기후모델(HadGEM2-AO)의 대표농도경로(RCP) 시나리오에 따른 21세기 말 육지 물순환 및 대륙별 하천유출량 변화 추정

김문현* · 강현석 · 이조한 · 백희정 · 조천호

기상청 국립기상연구소 기후연구과

(접수: 2013년 7월 9일, 수정: 2013년 10월 7일, 게재확정일: 2013년 10월 30일)

Estimates of the Water Cycle and River Discharge Change over the Global Land at the End of 21st Century Based on RCP Scenarios of HadGEM2-AO Climate Model

Moon-Hyun Kim*, Hyun-Suk Kang, Johan Lee, Hee-Jeong Baek, and ChunHo Cho

Climate Research Lab., National Institute of Meteorological Research, KMA

Abstract This study investigates the projections of water cycle, budget and river discharge over land in the world at the end of twenty-first century simulated by atmosphere-ocean climate model of Hadley Centre (HadGEM2-AO) and total runoff integrating pathways (TRIP) based on the RCP scenario. Firstly, to validate the HadGEM2-AO hydrology, the surface water states were evaluated for the present period using precipitation, evaporation, runoff and river discharge. Although this model underestimates the annual precipitation about 0.4 mm mon^{-1} , evaporation 3.7 mm mon^{-1} , total runoff 1.6 mm mon^{-1} and river discharge 8.6% than observation and reanalysis data, it has good water balance in terms of inflow and outflow at surface. In other words, it indicates the -0.3 mm mon^{-1} of water storage (P-E-R) compared with ERA40 showing -2.4 mm mon^{-1} for the present hydrological climate. At the end of the twenty-first century, annual mean precipitation may decrease in heavy rainfall region, such as northern part of South America, central Africa and eastern of North America, but for increase over the Tropical Western Pacific and East Asian region. Also it can generally increase in high latitudes inland of the Northern Hemisphere. Spatial patterns of annual evaporation and runoff are similar to that of precipitation. And river discharge tends to increase over all continents except for South America including Amazon Basin, due to increased runoff. Overall, HadGEM2-AO prospects that water budget for the future will globally have negative signal ($-8.0 \sim -0.3\%$ of change rate) in all RCP scenarios indicating drier phase than the present climate over land.

Key words: HadGEM2-AO, TRIP, water cycle, precipitation, evaporation, runoff

1. 서 론

지구에서 물의 체적은 약 $1.4 \times 10^{18} \text{ m}^3$ 이고, 질량은 약 $1.4 \times 10^{21} \text{ kg}$ 이다. 지구의 전체 질량($5.974 \times 10^{24} \text{ kg}$)과 비교했을 때 약 0.02% 정도가 물의 질량이지만,

*Corresponding Author: Moon-Hyun Kim, Climate Research Lab., National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, 460-18 Shindaeabang-dong, Dongjak-gu, Seoul 156-720, Korea.
Phone : +82-70-7850-6681
E-mail : mhkim77@korea.kr

이것은 지구의 삶과 생존에 있어서 절대적 역할을 차지하고 있다(Oki, 1999). 이러한 물은, 태양열에 의해 해양과 육지로부터 증발되고, 바람에 의해 수송되며 구름 형태로 응결되어 강수로써 다시 육지와 해양으로 떨어진다. 육지에서의 강수는 일시적으로 눈과 토양수분 형태로 저장되는 반면 초과된 강수는 강과 호수 및 하천(stream)으로 유출된 후, 해양으로 담수를 방류하게 된다. 결과적으로 이것은 완전한 전지구 물순환을 형성하게 된다(Fig. 1; Trenberth *et al.*, 2007). 온실효과에 의해 가속화되는 지구 온난화는 기상/

Fig. 1. The hydrological cycle by Trenberth *et al.* (2007). Estimates of the main water reservoirs, given in plain font in 10^3 km^3 , and the flow of moisture through the system, given in slant font ($10^3 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$) equivalent to $\text{Eg}(10^{18} \text{ g})\text{yr}^{-1}$.

기후 인자의 변동 범위를 변화시키고, 이와 직접적 연관성이 있는 수문 현상의 예측 및 전망에 많은 불확실성을 제공하여, 물순환 과정의 정확한 파악을 더욱 어렵게 하고 있다(IPCC, 2007). 물의 관점에서 중요한 점은 매우 작은 기후변화라 할지라도 물순환 과정을 거치면서 그 변동의 규모가 커지게 된다는 것이다. Servat *et al.*(1999)에 의하면 1970~80년대 서아프리카 지역의 강수가 25% 가량 감소함에 따라 약 50%의 연간 유량이 감소하였음을 설명하였고, 이것은 강수 패턴의 변화가 수자원에 상당히 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여주고 있다. IPCC 2차 평가보고서에 따르면, 지구 온난화에 의해 강수량이 특정지역에 상당히 증가 또는 감소하면서 우기와 건기의 시기가 변화하게 되어(Arnell, 1999), 홍수와 가뭄 모두의 증가를 유도할 것이라고 경고했다. 그 원인으로, Trenberth *et al.*(2007)와 Soden *et al.*(2005)에서, 지구 온난화 과정에 따른 대류권의 기온 상승은 대기의 보수력(water holding capacity)을 증가시켜, 실제 수증기량이 증가한 것으로 설명하고 있다. 대기중 증가된 수증기는 스톱으로의 수증기 수렴을 증가시키고, 이는 강수의 강도를 증가시킨다. 순환되는 물의 양이 같다면, 강수강도 증가는 강수 빈도와 기간의 감소를 의미한다고 볼 수 있다.

기후변화에 따른 미래 물순환을 예측하고 전망하기 위해, 현재 전지구 모델(General Circulation Model; GCM) 기반으로 한 많은 연구가 수행되고 있다. Döll and Flörke(2005)는 전지구 모델인 ECHAM4(a General Circulation Model developed at the Max Planck Institute; Roeckner *et al.*, 1996)와 HadCM3(Hadley

Centre Coupled Model of Net Office, version 3; Gordon *et al.*, 2000)의 수문 예측 결과를 이용하여 2050년대 지하수와 지표 유출량을 분석하였고, 각각 약 9% 및 약 2% 정도 증가할 것으로 전망하였다. Coulibaly and Dibike(2004)는 CGCM1(Canada Global Climate Model version 1)을 HBV-96 수문 모델 시스템(Bergström and Forsman, 1973)으로 역학적 및 통계적으로 상세화 기법을 적용하여 캐나다 Saguenay 강의 21세기 말 유출량 변화와 홍수 빈도를 분석하였다. 또한 Oki and Sud(1998)는 GCM의 유출량(Runoff) 값을 이용해 강 흐름 방향과 연속성을 설정하고 간단한 이류식을 이에 적용함으로써 하천 유출량 및 담수량을 계산하는 하천유출모델(Total Runoff Integrating Pathways; TRIP)을 개발하였고, 이를 다시 GCM에 결합하여 전지구 미래 주요 하천 유출량을 산정하였다.

본 연구에서는, 현대에 당면한 기후변화에 따른 미래 물순환 변화 및 각 요소의 연계성이 어떻게 변할 것인지를 강수, 증발량, 토양수분, 지하수, 강 유출량 등을 이용하여 분석하고자 한다. 이를 위한 도구로 HadGEM2-AO(the Fully-coupled atmosphere-ocean version of the Hadley Centre Global Environment Model, version 2; Collins *et al.*, 2008) 대기-해양 결합 모델을 이용하였으며, IPCC AR5에서 정한 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP)를 기준으로 하여 온실가스를 1860년의 농도로 고정하고 400년 적분을 수행하여 모델의 준평형상태로 안정화시켰다. 그 후 이 자료를 모델의 초기값으로 하여 1860~2100년까지 가동하였으며, 현재 대비(1971~2000년: 30년) 미래 21세기 말(2071~2100년: 30년) 수문 변화를 분석하였다. 또한 HadGEM2-AO 모델은 앞선 Oki and Sud(1998)에서 개발한 TRIP 모델이 결합되어 있고, 이를 이용하여 전지구 각 대륙별 하천에서 해양으로 방류하는 담수량의 미래 변화도 정량적으로 전망하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서 기후모델인 HadGEM2-AO와 하천유출 모델인 TRIP을 소개하였고, 3절에서 이 모델들의 현재 기후 모의 능력을 물순환 관점에서 평가하였다. 4절에서는 IPCC의 RCP 4종 시나리오에 따른 21세기 말 미래 수문 변화를 전망하였으며, 마지막으로 5절에서 요약 및 향후 연구 계획을 제시하였다.

2. 모델 및 실험설계

2.1 HadGEM2-AO

본 연구에서 사용한 모델은, IPCC AR5에 참여모델인 영국 해들리 센터 HadGEM2(Hadley Centre Global Environmental Model, version 2; Collins *et al.*, 2008)

Table 1. Summary of HadGEM2-AO physics scheme (Matrin *et al.*, 2006).

Components	Description
Atmospheric grid	Arakawa-C grid
Physics-dynamics coupling	Parallel split (slow processes), sequential split (fast processes). (Dubal <i>et al.</i> , 2004)
Dynamics	Semi-Lagrangian advection, conservative monotone treatment of tracers; semi-implicit time integration (Staniforth <i>et al.</i> , 2003; Davies <i>et al.</i> , 2005)
Radiation	Edwards and Slingo (1996); Cusack <i>et al.</i> (1999a)
Boundary layer	Nonlocal mixing scheme for unstable BLs (Lock <i>et al.</i> , 2000). Local Richardson number scheme for stable layers (Smith, 1990, 1993)
Microphysics	Mixed phase scheme including prognostic ice content; solves physical equations for microphysical processes using particle size information (Wilson and Ballard, 1999)
Convection	Revised scheme including diagnosed deep and shallow convection; new thermodynamic closures at lifting condensation level; new CMT parameterization based on flux-gradient relationships; parameterized entrainment/detrainment rates for shallow convection. Based on ideas in Grant and Brown (1999) and Grant (2001). Convective anvil scheme (Gregory, 1999)
Gravity wave drag	GWD scheme with low-level flow blocking Webster
Hydrology	MOSES-II (Essery <i>et al.</i> , 2001); nine surface tile types plus coastal tiling; seasonally varying vegetation (Lawrence and Slingo, 2004)
Clouds	Smith (1990); parameterized RH-crit (Cusack <i>et al.</i> , 1999b); vertical gradient area cloud scheme (Smith <i>et al.</i> , 1999)
River routing	Embedded $1^\circ \times 1^\circ$ river transport/hydrology sub-model (Oki and Sud, 1998)
Aerosols	Interactive sulphate, sea salt, black carbon, and biomass-burning aerosol schemes; direct/indirect radiative forcing (Jones <i>et al.</i> , 2001; Roberts and Jones, 2004; Woodage <i>et al.</i> , 2003)

대기-해양 결합모델이며, 이는 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 참여 모델 중 하나이다. 대기모델의 수평 해상도는 $1.875^\circ \times 1.25^\circ (192 \times 145$ 격자 간격)이며 연직은 40 km까지 38개층으로 구성되었다. 해양 모델은 남북위 30° 이하 적도지역에서 $1/3$ 격자, 나머지 지역에서 1° 격자이며, 40개 연직층을 갖는다(Baek *et al.*, 2013).

HadGEM2-AO는 영국 기상청에서 개발한 장기 기후모의를 위한 대기-해양 결합모델로 위경도 좌표계를 사용, 음파 및 중력파로 인해 야기되는 수치적 불안정 해소를 위해 이류항 계산시 수평 및 연직 방향에 대해 반라그랑지안법(semi-Lagrangian)을 사용, 양극의 수치적 불안정 완화를 위해 극필터(polar filter)를 채용하는 등의 수치적 특징이 있다(Davies *et al.*, 2005). 이 모델은 비정역학계를 사용하는 최초의 반라그랑지안법을 사용하는 모델이며, 연직으로는 지형을 따르는 고도 좌표계로 Charney-Phillips 격자계를 사용하고 있으며, 대기 최상단은 약 38 km로 성층권 하부를 포함한다(Collins *et al.*, 2008). 복사물리 과정은 Edwards and Slingo(1996)을 따르며 에어로졸은 황산염(Sulfate), 해염(Sea salt), 블랙카본(Black Carbon) 등

을 포함한 Jones *et al.*(2001)에 의한 식으로 계산된다. 경계층은 Lock *et al.*(2000)에 의해 연직 확산의 K-profile을 사용하여 단열적으로 보존되는 닫힌 혼합 난류 계산식을 따르고, 미세물리과정, 대류, 중력파, 수문 및 구름 모수화 과정은 Table 1에서 설명하였다. HadGEM2-AO 기후모델의 보다 상세한 설명은 Collins *et al.*(2008)에서 기술된다.

2.2 TRIP

TRIP은 하천유출 모델로서 HadGEM2-AO 기후모델에 장착되어 있으며, 기후모델로부터 유출량(surface and subsurface runoff)을 입력 받아 식 (1)과 같은 간단한 이류식으로 하천을 통해 물을 육지에서 해양으로 방류한다. 이를 위해 먼저 하천유출 모델은 강 흐름 방향과 지류, 본류의 연속성 설정을 필요로 하며, TRIP은 Oki and Sud(1998)의 연구 결과를 바탕으로 이러한 정보가 설정되었다.

$$\frac{dS_{rc}}{dt} = D_{IN} - D_{OUT} \quad (1)$$

여기서, S_{rc} 는 강유역에서 표현되는 물저장량(Water

Storage)이고, D_{IN} 은 격자에서 형성된 유출량(runoff)과 이웃 격자로부터 유입된 유출량의 합을 나타내며, D_{OUT} 은 격자에서 나가는 유출량(단, 한 격자당 한 방향으로 유출)을 의미하고 식 (2)와 같이 표현된다.

$$D_{OUT} = cS_{rc} \quad (2)$$

$$c = \frac{u_e}{d} \quad (3)$$

또한, c 는 식 (3)과 같이 유하속도($m\ s^{-1}$)인 u_e 와 강의 실제 길이를 좀 더 현실성 있게 표현하기 위해 굽이쳐 흐르는 비율에 의해 계산된 격자 거리 d 와의 비율로 계산된다. 유하속도 u_e 는 Falloon *et al.*(2007)의 민감도 실험에 따라 전구적으로 하나의 상수로 본 모델에서는 설정되었다. 이 연구는 모델의 적분시간 간격에 따라 유하속도를 결정하는데, 12시간 모델 적분시 $0.5\ m\ s^{-1}$, 24시간 적분시 $0.4\ m\ s^{-1}$ 로 설정하는 것이 가장 합리적인 결과를 도출한다고 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 TRIP 적분 간격을 24시간으로 설정하였으므로, 유하속도를 $0.4\ m\ s^{-1}$ 로 상수 처리하였다. 거리 d 또한 Oki and Sud(1998) 결과를 바탕으로 상수로 설정되어 있으며, 이 논문에서 거리 d 는, 모델과 실제 하천의 굽이친 비율을 통해 결정하였다. 즉, 이 비율을 하천으로 설정된 모델 격자 거리에 곱하게 되는데, Oki and Sud(1998)에서는 보편적 굽이친 계수(universal meandering coefficient)를 1.4로 결정하였으며, 본 연구는 이 논문을 바탕으로 구축된 TRIP을 사용하였으므로, 이 계수를 상수로 설정하였다. TRIP 방안의 자세한 사항은 <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~taikan/TRIPDATA/TRIPDATA/html>에서 제공하고 있다.

2.3 실험 설계

본 연구는 온실가스 농도에 따른 미래 기후변화를 전망하기 위해, IPCC AR5에서 정한 대표농도경로

(Representative Concentration Pathway, RCP)를 이용하였다. AR5는, 인간 활동이 대기에 미치는 영향의 정도를 복사량으로 구분하여 Table 2와 같이 복사강제력의 양에 따라 4종(RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5, RCP2.6)을 설정하였으며, 이를 기준으로 온실가스 농도를 결정하였다. 이 중 아무 제재 없이 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우를 RCP8.5로 명명하였다. 이는 복사강제력이 계속 상승하여 2100년에 $8.5\ W\ m^{-2}$ 이상이 되며, CO_2 농도는 1370 ppm CO_2 -eq(equivalent concentrations, 상당농도) 이상이 되는 시나리오를 의미한다. RCP6.0과 4.5는 2100년까지 복사강제력이 각각 약 $6\ W\ m^{-2}$ (850 ppm CO_2 -eq에 해당), $4.5\ W\ m^{-2}$ (650 ppm CO_2 -eq)까지의 상승을 의미하며, 2100년 이후 안정화되는 시나리오이다. RCP2.6은 이산화탄소에 의한 복사강제력이 2100년 이전에 약 $3\ W\ m^{-2}$ 의 복사강제력까지 증가하다가(약 490 ppm CO_2 -eq에 해당), 그 이후 2100년경 약 $2.6\ W\ m^{-2}$ 수준으로 감소하는 시나리오로 정의된다. 즉, 지구가 회복력을 가질 수 있는 최대 한계값은 RCP2.6으로 설정되었으며, 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우는 RCP4.5와 RCP6.0으로 구성되었다.

본 연구는 위와 같이 정의된 기후변화 시나리오 자료를 입력값으로 하여 기후모델의 수문순환 및 유출량을 평가하였다. 이를 위해 사용한 자료는, GPCP v2.1(the Global Precipitation Climatology Project, version 2.1; Huffman *et al.*, 2009), GRDC(Global Runoff Data Centre; http://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/homepage_node.html), ERA40(the European Centre for Medium-Range weather Forecasts Reanalysis 40-year; Large and Yeager, 2004)이며, 강수, 증발량, 유출량 등을 분석하였다. 또한 WMO(1997)과 Vörösmarty *et al.*(2000), Oki *et al.*(2001)의 결과를 참조하여, 이들과 같은 기간(1961~1990년; 30년간)에 대한 HadGEM2-AO의 대륙별 하천 유출량 모의 성능을

Table 2. Overview of representative concentration pathways (RCPs) (Van Vuuren *et al.*, 2011).

	Description ^a	Publication-IA Model
RCP8.5	Rising radiative forcing pathway leading to $8.5\ W/m^2$ (~1370 ppm CO_2 eq)	(Riahi <i>et al.</i> 2007)-MESSAGE
RCP6.0	Stabilization without overshoot pathway to $6.0\ W/m^2$ (~850 ppm CO_2 eq) at stabilization after 2100	(Fujino <i>et al.</i> 2006; Hijioka <i>et al.</i> 2008)-AIM
RCP4.5	Stabilization with overshoot pathway to $4.5\ W/m^2$ (~650 ppm CO_2 eq) at stabilization after 2100	(Clarke <i>et al.</i> 2007; Smith and Wigley 2006; Wise <i>et al.</i> 2009)-GCAM
RCP2.6	Peak in radiative forcing at $\sim 3\ W/m^2$ (~490 ppm CO_2 eq) before 2100 and then decline (the selected pathway declines to $2.6\ W/m^2$ by 2100).	(Van Vuuren <i>et al.</i> , 2007a; Van Vuuren <i>et al.</i> 2006)-IMAGE

^aApproximate radiative forcing levels were defined as $\pm 5\%$ of the stated level in $W\ m^{-2}$ relative to pre-industrial levels. Radiative forcing values include the net effect of all anthropogenic GHGs and other forcing agents.

검증하였으며, RCP 각 시나리오에 따른 21세기 말 (2071~2100년: 30년)의 현재 기후 대비 미래 수문 변화를 추정하였다.

3. 현재기후 모의 평가

현재기후에 대한 HadGEM2-AO 기후모델의 물순환을 평가하기 위해 먼저 GPCP 강수 관측 자료를 이용하여 1986~1995년(10년) 육지에서의 강수량 모의 성능을 먼저 분석 하였다. Figure 2는 이를 나타낸 것으로 (a)는 관측 공간분포, (b)는 모델 결과, (c)는 그 차이를 각각 나타내고 있다. 전반적으로 모델은 다우 지역인 서태평양, 인도양, 동아시아, 남미, 아프리카 중부 지역의 강수 공간분포를 관측과 유사하게 모의하고 있다. 지역적으로는 티베트를 포함한 중국지역과 미국 중부를 제외한 북미, 남미 안데스 산맥 지역, 아프리카 남부지역에서 모델이 다소 과다모사하는 경향이 있고, 인도 및 인도차이나 반도, 아마존 유역, 미국 중부 및 아프리카 중북부, 호주 해안 및 유럽 지역에서 과소모의하는 경향이 있다.

수문 변수 중 강수량에 직접적 영향을 받는 유출량

은 물순환에 있어 큰 역할을 차지한다. 강수 및 증발량의 차이에 의해 지표로 유입된 물은 하천이나 바다로 유출되고, 지표면에 흡수되며, 겨울철에는 눈의 형태로 상태를 변화시켜 물수지를 맞추고 있다. Figure 3은 이런 유출량에 대한 공간 분포로써 GRDC 유출량 관측자료(Fig. 3a)를 이용하여 1986~1995년 동안 10년간의 모델 모의 성능을 관측값과 비교하였다(Figs. 3b, c). 전반적으로 아마존이 있는 남미 지역과 양쯔강이 있는 동아시아 지역, 인도 차이나 반도 등 유출량이 큰 지역에서 모델의 유출량 공간분포 모의가 잘 형성되고 있지만, 그 강도에서 차이를 보이고 있다. 또한 강수량 분포와 유사하게 열대 우림인 아마존 지역과 아프리카 중부 및 인도 차이나 반도, 북미 동부 지역에서 강수량의 감소에 따른 유출량이 감소되고 있다. 반대로 동아시아 양쯔강 유역과 남미 페루, 칠레 연안은 강수량의 영향으로 유출량이 크게 모의되는 특징을 모델은 보이고 있다. 그러나 앞선 설명처럼 강수량의 오차가 유출량 오차에 중요한 역할을 하지만, 절대적으로 기여한다고 볼 수는 없다. Figures 2c, 3c의 인도 지역에서 보듯이, 모델 강수는 과소모의 편차가 크게 나타나는 반면, 유출량 편차는 매우

Fig. 2. Spatial distribution of precipitation over land about (a) GPCP observation, (b) HadGEM2-AO historical simulation, and (c) its bias fields averaged for 1986 to 1995. The unit is mm day^{-1} .

Fig. 3. Spatial distribution of runoff about (a) GRDC observation, (b) HadGEM2-AO historical simulation, and (c) its bias fields averaged for 1986 to 1995. The unit is mm day^{-1} .

작게 나타나고 있다. 이는 육지 물순환에서 증발량의 역할도 고려해야 하기 때문이다. 즉, 지역에 따라 강수가 적음에도 불구하고, 증발량이 상대적으로 크게 나타날 수도 있다는 것이다.

본 연구는 물순환의 주요 성분 중 하나인 증발량의 관측자료가 없거나 제한적임에 따라, 모델의 육지 물순환 모의 성능을 평가하기 위해 강수, 증발량, 유출

Fig. 4. Annual cycle and mean of (a) precipitation, (b) evaporation, (c) runoff, and (d) water storage calculated by P-E-R at surface. Blue stick bar is observation data of GPCP for precipitation and GRDC for runoff. Green graph indicates ERA40 reanalysis, and red is HadGEM2-AO simulation. The unit is mm mon⁻¹.

량의 ERA40 재분석 자료를 추가로 사용하였다. 강수, 유출량의 관측자료와 이 재분석자료를 이용하여 1986~1995년(10년간) 기간에 대해 육지에서 모델의 수문 변수 월 변동성을 Fig. 4와 같이 분석하였다. (a)는 전구 육지 강수평균의 월별 시계열을 관측 자료인 GPCP와 재분석 자료인 ERA40 및 HadGEM2-AO 모델에 대해 각각 나타낸 것으로, 모델은 관측 및 ERA40와 유사하게 그 연변동성을 모의하고 있지만, 북반구 봄과 초여름 시기에 과다모의하는 경향을 보이고 있고, 8월을 포함한 가을철에 다소 과소모의 하고 있다. 관측 강수량은 51.1 mm mon^{-1} 의 연평균과 4.2 mm mon^{-1} 의 표준편차를 가지며, ERA40는 $49.6, 3.1 \text{ mm mon}^{-1}$, 모델은 $51.6, 3.9 \text{ mm mon}^{-1}$ 의 평균 및 표준편차를 각각 나타내고 있다. 결과적으로, ERA40는 관측에 비해 연평균 약 1.5 mm mon^{-1} 정도 강수량이 낮게 나타나고 있지만, HadGEM2-AO 기후모델은 약 0.5 mm mon^{-1} 오차로 모의함으로써 오히려 재분석 자료의 강수량에 비해 관측과 비슷한 연평균 값을 나타내고 있다. Figure 4b는 육지 증발량에 대한 ERA40와 HadGEM2-AO의 월별 시계열을 나타낸 것으로, 전반적인 연변동성은 유사하게 모의되고 있다. 그러나 ERA40가 연평균 증발량이 32.5 mm mon^{-1} , 표준편차가 5.5 mm mon^{-1} 인데 반해 모델은 $28.1, 9.2 \text{ mm mon}^{-1}$ 로 모의 되면서 평균이 작음에도 불구하고 그 변동성이 더 크게 나타나고 있다. 이는 HadGEM2-AO 기후모델이 ERA40에 비해 계절별 편차, 그 중 여름과 겨울철의 변동성이 더 크게 나타나기 때문이라고 볼 수 있다. 즉, 모델은 ERA40에 비해 북반구 여름철 증발량이 약 0.8 mm mon^{-1} 정도 과다모의되고 있고, 나머지 계절에서 과소모의되며, 특히 겨울철에 -8.5 mm mon^{-1} 로 그 편차가 가장 크게 나타나는 특징을 HadGEM2-AO는 보이고 있다. Figure 4c는 유출량의 월별 시계열을 나타낸 그림으로 HadGEM2-AO 모델은 관측에 비해 연평균 양은 약 -1.6 mm mon^{-1} 차이가 나고 있지만, 월 변동성 측면에서 전구 규모의 유출량이 가장 큰 남아메리카 지역 주요 유역의 영향으로 4~7월 유출량이 크게 모의되는 등 모델은 관측과 유사한 변동 패턴을 보여주고 있다. 반면, ERA40는 월 변동성뿐만 아니라 양에서도 관측과 차이를 보이고 있다. 정량적으로 관측은 24.3 mm mon^{-1} 의 연평균과 3.5 mm mon^{-1} 의 표준편차를 가지고, ERA40는 $20.1, 5.6 \text{ mm mon}^{-1}$, HadGEM2-AO는 $22.7, 3.7 \text{ mm mon}^{-1}$ 를 각각 나타내면서, ERA40에 비해 모델이 관측값과 더 유사한 결과를 보이고 있다. 이는 ERA40가 북반구 봄철과 가을철 관측과의 가장 큰 편차를 나타냈기 때문이며, 같은 시기 증발량이 다소 크게 나타나는 것과 연관될 수 있다. 위의 변수들을 이용하여 지표 물수지를 계산하기 위해 Fekete *et al.*(2000)의 식 (4)와

같은 정의를 이용하였다.

$$dS/dt = P - E - R \quad (4)$$

여기서, dS/dt 은 토양 수분의 변화량이며, P 는 지표로 입력되는 강수량, E , R 은 각각 지면에서 출력되는 증발량 및 유출량을 의미한다.

Figure 4d는 월별 전구 평균된 그 결과이며, 0 mm mon^{-1} 값이 대기-지면 간 물균형을 이룬다고 보았을 때, 양의 값은 육지로의 물의 유입이 유출보다 큰 것을 의미하고 음의 값은 그 반대이며, 이 값이 클수록 비고 대상에 비해 토양 수분량이 많다는 것을 의미한다. HadGEM2-AO와 ERA40 모두 4~8월은 지표가 건조한 상태를, 나머지 월은 습윤한 패턴을 합리적으로 나타내는 등 전반적으로 변동성은 유사한 패턴을 나타내고 있다. 그러나 토양 수분량 측면에서 모델은 ERA40에 비해 전 계절에서 많게 모의되고 있고, 특히 북반구 여름철(6~7월)은 약 3.4 mm mon^{-1} , 겨울철(12~2월)은 약 7.8 mm mon^{-1} 모델이 토양 수분을 과다모의 되는 등 연평균적으로는 약 4.8 mm mon^{-1} 정도 차이를 보이고 있다. 또한 연평균적으로 지표 물수지는 ERA40가 약 -4.0 mm mon^{-1} , HadGEM2-AO가 0.8 mm mon^{-1} 로써 ERA40는 분석 기간인 1986~1995년(10년간) 지표의 물 손실이 발생하여 건조한 상태를 나타내고 있고, 모델은 다소 지표의 습윤 상태를 보이거나, 거의 물균형 상태를 유지하고 있다고 판단된다.

HadGEM2-AO 기후모델의 수문 변수를 보다 더 정량적으로 진단하기 위해, 강수량과 증발량의 현재 기후에 대한 모델 결과를 ERA40 자료를 이용하여 바이어스(Fig. 5a) 및 RMSE(Fig. 5b)로 검증하였다. 전

구와 육지 및 해양으로 나누었고, 그에 따른 연평균과 여름철, 겨울철에 대해 각각 분석하였다. 전반적으로 모델 연평균 강수량은 ERA40와 큰 편차를 보이지 않았지만, 육지에서 약 0.07 mm day^{-1} 과소모의, 해양에서 약 0.04 mm day^{-1} 과다모의하는 특징을 보이고 있고, 여름철에 비해 겨울철이 더 큰 편차를 보이고 있다. RMSE는 전구평균 약 1.33 mm day^{-1} 이고 해양 보다 육지에서 에러가 다소 크게 나타나며, 계절적인 차이는 크지 않다. 모델의 증발량 모의는 ERA40에 비해 연평균 약 0.13 mm day^{-1} 의 편차와 0.77 mm day^{-1} 의 오차를 가지며, 육지에서 과소모의하는 경향이 있지만 해양에서 과다모의 한 결과로 보여지고, 오차는 육지에서 상대적으로 다소 크게 나타나는 경향이 있다.

한편, HadGEM2-AO 기후모델은 하천유출 모델(TRIP)이 장착되어 있어, 앞선 설명과 같이 지면 모델로부터 유출량을 입력받아 이류식을 통해 물을 바다로 방류한다. 이 양은 나아가 해양 염분을 변화시키고, 해수면 온도에도 영향을 미쳐 대기/해양의 순환 변화에 기여할 수 있기 때문에, 이를 현실적으로 모의하는 것은 매우 중요하다고 볼 수 있다(Oki and Sud, 1998). 이에 따라 WMO(1997)에서는 과거 1961~1990년(30년간) 기간에 대해 관측자료와 재분석 자료를 이용하여 물수지를 맞춘 후 Fig. 6의 영역으로 대륙별 하천 유출량을 계산하였다. 이 양은 Fig. 6 영역에 포함된 하천을 통해 육지에서 바다로 방류하는 물의 양을 합산함으로써 계산된다. 이 자료를 토대로 하천 유출량에 대한 많은 연구가 진행되었고, Vörösmarty *et al.*(2000)은 HadCM2(Hadley Centre Coupled Model of Net Office, version 2) 및 CGCM1(the Canadian

Fig. 5. (a) Bias and (b) RMSE of evaporation and precipitation averaged for 1971 to 2000 year. The black circle marks are annual mean, the red squares are boreal summer time (June-July-August), and the blue diamonds are boreal winter (December-January-February). The clear marks are averaged over the global region, the plus signals over the land, and the half shaded marks over the sea. The unit is mm day^{-1} .

Fig. 6. Six Main continental Areas in global, such as Asia, Africa, Europe, Oceania, North America, and South America, divided by WMO (1997) to analyze river discharge.

Climate Model Ver. 1) 기후모델의 유출량 값을 offline 수문 모델로 입력하여, 같은 기간 대륙별 하천 유출량을 산정하였고, Oki *et al.*(2001)은 GSWP(the Global Soil Wetness Project; IGPO(1995))에 참여한 11개의 지면모델의 유출량 결과를 앙상블 하여 본 연구와 같은 하천유출모델로 입력하여 대륙별 하천 유출량을 계산하였다. Figure 7과 Table 3은 WMO(1997)과 같은 기간(1961~1990년; 30년간)에 대해 이렇게 계산된 대륙별(아시아, 아프리카, 유럽, 오세아니아, 북미, 남미) 담수량과 HadGEM2-AO의 TRIP에 의한 하천 담수량을 비교한 것으로, 남미 지역에서는 본 모델은 관측을 기반으로 한 WMO(1997)에 비해 약 3.5% 정도 과다모의를 할 뿐, 나머지 지역에서는 과소모의하는 경향을 보이고 있다. 아시아 지역에서 약 16.4%, 아프리카 24.9%, 유럽 26.2%, 오세아니아 5.6%, 북미 2.6% 정도 과소모의를 하고 있다. 관측값과 차이를 보이는 이유는, 모델의 강수량 모의 차이가 일차적인 원인일 것이며, 대기-지면 매커니즘 및 하천유출 모델(TRIP)의 오류 방정식에 의한 유출량 산정 방법에서 다소 관측값과 차이를 보일 수 있다(Oki *et al.*, 2001).

Fig. 7. River discharge of main continents in globe. This is composed of Asia, Africa, Europe, Oceania, North America, and South America with four study results averaged for 1961 to 1990. Blue stick indicates HadGEM2-AO historical simulation as this study, red is WMO (1997) based on observation data, green is Vörösmarty *et al.* (2000), and purple is Oki *et al.* (2001). The unit is $(\times 10^3) \text{ km}^3 \text{ year}^{-1}$.

하지만 기존 연구결과와 비교했을 때, 전지구 주요 대륙에서 본 연구 결과는 Vörösmarty *et al.*(2000)에 비해서는 약 2.6% 관측값과 더 차이를 보였지만, Oki *et al.*(2001)보다는 약 20.6% 개선된 결과를 보여주고 있다.

이러한 특징을 갖는 HadGEM2-AO 기후 모델을 이용하여 다음 절에서 21세기 말 미래 변화를 분석하고자 한다.

4. 21세기 말(2071~2100년) 물순환/수지 변화

본 절에서는 전지구 물순환 중 육지를 중심으로 한 강수, 증발량, 유출량, 토양수분, 하천 유출량 및 담수량 등을 이용하여 HadGEM2-AO 기후모델에서 모의된 각 기후변화 시나리오(RCP 시나리오)에 따라 미래 물 순환과 수지가 어떻게 변할 것인지 분석하고자 한다.

Table 3. Six main continental river discharge ($\text{km}^3 \text{ year}^{-1}$) and its change rate (%) by WMO (1997) based on observation, Vörösmarty *et al.* (2000), Oki *et al.* (2001), and this study based on HadGEM2-AO.

Region	WMO (1997)	Vörösmarty <i>et al.</i> (2000)	Oki <i>et al.</i> (2001)	This Study
Asia	13,510	13,700 (1.4%)	9,385 (-30.5%)	11,297 (-16.4%)
Africa	4,050	4,520 (11.6%)	3,616 (-10.7%)	3,041 (-24.9%)
Europe	2,900	2,770 (-4.5%)	2,191 (-24.4%)	2,141 (-26.2%)
Oceania	2,404	714 (-70.3%)	1,680 (-30.1%)	2,270 (-5.6%)
N. America	7,890	5,890 (-25.3%)	3,824 (-51.5%)	7,681 (-2.6%)
S. America	12,030	11,700 (-2.7%)	8,789 (-26.9%)	12,453 (3.5%)
Total	42,784	39,394 (-7.9%)	29,485 (-31.1%)	38,883 (-10.5%)

Fig. 8. Spatial distribution of precipitation over land simulated by HadGEM2-AO. Figure (a) shows it for the present climate (1971~2000 year), (b) and (c) are change rate (%) of zonal mean precipitation and global spatial distribution by climate change scenarios (RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5), respectively. The unit is mm day⁻¹ for figure (a), and percentage for figures (b) and (c).

Figure 8은 HadGEM2-AO 기후모델을 이용하여 산출한 것으로, 현재기후(1971~2000년)에 대한 RCP 기후변화 시나리오 4종의 미래(2071~2100년) 강수 변화(%)를 나타낸 것이다. (a) 현재 강수량과 (c) 미래 21세기 말 강수량 변화의 전구 공간분포에서, 최대 다우지역인 남아메리카 아마존 유역, 열대 서태평양, 아프리카 남부 지역은 미래 대부분 강수량이 감소할 것으로 나타났으나, 북반구는 전반적으로 유럽과 미국 중남부를 제외하고 증가하는 패턴이 나타났다. (b)는 육지에 대해 동서 평균된 강수량의 위도별 미래 변화를 보인 것으로, 약 30°N 부근의 북반구 아열대 지역에서 미래 가장 큰 강수량 증가를 보였다. 이는 (c) 공간분포에서 보듯이 아프리카 사헬 지역, 아라비아 반도, 인도 지역 등에서 RCP 고배출 시나리오로 갈수록 강수량이 증가하기 때문인 것으로 분석되었다. 반면 남반구의 저위도, 중위도 육지에서는 강수량이 미래 감소할 것으로 전망됨에 따라, 미래에는 반구별 패턴이 뚜렷히 다른 양상을 보일 것으로 보고, 고배출 시나리오 일수록 지역적 편차가 더욱 뚜렷하게 나타난다.

물 순환 측면에서 지표로 입력되는 변수가 강수량이라면 출력되는 변수는 증발량, 유출량이라 정의할 수 있다. Figures 9, 10은 증발량과 유출량의 (a) 현재 기후 모의 공간 분포와 21세기 말 미래 변화를 동서

평균(b) 및 전구 공간 분포(c)로 각각 나타내고 있다. 먼저 증발량은 현재기후뿐만 아니라 미래 변화량도 강수량 분포와 유사한 패턴을 잘 보이고 있다. 즉, 증발량은 남반구에 비해 북반구에서 변화폭이 더 뚜렷하고, 특히 15°N 지역과 30°N 이상 중위도에서 가장 크게 증가하고 있으며, 그 원인은 (c)의 미래 변화 공간분포에서 파악할 수 있다. 티벳 지역과 북반구 고위도 지역은 기온에 의해 눈이 녹음에 따라 상대적으로 증발량이 증가한 것으로 보이고, 고배출 시나리오로 갈수록 그 경향은 다소 뚜렷해진다. 유출량의 변화도 증발량과 유사하게 아열대 지역 및 중위도 지역에서 미래 크게 나타날 것으로 보이지만(Fig. 10b), 최대 우림 지역인 아마존 유역을 포함해 북미 중부, 북유럽, 유라시아 내륙 일부 지역 등에서 유출량의 미래 감소가 나타나고 있다(Fig. 10c). 그러나 물수지 측면에서 미래 지표로 입력되는 강수량의 감소에도 불구하고 유출량이 증가하며 증발량의 변화 패턴이 크지 않은 호주, 아프리카 남부, 유럽 일부 등에서 지표 건조화가 미래 더욱 심각해 질것으로 판단된다.

위 변수들과 상호 연계적으로 결정되는 미래 지표 상태를 정성적으로 전망하기 위해, 토양 수분을 분석하였다. Figures 11, 12는 지표에서 지하 10 cm 및 지하 2 m까지 누적된 토양수분(kg m⁻²)의 분포를 각각 보인 것으로, 현재기후 (a)에 대한 RCP 시나리오별

Fig. 9. The same as Fig. 8, but for evaporation.

Fig. 10. The same as Fig. 8, but for runoff.

21세기 말 미래 변화(%)의 동서 평균된 위도 분포 (b) 및 전구 공간분포 (c)를 각각 나타내고 있다. 토양의 깊이에 상관없이 현재기후의 누적된 수분량 전구 분포는 Figs. 11(a), 12(a)에서처럼 북반구 고위도 지역

과 강수량이 많은 지역에서 높게 나타났다. 두 그림 (b)의 위도별 분포를 비교했을 때, 지표에서 10 cm까지 분포는 RCP 시나리오에 상관없이 대부분 지역에서 감소하는 경향을 보이고 있지만, 2 m까지 분포에

Fig. 11. The same as Fig. 8, but for soil moisture from surface to 10 cm. The unit is kg m^{-2} for figure (a).

Fig. 12. The same as Fig. 11, but for surface to 2 m.

서는 저위도를 포함한 일부 위도대에서 오히려 토양 수분량이 현재기후에 비해 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이는 (c) 공간 분포에서도 확인할 수 있다. 아마

존 유역을 제외한 남아메리카와 북아메리카 및 유라시아 대륙, 유럽지역 등에서 토양층이 깊어질수록 앞은 층에 비해 누적 토양 수분량이 현재기후보다 많아

짐을 볼 수 있다. 지표에서는 대기-지면 상호 작용에 의한 물수지에 영향을 결정적으로 받는 반면, 지표 하층에서의 물은 지표 물순환에 의한 영향과 지하 물 저장량(Water storage) 변화에 따라 큰 영향을 받고, 누적 토양 깊이에 따른 다른 양상은 이 때문인 것으로 보이며, 보다 자세한 규명을 위해 지표하(sub-surface)에서의 물리적 매커니즘에 대한 분석이 향후 추가되

어야 할 것이다. 또한 토양 수분 공간 분포 중 특징적인 현상은 북반구 중·고위도(약 60°N 부근) 밴드 형태의 분포이며, 이 또한 향후 이 현상의 물리적인 연결고리에 대해 상세한 과학적 분석이 필요할 것으로 사료된다.

본 연구는 미래 수문 변화의 공간 분포뿐만 아니라 월 및 계절변화를 분석하기 위해, 물순환 각 성분별

Fig. 13. Monthly distribution of the present climate by HadGEM2-AO historical run and change rate of the end of twenty-first century by each RCP scenarios (RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5) of annual cycle about (a) precipitation, (b) total evaporation, (c) soil evaporation, (d) canopy evaporation, (e) runoff, and (f) water storage calculated by P-E-R at surface. The grey stick graph as historical run matches left axis indicating ($\times 10^3$) $\text{km}^3 \text{ mon}^{-1}$ unit and line graph as each RCP scenarios is right having percentage unit.

전지구 육지에서의 누적 물 체적 변화를 RCP 시나리오 별 21세기 말 월별 시계열 변동성으로 분석하였다. Figure 13은 강수(a), 증발량(b, c, d), 유출량(e) 및 지표물수지(P-E-R)(f)에 대한 변화를 나타낸 것으로, 막대 그래프는 좌측 축의 현재 기후, 꺾은선 그래프는 우측 축의 미래 변화율을 각 RCP 시나리오별로 나타내고 있다. 강수(a)는 미래 시나리오 대부분에서 체적이 현재에 비해 증가할 것으로 나타났고, 북반구 여름철보다 겨울철 증가 추세가 뚜렷해 보인다. 그러나 RCP8.5에서 북반구 여름철인 6~9월 현재기후에 비해 미래에 감소하는 경향을 보이고 있고, 이는 저위도 지역에서 미래 강수량 감소의 영향에 따른 것으로 판단된다. 증발량(b)은 봄철 증가 경향을 보이는 것을 제외하고는 대부분 감소패턴을 보이고 있다. 육지에서의 증발량은 크게 토양(c)과 식생(d)의 증발로 대표되고, 약 80%, 20%로 전체 증발량에 기여한다. 토양과 식생은, 기후변화 시나리오에 정의에 맞게 Land-Use Harmonization Project(<http://iuh.unh.edu>)에서 구축한 2100년까지의 9개 지표 피복(나무, 관목, C3형 초지, C4형 초지, 도시, 물, 토양, 얼음, 토양) 변화 자료를 모델의 외부 입력자료로 처방되었으며, 강제된 지표 피복 변화에 의한 각 피복에서의 증발량이 모델 내에서 계산이 된다. 먼저 토양에 의한 증발량 체적은 봄철에 현재기후에 비해 약 3% 증가하는 경향이 있고, RCP4.5 시나리오에서 가장 뚜렷한 패턴이 나타난다. 그러나 전반적으로 미래에 고배출 시나리오로 갈수록 증발량이 더욱 감소할 것으로 전망되고 있다. 반면 (d)와 같이 식생에 의한 증발은 RCP4.5와 8.5의 북반구 여름철을 제외하고 전반적으로 증발량 체적이 증가할 것으로 전망되었다. 식생에서의 체적 변화 현상은 미래 식생의 증가 및 형태 변화에 기인한 것으로 판단된다. (e)는 유출량 체적에 대한 그림으로, 육지의 수문량인 강수, 증발 차이값(P-E)에 비례적으로 균형을 이루게 되며 육지에 누적되는 물의 양이 많을수록 이 변수의 값도 커지게 된다. RCP2.6을 제외하고 모든 시나리오에서 미래 증가 패턴을 보이고 있고 북반구 여름철보다 겨울철의 변화폭이 더 커질 것으로 전망된다. 위의 변수들을 이용하여 지표 물수지를 (f)와 같이 P-E-R 값을 통해 산정하였다. 4월은 지표에서 약 $0.7 \text{ km}^3 \text{ mon}^{-1}$ 정도 습윤하던 물수지가 증발량 증가를 주 원인으로 RCP8.5에서 약 51% 가량 떨어지는 등 모든 시나리오에서 감소하고 있다. 이것은 4월 미래 지표 변화가 건조화되는 방향으로 나타날 것이며, 연 중 가장 크게 변화할 것이라는 의미이다. 7월 또한 $-0.6 \text{ km}^3 \text{ mon}^{-1}$ 이던 지표 상태가 더욱 건조화되고 있으며, RCP6.0과 8.5에서 각각 30.6%, 26.3% 정도 가속화 될 것으로 보인다. 반면 5, 6, 8월은 건조하던 지표상태가 미래 다소 완화되고 있고, 특

Fig. 14. Future change of river discharge of six main continents in globe by climate change scenarios of HadGEM2-AO. Blue stick indicates RCP2.6, red is RCP4.5, green is RCP6.0, and purple is RCP8.5. The unit is percentage.

히 8월은 $-0.15 \text{ km}^3 \text{ mon}^{-1}$ 이던 값이 RCP2.6과 RCP4.5에서 약 55.8%과 51.5% 완화되면서 -0.06 및 $-0.07 \text{ km}^3 \text{ mon}^{-1}$ 까지 물 균형이 미래 맞춰질 것이다. 이를 토대로 했을 때, Fig. 11의 미래 토양수분이 감소하는 경향은 주로 북반구 봄과 가을철, 그리고 7월 현재기후에 비해 건조해진 영향 때문인 것으로 판단된다.

본 연구는 이러한 물수지 측면뿐만 아니라 지표 수문 변화에 따라 하천을 통해 육지에서 해양으로 방류하는 담수량의 미래 변화 패턴을 분석하기 위해, 하천유출모델인 TRIP을 이용하여 8개 주요대륙별 미래 변화를 Fig. 14와 같이 분석하였다. 이것은 Fig. 13e의 지표 총 유출량 변화에 의한 영향을 받으며, 전반적으로 전구에서 증가하는 추세를 보이고 고배출 시나리오로 갈수록 이 담수량은 커진다. 그러나 아마존 유역의 강한 강수 감소로 인해 남아메리카는 담수량이 감소 경향을 보인다. 아시아와 아프리카 대륙은 RCP8.5의 경우 약 28%, 27%까지 담수량이 증가하였다.

5. 요약 및 향후계획

본 연구는 기후변화에 따른 미래 21세기 말 물순환 변화를 전망하기 위해 영국 Hadley Centre의 결합모델인 HadGEM2-AO를 이용하여 IPCC AR5에서 정한 대표농도경로(RCP) 시나리오를 기준으로 온실가스를 1860년의 농도로 고정하고 400년 적분을 수행하였다. 그 후 이 자료를 모델 초기값으로 한 후 1860~2100년까지 가동하였고, 현재(1971~2000년; 30년간) 대비 미래 21세기 말(2071~2100년; 30년간) 수문 변화를 강수, 증발량, 유출량, 하천 담수량 등을 통해 전망하였다.

먼저 모델의 현재 기후 모의 성능을 관측 및 ERA40 재분석 자료를 이용하여 평가하였다. 모델 강수 모의는 관측에 비해 북미, 남미 안데스 산맥, 아프리카 남

Table 4. Hydrological budget ($\times 10^3 \text{ km year}^{-1}$) of the present climate from historical run and change rate (%) of the end of twenty-first century from RCP climate change scenarios about each water cycle components using HadGEM2-AO.

Var./Scenarios	HISTO ($\times 10^3 \text{ km y}^{-1}$)	RCP2.6 (%)	RCP4.5 (%)	RCP6.0 (%)	RCP8.5 (%)
PR	143	1.7	4.3	3.4	2.6
EVAP (total)	85	1.0	1.8	-0.5	-3.5
EVAP (soil)	69	-1.3	1.9	-3.4	-6.1
EVAP (canopy)	16	11.0	1.3	11.7	7.6
RUNOFF	44	4.4	10.7	13.5	17.6
FRESHW	34	3.1	9.4	12.3	16.6
P-E-R	14	-2.3	-0.3	-5.3	-8.0

부 지역에서 과다모의하고 있으며, 인도 및 인도차이나 반도, 아마존 유역, 미국 중부 및 아프리카 중북부, 호주 해안, 유럽 지역에서 과소모의 하는 경향이 있었다. 강수에 직접적으로 영향을 받는 유출량은 강수 분포와 유사한 편차를 나타내고 있었으며, 특히 동아시아 양쯔 강 유역과 남미 페루, 칠레 연안 등에서 유출량이 과다모의되고 있었다. 육지에서의 물순환 변동성 분석을 위해 현재 기후값의 월별 시계열을 분석하였으며 그 결과, 강수, 증발량, 유출량은 관측 및 재분석 자료와 월 변동성을 유사하게 현재 기후를 모의하였다. 그러나 증발량은 그 강도에서 다소 차이를 보였으며, 모델이 여름철 재분석 자료에 비해 0.17 mm day^{-1} 과다모의, 겨울철 0.78 mm day^{-1} 과소모의를 하고 있었고, 해양에서 과다모의, 육지에서 과소모의 하고 있었다. 현재기후에 대한 강수와 증발량 RMSE 또한 해양에서보다 육지에서 에러가 크게 나타났다. 대륙별 하천 유출량은 관측에 비해 모델이 남미에서 약 3.5% 과다모의할 뿐, 아시아 지역은 약 -16.4%, 아프리카 -24.9%, 유럽 -26.2%, 오세아니아 -5.6%, 북미 2.6% 과소모의 하고 있다. 그러나 유사한 연구인 Oki *et al.*(2001) 및 Vörösmarty *et al.*(2000) 등에 비해 관측값에 더 근접한 결과를 HadGEM2-AO는 도출하였다.

이러한 특징을 갖는 HadGEM2-AO 기후모델을 통해 21세기 말 물순환 변화를 분석하였다. 강수는 최대 다우지역인 남아메리카 아마존 유역, 열대 서태평양, 아프리카 남부, 유럽 및 미국 중남부 지역에서 대부분 강수량이 감소할 것으로 나타났으며, 이를 제외한 북반구에서는 증가할 것으로 전망되었다. 증발량은 남반구에 비해 북반구에서 변화폭이 더 뚜렷하고, 특히 15°N 지역과 30°N 이상 중위도에서 가장 크게 증가하고 있다. 유출량의 변화도 증발량과 유사하게 아열대 지역 및 중위도 지역에서 미래 크게 나타날 것으로 보이지만, 최대 우림지역인 아마존 유역을 포함해 북미 중부, 북유럽, 유라시아 내륙 일부 지역 등에서 유출량의 미래 감소가 나타날 것으로 보인다.

21세기 말 물수지 변화를 요약하면 Table 4와 같다. 강수량은 21세기 말 모든 미래 배출 시나리오에서 약 1.7~4.3% 증가가 전망되고, 증발량은 식생 증발량의 증가에도 불구하고 토양 증발량의 감소로 인해 RCP6.0과 RCP8.5에서 각각 -0.5, -3.5% 정도 감소할 것으로 나타났다. 유출량과 그에 따른 하천 담수량은 각각 4.4~17.6% 및 3.1~16.6% 증가하는 경향을 보였다. 따라서 이를 종합했을 때, 지표 토양수분은 전반적으로 미래 감소할 것으로 보인다. 단지 RCP4.5에서 -0.3%로 현재기후와 큰 차이를 보이지 않을 뿐, 나머지 시나리오에서는 약 -2.3~-8.0%까지 감소할 것으로 나타남으로써 미래 지표 건조화가 가속화 될 것으로 전망되었다.

향후 본 연구는 HadGEM2-AO의 모의 성능을 보다 다양한 방법으로 물순환 및 물수지를 평가하기 위해서 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 참여모델들을 이용하여 비교/검증 할 것이다. 또한 모델 결과의 불확실성을 최소화하기 위해 단일 모델이 아닌 앙상블 분석을 통해 기후변화에 따른 미래 물의 변화를 전망할 것이다. 뿐만 아니라 4장에서 언급한 것처럼 지표하(sub-surface)에서의 물리적 메커니즘 분석을 통해 토양 수분의 연직 상태 변화를 분석할 것이다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 주요사업인 “기후변화 예측기술 지원 및 활용연구(NIMR-2012-B-2)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Arnell, N. W., 1999: Climate change and global water resources. *Global Environ. Change*, **9**, 31-49.
Baek, H. J., and Coauthors, 2013: Climate change in the

- 21st century simulated by HadGEM2-AO under Representative Concentration Pathways. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 603-618.
- Bergström, S., and A. Forsman, 1973: Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model. *Nordic. Hydrol.*, **4**, 137-170.
- Clarke, L., J. Edmonds, H. Jacoby, H. Pitcher, J. Reilly, and R. Richels, 2007: Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations. *Sub-report 2.1a of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*, Washington D.C., 154 pp.
- Collins, W. J., and Coauthors, 2008: Evaluation of the HadGEM2 model. *Hadley Centre Technical Note HCTN 74*, 47 pp. [<http://www.metoffice.gov.uk/learning/library/publications/science/climate-science>].
- Coulibaly, P., and Y. B. Dibié, 2004: Downscaling of global climate model outputs for flood frequency analysis in the Saguenay River System. *Department of Civil Engineering, McMaster Univ., Hamilton*, Project no. s02-15-01.
- Cusack, S., J. M. Edwards, and J. M. Crowther, 1999a: Investigating k-distribution methods for parameterizing gaseous absorption in the Hadley Centre climate model. *J. Geophys. Res.*, **104**, 2051-2057.
- _____, _____, and R. Kershaw, 1999b: Estimating the subgrid variance of saturation, and its parametrization for use in a GCM cloud scheme. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 3057-3076.
- Davies, T., M. J. P. Cullen, A. J. Malcolm, M. H. Mawson, A. Staniforth, A. A. White, and N. Wood, 2005: A new dynamical core for the Met Office's global and regional modeling of the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 1759-1782.
- Döll, P. and M. Flörke, 2005: Global-scale estimation of diffuse groundwater recharge. *Frankfurt Hydrology*, **3**, Institute of Physical Geography, Frankfurt University, 26 pp.
- Dubal, M., N. Wood, and A. Staniforth, 2004: Analysis of parallel versus sequential splittings for time-stepping physical parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 121-132.
- Edwards, J. M., and A. Slingo, 1996: Studies with a flexible new radiation code : Choosing a configuration for a large-scale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **122**, 689-719.
- Essery, R., M. Best, and P. Cox, 2001: MOSES 2.2 technical documentation. *Hadley Centre Tech. Note*, **30**, 30 pp. [Available online at <http://www.metoffice.gov.uk/research/hadleycentre/pubs/HCTN/index.html>].
- Falloon, P., R. Betts, and C. Bunton, 2007: New Global River Routing Scheme in the Unified Model. *Hadley Centre Technical Note 72*, 42 pp.
- Fekete, B. M., C. J. Vörösmarty, and W. Grabs, 2000: Global composite runoff fields based on observed river discharge and simulated water balances. *Global Runoff Data Centre (GRDC) Rep. No. 22*, Germany, 39 pp.
- Fujino, J., R. Nair, M. Kainuma, T. Masui, and Y. Matsuoka, 2006: Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. *Energy J.*, **27**, 343-353.
- Gordon, C., C. Cooper, C. A. Senior, H. T. Banks, J. M. Gregory, T. C. Johns, J. F. B. Mitchell, and R. A. Woo, 2000: The simulation of SST, seaice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dynam.*, **16**, 147-168.
- Grant, A. L. M., 2001: Cloud-base fluxes in the cumulus-capped boundary layer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 407-421.
- _____, and A. R. Brown, 1999: A similarity hypothesis for shallow cumulus transports. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 1913-1936.
- Gregory, J., 1999: Representation of the radiative effects of convective anvils. *Hadley Centre Tech. Note*, **7**, 20 pp.
- Hijioka, Y., Y. Matsuoka, H. Nishimoto, M. Masui, and M. Kainuma, 2008: Global GHG emissions scenarios under GHG concentration stabilization targets. *J. Global Environ. Eng.*, **13**, 97-108.
- Huffman, G. J., R. F. Adler, D. T. Bolvin, and G. Gu, 2009: Improving the global precipitation record: GPCP Version 2.1. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L17808, doi:10.1029/2009GL040000.
- IGPO (International Project Office), 1995: Global Soil Wetness Project. *Tech. Report of International GEWEX Project*, Maryland, USA.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Scientific Basis, Working group I contribution to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Summary for Policymakers. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 996 pp. (eds.).
- Jones, A., D. L. Roberts, M. J. Woodage, and C. E. Johnson, 2001: Indirect sulphate aerosol forcing in a climate model with an interactive sulphur cycle. *J. Geophys.*

- Res., **106**, 20293-20310.
- Large, W. G., and S. G. Yeager, 2004: Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: the data sets and flux climatologies, *NCAR technical note*, NCAR/TN-460+STR, 22 pp.
- Lawrence, D. M., and J. M. Slingo, 2004: An annual cycle of vegetation in a GCM. Part I: Implementation and impact on evaporation. *Clim. Dynam.*, **22**, 87-106.
- Lock, A. P., A. R. Brown, M. R. Brush, G. M. Martin, and R. N. B. Smith, 2000: A new boundary layer mixing scheme. Part : Scheme description and SCM tests. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3187-3199.
- Oki, T., 1999: The global water cycle. *Global Energy and Water Cycles*, K. A. Browning and R. J. Gurney Eds., Cambridge University Press, 10-29.
- _____, Y. Agata, S. Kanae, T. Saruhashi, D. Yang, and K. Musiake, 2001: Global assessment of current water resources using total runoff integrating pathways, *Hydro. Sci. J.*, **46**, 984-996.
- _____, and Y. C. Sud, 1998: Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) - A Global river channel network. *Earth Interactions*, **2**. [Available online at <http://EarthInteractions.org/>].
- Riahi, K., A. Gruebler, and N. Nakicenovic, 2007: Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technol. Forecast Soc. Change*, **74**, 887-935.
- Roberts, D. L., and A. Jones, 2004: Climate sensitivity to black carbon aerosol from fossil fuel combustion. *J. Geophys. Res.*, **109**, D16202, doi:10.1029/2004JD004676.
- Roeckner, E., K. Arpe, L. Bengtsson, M. Christoph, M. Claussen, L. Dümenil, M. Esch, M. Giorgetta, U. Schlese, and U. Schulzweida, 1996: The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate. *Report No. 218 of Max Planck Institute for Meteorology in Hamburg*, Germany, ISSN 0937-1060.
- Servat, E., J. E. Paturel, L. Niel, B. Kouame, J. M. Masson, M. Travalio, and B. Marieu, 1999: De different aspects de la variabilite de la pluviometrie en Afrique del'Ouest et Centrale non Saheliennne. *Rev. Sci. Eau.*, 363-387.
- Smith, R. N. B., 1990: A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **116**, 435-460.
- _____, 1993: Experience and developments with the layer cloud and boundary layer mixing schemes in the UK Meteorological Office Unified Model. *Proc. ECMWF/GCSS Workshop on Parametrization of the Cloud-Topped Boundary Layer*, ECMWF, Reading, England, 319-339.
- _____, D. Gregory, C. A. Wilson, A. C. Bushell, and S. Cusack, 1999: Calculation of saturated specific humidity and largescale cloud. *Unified Model Documentation Paper*, **29**, Met Office, Exeter, United Kingdom, 27 pp.
- Smith, S. J., and T. M. L. Wigley, 2006: MultiGas forcing stabilization with minicam. *Energy J. Special Issue*, **3**, 373-392.
- Soden, B. J., D. L. Jackson, V. Ramaswamy, M. D. Schwarzkopf, and X. Huang, 2005: The radiative signature of upper tropospheric moistening. *Science*, **310**, 841-844.
- Staniforth, A., A. White, N. Wood, J. Thuburn, M. Zerroukat, and E. Cordero, 2003: Joy of UM5.4—Model formulation. *Unified Model Documentation Paper*, **15**, Met Office, Exeter, United Kingdom, 498 pp.
- Trenberth, K. E., L. Smith, T. Qian, A. Dai, and J. Fasullo, 2007: Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *J. Hydrometeor.*, **8**, 758-769.
- Van Vuuren, D. P., M. G. J. den Elzen, P. L. Lucas, B. Eickhout, B. J. Strengers, B. van Ruijven, S. Wonink, and R. van Houdt, 2007a: Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, **81**, 119-159.
- _____, and Coauthors, 2011: The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, **109**, 5-31.
- _____, B. Eickhout, P. L. Lucas, and M. G. J. den Elzen, 2006: Long-term multi-gas scenarios to stabilize radiative forcing - Exploring costs and benefits within an integrated assessment framework. *Energy J.*, **27**, 201-233.
- Vörösmarty, C. J., P. Green, J. Salisbury, and R. B. Lammers, 2000: Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, **289**, 284-288.
- Wilson, D. R., and S. P. Ballard, 1999: A microphysically based precipitation scheme for the Met Office Unified Model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 1607-1636.
- WMO, 1997: Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World. *Report by the UN, UN Development Programme, UN Environment Programme, FAO, UNESCO, WMO, World Bank, WHO. UN Industrial Development Organization & Stock-*

- holm Environment Institute*, 59 pp.
- Woodage, M., P. Davison, and D. L. Roberts, 2003: Aerosol processes. *Unified Model Documentation Paper*, **20**, Met Office, Exeter, United Kingdom, 30 pp.
- Wise, M., K. Calvin, A. Thomson, L. Clarke, B. Bond-Lamberty, R. Sands, S. J. Smith, A. Janetos, and J. Edmonds, 2009: Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy. *Science*, **324**, 1183-1186.