

우리나라 15개 다목적댐 유역별 A1B 기후변화 시나리오 분석

김 홍 래 · 이 혜 숙 · 신 재 기*

한국수자원공사 K-water연구원

Analysis of A1B Climate Change Scenario in the Watersheds of 15 Multi-purpose Dams in South Korea. Kim, Hong-Rae, Hye-Suk Yi and Jae-Ki Shin* (K-water Research Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Korea)

This study analyzed the A1B climate change scenario provided by National Institute of Meteorological Research (NIMR), Korea, to investigate potential climate changes in watersheds of 15 multi-purpose dams in South Korea. The A1B climate change scenario is produced by Regional Climate Model (RCM) with 27 km horizontal grid spacings using a one-way nesting technique with Global Climate Model (GCM). Relative to present climate conditions (1971~2000), the modeled 10-year averaged daily temperatures at the watersheds of the 15 multi-purpose dams continuously increased to year 2100, whereas precipitation changes were varied regionally (north, central, and south regions of South Korea). At two watersheds located in Gangwon-province (north region), the modeled temporal variations of precipitation rapidly increased in the 2090's after a slow decrease that had occurred since the 2050's. At seven watersheds in the central region, including Gyeongsangbuk-province to Jeollanam-province, the modeled temporal variations of precipitation increase showed 10-year periodic changes. At six watersheds in the south region, the modeled temporal variations of precipitation increased since the 2070's after a rapid decrease in the 2060's. Compared to the climate conditions of the late of 20th century (1971~2000), the number of rainy days and precipitation intensity increased (3% and 6~12%, respectively) in the late 21st century (2071~2100). The frequency of precipitation events tended to increase with precipitation intensity in all regions. The frequency of heavy precipitation events (>50 mm d⁻¹) increased with >100% in the north region, 60~100% in the central region, and 20~60% in the south region.

Key words : A1B climate change scenario, multi-purpose dams, regional climate model, temperature, precipitation

서 론

기후변화의 원인인 지구온난화에 따라 전지구적인 이상 기상현상과 재해현상이 빈번해지고 앞으로도 지구온난화는 일정기간 지속될 것이라는 연구 전망(IPCC, 2001, 2007)에 따라 국외뿐만 아니라 국내에서도 기후변화의

대응, 적응 및 극복도전을 위한 연구들이 최근 활발히 진행되고 있다. 우리나라에서는 지난 100년 동안 한반도 기온은 약 1.7°C 상승하여 세계온도의 증가율에 비해 2.3배 상승하였고, 최근 50년 동안 우리나라 강수량을 분석한 결과 전국적으로 강수일수는 감소하고 일강수량 80 mm 이상인 호우발생 빈도는 증가하는 것으로 나타났다(NIMR, 2004; Jung *et al.*, 2010). 또한 남부지역에서는 연강수량

* Corresponding author: Tel: (042) 870-7450, Fax: (042) 870-7499, E-mail: jaekishin@kwater.or.kr

이 7% 증가하고 연강수일수는 14% 감소하며 강수강도는 18% 증가하는 것으로 분석되었다(Choi, 2002). 이상의 결과를 종합해 볼 때, 우리나라는 기후변화의 영향으로 강수발생일수 감소, 연 강수량 증가, 강수강도 증가현상이 나타남을 예상할 수 있으며, 특히, 강수강도의 증가와 강수발생일수의 감소는 각각 홍수와 가뭄의 발생가능성을 증가시킨다고 할 수 있다(Bae *et al.*, 2008a).

지구온난화에 의한 미래 기온의 상승과 강수량의 패턴 변화는 증발산이나 토양수분 등의 변화로 이어져 궁극적으로 물순환의 변화를 초래하며 유출량 변화로 이어질 것으로 예상된다. 최근 기후변화에 대한 피해가 가속화되면서 국내외 수문분야에서는 기후변화에 따른 수자원 연구가 다양하게 진행되고 있다(Bae *et al.*, 2008b; Im *et al.*, 2009). Kim *et al.* (2008)은 하나의 GCM에서 생산된 기후변화 시나리오로부터 Quantile mapping 방법을 적용하고 빈도별 강수량을 산정하여 IDF 곡선을 작성한 바 있다. 국외 사례의 경우 Cameron *et al.* (2000)은 HadCM2 모형과 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 홍수량의 변동성을 분석한 바 있다. 또한, Mailhot *et al.* (2007)은 CRCM(Canadian Regional Climate Model)의 기후시나리오를 토대로 IDF 곡선을 작성하여 지속시간별 재현 기간별 강수량이 현재에 비해 크게 증가한 것을 규명한 바 있다. 이처럼 가속화되고 있는 기후변화와 더불어 나타나게 될 자원의 변화는 우선적으로 해결되어야 할 중요한 문제이며, 심각해지고 있는 수자원에 대해 원활하고 효과적으로 수자원을 활용하기 위해서는 기후변화에 대한 정확한 파악이 필수적이다.

본 연구에서는 기후변화에 따른 수자원, 물환경 및 국내 수생태계의 변이를 파악하는 데 기초자료를 제공하고 국내 15개 다목적댐 유역에 대한 미래 기후 전망을 분석하였다. 분석은 기상청에서 제공하고 있는 수평격자 27km의 고해상도 기후변화 시나리오 자료를 이용하였으며, 기온과 강수량 분석을 중심으로 20세기 후반(1971~2000) 대비 21세기 후반(2071~2100)에 대한 기후 전망을 제시하였다.

재료 및 방법

1. A1B 시나리오

본 연구의 분석에 사용된 기후변화 시나리오는 기상청

에서 제공하고 있는 수평격자 27km의 고해상도 지역 기후모형(MM5; Penn State University/National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model version 5)의 수치모의 결과이다. 기상연구소에서는 유엔 기후변화 협약에 대응하기 위하여 온실가스 배출시나리오에 따른 전지구 및 한반도에 대한 기후적 영향을 분석하고자 2005년부터 2008년까지 지역기후 시나리오 활용기술을 개발하였다. IPCC SRES 중에서 A1B, A2, B1 시나리오를 전지구 기후모형(GCM)인 ECHO-G에 입력하여, 온실가스 증가에 따른 장기간(1986~2100년) 전지구 기후변화 시나리오를 생산하였다. ECHO-G는 독일 막스플랑크기상연구소에서 개발한 대기-해양 결합모형으로, 대기모형(ECHAM4)과 해빙-해양모형(HOPE) 그리고 두 모형의 결합을 위하여 OASIS라는 소프트웨어를 이용하였다. 대기모형(ECHAM4)과 해양모형(HOPE) 해상도는 각각 약 400km와 300km이며, 전지구 기후모형에서 산출된 결과를 이용, 동아시아 지역의 미래 기후를 예측하게 된다. 전지구 기후변화 시나리오를 우리나라에 활용하기 위해서는 우리나라의 지형특성이 반영된 수십 km규모의 고해상도의 좀 더 상세한 자료 재생산이 필요하다. 기상청에서는 이를 위하여 지역 기후모형을 이용한 역학적 상세화 기법을 도입하였으며 지역 기후모형인 MM5를 적용하여 A1B 시나리오에 대한 한반도 기후변화 시나리오를 생산하였다.

A1B 시나리오는 고도 경제성장이 계속되어 세계 인구가 21세기 중반에 정점에 도달한 후 감소하고, 신기술이나 고효율화 기술이 급속히 도입되는 미래 사회를 가정한 A1그룹의 온실가스 배출 시나리오에 속하며, 이 중 각 에너지원의 균형을 중시하고 대기 중 이산화탄소 농도가 2100년에 720 ppm에 도달할 것으로 예상되는 시나리오를 의미한다. 3개의 A1그룹은 기술적 중요성에 의해 화석연료(A1F1), 비 화석연료(A1T), 총 에너지원의 균형(A1B) 중심으로 구분된다. 한반도 지역의 고해상도 기후변화 시나리오 자료 산출과정은 Fig. 1과 같으며, 산출자료는 Table 1과 같다.

한반도의 상세 기후 시나리오 자료 생산에 사용된 전지구 기후모형인 ECHO-G와 지역 기후모형인 MM5의 모의 결과와 관측 자료의 비교를 통한 모의 특성 및 성능은 Koo *et al.* (2009)과 Cha *et al.* (2007)에 제시되어 있다. Koo *et al.* (2009)에 따르면, ECHO-G 모형은 AR4에 참여한 다른 기후모형과 비교하여 관측에서 나타난 여름철 기온과 강수에 대한 평균 기후패턴 모의가 우수한 편이며, 기온 변동성은 관측보다 크고 강수 변동성은 작게 모의하는 특성을 보였다. 겨울철 기온과 강수에 대한 모의

수준은 평균기후뿐 아니라 변동성 모의에서도 대체적으로 다른 모델에 비하여 우수한 편에 속하였다. 또한, 여름철 동아시아 지역의 수분 수렴지역이 강수가 집중되는 지역과 잘 일치하고, 겨울철 수분속은 동아시아의 북서쪽에서 남동쪽으로 수증기가 빠져나가고 일본 남쪽해상에서 발산되는 형태를 대체로 잘 모의하였다.

지역 기후모형 MM5의 상세 기후 자료는 온도의 경우 1971년에서 2000년까지 30년 평균 관측자료(CRU; Climate Research Unit, University of East Anglia)와 비교하여 약 2°C 정도 낮게 모의되는 특성을 보이지만, 한반도 지형을 반영한 공간분포를 잘 모의하고 있는 것으로 분석되었다(Cha *et al.*, 2007). 반면 강수량은 대체로 관측에 비하여 과소 모의되는 특성을 보이며 여름철 강수량은 최대 50%까지 적은 경우도 있었다(NIMR, 2009). 이는 모형들이 갖는 일반적인 특성으로 모형 강수는 격자규모의 면적 평균값을 의미하므로 지점단위의 관측값과의 비교에는 한계가 있고, 극한 강수를 초래하는 태풍을 비롯한 강한 대류계의 발생, 발달 및 소멸을 재현함에 있어서는 여전히 역학적인 한계를 가지고 있다. 이러한 강

수 모의 특성에도 불구하고, 전반적으로 ECHO-G가 동아시아 지역의 종관장(synoptic condition)을 비교적 잘 모의하였고, 많은 연구들을 통해서 중규모 기상현상(meso-scale phenomena)을 재생산함에 있어서 성능을 인정받고 있는 지역 기후모형인 MM5로부터 생산된 상세 기후 시나리오 자료는 미래 기후를 전망하는데 있어서 비교적 신뢰성 있는 자료로 판단된다. 또한 이 연구에서는 현재 기후(20세기 후반)에 대한 21세기 후반의 평균적인 기후 변화 경향성에 대한 분석이므로 모형이 갖고 있는 계통적 오차(systematic bias)는 결과에 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

2. 분석방법

15개 댐 유역에 대한 기후변화 시나리오 자료를 얻기

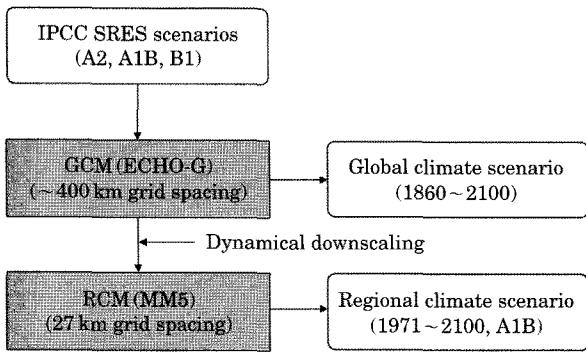


Fig. 1. Summation of flow chart of A1B climate change scenarios produced by National Institute of Meteorological Research (NIMR), Korea.

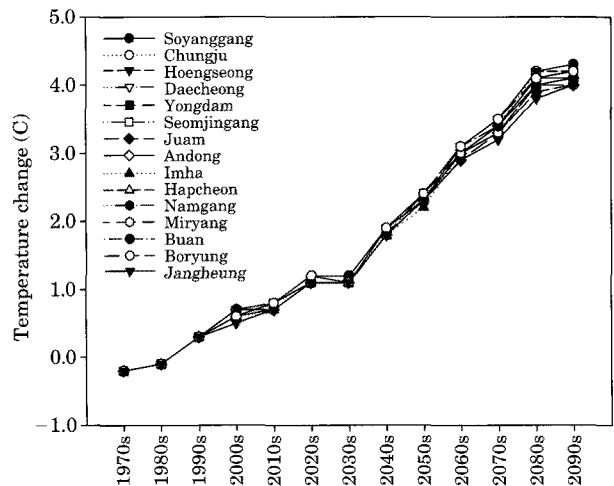


Fig. 2. Changes of 10-year averaged daily mean temperature at watersheds of 15 multi-purpose dams in South Korea from 1971~2100 relative to 1971~2000 from MM5 A1B simulation.

Table 1. Comparison of climate change scenarios produced by NIMR.

Items	Global Climate Scenario (GCM)	Regional Climate Scenario (RCM)
Period	1986 ~ 2100	1971 ~ 2100
Scenario	A2, A1B, B1	A1B
Model	ECHO-G	MM5
Grid spacing	~400 km (~3.75°)	~27 km (~0.2432°)
Area	87.159° S ~ 87.159° N, 0° ~ 360°	32.968° N ~ 43.426° N, 122.935° E ~ 131.447° E
Variable	Temperature, Precipitation, Relative humidity	Temperature, Precipitation, Relative humidity
Interval	Monthly	Daily, Monthly

위하여 27 km의 기후변화 시나리오 자료를 각 댐 유역으로 내삽하여 그 변화 경향을 분석하였다. 내삽방법은 각 유역을 중심으로 영향반경(radius of information)내에 들어온 모형격자 결과들을 거리의 제곱에 반비례하는 가중치를 주어 구하였다(Guo and Chen, 1993).

분석은 기온과 강수량을 중심으로 1971년부터 2100년까지 10년 단위로 평균치를 구한 후 1971년부터 2000년까지의 30년 평균치를 제거하여 20세기 후반 기후에 대한 21세기 후반의 기후변화 경향을 파악하였다.

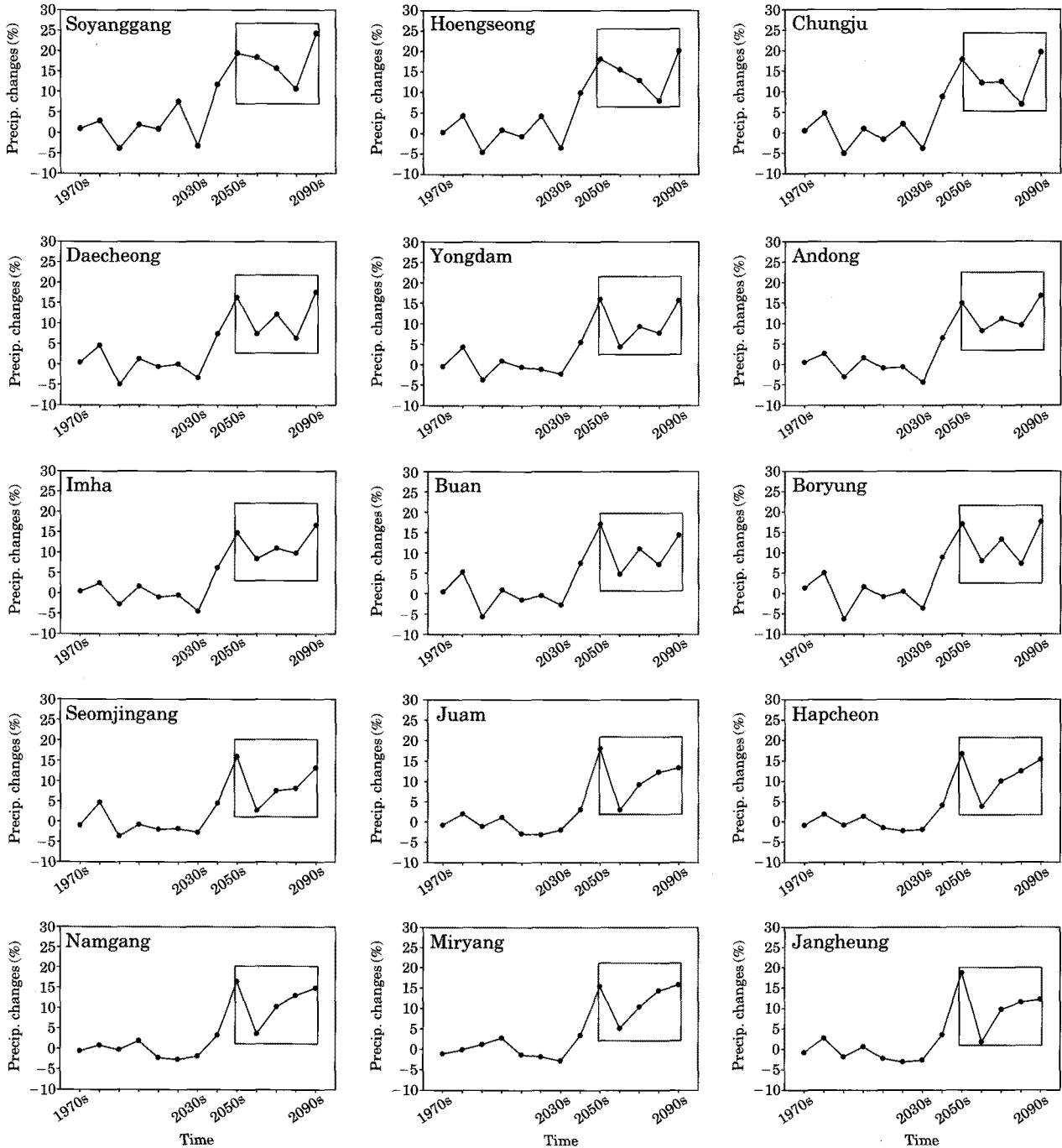


Fig. 3. Changes of 10-year averaged precipitation at watersheds of 15 multi-purpose dams for the period of 1971~2100 relative to 1971~2000 from MM5 A1B simulation. Solid boxes within a figure represent the period of the 2050's to the 2090's.

결과 및 고찰

Fig. 2는 15개 다목적댐 유역에 대한 10년 평균 기온 변화를 나타낸 것이다. 각 유역의 기온은 2090년대에 약 4°C 정도까지 지속적으로 상승하며, 유역들 사이에 서로 유사한 상승 경향을 보였다.

반면, 강수량의 경우에는 유역과 유역간에 큰 변동성을 보였다. Fig. 3은 15개 댐 유역에 대한 강수량 변화 경향을 보인 것으로, 공통적으로 2030년대까지 증가와 감소를 반복하고 2040년대 이후에 급격히 증가하는 경향을 보이다가 2050년대 이후부터는 유역에 따라 서로 다른 증감 변화 경향을 보였다. 이들의 변화 경향을 분류하면 크게 세 그룹으로 나눌 수 있으며 (Table 2), 지역적으로는

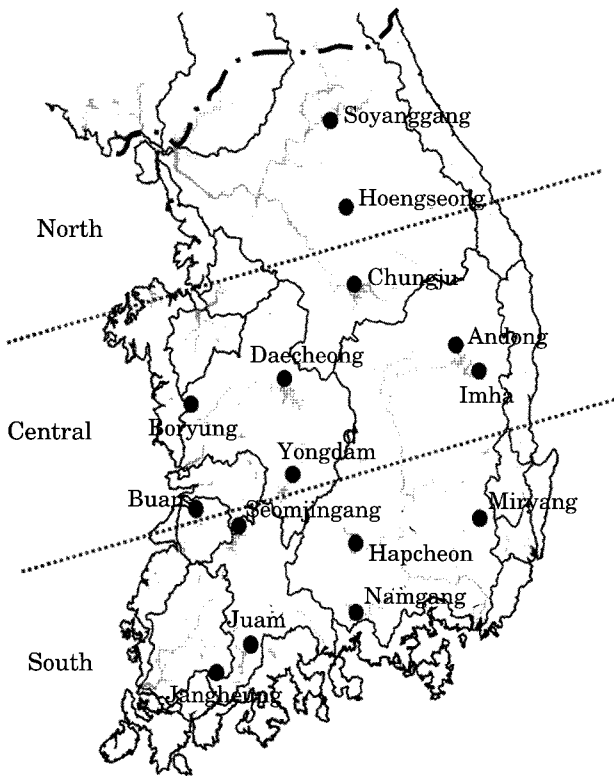


Fig. 4. Locations and 3 classified regions for watersheds of 15 multi-purpose dams in South Korea.

강원지역의 북부지역, 경상북도에서 전라남도 해안지역에 이르는 중부지역, 그 이남의 남부지역으로 분류할 수 있다 (Fig. 4). 강원지역에 위치한 소양강댐 유역과 횡성댐 유역에서는 2050년대 이후 2080년대까지 증가 경향이 서서히 감소한 후 2090년대에 다시 급격히 증가하는 것으로 볼 수 있었다 ($r=0.979, p<0.01$), (Table 3). 경상북도 지역에서 전라남도 해안지역에 이르는 중부지역에 위치한 7개 댐 유역 (충주, 대청, 용담, 안동, 임하, 부안, 보령댐)에서는 2050년대 이후 10년 주기로 증감이 반복되는 경향을 보였다 ($p<0.01$). 남부지역에 위치한 6개 댐 유역 (섬진강, 주암, 합천, 남강, 밀양, 장흥댐)에서는 2060년대에 증가 경향이 급격히 감소한 후 2090년대까지는 서서히 증가하는 경향을 나타냈다 ($p<0.01$). 이러한 강수량의 지역적 차이는 한반도 지역의 복잡한 지형효과와 경압성이 강한 동아시아 지역의 종관강제력 (synoptic forcing)이 대규모 강수과정에 영향을 줌으로서 지역적으로 서로 다른 특성을 보인 것으로 판단된다.

Fig. 5는 20세기 후반 대비 21세기 후반의 강수일수, 강수강도의 변화를 각 댐 유역별로 보인 것이다. 모든 유역에서 강수일수는 약 3% 정도 증가하며, 강수강도도 6~12% 정도 강해졌다. 강원도 지역에 위치한 소양강댐과 횡성댐 유역에서 비교적 큰 강수강도를 보이며, 나머지 댐 유역에서는 비교적 유사한 강수강도의 증가를 보임으로서 21세기 후반에는 강수일도 많아지고 강수강도도 강해지는 것을 전망할 수 있다.

Fig. 6은 각 댐 유역별로 강수강도에 따른 강수빈도의 변화를 알아보기 위하여 강수강도를 '10 mm d⁻¹ 이하', '10~30 mm d⁻¹', '30~50 mm d⁻¹' 및 '50 mm d⁻¹ 이상'으로 구분하고 20세기 후반 대비 21세기 후반의 강수빈도 변화 경향을 보인 것이다. 강수강도의 구분은 기상청의 구분에 따른 것으로, 이 중 강수강도가 50 mm d⁻¹ 이상은 '호우'로 정의한다. 이는 관측상 호우 (80 mm d⁻¹ 이상) 발생빈도가 약 4% 정도임을 감안하여 과소 모의 경향이 있는 모형의 경우는 4%에 해당하는 강수강도가 50 mm d⁻¹ 임을 고려한 것이다 (NIMR, 2009).

강원도 지역 ('North')에 위치한 소양강댐과 횡성댐 유역

Table 2. Classification of watersheds of 15 multi-purpose dams in South Korea.

Group	Dams	Tendency of precipitation changes from 2050s to 2090s	Location in South Korea
1	Soyanggang, Hoengseong	Rapid increase after slow decrease	North region
2	Chungju, Daecheong, Yongdam, Andong, Imha, Buan, Boryung	10-year periodic change	Central region
3	Seomjingang, Juam, Hapcheon, Namgang, Miryang, Jangheung	Slow increase after rapid decrease	South region

Table 3. Correlation coefficients between changes of precipitation for the period of the 2050's to the 2090's at watersheds of 15 multi-purpose dams in South Korea. (Abbreviations for the dams: SY-Soyanggang, HS-Hoengseong, CJ-Chungju, DC-Daecheong, YD-Yongdam, AD-Andong, IH-Imha, BA-Buan, BR-Boryung, SJ-Seomjingang, JA-Juam, HC-Hapcheon, NG-Namgang, MY-Miryang, JH-Jangheung).

Dam	SY	HS	CJ	DC	YD	AD	IH	BA	BR	JH	SJ	JA	HC	MY	NG
SY	1														
HS	0.979**	1													
CJ	0.940**	0.967**	1												
DC	0.789*	0.819*	0.937**	1											
YD	0.597	0.643	0.807*	0.933**	1										
AD	0.725	0.732	0.871*	0.959**	0.974**	1									
IH	0.727	0.733	0.868*	0.950**	0.972**	0.999**	1								
BA	0.544	0.624	0.793*	0.932**	0.971**	0.915**	0.906**	1							
BR	0.752*	0.791*	0.918**	0.997**	0.933**	0.947**	0.936**	0.947**	1						
JH	0.105	0.204	0.416	0.640	0.850*	0.716	0.713	0.864*	0.665	1					
SJ	0.421	0.495	0.675	0.828*	0.970**	0.895*	0.896*	0.949**	0.835*	0.943**	1				
JA	0.144	0.228	0.433	0.643	0.867*	0.748	0.750*	0.850*	0.659	0.991**	0.957**	1			
HC	0.245	0.289	0.500	0.714	0.913**	0.835*	0.838*	0.863*	0.722	0.953**	0.963**	0.976**	1		
MY	0.146	0.158	0.371	0.597	0.831*	0.767*	0.773*	0.744	0.599	0.894*	0.889*	0.934**	0.977**	1	
NG	0.173	0.219	0.437	0.667	0.882*	0.795*	0.797*	0.836*	0.678	0.959**	0.945**	0.980**	0.997**	0.982**	1

*p<0.05, **p<0.01

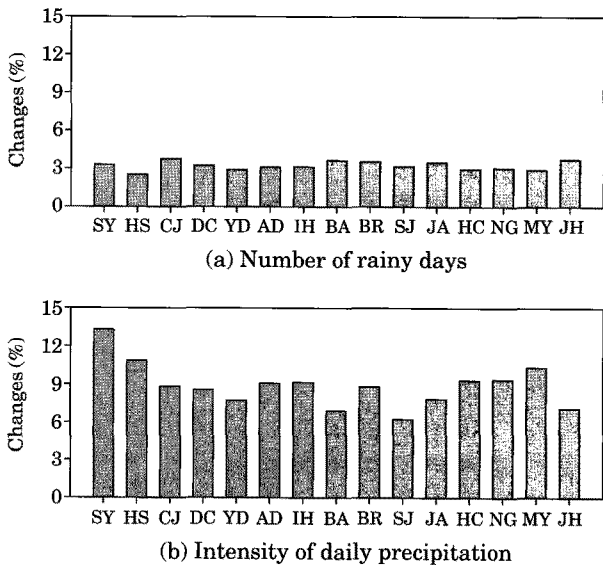


Fig. 5. Changes of (a) number of rainy days and (b) intensity of daily precipitation at watersheds of 15 multi-purpose dams for the period of 2071~2100 relative to 1971~2000 from MM5 A1B simulation. Abbreviated letters on the x-axis are the same as in Table 3.

에서는 강수강도가 증가할수록 강수빈도도 증가하며, 호우 빈도수는 20세기 후반에 비하여 100% 이상 증가함을 보임으로써 이 지역에는 호우발생이 매우 빈번해 질 것으로 전망되었다. 경북지역에서 전남해안지역에 이르는 중부지역('Central')에 위치한 7개 댐 유역에서도 강수강

도가 증가할수록 강수빈도도 증가하며, 임하댐 유역을 제외하고 호우 빈도가 20세기 후반 대비 60% 이상 증가함을 보였다. 남부지역('South')에 위치한 6개 댐 유역에서는 10~30 mm d⁻¹의 강수일수는 감소하나, 30~50 mm d⁻¹의 강수일수는 증가하는 것으로 나타나며, 50 mm d⁻¹ 이상의 호우빈도는 20~40% 정도 증가하는 경향을 보였다. 따라서, 21세기 후반 15개 다목적댐 유역의 강수강도별 강수빈도는 남부지역을 제외한 지역에서는 강수강도가 강해질수록 증가하는 경향을 보이며, 특히, 호우일수는 모든 지역에서 증가하는 경향을 나타냄으로서 수자원의 이용과 관리에 현재보다 효과적인 대응이 필요할 것으로 전망되었다.

본 연구에서 제시한 기온, 강수량, 강수강도 및 강수빈도의 변화는 댐 유역의 유입·유출량 등 수문학적 요소뿐만 아니라 녹조현상, 수중 탁도 및 탁수의 입자분포 등의 수환경에도 중요하게 작용할 수 있다(Shin *et al.*, 2003). 따라서, 향후 수자원, 물환경 및 수생태계 변화를 파악하는데 기초자료가 될 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 본 연구에서 분석한 기후변화 시나리오는 전지구 기후모형인 ECHO-G의 단일 결과만을 경제자료로 사용하여 생산한 상세 기후 시나리오 자료라는 것과 지역 기후모형의 강수자료의 경우 격자영역내의 공간평균 자료로서 극치호우를 반영하지 못한다는 것과 적분이 길어질수록 모형오차는 증가하는 것 등을 고려하면 미래 기후에 대한 정확한 판단을 규정하기에는 한계가 있다고 할 수 있다. 향후 개선된 기후변화 시나리오에 대한 적용과 보다 다양한 방법에 의한 기

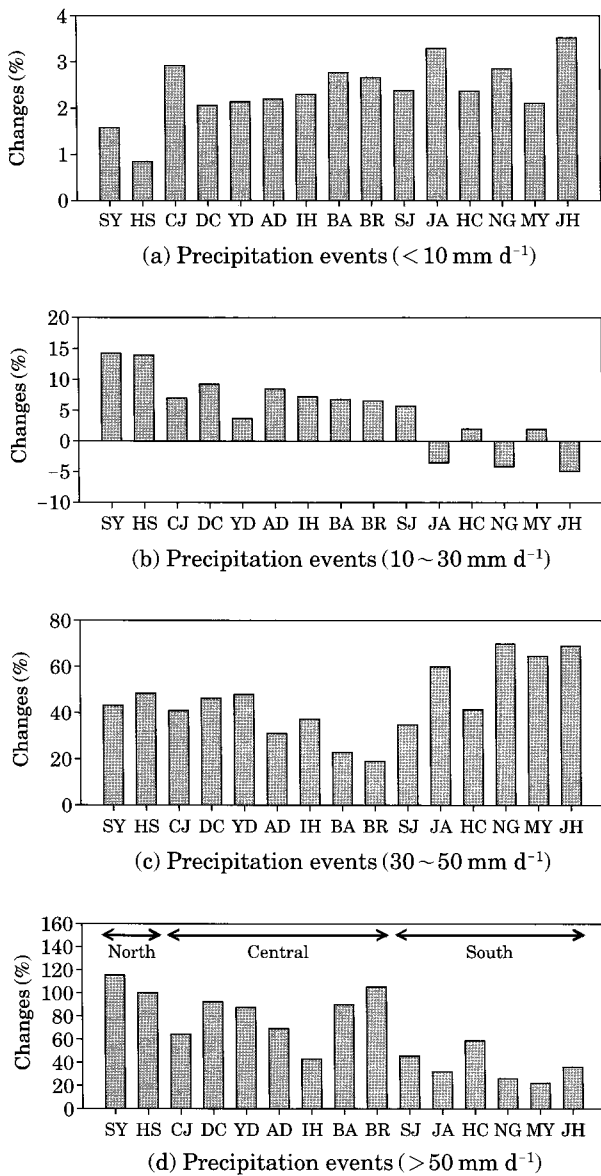


Fig. 6. Changes of number of precipitation events of (a) < 10 mm d⁻¹, (b) 10~30 mm d⁻¹, (c) 30~50 mm d⁻¹, and (d) > 50 mm d⁻¹ at 15 multipurpose dams for the period of 2071~2100 relative to 1971~2000 from MM5 A1B simulation. 'North', 'Central', and 'South' in (d) represent the regions in South Korea shown in Fig. 4 and abbreviated letters on the x-axis are the same as in Table 3.

후 전망의 시도가 필요할 것으로 사료되었다.

적 요

본 연구는 수자원, 물환경 및 수생태계의 변이를 파악

하는데 기초자료를 제공하고자 수평격자 27km의 고해상도 기후변화 시나리오를 이용하여 15개 다목적댐 유역을 대상으로 기후변화를 분석하였다. 기온은 15개 다목적댐 유역 모두 2100년까지 지속적으로 상승하는 경향을 보인 반면, 강수량은 2040년대에 급격히 증가하면서 2050년대 이후부터는 지역별로 서로 다른 증감 경향을 보였다. 강원지역에 위치한 소양강댐과 횡성댐 유역에서는 2050년대 이후 강수량 증가가 서서히 감소한 후 2090년대에 다시 급격히 증가하는 경향을 보인 반면, 경북지역에서 전남 해안지역에 이르는 중부지역에 위치한 7개 댐 유역에서는 2050년 이후 10년 주기의 증감 변화가 나타났으며, 남부지역에 위치한 6개 댐 유역에서는 2050년 이후 2060년대에 강수량 증가가 급격히 감소한 후 2090년대까지 서서히 증가하는 경향을 보였다. 20세기 후반(1971~2000년)에 비하여 21세기 후반(2071~2100년)에 강수일수는 약 3% 정도 증가하고 강수강도는 6~12% 정도 강해지는 것을 볼 수 있었다. 강수강도별 강수빈도는 남부지역을 제외한 모든 댐 유역에서 강수강도가 증가할수록 강수빈도는 증가하며, 남부지역에서는 10~30 mm d⁻¹ 범위의 강수강도에서 강수빈도가 감소하나 그 이상의 강수강도에서는 강수빈도가 다시 증가하는 특성을 보였다. 호우로 규정된 50 mm d⁻¹ 이상의 강수강도에서 15개 댐 유역 모두 강수빈도가 약 20~100% 이상 증가하였다.

사 사

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업(06건설핵심B01-자연과 함께하는 하천복원기술개발(ECORIVER21)) 및 한국수자원공사 K-water 연구원 「기후변화에 따른 댐저수지 수환경 취약성 평가 및 대응방안 수립」의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

인 용 문 헌

Bae, D.H., I.W. Jung and H. Chang. 2008a. Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins. *Hydrological Processes* **22**(14): 2644-2656.
 Bae, D.H., I.W. Jun and H. Chang. 2008b. Potential changes in Korean water resources estimated by high-resolution climate simulation. *Climate Research* **35**: 213-226.
 Cameron, D., K. Beven and P. Naden. 2000. Flood frequency estimation by continuous simulation under climate change (with uncertainty). *Hydrology and Earth System*

- Sciences* 4(3): 393-405.
- Cha, Y.M., H.S. Lee, J.Y. Moon, W.T. Kwon and K.O. Boo. 2007. Future climate projection over East Asia using ECHO-G/S. *Atmosphere* 17(1): 55-68.
- Choi, Y. 2002. Changes on frequency and magnitude of heavy rainfall events in Korea. *Journal of the KOREAN Data Analysis Society* 4(3): 269-282.
- Guo, Y.R. and S. Chen. 1993. Terrain and land use for the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Modeling System (MM5): Program TERRAIN. NCAR Technical Note NCAR/TN-397+LA(1993), p. 113. Boulder, Colorado.
- Im, E.S., I.W. Jung, H. Chang, D.H. Bae and W.T. Kwon. 2009. Hydroclimatological response to dynamically downscaled climate change simulations for Korean basins. *Climate Change*, doi: 10.1007/s10584-009-9691-2.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001. Impacts, Adaptations, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. UK.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. UK.
- Jang, W. 2010. Basic out on low carbon green growth and coping with climate change. *Journal of Korea Public Land Law Association* 49: 223-244.
- Jung, I.W., D.H. Bae and G. Kim. 2010. Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.2068.
- Kay, A.L., N.S. Reynard and R.G. Jones. 2006. RCM rainfall for UK flood frequency estimation. I. Method and Validation. *Journal of Hydrology* 318: 151-162.
- Kim, B.S., B.K. Ki, M.S. Kyung and H.S. Kim. 2008. Impact assessment of climate change on extreme rainfall and I-D-F analysis. *Journal of Korea Water Resources Association* 41(4): 379-394.
- Koo, G.S., K.O. Boo and W.T. Kwon. 2009. Projection of temperature over Korea using an MM5 regional climate simulation. *Climate Research* 40: 241-248.
- Mailhot, A., S. Duchesne, D. Caya and G. Talbot. 2007. Assessment of future change in Intensity-Duration-Frequency (IDF) curve for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrology* 347: 197-210.
- NIMR, 2004. The development of regional climate scenario for the national climate change report (III). National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration.
- NIMR, 2009. Understanding of climate change (II). National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration.
- Shin, J.K., C.K. Kang and S.J. Hwang. 2003. Daily variations of water turbidity and particle distribution of high turbid-water in Paltang reservoir, Korea. *Korean J. Limnol.* 36(3): 257-268.

(Manuscript received 12 April 2011,
Revision accepted 9 June 2011)