후변화가 가장 급격하게 발생하는 미래를 가정한 것이라 할 수 있다.

이들 자료는 기상관측지점에 대한 월단위 자료이기 때문에 일 단위 강우지속시간에 대한 강우빈도해석을 위해서는 월 단위 자료를 일단위로 상세화(downscaling) 하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 통계적 상세화 기법 중 하나인 WXGEN (Sharply and Williams, 1990) 기법을 적용하여 생성한 일단위 자료를 이용하였다. 이 기법은 배덕효 등 (2009)과 과학기술부 (2010)에서 국내 적용된 사례가 있으며, 관측기상자료의 통계적 특성치를 이용하여 강수, 최고/최저기온, 상대습도, 풍속 등의 일자료를 생산하는 기법이다.

4. 미래기간의 확률강우량 산정 및 분석

4.1 관측자료를 이용한 확률강우량 산정

앞서 구축된 12개 기상관측소의 일 단위 연최대치계열 자료로부터 강우빈도해석을 통해 지점 확률강우량을 산정하였다. 확률분포형은 건설교통부 (2000)에서 제안하는

Table 3. Probability Rainfalls at Sites

Station	Prob. Rainfall (mm)
Daegwallyeong	473.46
Wonju	357.94
Chungju	321.60
Uljin	282.47
Cheongju	395.78
Yangpyeong	306.39
Icheon	349.23
Hongcheon	226.40
Jecheon	340.17
Boeun	317.65
Yeongju	388.24
Mungyeong	318.69
Ave	339.83

Gumbel 분포형을 채택하였으며 확률가중모멘트법을 이용하여 매개변수를 추정하고 K-S검정 및 χ^2 검정을 이용하여 매개변수를 검정하였다. Table 3은 12개 관측지점에 대한 강우지속시간 1,440분에 대한 100년 빈도 확률강우량 산정결과를 나타낸 것이다. 대관령 관측소가 473.46 mm로 가장 크고 홍천 관측소가 226.40 mm로 가장 작으며 관측소 평균은 339.83 mm로 산정되었다.

앞서 산정된 확률강우량은 관측소에 대한 지점 확률강우량하므로 ‘면’ 개념의 유역에 적용하기 위해서는 면적확률강우량으로의 변환이 필요하다. 본 연구에서는 지점확률강우량과 티센법을 적용하여 유역평균 확률강우량을

산정하고 이 값에 대상유역면적을 고려한 ARF를 적용하여 면적확률강우량을 산정하였다. 유역평균 확률강우량 362.26 mm와 남한강 유역면적 12407.6 km²에 해당하는 ARF 0.66을 적용한 면적확률강우량은 239.09 mm이며 이 결과는 건설부 (1992)에서 제시하는 244.42 mm와 비교할 때 충분한 타당성이 있는 결과라 사료된다.

4.2 기후시나리오를 이용한 확률강우량 산정

생산된 기후시나리오의 전체자료기간은 1971~2100년 인 130년으로 본 연구에서는 과거 30년인 S0 (1971~2000년)를 기준으로 미래 시간에 대한 확률강우량의 변화 정도를 분석하기 위해 미래 자료기간을 30년의 3개 기간 S1 (2011~2010년), S2 (2041~2070년), S3 (2071~2100년)으로 분석기간을 동일하게 구분하여 분석을 수행하였다. 자료기간 중 2001~2010년은 분석기간의 통일을 위해 제외하였다. 각 기간별로 13개 GCMs에 대해 앞서 관측강우자료와 동일한 과정을 통해 확률강우량을 산정하였다. Fig. 4는 13개 GCMs에 대한 기간별 강우지속시간 1일의 100년빈도 확률강우량과 과거기간 S0 대비 미래기간 S1, S2, S3의 변화를 산정결과를 도시한 것이다. 13개 GCMs의 평균확률강우량은 S0, S1, S2, S3별로 각각 142.1 mm, 160.6 mm, 163.2 mm, 163.5 mm이며 S0 대비 변화율은 각각 +13.0%, +14.9%, +15.1% 증가하는 것으로 나타났다. GCM 별로는 GF1이 +23.07%로 가장 변화율이 크며 MIU가 +2.63%로 가장 작은 것으로 나타났다. 또한 GCMs 중 MIU는 S1과 S3기간에서 과거기간인 S0에 비해 확률강우량이 각각 -5.63%와 -4.01% 감소하는 것으로 확인되었다.

또한 과거 S0 기간에 대한 관측강우자료와 기후시나리오를 이용한 확률강우량이 각각 239.09 mm와 142.21 mm

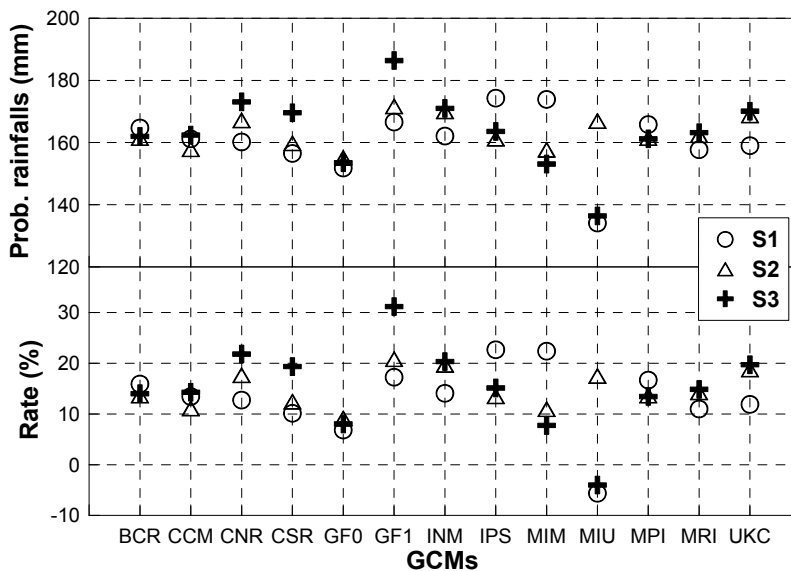


Fig. 4. Probability Rainfalls and Rates during S1, S2, and S3

임을 감안할 때 기후시나리오를 이용한 결과는 관측치에 비해 매우 과소추정됨을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서 사용된 GCMs이 극치호우를 반영하지 못하기 때문으로 판단된다.

4.3 미래기간의 확률강우량 산정

본 연구에서는 기후변화 시나리오에 따른 강우량의 변화가 실제 미래기간에 발생한다는 가정하에 과거 관측자료를 이용한 확률강우량과 기후시나리오로부터 산정한 미래기간의 확률강우량 변화율을 이용하여 최종적으로 미래기간의 확률강우량을 산정하였다. Table 4는 자료이용기간 (S1, S2, S3)별로 13개 GCMs에 대한 강우지속기간 1,440분의 100년 빈도 확률강우량 산정결과를 나타낸 것이다. S1, S2, S3 기간에 대한 13개 GCMs의 평균확률강우량은 각각 270.23 mm, 274.64 mm, 275.11 mm이며 이는 과거 관측자료를 이용한 확률강우량 239.09 mm에 비해 +13.0%, +14.9%, +15.1% 증가한 것으로 확인되었다. 또한 Fig. 5는 자료이용기간별 GCMs의 확률강우량 변동성을 분석하기 위해 GCM별 확률강우량을 Box-Whisker 그래프로 도시한 결과이다. 중간의 박스를 기준으로 최하단과 최상단 선은 자료의 최소값과 최대값을 나타내며 박스의 상하단 경계는 초과확률 25% (first quartile)과 75% (third quartile)을 의미하고 박스 내의 선은 median 중간값을 나타낸다. 자료기간별로 상위 25~75%의 초과확률 값은 S1: 264.83~279.30 mm, S2: 268.07~282.00 mm, S3:

Table 4. Probability Rainfalls for Each GCM during S1, S2 and S3

GCM	100-yr Frequency (mm)		
	S1	S2	S3
BCR	277.12	271.73	272.57
CCM	271.23	265.67	273.25
CNR	269.54	281.32	291.25
CSR	263.32	268.87	285.36
GF0	255.41	260.96	258.27
GF1	280.31	288.89	313.63
INM	272.74	286.20	287.72
IPS	293.27	271.39	275.26
MIM	292.60	265.34	257.60
MIU	225.63	280.99	229.50
MPI	278.97	271.73	271.23
MRI	265.34	273.25	274.59
UKC	267.53	284.01	286.20
평균	270.23	274.64	275.11

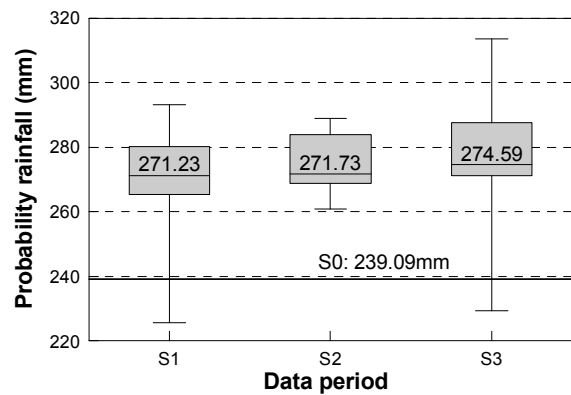


Fig. 5. Variability Analysis of Probability Rainfalls during S1, S2, and S3

267.99~286.58 mm 범위를 갖는 것으로 나타났다.

이상의 과정을 통해 미래기간에 대한 남한강 상류유역의 면적확률강우량을 산정하였으며 여기서 산정된 결과를 이후의 확률홍수량 산정에 적용하고자 한다.

5. 기후변화를 고려한 홍수변화 분석

5.1 확률홍수량 산정 및 분석

확률홍수량을 산정하기 위해서는 강우-유출모형을 선정하고 해당모형의 유출매개변수를 추정해야 한다. 본 연구에서는 남한강 상류유역에 대한 유출매개변수 결정을 위해 건설교통부 (2004)에서 수행한 ‘한강유역조사 보고서’ 연구결과를 인용하였다. 여기서는 한강 전제유역에 대해 Clark 모형을 구축하였다. 또한 매개변수 추정을 위해 5개의 홍수사상 (1990.9.10~14; 1991.7.25~26; 1995.8.23~28; 1999.7.30~8.5; 1999.9.19~22)을 수집하고 춘천댐, 소양댐, 의암댐, 청평댐, 충주댐, 여주대교, 팔당댐, 한강대교의 8개 지점에 대해 매개변수 검·보정을 실시하였다. 매개변수 검·보정 지점 중 본 대상유역 내에 위치한 충주댐의 경우 홍수유출이 발생하지 않은 1991년 홍수사상을 제외한 4개 홍수사상에 대한 첨두홍수량의 평균 절대상대오차는 31.98%, 상관계수는 0.87인 것으로 확인되었다. 이상의 결과로부터 유출매개변수 추정결과와 정확도는 낮다고 할 수 있으나 4개 호우사상의 오차 특성이 상이함으로 인해 개선된 모의결과를 갖는 매개변수를 추정하는 것은 어려울 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 건설교통부 (2004)에서 제안한 유출매개변수를 적용하였다. 본 연구에서는 17개 소유역에 대해 기 산정된 유출매개변수를 적용하였다. 또한 대상유역 내에는 충주댐, 괴산댐, 횡성댐이 위치하고 있으므로 댐 운영에 따른 하류 유출량의 변화를 고려하기 위해 HEC-5모형을 이용하여 댐 유입량에 대한 방류량을 결정하였다.

Fig. 6은 남한강유역 출구점에 대한 13개 GCMs의 확률 홍수량과 과거 기준기간의 확률홍수량 대비 변화율을 도시한 것이다. GCMs의 평균침투홍수량은 S0, S1, S2, S3 기간에 대해 각각 20,708.0 m³/s, 26,816.2 m³/s, 27,692.2 m³/s, 27,328.9 m³/s이며 S0 기간에 대한 변화율은 29.50%, 33.73%, 31.97%로 나타났다. 확률강우량과 달리 S2기간의 침투홍수량이 가장 크게 증가한 것은 강우량의 변화량

에 비해 침투홍수량의 변화가 훨씬 큰 폭으로 변하기 때문으로 판단된다. 그 예로 MIU GCM의 확률강우량이 S1과 S3 기간에 5.63%와 4.01%가 감소하는 것에 비해 침투홍수량은 13.63%와 10.48%로 두 배 이상 크게 감소하는 것으로 조사되었다.

Fig. 7은 달천 (a), 섬강 (b), 복하천 (c) 합류 후 본류 유량, 남한강 출구점 유량 (d)에 대한 자료기간별 침투홍수

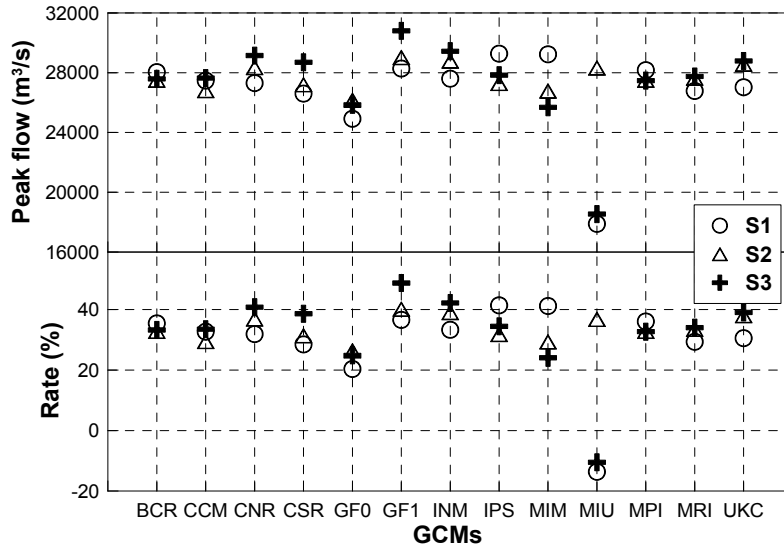


Fig. 6. Peak Flows and Rates at the Outlet of Namhan River Basin during S1, S2, and S3

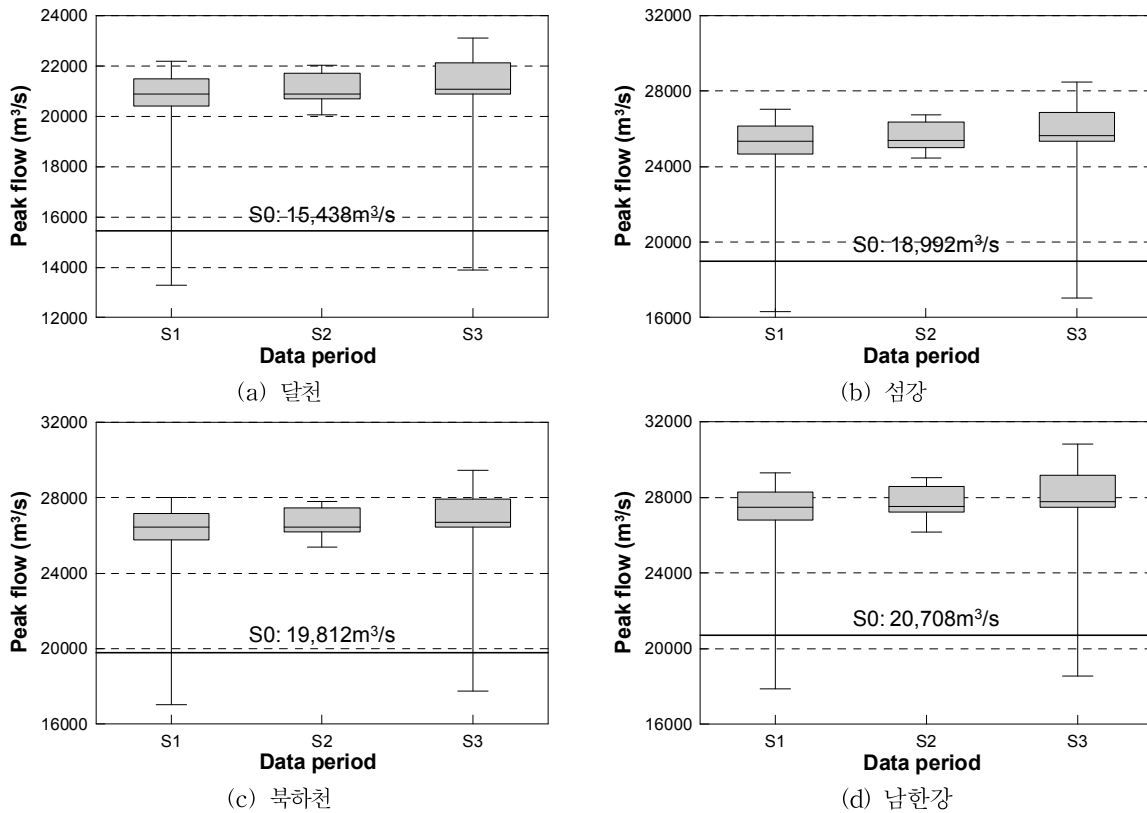


Fig. 7. Variability Analysis of Peak Flow at the 4 Points in the Main Channel

량 산정결과를 도시한 것이다. (a)~(d) 지점의 침투홍수량은 S0 기간에 비해 미래기간 평균변화율은 34.12%, 32.55%, 32.31%, 31.73% 증가한 것으로 나타났다. 또한 분석지점에 대한 GCMs의 침투홍수량 변동폭은 S1과 S3 기간이 상대적으로 크게 나타나며 이는 확률강우량과도 동일한 변동특성을 갖는 것을 알 수 있다. 초과확률 25~75%의 범위는 대체로 유사한 것으로 나타났다.

5.2 분류 홍수위 산정 및 분석

통상 우리나라의 경우 하천설계시 부등류해석을 통해 제방 설계 홍수위를 산정하고 있다. 본 연구에서도 이와 동일한 방법으로 앞서 산정된 각 소유역과 본류구간의 확률홍수량을 이용하여 충주댐 직하류부터 팔당댐 직상류 구간에 대한 홍수위해석을 수행하였다.

홍수위해석을 위한 하도단면자료는 ‘한강수계지수기본계획:하천정비기본계획 (건설부, 1992)’의 측량성과를 토대로 구축하였으며 대상유역의 하도구간 110.2km에 대해서 362개 단면을 구축하였다. 또한 대상유역 출구점의 기점홍수위도 기존 연구결과에서 인용하였으며 29.36 EL.m를 적용하였다. 부등류 해석시 주요 매개변수인 하도 조도계수는 여주와 양평 수위관측소의 홍수사상에 대한 수위자료를 이용하여 추정하였으며 구간에 따라 0.027~0.032 값을 적용하였다.

Fig. 8은 하도구간에 대해 100년 빈도에 해당하는 13개 GCMs의 평균홍수위 산정결과를 도시한 것이다. 홍수위는 최대 2.5m 상승하며 S1, S2, S3 기간에 대한 하도구간의 평균홍수위는 각각 1.75m, 2.02m, 1.89m 상승하는 것으로 모의되었으며 과거 관측자료로부터 산정된 S0 기간

의 홍수심을 기준으로 증가율을 분석한 결과 미래기간별로 평균 12.6%, 14.5%, 13.6% 증가하는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 기후변화에 따른 남한강 유역의 홍수위는 S1, S2, S3 기간에서 모두 증가하는 것을 확인할 수 있으며 특히 3개 기간 중 S2의 침투홍수량이 가장 큰 이유로 인해 S2 기간에서 홍수위 증가율이 가장 높게 나타남을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 GCM으로부터 생산된 기후시나리오 자료를 이용한 미래기간의 확률강우량 산정방법을 제안하고 남한강유역에 대해 13개 GCMs를 이용하여 확률강우량, 홍수량, 홍수위 변화를 분석하였다. 본 연구에서 도출된 주요 연구결과는 다음과 같다.

1. GCM으로부터 생산된 기후시나리오자료를 이용하여 미래기간에 대한 확률강우량 산정방법인 단순변화율가중법을 제안하였다. 이 방법은 관측자료 기반의 확률강우량을 산정, 기후시나리오 기반의 확률강우량으로부터 과거기간 대비 미래기간의 변화율을 산정, 마지막으로 관측자료 기반의 확률강우량에 변화율을 적용하여 미래기간의 확률강우량을 산정하는 3가지 과정으로 이루어진다.
2. 남한강유역에 대한 12개 기상관측소의 일강우자료를 이용하여 강우지속기간 1,440분의 100년 빈도 면적확률강우량을 산정한 결과 239.09 mm로 산정되었다. 13개 GCMs로부터 생산된 기후시나리오 기반의 확률강우량은 전체기간 130년(1971~2100년)에 대

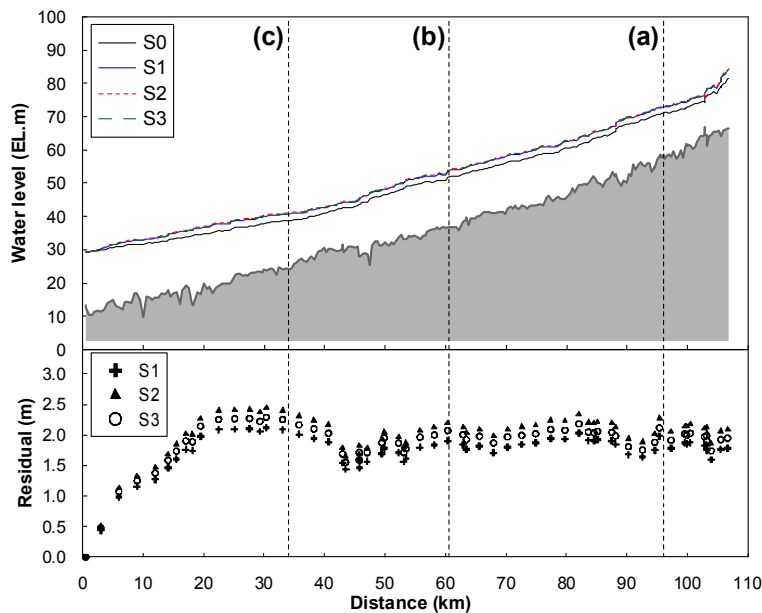


Fig. 8. Flood Water Levels and Residuals during S0, S1, S2, S3, and S4

해서 4개 기간 S0 (1971~2000년), S1 (2011~2040년), S2 (2041~2070년), S3 (2071~2100년)으로 구분하여 산정하였으며 기간별로 확률강우량은 142.1 mm, 160.6 mm, 163.2 mm, 163.5 mm이며 S0 기간의 확률강우량 대비 13.0%, 14.9%, 15.1% 증가하는 것으로 나타났다.

3. 건설교통부 (2004)의 유출매개변수 추정결과를 이용하여 남한강유역의 확률홍수량을 산정한 결과 S0, S1, S2, S3 기간에 대해 각각 20,708.0 m³/s, 26,816.2 m³/s, 27,692.2 m³/s, 27,328.9 m³/s이며 S0 기간 대비 변화율은 29.50%, 33.73%, 31.97%로 나타났다. 또한 달천, 섬강, 복하천 합류 후 분류 유량, 남한강 출구점 유량에 대한 침투홍수량은 S0 기간에 비해 각각 34.12%, 32.55%, 32.31%, 31.73% 증가한 것으로 분석되었다.
4. 남한강 분류구간 중 충주댐 직하류에서 팔당댐 직상류 구간에 대해 13개 GCMs로부터 산정된 각 자료기간의 확률홍수량을 이용하여 부등류해석을 수행하였다. S0 기간에 대한 S1, S2, S3 기간의 평균홍수위는 1.75 m, 2.02 m, 1.89 m 상승하며 이는 S0 기간의 홍수심을 기준으로 12.6%, 14.5%, 13.6% 증가하는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 기후변화로 인해 남한강유역은 미래 자료기간별로 차이는 있으나 평균적으로 강우지속기간 1,440분의 100년 빈도 확률강우량 13.0~15.1% 증가, 침투홍수량 29.1~33.5% 증가, 홍수위는 12.6~13.6% 증가하는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 제안한 방법 및 결과는 기후변화 영향을 고려한 댐과 제방 등의 수공구조물 설계 방법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

다만, 본 연구에서 적용한 기후시나리오는 극치호우를 반영하지 못함으로 인해 확률강우량의 변화율 산정시 불확실성을 가진다고 할 수 있다. 따라서 향후 개선된 기후시나리오의 적용을 통해 결과를 검토할 필요가 있으며 다양한 배출시나리오에 따른 평가를 위해 A2 시나리오 이외에도 A1B와 B1 시나리오에 대한 분석을 추가적으로 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업의 「기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망」 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

과학기술부 (2010). 기후변화에 의한 국가 수자원 영향분

석 및 평가체계 적용, 수자원의 지속적 확보기술개발 사업, 연구보고서.

건설부 (1992). 한강수계치수기본계획: 하천정비기본계획.

건설교통부 (2000). 한국확률강우량도 작성, 1999년도 수자원관리기법개발연구조사보고서.

건설교통부 (2004). 한강유역조사 보고서.

기상연구소 (2004). 기후변화협약대응 지역기후시나리오 산출기술개발 (III).

김병식, 김보경, 경민수, 김형수 (2008), “기후변화가 극한강우와 I-D-F 분석에 미치는 영향 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제4호, pp. 379-394.

배덕효, 정일원, 이병주, 전태현 (2009). “MME (Multi-Model Ensemble)을 활용한 국가 수자원 기후변화 영향평가.” **한국수자원학회 2009년도 학술발표논문집**, 한국수자원학회, pp. 198-222.

Bae, D.H., Jung, I.W., Chang, H. (2008a). “Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins.” *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 14, pp. 2644-2656.

Bae, D.H., Jung, I.W., and Chang, H. (2008b). “Potential changes in Korean water resources estimated by high-resolution climate simulation.” *Climate Research*, Vol. 35, pp. 213-226.

Cameron, D., Beven, K., and Naden, P. (2000), “Flood Frequency Estimation by Continuous Simulation under Climate Change (with uncertainty).” *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 4, issue. 3, pp. 393-405.

Choi, Y. (2002), “Changes on Frequency and Magnitude of Heavy Rainfall Events in Korea.” *Journal of the KOREAN Data Analysis Society*, Vol. 4, No. 3, pp. 269-282.

Im, E.S., Jung, I.W., Chang, H. Bae, D.H., and Kwon, W.T. (2009). “Hydroclimatological response to dynamically downscaled climate change simulations for Korean basins.” *Climatic Change*, doi: 10.1007/s10584-009-9691-2.

IPCC (2001). Climate change 2001: The Scientific Basis, IPCC Contribution of Working Group III of the intergovernmental Panel on Climate Change (Nakicenovic N and lead authors). Cambridge: Cambridge Univ. Press.

IPCC (2007). Climate Change 2007: The Scientific Basis, Summary for Policy Makers. Cambridge University

- Press, Cambridge.
- Jung, I.W., Bae, D.H., and Kim, G. (2010). "Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea." *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.2068
- Kay, A.L., Reynard, N.S., and Jones, R.G. (2006). "RCM rainfall for UK flood frequency estimation. I. Method and Validation." *Journal of Hydrology*, Vol. 318, Issues. 1-4, pp. 151-162.
- Kusunoki, K.J., Yoshimura, J., Yoshimura, H., Noda, A., Oouchi, K., and Mizuta, R. (2006). "Change of Baiu Rain Band in Global Warning Projection by an Atmospheric General Circulation Model with a 20-km Grid Size." *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 84, pp. 581-611.
- Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D., and Talbot G. (2007). "Assessment of future change in Intensity-Duration-Frequency (IDF) curve for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM)." *Journal of Hydrology*, Vol. 347, Issues. 1-2, pp. 197-210.
- Sharply, A.N., and Williams, J.R. (1990). EPIC Erosion Productivity Impact Calculator, 1. model documentation. U.S Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8.

논문번호: 10-029	접수: 2010.04.14
수정일자: 2010.07.02/08.24	심사완료: 2010.08.24