

# 수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산( I ): 유역별 기후시나리오 구축

## Generation of High Resolution Scenarios for Climate Change Impacts on Water Resources ( I ): Climate Scenarios on Each Sub-basins

배 덕 효\* / 정 일 원\*\* / 권 원 태\*\*\*

Bae, Deg Hyo / Jung, Il Won / Kwon, Won Tae

### Abstract

To evaluate the climate change impacts on water resources, this study generates and analyzes the climate change scenarios for 139 sub-basins in Korea using high resolution (27km × 27km) SRES A2 scenario and LARS-WG. The 27 × 27km high resolution NCAR/PSU MM5 scenario is downscaled from 350km horizontal resolution ECHO-G data. The A2 scenario relatively well reproduced Korean spatial precipitation characteristics, but it underestimated the precipitation over the Han River and the Gum River basins. The LARS-WG was selected and evaluated to overcome the limitation of climate model and to create a highly reliable climate scenario. The results show that the monthly mean minimum and maximum temperature and monthly mean precipitation are within ±20% from the observed mean, and ±50% from the standard deviation that represents the generated data are highly reliable. Moreover, the comparison results between observed data and generated data from LARS-WG show that the latter can reflect the regional climate characteristic very well that can not be simulated from the former.

**keywords** : Climate Change, Water resources, A2 scenario, LARS-WG

### 요 지

본 연구에서는 기후변화가 국내 수자원에 미치는 영향을 평가하기 위해 고해상도(27km × 27km)의 SRES A2 시나리오와 LARS-WG를 이용하여 국내 139개 소유역별 기후시나리오를 생산하였다. 본 연구에서 사용된 고해상도 시나리오는 약 350km 수평해상도의 ECHO-G 자료를 NCAR/PSU MM5를 이용하여 27km 수평해상도로 상세화한 것이다. A2 시나리오는 우리나라의 공간적 강수특성을 비교적 잘 모사하였으나, 한강과 금강유역의 강수량이 적게 모의되는 문제점을 보였다. 이러한 기후모형의 한계를 극복하고 유역스케일의 신뢰성 높은 기후시나리오를 생산하기 위해 일기상발생기인 LARS-WG를 선정하고 국내 기후모의에 대한 적용성을 평가하였다. LARS-WG를 이용한 기후모의 결과 월평균최대·최소기온과 월평균강수량은 관측치에 평균에서는 ±20%, 표준편차에서는 ±50% 이내로 기

\* 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 부교수

Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea  
(e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

\*\* 세종대학교 토목환경공학과 박사과정

Ph.D Candidate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea  
(e-mail: bobilwon@paran.com)

\*\*\* 기상연구소 기후연구실 기후연구실장

Director, Climate Research Lab., Meteorological Research Institute, Seoul 156-720, Korea  
(e-mail: wontk@metri.re.kr)

후변화에 따른 수자원 영향평가의 목적으로 적용성이 높다고 판단되었다. 또한 LARS-WG를 이용하여 유역별 시나리오를 생산하고 관측치와 비교한 결과 기후모형에서 모의하지 못하는 지역적인 기후특성을 잘 반영하는 것으로 분석되었다.

**핵심용어 :** 기후변화, 수자원, A2 시나리오, LARS-WG

## 1. 서론

기후변화의 영향과 수자원에 관한 논의는 새로운 것이 아니다. 1990년대 이래로 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 평가하기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 이러한 연구들은 기술개발 수준과 사회적 요구에 따라 연구의 관점이 조금씩 변화되었다. 1990년대 중반까지는 기후변화가 유역의 물순환에 어떠한 영향을 미치는지를 규명하기 위한 연구들이 주를 이루었다. 이들은 수문 관측자료를 통계적으로 분석하여 기후변화의 징후나 증거를 발견하려는 연구들(Lins, 1994; Mitosek, 1995)과 강수와 온도의 변화에 따른 유출량과 수문시스템의 민감도를 분석하려는 연구들(Ayers et al., 1994; Kwadijk and Middelkoop, 1994)이 주를 이루었다. 1990년대 후반에는 수치모형화 기법의 향상과 기후 및 수문 모형의 기술 발전에 기인하여 기후변화로 인한 미래 수자원의 변동성을 정량적으로 평가하려는 연구들이 시도되었다(Vogel et al., 1997; Lettenmaier et al., 1999). 이러한 연구들에서는 대부분 전구모형(General Climate Model, 이하 GCM)과 수문모형을 이용하여 미래 수자원의 변동성을 평가하고 수자원시스템에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 최근에는 선진국을 중심으로 수자원 영향평가 결과에 대한 불확실성을 평가하고 최소화하기 위한 연구들(Webster et al., 2003; Wilby, 2005)이 진행되고 있다. 또한 통합적인 관점에서 기후변화에 따른 수자원의 변화가 사회경제에 미치는 영향을 분석하려는 연구들도 일부 시도되고 있다(Alcamo et al., 2003).

이러한 연구들의 신뢰성과 결과의 활용성을 높이기 위해서는 기후변화 시나리오의 불확실성을 줄이는 것과 영향평가 및 분석이 지역차원에서 수행되는 것이 요구된다(IPCC, 2001b). 지역차원의 영향평가를 위해서는 지역적인 기후특성을 모사할 수 있는 고해상도의 시나리오가 필요하다. 이에 관한 대표적인 연구로 Pilling and Jones(1999)는 영국전역에 대해 고해상도(10km×10km) 시나리오를 이용한 결과 저해상도의 기존연구들에 비해 지역차원의 변동성을 보다 잘 반영한다고 제시하였다. Bergström et al.(2001)과 Fowler et al.(2005)도

RCM(Regional Climate Model)을 이용하여 고해상도 시나리오를 구축하고 스웨덴과 영국 전역에서 수자원의 지역별 변화에 대해 평가하였다. 일본(한국환경정책평가연구원, 2004)에서도 10km 격자의 고해상도 국지기후 시나리오를 생산하고 수자원의 변화와 적설심의 변화에 대해 연구하였다.

국내에서도 기후변화가 수자원에 미치는 영향에 대한 연구들이 적지만 꾸준히 진행되어 왔다(윤용남 등, 1998; 한국건설기술연구원, 2000; 안재현 등, 2001; 김병식 등, 2004). 이러한 연구들은 국내 유역에서 기후변화에 따른 수자원의 변동성을 평가하려고 시도하였다는 점에서 의미가 크다고 할 수 있다. 그러나 이와 같은 대부분의 연구에서는 적분기간이 기후변화를 모의하기는 불충분한 10년 미만이거나, 온난화의 원인을 CO<sub>2</sub>에만 국한시킨 제약성을 안고 있다. 또한 영향평가가 특정 지역에 국한되어 있어 통합적인 수자원계획과 관리에 활용성이 낮은 실정이다. 특히 우리나라와 같이 협소한 면적에 비해 복잡한 지형적 영향을 가지는 곳에서는 국지적으로 다양한 기후 특성이 나타나고 있으며, 지역적으로 인접해 있는 유역의 경우에도 유출특성에 차이가 있다. 따라서 국내 유역에서 신뢰성 높은 기후변화 영향평가 결과를 제시하기 위해서는 고해상도 자료를 이용한 지역적 영향평가가 시급한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 측면들을 고려하여 공간적으로는 국내 5대강유역을 포함하고, 시간적으로는 과거 30년(1971~2000년)과 미래 90년(2001~2090년) 동안의 신뢰성 높은 기후변화 시나리오를 생산하고자 하였다. 지역스케일의 기후시나리오 생산을 위해 국내 5대강유역을 139개의 소유역으로 분할하였다. 유역별 기후시나리오 생산을 위해서는 무엇보다도 신뢰성 있는 미래 온실가스 배출 시나리오를 선정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, 이하 IPCC)에서 제공하는 온실가스배출에 관한 특별 보고서(Special Report on Emissions Scenarios, 이하 SRES)의 A2 온실가스 배출시나리오를 적용하여 기상연구소(2002-2004)가 생산한 고해상도(27km×27km)의 기후변화 시나리오 자료를 활용하였다. 기후모형의 한계를 극복하

고 관측치를 기초로 하는 기후시나리오 생산을 위해 일 기상발생기인 LARS-WG를 선정하고, 국내 기후모의 적합성을 평가하였다. 최종적으로 A2 시나리오의 기후 변동성을 LARS-WG에 입력하여 유역별 시나리오를 생산하였다.

본 연구의 목표는 국내유역에서 지역스케일의 기후 변화가 수자원에 미치는 영향평가를 수행할 수 있는 기후 및 유출시나리오를 생산하는 것으로, (a) 고해상도의 A2 시나리오를 이용한 유역별 기후시나리오 생산과 (b) 유역별 유출시나리오 생산, 두 개의 논문으로 구성하였다. 본 논문은 그 첫 번째 논문으로, 월 단위 A2 시나리오의 기후변동성을 반영하여 LARS-WG를 통한 일 단위 기후변수들을 생성하였다. 2장에서는 수자원 측면의 일반적인 기후변화 영향평가 기법에 대해 서술하였으며, 3장에서는 유역별 기후시나리오 생산방법과 연구에 이용된 SRES A2 기후변화 시나리오, 기후모형 그리고 LARS-WG에 대해 기술하였다. 4장에서는 유역별로 기후시나리오를 생산하고 분석하였으며, 5장에서는 연구 결과에 대해 요약하였다.

## 2. 기후변화에 따른 수자원의 영향평가 기법

기후변화로 인한 수자원의 영향을 분석하는 방법으로는 크게 과거 관측자료를 이용해 변화 경향을 분석하는 방법, 기후모형을 이용하는 방법 그리고 기후모형과 결정론적 수문모형을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 관측자료를 이용하는 방법은 주로 기후변화의 징후나 증거 분석에 이용되는 방법으로 과거의 실제 현상을 통해 기후변화의 특성을 파악할 수 있는 장점이 있으나, 관측치만으로 불확실성이 큰 미래 기후변화에 대한 영향을 분석하기에는 한계가 있다. 기후모형을 이용하는 방법은 기후모형의 결과를 이용하여 비교적 쉽게 미래의 변동성을 평가할 수 있는 장점이 있으나 공간해상도문제와 복잡한 지역차원의 수자원 변동성 분석에는 한계가 있다. 따라서 대부분의 연구에서는 기후모형에서 생산되는 기후자료를 수문모형에 입력하여 수자원의 영향을 평가하는 방법을 사용하고 있다(배덕효와 정일원, 2005). 이 방법의 가장 큰 문제점은 두 모형이 시·공간스케일에서 차이가 있다는 것이다. 일반적인 기후모형의 공간해상도는 수 100km 이상으로 지역 차원의 수자원 영향평가에 이용하기에는 시·공간 분해능과 물리 과정의 한계로 인해 지역적인 기후특성이나 변화를 분석하기에는 문제가 있다(IPCC, 2001b). 따라서 기후모형에서 생산되는 저해상도의 공간자료를 유역스케일(10~50km)의 고해상

도 자료로 상세화(Downscaling)하는 것이 필요하다. 시간해상도의 문제는 기후모형이 일일변동의 재현능력에 대해 아직까지 충분히 검증되지 않았다는 것이다. 기후모형의 결과는 보통 10분 이하의 간격으로 계산되지만 불확실성이 큰 일 단위 이하의 기후모사에는 아직까지 한계가 있다. 또한 기후모형의 결과는 모형의 구조와 계산 알고리즘에 따른 편차(bias)를 지니게 된다. 이러한 시·공간적 한계와 편차를 가장 손쉽게 제거할 수 있는 방법이 일기상발생기를 이용하는 것이다. 일기상발생기는 과거 관측 기후자료의 변동패턴을 통계적으로 분석하여 필요한 시간해상도의 기후자료를 생산할 수 있다. Fig. 1은 기후모형과 유출모형을 이용하여 수자원 영향평가를 수행하는 과정을 나타낸 것이다. 일기상발생기는 기상관측자료를 이용하여 매 개변수를 결정한 다음 기후모형에서 모의된 유역별 기후인자 즉 강수 및 기온 등의 월평균 변화량을 입력자료로 하여 유역별 미래 기후시나리오를 생산하게 된다. 유출모형은 계측유역에서는 매개변수를 직접 보정하고, 미계측유역에서는 지역화를 통해 매개변수를 결정하게 된다. 최종적으로 구축된 유출모형에 유역별 기후시나리오를 입력하여 유출시나리오를 생산하고 기후변화에 따른 수자원의 변동성을 평가하게 되는 것이다.

## 3. 유역별 기후시나리오 생산 방법

유역별 기후시나리오를 생산하기 위해서는 무엇보다도 영향평가의 목적이 명확해야 하며, 생산된 시나리오에 대한 적합성분석이 수행되어야 한다. 본 연구는 국내유역에서 지역스케일의 기후변화 영향평가를 수행할 수 있는 신뢰성 있는 기후변화 시나리오를 생산하기 위한 것으로 국내 유역을 139개의 소유역으로 구분하여 유역별 시나리오를 생산하고자 하였다. 이를 위해 25년 이상의 관측치를 보유한 56개의 기상관측소 자료를 수집하고 LARS-WG를 이용하여 지역별 기후모의 적합성을 분석하였다. 또한 IPCC SRES A2 고해상도 자료의 특성과 유역별 기후 변동성을 분석하였다. 마지막으로 A2 기후변화 시나리오의 유역별 기후변동량을 유역별로 구축된 LARS-WG에 입력하고 유역별 시나리오를 생산하였다.

다음은 유역별 기후시나리오 생산을 위해 이용된 기후변화 시나리오와 기후모형 그리고 LARS-WG에 대해 설명한 것이다.

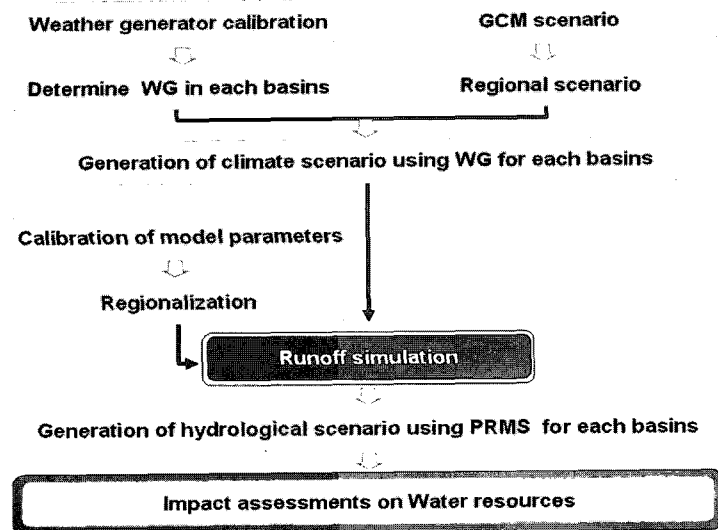


Fig. 1. Scheme for the assessment of climate change impacts on water resources

### 3.1 A2 기후변화 시나리오

기후변화 시나리오는 인위적 온실가스 농도 증가 시나리오에 따른 기후시스템의 반응을 모의한 것이다. 최근에는 IPCC의 배출시나리오에 대한 특별 보고서에 기초한 시나리오 산출이 주를 이루는데, 모든 사회, 경제, 기술, 환경적 부분을 완벽하게 배출시나리오에 고려하는 것은 불가능하기 때문에 상당한 불확실성이 포함될 수 밖에 없다. 따라서 이에 반응하는 미래 기후변화는 매우 불확실하지만, 현재로서는 기후가 어떻게 변화될 지를 보여줄 수 있는 유일한 선택이 시나리오이다. Table 1은 IPCC SRES에 대한 구체적인 사항을 나타낸 것으로, 인구, 기술, 경제성장 등 미래 배출문제의 원동력이 되는 요소들을 광범위하게 다루며, 크게 4개 그룹(A1, A2, B1, B2)으로 배출시나리오를 제시한다. 어느 시나리오도 기후변화를 구체적으로 설명할 수 있는 미래의 발전방향성을 포함하는 것은 없으며, 각각 다양한

종류의 발전방향성을 포함하고 있다. 따라서 국내의 기후변화 영향 평가 및 적응 전략을 수립하기 위해서는 다양한 시나리오에 대한 영향평가를 통해 발생 가능한 변화의 범위를 제시하는 것이 필요할 것이다. IPCC 3차 평가보고서의 기준시나리오로서 현재까지 많이 적용되는 배출시나리오는 A2와 B2 시나리오이며, 본 연구에서는 A2 시나리오를 이용하였다. A2 시나리오는 CO<sub>2</sub> 배출 농도가 급격히 증가하여 2100년에는 820 ppm에 이르는 배출시나리오로, 온실가스가 급격히 증가할 경우 수자원에 미치는 영향을 평가하는 것은 안정성측면에서 의미가 있을 것으로 판단되어 선정하였다. Table 1에서 A와 B는 경제(Economic)지향인가, 환경(Environmental)지향인가를, 1과 2는 지구주의(Global)지향인지, 지역주의(Regional)지향인가를 나타낸다. A1 시나리오에서 C, G, B, T는 각각 밸런스형, 석탄 주도형, 가스 주도형, 고효율 에너지 기술 주도형을 뜻한다.

Table 1. SRES(Special Report on Emission Scenario) scenarios(IPCC, 2001a)

Driver	A1				A2	B1	B2
	A1C	A1G	A1B	A1T			
Population growth	Low	Low	Low	Low	High	Low	Medium
GDP Growth	Very high	Very high	Very high	Very high	Medium	High	Medium
Energy Use	Very high	Very high	Very high	Very high	High	Low	Medium
Land-Use Changes	Low-Medium	Low-Medium	Low	Low	Medium/High	High	Medium
Availability of Conventional and Unconventional Oil and Gas	High	High	Medium	Medium	Low	Low	Medium
Pace of Technological Change	Rapid	Rapid	Rapid	Rapid	Slow	Medium	Medium

본 연구에서 이용한 A2 시나리오는 기상연구소 기후 연구실에서 “기후변화협약대응 지역기후 시나리오 산출 기술개발” (2002-2004)의 일환으로 생산한 것이다. 자료 기간은 100년(2001-2100년)이며, 자료 형태는 과거 30년(1971-2000년) 평균 월별값에 대한 편차자료로서 기온과 강수 변화량을 제공하고 있다. 자료 영역은 32.9684°N-43.426°N, 122.9348°E- 131.4468°E이며, 격자 간격은 약 0.2432°(약 27 km)이다.

### 3.2 ECHO-G와 MM5 모형의 개요

ECHO-G(ECHAM4/HOPE-G)는 유럽 중기예보 센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)의 예보모형을 근간으로 하여 독일의 막스플랑크 연구소(Max Planck Institute, MPI)에서 수정하여 개발한 대기 대순환 모형과 해양모형을 접합한 기후모형이다. 자료는 경위도 약 3.75°×2.8°의 수평 격자간격으로 구성되어 있다 (Min et al., 2005). NCAR/PSU MM5 모형은 NCAR(National Center for Atmospheric Research)의 중규모 예측 그룹에서 개발한 중규모 기후모형이다. SRES A2 온실가스 증가 시나리오에 따라 모의된 ECHO-G 결과를 4시간 간격으로 MM5의 초기 및 측면 경계자료로 입력하여 지역적인 기후를 모의하게 된다.

### 3.3 LARS Weather Generator

일기상발생기는 미세측 지역이나 결측치가 있는 관측소의 기후자료를 생산하기 위한 목적으로 개발된 것으로 기후변화 영향평가에도 많이 적용되고 있다. 기후변화 영향평가에 주로 적용되는 일기상발생기는 Richardson(1981)이 개발한 WGEN과 Racsko et al.(1991)가 개발한 LARS-WG이다. Semenov et al.(1998)은 두 모형을 유럽, 미국, 아시아 등 상이한 기후지역에 적용하여 모의 정확성을 평가한 결과 LARS-WG가 WGEN에 비해 적용성이 높다고 제시하였다. 따라서 본 연구에서도 LARS-WG(Semenov and Barrow, 2002)를 이용하여 유역별 일단위 기후시나리오를 생산하였다.

LARS-WG는 무강수일(dry day)과 강수일(wet day)이 지속된 일수(series)에 대한 준경험적분포형(semi-empirical distribution)을 이용하여 일단위의 강수와 태양복사량 자료를 생산한다. 여기서 강수일은 강수가 0 mm 이상인 날로 정의되며, 무강수일은 강수가 없는 날이다. 준경험적분포형(Emp)은 Eq. (1)과 같이 10개의 간격(interval)을 가진 히스토그램으로 가정된다. 여기서  $a_{i-1} < a_i$  이고,  $h_i$ 는 관측치를 이용해 계산되는 i번째

간격의 빈도수를 나타낸다.

$$Emp = \{a_0, a_i; h_i, i = 1, \dots, 10\} \quad (1)$$

LARS-WG는 강수량, 최고·최저기온 그리고 태양복사량의 일별 시계열 자료를 생성할 수 있다. 이 모형의 매개변수로는 강수와 무강수일의 연속 일수(wet and dry series)의 빈도분포와 평균 및 표준편차, 월별 강수량의 빈도분포와 평균 및 표준편차, 월별 최대·최소강수량, 월별 최고·최저기온, 일최고·최저기온, 최저기온이 0°C 보다 작은 날의 분포, 최대기온이 30°C 이상인 날의 분포 등이 있다. LARS-WG는 이러한 매개변수들을 이용하여 기후자료를 생산하게 된다. 매개변수의 검·보정에는 Q-test 기능이 사용되는데, 이것은 LARS-WG를 통해 모의되는 기후자료가 관측치에 얼마나 적합한지를 판단하는 것으로 t-test와 F-test를 통해 모의된 기후자료의 평균과 분산이 관측치와 동일한 모집단에서 생성된 자료인지를 분석하게 된다.

## 4. 유역별 기후시나리오 생산

유역별 기후변화 시나리오 생산을 위해 25년 이상의 관측치를 보유한 56개의 기상관측소 자료를 수집하고 LARS-WG의 지역 기후모의 적합성을 분석하였다. 기후변화는 현재나 과거에서 장기간의 평균적인 기후가 미래에 어떻게 변화되는지를 뜻하는 것으로 본 연구에서는 30년 동안의 평균을 기준으로 시나리오를 생산하고자 하였다. 많은 국외연구에서도 30년 단위의 평가를 보편적으로 적용하고 있다(Arnell and Reynard, 1996; Pilling and Jones, 2002). 전체 모의기간 중 과거 30년(1971-2000년) 동안을 기준기간(baseline period)으로 미래 90년 동안을 3개의 분석기간(2015s(2001~2030년), 2045s(2031~2060년), 2075s(2061~2090년))으로 구분하여 각 유역별 기후변화 시나리오를 생산하였다.

### 4.1 유역구분 및 자료수집

기후변화 영향평가를 위한 유역 구분은 평가의 목적에 부합되면서 기후변화 시나리오의 공간해상도와 결과의 활용성 등을 종합적으로 고려하여 결정하여야 한다. 본 연구에서는 수자원에 대한 지역별 기후변화 영향을 평가할 유역으로 수자원단위지도의 단위유역을 기준으로 하였다. 단위유역은 제주도를 제외한 139개로 구분되어 있으며, 평균유역면적이 약 700km<sup>2</sup>이다. 주요 수위표와 댐지점이 유역출구에 위치해 있어 유출모형의 매개변수 검·보정에도 유리하며, 향후 영향평가 결과의 활용성 측면에서도 적합할 것으로 판단하였다. Fig. 2는

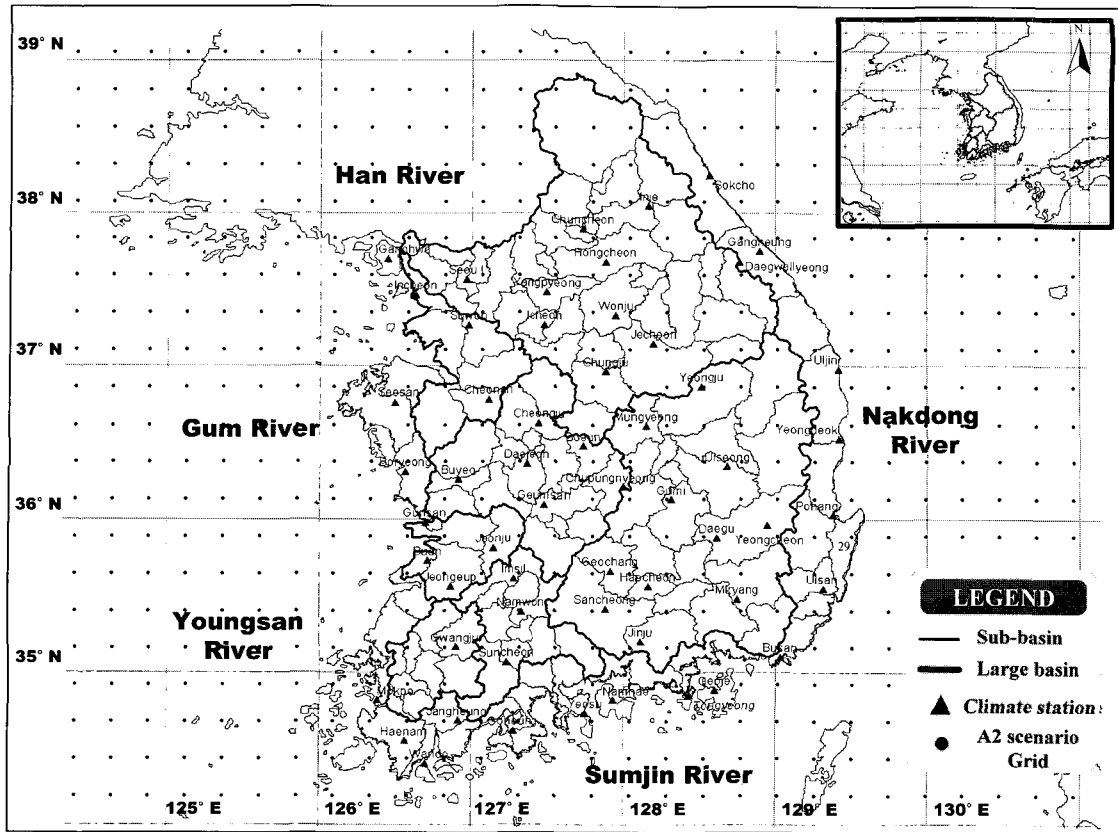


Fig. 2. Location of the 139 sub-basins and 56 climate stations in South Korea

유역구분과 A2 시나리오의 격자점 그리고 LARS-WG를 검·보정하기 위해 사용한 56개의 기상관측소 현황을 나타낸 것이다.

#### 4.2 LARS-WG의 기후모의 적합성 평가

기후자료의 불확실성을 줄이고 신뢰성 있는 보정을 하기 위해서는 최소한 20년 이상의 자료가 필요하다 (Semenov and Barrow, 2002). 따라서 국내의 기상관측소 중에서 최소 25년 이상의 자료를 가진 56개 관측소를 선정하고 자료를 수집하였다. Fig. 3은 월별 각 관측소의 연속적인 강수(Wet day)와 무강수(Dry day) 일수의 평균과 표준편차를 보여준다. 여기서 각 기상관측소별로 평균값의 편차가 큰 것을 볼 수 있는데, 이것은 지역적으로 강수특성에 차이가 있다는 것을 뜻하며, 유역별 기후변화 시나리오 생산에서도 이러한 특성이 고려되어야 한다는 것을 나타낸다. 각 관측소별 범위(range)는 연속 무강수일수에서는 1월(3.67~11.81일)이, 연속 강수일수에서는 8월(1.69~3.39일)이 가장 큰 차이를 보였다. 전체 관측소의 평균에서는 연속 무강수일수의 경우 10월(9.18일)이 최고치를, 7월(3.51일)에서 최소치를 보였으며, 연속 강수일수에서는 7월(2.59일)이 최고치를, 12월(1.54일)이 최소치를 나타내었다. 이것은 여름철인

7월에 강수가 자주 발생하는 국내 기후특성으로 인한 결과로 판단된다. 연속 무강수일수의 경우는 1~12일 정도의 큰 차이를 보이는데 반해, 연속 강수일수는 1~3.5일 정도로 작은 차이를 보였다. 이 결과는 국내 유역에서는 연속해서 강수가 내리는 날이 전국 평균 약 3.5일을 넘지 않는 것을 보여준다.

LARS-WG의 국내지역 기후모의 적합성을 검증하기 위해 각 관측소별로 300년 동안의 기후자료를 모의하였다. 관측자료를 모집단으로 가정하여 모의된 시나리오의 평균과 분산이 모집단의 평균과 분산에 대한 적합성을 평가하였다. Table 2는 월평균강수량에 대한 t-test와 F-test의 결과로 각 유의수준(p) 구간별 관측소의 수를 나타낸 것이다. 이를 통해 모의된 기후자료의 평균과 분산이 관측치와 동일한 모집단에서 생성된 자료인지를 분석하게 된다. Semenov and Barrow(2002)는 동일한 모집단으로 평가할 수 있는 유의수준으로 P-value(Probability)가 0.05보다 큰 값을 가져야 한다고 제안하였다. 월평균강수량은 평균에서는 모집단 즉 관측치의 유의수준을 만족하였으나 분산에서는 일부 관측소에서 유의수준을 만족하지 못하였다(Table 2). Fig. 4는 관측치와 LARS-WG에 의해 생산된 월평균 강수량, 월별 최고·최저기온의 평균과 표준편차의 차를 백

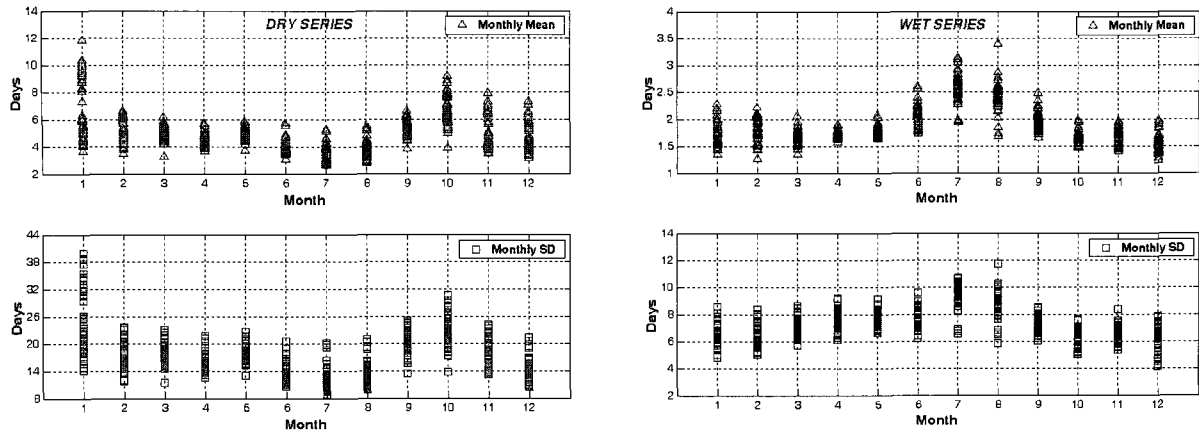


Fig. 3. Monthly mean and standard deviation of dry and wet series for 56 climate stations

Table 2. The result of t-test and F-test for monthly mean precipitations

Probability range	month											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
t-test												
$p < 0.01$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$0.01 \leq p < 0.05$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
$0.05 \leq p < 0.50$	4	3	2	2	6	4	5	13	4	7	3	33
$0.50 \leq p < 0.70$	12	11	9	16	18	13	7	16	15	20	14	7
$0.70 \leq p \leq 1.00$	40	42	45	38	32	39	44	27	37	29	39	7
F-test												
$p < 0.01$	8	11	2	2	1	9	4	7	4	4	6	3
$0.01 \leq p < 0.05$	12	7	5	2	2	4	1	8	4	9	8	5
$0.05 \leq p < 0.50$	33	29	18	24	24	20	21	16	36	21	30	16
$0.50 \leq p < 0.70$	1	4	11	13	15	13	8	18	8	4	5	9
$0.70 \leq p \leq 1.00$	2	5	20	15	14	10	22	7	4	18	7	23

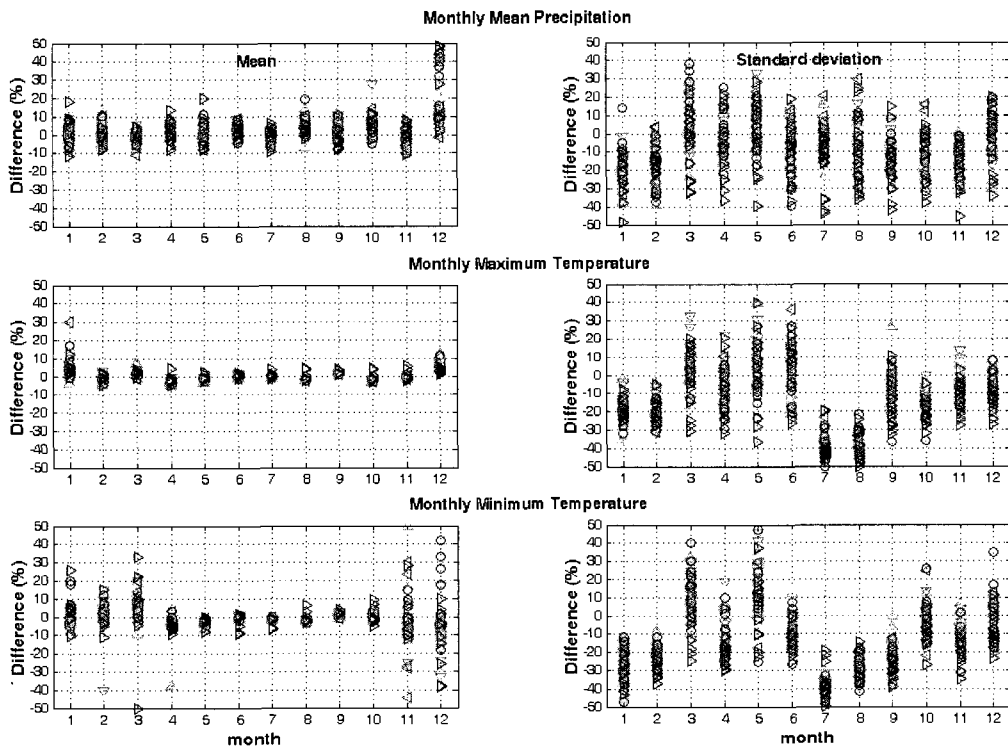


Fig. 4. Monthly differences of observed and generated mean precipitation, maximum temperature, and minimum temperature at 56 climate stations

분율로 나타낸 것이다. 월평균강수량에서는 대부분의 월에서  $\pm 20\%$  이내의 차를 보였으나 12월의 경우 일부 관측소에서 최대 50%까지 크게 모의하였다. 12월의 경우 월평균강수량이 가장 적으나 일강수량의 변동계수는 매우 큰 달로, 통계적 기반인 LARS-WG의 모의능력이 낮은 것을 사료된다. 특히 12월 한 달 내내 무강수인 연도가 많은 관측소의 경우에는 적용성이 떨어지는 것으로 나타났다. 월최고기온은 거의 모든 월에서 관측치와  $\pm 10\%$ 의 차이를 보였으나, 월최저기온에서는 몇몇 관측소에서  $\pm 50\%$ 까지 과다 혹은 과소 모의하였다. 표준편차는 관측치에 대해 전반적으로  $\pm 50\%$  범위의 차이를 나타내었으며, 관측소별로도 차이가 있었다. 특히 1월과 2월 그리고 7월과 8월의 월별 최고·최저기온의 평균값에서는 관측치에 근접하였으나 표준편차에서는 과소하게 모의하였다. 여름철의 월최고기온은 온난일의 분석에, 겨울철 월최저기온은 한랭일의 변화를 분석하는데 이용되는 것으로 이러한 극치 기온 분석을 위한 기후자료 생성에서는 LARS-WG가 다소 적용성이 낮은 것으로 판단되었다. 그러나 월평균최대·최소기온과 월평균강수량은 관측치와 비교하여 평균에서는  $\pm 20\%$  이내로 매우 근접하게 모의하였으며 표준편차에서도  $\pm 50\%$  이내로 기후변화에 따른 수자원 영향평가의 목적으로는 적용성이 높다고 판단되었다. 각 관측소의 연속적인 강수(Wet day)와 무강수(Dry day) 일수의 모의에서는 유의수준(p-value)이 최소 90 이상으로 모의능력이 매우 우수하게 나타났다.

### 4.3 A2 시나리오 특성 분석

유역별 시나리오 생산을 위해 우선 A2 시나리오 자료의 기후 모사특성과 시·공간적 변동성을 분석하였다. Fig. 5는 기준기간과 3개의 분석기간(2015s, 2045s,

2075s) 동안의 연평균강수량과 기온을 나타낸 것이다. 기준기간에서의 연평균강수량의 분포를 살펴보면 남쪽보다는 북쪽이, 해안보다는 내륙지역의 강수량이 적게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 A2 시나리오가 해양에 인접한 유역에서 강수량이 많은 국내 유역의 공간적인 강수분포 특성을 비교적 유사하게 모사한 것으로 판단할 수 있다. 양적인 측면에서는 섬진-영산강유역과 낙동강 유역에서는 관측치와 유사한 강수량을 보였으나, 한강유역과 금강유역에서는 연평균강수량이 1,000mm 이하로 과소하게 모의되었다. 이것은 지역기후모형인 MM5가 해양에서 강수량을 많이 모의하는 특성으로 인해 내륙에 강수를 모의할 만한 충분한 수분이 공급되지 않는 원인 때문이다(기상연구소, 2002). 이러한 기후모형의 한계를 극복하고 신뢰성 있는 유역별 영향평가를 위해 관측치에 기반한 일기상발생기의 적용이 필요하다.

연평균강수량의 변화는 전체적으로 증가경향을 보이고 있으나, 2045s 기간에서는 낙동강과 섬진-영산강유역에서 감소하는 것으로 나타났다. 특징적인 변화로는 한강유역과 동해안 일부 지역의 강수량 증가가 뚜렷하게 나타난다는 점이다. 기온분포에서는 A2 시나리오가 강수에 비해 국내 기온의 공간적 분포특성을 잘 모사하는 것을 볼 수 있다. 고도와 위도가 높을수록, 해양보다는 내륙에 위치해 있는 지역일수록 평균기온이 낮은 특성을 잘 반영하고 있다. 평균기온은 뚜렷한 증가경향을 보였으며, 2090년경에는 평균기온이 최대 6°C까지도 증가하는 것으로 나타났다.

유출량 변화에 가장 큰 영향을 미치는 강수량의 계절별 변동성을 분석하였다. Table 3은 국내 전체유역에 대한 계절별 평균강수량의 통계치를 정리한 것이다. 평균강수량은 봄철에는 감소하고, 가을과 겨울철에는 증

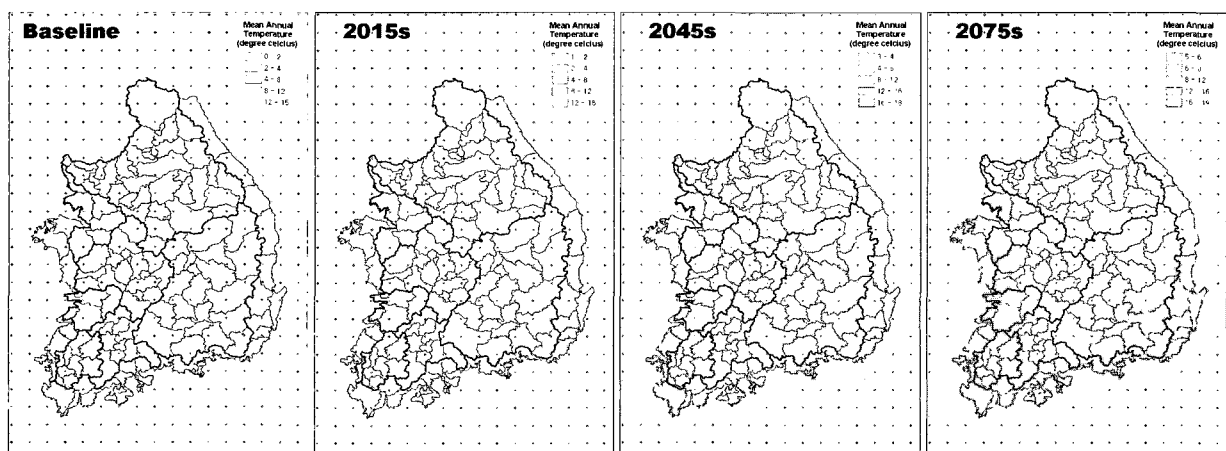


Fig. 5. Variations of annual mean precipitation (upper) and mean temperature (lower)



Table 3. Statistical value of seasonal mean precipitation for sub-basins under A2 scenario

Season	Statistical Value	Period						
		base	2015s		2045s		2075s	
			Value (mm)	Change rate(%)	Value (mm)	Change rate(%)	Value (mm)	Change rate(%)
Spring (MAM)	Max	458.75	448.99	-2.13	432.53	-5.72	418.17	-8.85
	Min	187.38	188.17	0.42	181.08	-3.36	174.15	-7.06
	Mean	252.01	250.48	-0.61	246.21	-2.30	243.16	-3.51
	SD	57.78	56.54	-2.15	53.52	-7.37	49.25	-14.76
Summer (JJA)	Max	954.73	919.15	-3.73	871.55	-8.71	1036.36	8.55
	Min	300.79	284.63	-5.37	239.54	-20.36	310.90	3.36
	Mean	692.78	689.99	-0.40	627.60	-9.41	728.71	5.19
	SD	129.15	132.63	2.70	133.70	3.53	150.90	16.84
Autumn (SON)	Max	478.97	562.36	17.41	636.71	32.93	682.87	42.57
	Min	193.97	185.26	-4.49	206.44	6.43	244.71	26.16
	Mean	267.61	285.81	6.80	320.63	19.81	343.29	28.28
	SD	48.26	57.95	20.08	68.43	41.79	74.18	53.69
Winter (DJF)	Max	389.05	459.66	18.15	515.87	32.60	456.17	17.25
	Min	56.55	69.57	23.02	69.83	23.48	69.19	22.35
	Mean	108.37	123.02	13.52	139.40	28.64	127.84	17.96
	SD	54.15	59.11	9.17	70.86	30.87	59.92	10.65

가할 것으로 분석되었다. 그러나 2075s 기간의 여름철 강수량은 평균적으로 약 5% 증가될 것으로 나타났다. 최대값에서도 동일한 결과를 보였다. 그러나 표준편차에서는 봄철을 제외하고는 모두 증가될 것으로 나타났다. Fig. 6은 분석기간에 따른 A2 시나리오의 계절별 평균강수량을 도시한 것으로, 여름철에 강수가 집중되는 우리나라의 기후특성을 잘 묘사하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 한강유역의 경우 여름철에 다른 유역에 비해 많은 강수량이 발생하는데 이러한 현상은 묘사하지 못하였다.

#### 4.4 유역별 시나리오 생산 및 분석

유역별 기후변화 시나리오를 생산하기 위해 A2 시나리오로부터 기준기간에 대한 각 분석기간에서의 격자별 기온과 강수의 변화량을 산정한 다음 면적가중법을 적용하여 유역별 변화량을 계산하였다. 보다 신뢰성 있는 기후변화 시나리오를 생산하기 위해서는 연속 강수일과 무강수일(wet and dry series)의 변화와 월별 최고·최저기온의 평균과 표준편차의 변화도 고려되어야 한다. 그러나 본 연구에서 평가한 A2 시나리오는 월별 자료만을 제공하고 있어 현실적으로 이러한 인자들의 변화를 고려할 수 없었다. 따라서 월별 강수와 기온의 변화만을 고려하였다. 또한 평균기온의 변화율을 최고·최저기온의 변화율과 동일한 것으로 가정하였다. 56개의 기상관측소에서 검·보정된 LARS-WG를 관측소의 지배면적을 고려하여 각 유역에 구축하였고, 분석기간별

로 월평균강수량과 월평균기온의 변화율을 입력하여 유역별 기후변화 시나리오를 구축하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 기준기간에 대한 분석기간에서의 상대적인 연평균 강수량과 기온의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 7은 상대적 변화율로 1이면 기준기간과 동일한 것을 의미하며, 1 보다 크면 증가, 작으면 감소를 의미한다. 2015s 기간 동안에는 섬진-영산강유역, 금강 상류 유역과 낙동강 중류유역에서 최대 6% 정도 연평균강수량이 감소될 것으로 전망되었다. 나머지 유역에서는 최대 10% 정도 증가될 것으로 나타났다. 2045s 기간에서는 섬진강, 영산강, 금강, 낙동강 대부분 유역에서 평균강수량이 최대 7% 감소할 것으로 나타났으며, 나머지 유역에서는 큰 변화가 없었다. 2075s 기간 동안에는 모든 유역에서 연평균강수량이 최대 15% 정도 증가할 것으로 분석되었다. 연평균기온 변화는 모든 기간과 유역에서 증가될 것으로 예상되었다. 2015s 기간에서는 남해와 동해에 인접한 유역에서는 0.8℃, 내륙에 위치한 유역에서는 0.9~1.2℃ 정도 상승할 것으로 나타났다. 2045s와 2075s 기간에서는 더욱 증가하여 각각 2.5~3.1℃, 4.0~5.2℃ 까지 연평균기온이 증가할 것으로 전망되었다.

기준기간(1971~2001년)에 대해 관측자료(<http://www.wamis.go.kr/>)와 MM5에서 모의된 A2 시나리오 그리고 LARS-WG를 이용하여 생산한 연평균강수량을 비교하였다(Fig. 9). MM5에서 생산된 강수자료는 낙동강유역을 제외한 한강과 금강의 대부분 유역과 섬진강

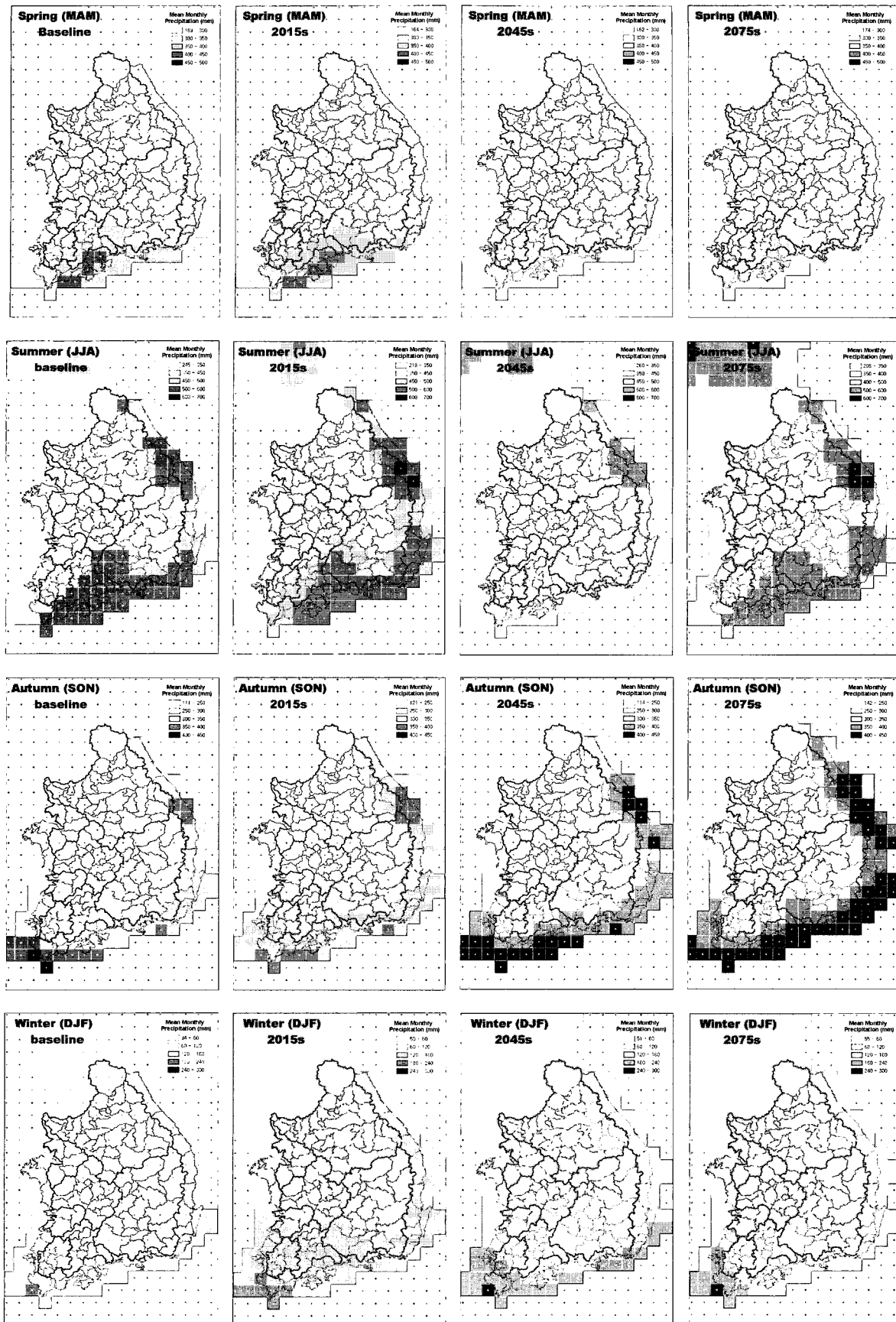


Fig. 6. Seasonal variations of mean precipitation during baseline period, 2015s, 2045s and 2075s

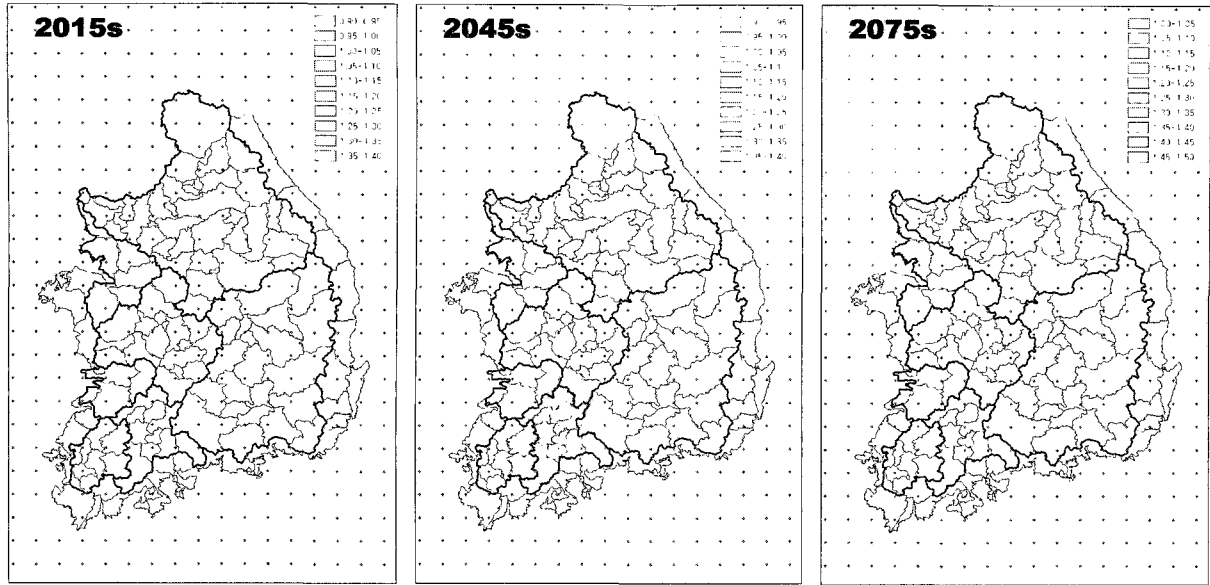


Fig. 7. Relative changes (decimal) of mean annual precipitation during 2015s, 2045s and 2075s relative to the baseline period

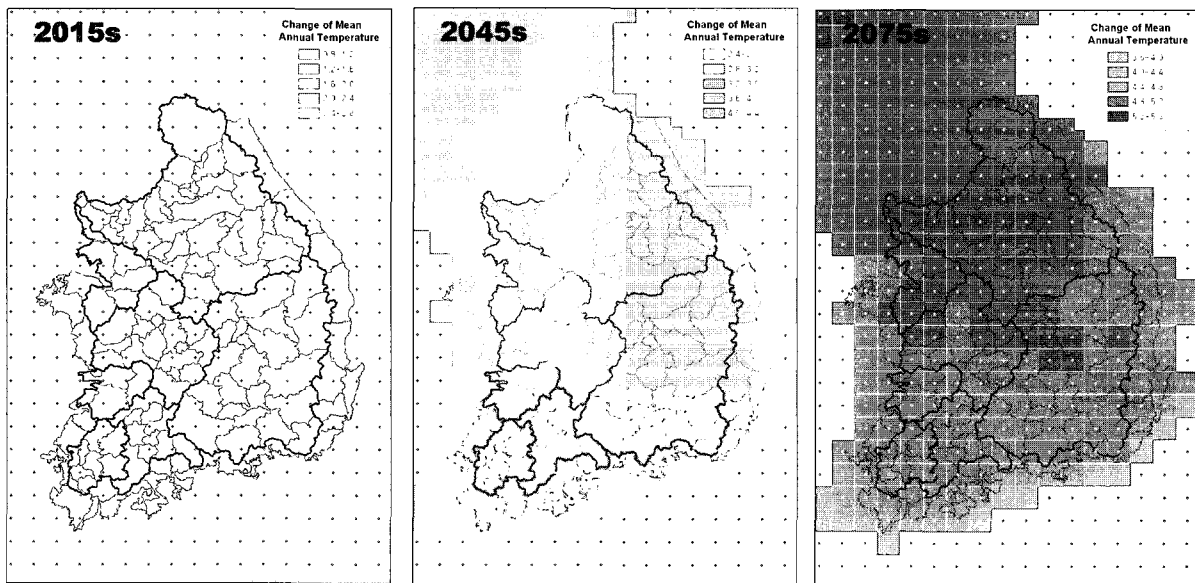


Fig. 8. As in Fig. 7 but for relative changes of mean annual temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )

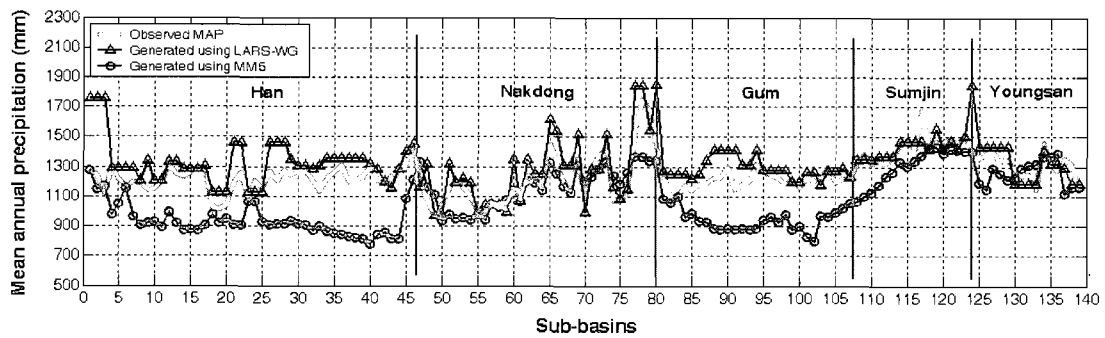


Fig. 9. Comparison of mean annual precipitation with observed and two generated mean area precipitation at each sub-basins

일부 유역에서 과소 산정되었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 LARS-WG를 이용하여 산정한 결과는 지역기후 모형이 모의하지 못한 부분에 대해 크게 개선하는 것을 볼 수 있다. 이것은 LARS-WG를 통해 생산되는 유역별 기후시나리오가 지역적인 기후특성을 반영할 수 있는 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서 생산한 기후시나리오를 이용한 수자원 영향평가는 기후모형의 자료를 직접 이용하는 것보다 현실성이 높을 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기후변화가 국내 수자원에 미치는 지역차원의 영향을 평가할 수 있는 유역별 기후시나리오를 생산하고자 하였다. 이를 위해 국내 유역을 139개의 소유역으로 구분하고, 기상연구소에서 구축한 고해상도(27km×27km) A2 시나리오를 이용하여 120년간의 시나리오를 생산하였다. A2 시나리오의 기후 모사정확도와 변동성을 분석한 결과, 연평균강수량의 경우 우리나라의 공간적 강수특성을 잘 모사하였으나, 한강유역과 금강유역의 강수량이 적게 모의되는 특징을 보였다. A2 시나리오에 따르면 2015s 기간에는 섬영, 금강 상류 및 낙동강 중류유역에서 최대 6% 정도 연평균강수량이 감소하고, 나머지 유역에서는 최대 10% 정도 증가할 것으로 나타났다. 2045s 기간에는 섬영 및 금강, 낙동강 대부분 유역에서 최대 7% 감소하고, 나머지 유역에서는 거의 변화가 없을 것으로 나타났다. 2075s 기간 동안에는 모든 유역에서 연평균강수량이 최대 15% 까지 증가할 것으로 분석되었다. 연평균기온은 2015s 기간에는 0.8℃~1.2℃, 2045s와 2075s 기간에는 각각 2.5~3.1℃, 4.0~5.2℃까지 증가될 것으로 전망되었다.

기후모형의 모사능력의 한계를 극복하고 관측 자료에 기초한 유역별 기후변화 시나리오 구축을 위해 일기상발생기인 LARS-WG를 선정하여 국내 적용성을 평가하였다. 기후모의 적합성을 분석하기 위해 25년 이상의 자료를 보유한 56개의 기상관측소 자료를 수집하고 분석하였다. 결과적으로 LARS-WG는 월평균최대·최소기온과 월평균강수량 모의에서 관측치에 ±20%, 표준편차 ±50% 이내의 정확도를 보였다. 따라서 기후변화에 따른 국내 수자원 영향평가의 목적으로 적용성이 높다고 판단되었다. 또한 LARS-WG를 이용하여 구축한 기후시나리오는 기후모형에서 모의하지 못하는 지역적인 기후특성을 보다 현실성 있게 반영할 수 있는 것으로 나타났다.

기후시나리오는 미래를 전망하는 하나의 도구로, 미래에 이와 같이 변화된다는 의미를 가지는 것이 아니라 하나의 가능성으로 이해해야한다. 따라서 본 연구에서 이용한 A2 시나리오뿐 아니라 다양한 시나리오에 대한 검토를 통해 기후변화에 대한 적응방안을 모색해보는 것이 필요할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(1-9-2)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 기상연구소 (2002). 기후변화협약대응 지역기후시나리오 산출기술개발 (I).
- 기상연구소 (2003). 기후변화협약대응 지역기후시나리오 산출기술개발 (II).
- 기상연구소 (2004). 기후변화협약대응 지역기후시나리오 산출기술개발 (III).
- 김병식, 김형수, 서병하, 김남원 (2004). “기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향”, 한국수자원학회논문집, 제37권, 제2호, 한국수자원학회, pp. 185-193.
- 배덕효, 정일원 (2005). “기후변화에 따른 수자원 영향평가”, 방재정보, 제21호, 한국방재협회, pp. 16-22.
- 안재현, 유철상, 윤용남 (2001). “GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석”, 한국수자원학회논문집, 제34권, 제4호, 한국수자원학회, pp. 335-345.
- 윤용남, 유철상, 이재수 (1998). 지구환경의 변화에 따른 한반도 수문환경의 변화 연구, 한국과학재단.
- 한국건설기술연구원 (2000). 수자원계획의 최적화 연구(IV) : 기후변화에 따른 수자원 계획의 영향 평가, 건설교통부, 한국수자원공사.
- 한국환경정책평가연구원 (2004). 기후변화영향평가모형 개발 - 물관리 부문을 중심으로, KEI RE-10, pp. 19.
- Alcamo, J., Doll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rosch, T. and Siebert, S. (2003). “Global Estimates of Water Withdrawals and Availability under Current and Future

- 'Business-as-Usual' Conditions", *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 48, No. 3, pp. 339-348.
- Arnell, N.W. and Reynard, N.S. (1996). "The Effects of Climate Change due to Global Warming on River Flows in Great Britain", *Journal of Hydrology*, Vol. 183, pp. 397-424.
- Ayers, M.A., Wolock, D.M., McCabe, G.J., Hay, L.E., and Tasker, G.D. (1994). *Sensitivity of Water Resources in the Delaware River Basin to Climate Variability and Change*, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2422.
- Bergström, S., Carlsson, B., Gardelin, M., Lindström, G., Pettersson, A. and Rummukainen, M. (2001). "Climate Change Impacts on Runoff in Sweden - Assessments by Global Climate Models, Dynamical Downscaling and Hydrological Modelling", *Climate Research*, Vol. 16, pp. 101-112.
- Fowler, H.J., Ekström, M., Kilsby, C.G. and Jones, P.D. (2005). "New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 1. Assessment of control climate", *Journal of Hydrology*, Vol. 300, Issues 1-4, pp. 212-233.
- IPCC (2001a). *Climate change 2001: The Scientific Basis, IPCC Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (2001b). *Climate change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kwadijk, J., and Middelkoop, H. (1994). "Estimation of Impact of Climate Change on the Peak Discharge Probability of the River Rhine", *Climatic Change*, Vol. 27, pp. 199-224.
- Lettenmaier, D.P., Wood, A.W., Palmer, R.N., Wood, E.F., and Stakhiv, E.Z. (1999). "Water Resources Implications of Global Warming : A U.S. Regional Perspective", *Climate Change*, Vol. 43, pp. 537-579.
- Lins, H.F. (1994). "Increasing U.S. Streamflow Linked to Greenhouse Forcing", *EOS*, Vol. 75, No. 25, pp. 281-283.
- Min, S.K., Legutke, S., Hense, A., and Kwon, W.T. (2005). "Internal Variability in a 1000-Year Control Simulation with the Coupled Climate Model ECHO-G. Part I: Near Surface Temperature, Precipitation, and Mean Sea Level Pressure", *Tellus*, 57A, pp. 605-621.
- Mitosek, H.T. (1995). "Climate Variability and Change within the Discharge Time Series : A Statistical Approach", *Climatic Change*, Vol. 29, pp. 101-116.
- Pilling, C., and Jones, J.A.A. (1999). "High Resolution Climate Change Scenarios: Implications for British runoff", *Hydrological Processes*, Vol. 13, pp. 2877-2895.
- Racsko, P., Szeidl, L., and Semenov, M. (1991). "A Serial Approach to Local Stochastic Weather Models", *Ecol. Model*, Vol. 57, pp. 27-41.
- Richardson, C.W. (1981). "Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature and Solar Radiation", *Water Resources Research*, Vol. 17, pp. 182-190.
- Semenov, M.A. and Barrow, E.M. (2002). *A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies : User Manual*.
- Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M. and Richardson, C.W. (1998). "Comparison of the WGEN and LARS-WG Stochastic Weather Generators in Diverse Climates", *Climate Research*, Vol. 10, pp. 95-107.
- Vogel, R.M., Bell, C.J., and Fennessey, N.M. (1997). "Climate Streamflow and Water Supply in the Northeastern United States", *Journal of Hydrology*, Vol. 198, pp. 42-68.
- Webster, M., Forest, C., Reilly, J., Babiker, M., Kicklighter, D., Mayer, M., Prinn, R., and Wang, C. (2003). "Uncertainty Analysis of Climate Change and Policy Response", *Climatic Change*, Vol. 61, pp. 295-320.
- Wilby, R.L. (2005). "Uncertainty in Water Resource

Model Parameters Used for Climate Change  
Impact Assessment”, Hydrological Processes,  
Vol. 19, No. 16, pp. 3201-3219.

(논문번호:06-81/접수:2006.07.28/심사완료:2007.01.26)