

지구 온난화에 따른 물 수송 변화

The Change of Water Vapor Transport due to Global Warming

오 현 택* / 김 정 우** / 신 호 정*** / 최 영 진****

Oh, Hyun Taik / Kim, Jeong Woo / Shin, Ho Jeong / Choi, Young-Jean

Abstract

This research is an analysis of the water vapor transport change into the continent due to the global warming effect with the general circulation models. Water vapor transport change from ocean to land increases through the year due to CO₂ doubling effect. In Eurasia, it indicates an increase about 170~350×10⁶ Mt/day the whole year. In Africa, it shows an decrease every month except November, especially there is the maximum decrease about -350×10⁶ Mt/day during August-September. In other continents, excluding Eurasia and Africa, the change of water vapor transport vary with the month below ±8.0×10⁶ Mt/day with the unsystematic patterns. In Eurasia, the change of water vapor transport increases as a whole, but it decrease in desert areas which occupy a high area-ratio. Therefore, except desert areas, the amount of the growth in water vapor transport change concentrate on Asian monsoon area. As a result of monsoon strengthening, available water will grow considerably at the asian monsoon areas.

Keywords : global warming, available water transport, water vapor transport, energy flux transport

요 지

이 논문에서 우리는 대기 대순환 모형을 사용하여 지구 온난화에 따른 육지 대기로의 물 수송 변화를 평가했다. 해양으로부터 육지로의 물 수송 변화량은 지구온난화에 따라 거의 연중 증가한다. 유라시아대륙의 물 수송량은 연중 170~350×10⁶ Mt/day 수준의 증가를 보인다. 아프리카로의 수송은 11월을 제외한 모든 달에 감소를 보이고 특히 8월과 9월에 -350×10⁶ Mt/day의 최대 감소를 나타낸다. 유라시아와 아프리카를 제외한 다른 대륙들에의 수송은 ±80×10⁶ Mt/day 미만의 증가와 감소를 달에 따라 다르게, 그리고 불규칙하게 보인다.

지구온난화로 유라시아 대륙으로의 물 수송이 전체적으로 증가하지만, 이 대륙 안에 위치한 사막지역의 물 수송은 감소한다. 그러므로, 사막을 제외한 부분, 특히 몬순 지역에 증가분이 집중될 것이고, 이러한 동아시아 몬순강화의 결과로 몬순지역에 상당한 가용수의 증가가 기대된다

핵심용어 : 지구온난화, 가용수 수송, 물 수송, 에너지 수송

* 기상연구소 기후연구실 연구원, 서울시 동작구 신대방동 460-18 기상청 기상연구소 기후연구실
Research Scientist, Climate Research Laboratory, Meteorological Institute
(E-mail : oht@metri.re.kr)

** 연세대 대기과학과 교수, 서울시 서대문구 신촌동 연세대학교 대기과학과
Prof. Atmospheric Science, Yonsei University
(E-mail : Correspondence to : jwkim@atmos.yonsei.ac.kr)

*** 연세대 지구환경연구소 연구원, 서울시 서대문구 신촌동 연세대학교 대기과학과 지구환경연구소
Research Scientist, Global Environmental Institute, Yonsei University
(E-mail : shj@atmos.yonsei.ac.kr)

**** 기상연구소 예보연구실 연구관, 서울시 동작구 신대방동 460-18 기상청 기상연구소 예보연구실
Senior Scientist, Forecasting Research Laboratory, Meteorological Institute
(E-mail : ychoi@metri.re.kr)

1. 서 론

전지구 순환 모형(general circulation model, GCM)을 활용하여 온실기체 증가시 예측한 기후변화는 현재보다 더 극심한 홍수와 가뭄을 보고한다(Rind, 1993). 즉, 강수가 증가하는 아시아 몬순 지역에서는 홍수가 빈발하며, 강수가 비교적 적은 사막 지역에서는 빈번한 가뭄을 예상할 수 있다(Kitoh et al., 1997). 온난화로 인한 강수와 기온의 증가에 따른 수자원은 세계 통합적으로 평가하고, 통합관리의 필요성이 강조된다(김승과 심규철, 2003).

우리나라에서 수자원과 관련된 연구로는 한국과학기술연구원(1994, 1995), 오재호와 홍성길(1995), 윤용남 등(1999a, 1999b), 안재현 등(2001a, 2001b, 2001c)이 지구온난화에 따른 한반도 기후의 변화를 연구한 바 있다. 기존 연구에서는 지구온난화시 한반도의 강수 및 기온, 댐 저수율의 특징에 대한 분석으로 나타날 기후변화를 이해하는데 도움을 줬다. 환경부에서는 최근 10년동안 G7 프로젝트를 통해 선진 외국의 GCM과 수준을 나란히 하는 YONU GCM(Yonsei University GCM)을 개발했다. 이를 통한 한반도 주변을 비롯한 아시아 및 대기대순환연구가 가능케 되었다. 그리고 이모형은 전세계 뛰어난 모형들의 신뢰성을 공식적으로 평가받는 AMIP(Atmospheric Model Intercomparison Project), PMIP(Paleoclimate Modeling Intercomparison Project), CMIP(Coupled Model Intercomparison Project)에 출력 자료를 제출하였고, 그 성공적인 능력을 인정받았기에, 이를 활용하여 연구하고자 한다.

이번 연구에서는 모형의 신뢰성향상을 위해서 최근 까지 연구된 YONU GCM을 비롯한 AMIP II 참여 모형을 해석, 이해하여 이를 통해 얻어지는 결과로 물 수지 전달에 관한 의미를 해석하고자 한다. 연구의 일환으로 동서평균 북향수송을 보일 기후변화를 계산하여 물수송 추정치의 신뢰수준을 확립코자 했다. 궁극적으로 이번 연구결과로 우리는 지구 온난화에 따라 대륙 대기 예로의 물 수송에 나타날 변화를 평가하고자 한다.

2. 연구에 사용된 GCM과 관측값

이 연구에 사용된 자료는 AMIP II(1979.1~1995.12)의 표준모형출력자료(Philips, 1997; Gates 등, 1998), 관측자료는 NCEP/DOE (National Center for Atmosphere Research/Department of Energy), COADS/ISCCP(Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set / International Satellite Cloud Climatology Project), ERBE(The Earth Radiation Budget Experiment)를 활용했다. AMIP에 참여하는 전세계 주요 30여개 모형가운데 높은 신뢰성을 유지하는 것으로 알려진 CCCMA, ECMWF를 비롯해 동아시아 지역에 대한 모형개선이 최근 많았던 CCSR, JMA, MRI, NCAR, NCEP을 선택해서 YONU 신뢰성 검증 및 에너지와 물 수지 이해를 위해 사용했다 (표 1). 웹사이트에서도 모형별 상세특징을 확인할 수 있다 (<http://www-pcmdi.llnl.gov/amip/>).

연구의 주된 자료는 YONU AGCM (Atmospheric GCM) Tr7 및 YONU CGCM(Coupled GCM) 표준출력 자료이다. AMIP II 표준 출력자료는 1979년 1월부터

표 1. AMIP II 모형들의 표준 출력 자료(Philips, 1996) 및 연구에 사용된 관측자료

	Modeling Center	Nation	Resolution (lat x lon.)
CCCMA	Canadian Center for Climate Modeling and Analysis	Canada	3.75 × 3.75.
CCSR	Center for Climate System Research	Japan	5.6 × 5.6.
CNRM	Centre National de Recherches Meteorologiques	France	≈ 300 km
DNM	Department of Numerical Mathematics	Russia	4 × 5.
ECMWF	European Center for Medium-Range Weather Forecasts	England	2.8 × 2.8.
JMA	Japan Meteorological Agency	Japan	1.875 × 1.875.
MRI	Meteorological Research Institute	Japan	2.8 × 2.8.
NCAR	National Center for Atmosphere Research	USA	2.8 × 2.8.
NCEP	National Center for Environmental Prediction	USA	3 × 3.
YONU	Yonsei University	Korea	4 × 5.
NCEP/DOE	NCEP/Department of Energy	*observation	≈ 210 km
COADS+ ISCCP	Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set / International Satellite Cloud Climatology Project	*observation	≈ 280 km
ERBE	The Earth Radiation Budget Experiment	*observation	1 × 1.

1995년 12월까지의 17년 기간에 대한 월 평균 전구 장이다. 특히 지구온난화시 가용수의 변화를 위한 모형은 YONU CGCM Tr7으로 대기부분은 경도 5도, 위도 4도의 수평격자와 연직7층으로 구성된 전구 대류권 모형이다. 해양부분은 경도 2.5도, 위도 2도~1/3도의 수평격자와 연직 12층으로 구성된 해양 모형이다(이우성, 2000).

이산화탄소증가가 온실효과를 촉진하여 지구온난화를 초래했다는 연구를 활용하여(Jager와 Ferguson, 1991), 온난화 결과를 위한 각 실행에서(1×CO₂, 2×CO₂) 적분기간은 각각 85년이며, 자료분석기간은 이산화탄소 배증시기인 적분후 70년을 중심으로 20년 즉 61년에서 80년의 기간이다. 두 실행의 초기 조건은 동일하다.

3. 에너지와 물의 자오수송

3.1. 에너지의 자오수송

복사, 대류 및 요란 전달들만에 의한 에너지 수지의 위도 별 불균형을 해소하는 대기 대순환은 적도에서 남는 에너지를 극으로 수송하며, 이 수송은 에너지와 더불어 수증기의 이동과 수송을 이해하는데 있어 매우 중요하다. 복사 속, 현열 속 및 잠열 속 등 에너지의 연직 속을 쓰는 잉여법(residual method)을 이용하여 에너지 수송을 추정했다.

에너지 수송 전량(total transport)은 한 위도를 거쳐 북쪽으로 단위 시간에 수송되는 에너지의 양으로 정의

된다 (Zhang and Rossow, 1997). 지구의 에너지 수송 전량은 다음과 같다.

$$T_a(\theta) + T_o(\theta) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\theta} 2\pi a^2 \cos \theta R d\theta \quad (1)$$

여기서 $T_a(\theta)$ 와 $T_o(\theta)$ 은 각각 위도 θ 에서의 대기와 해양에 의한 에너지 수송 전량을, a 는 지구의 반경을, 그리고 R 은 대기 상단에서 지구로 들어오는 순 복사 속의 동서 평균을 각각 나타낸다.

그림 1에서 보는 바와 같이, 지구의 에너지 수송은 35oN과 35oS 부근에서 각각 극대와 극소 값을 가진다. 모형의 결과는 Trenberth and Caron(2000)의 결과들과 크게 다르지 않으며, ERBE(The Earth Radiation Budget Experiment)의 관측보다 남반구에서는 다소 적게 나타난다. 이 극치들은 CCCMA, CCSR, NCAR 및 YONU에서 관측 자료인 ISCCP와 유사하게 잘 모사된다. 반면, NCEP과 JMA에서 모든 위도 대에 걸쳐 일관되게 적게 모사되고 있어, 모형들 간에 편차가 나타난다.

반면, 대기의 에너지 수송 전량에서 모형들은 북반구와 남반구에서 전반적으로 관측 값 보다 더 큰 극향 수송(poleward transport)을 준다. 다만 DNM이 남반구에서 작다. 대부분의 모형들이 특히 남반구 고위도에서 관측과 잘 일치하며, YONU는 남반구 저위도에서 다른 모형들에 비해 큰 극향 수송을 보이고 있다.

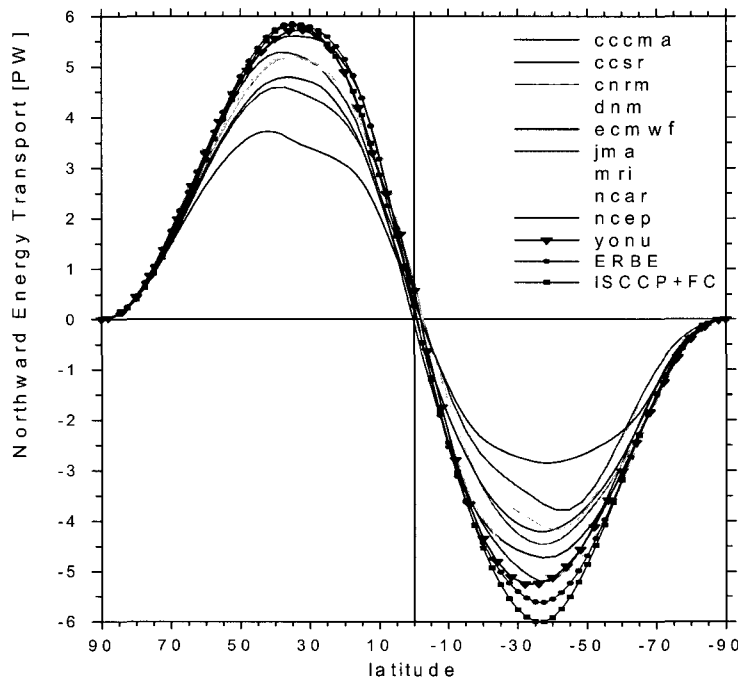


그림 1 AMIP II 모형에 의해 계산된 대기 에너지의 북향 수송 (양의 값은 북향 수송, 음의 값은 남향 수송임)

그리고, 계산된 해양의 에너지 수송 전량은 극치들이 나타나는 위도가 5° 정도 서로 다르고, 극치 또한 북반구에서 약 0.9PW, 그리고 남반구에서 0.4PW 정도의 차이를 보인다. 모형들도 서로 간에 큰 편차를 보이는데, NCEP, ECMWF, JMA, MRI 등 잘 알려진 모형들이 큰 오차를 보이고 있다. 이러한 오차들이 모든 접합 GCM들이 보이는 다양한 모습의 기후 표류들과 관련될 것으로 보고, 현재 이 관련성을 탐색하고 있다.

3.2 물의 자오수송

대기의 잠열 수송 전량은 다음 식으로 계산된다:

$$T_w(\theta) \equiv \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\theta} 2\pi a^2 \cos \theta L (E_s - P) d\theta \quad (2)$$

여기서 $T_w(\theta)$ 은 위도 θ 에서의 잠열 수송 전량, L 은 단위 질량당 잠열, E_s 는 지표 증발 또는 수증기 속, 그리고 P 는 강수율을 각각 나타낸다.

그림. 2에 보인 바와 같이, 해들리 순환을 따라 열대간 수렴대 ITCZ(Inter Tropical Convergence Zone)로 수증기가 모이는 것을 알 수 있다. ITCZ가 북반구에 위치함에도 불구하고, 이 그림은 이 곳에 모이는 수증기가 북반구 아열대보다 남반구 아열대로부터 더 많이 수송되고 있는 것을 보인다. 특히 CCCMA, CCSR, MRI 및 YONU에서 ITCZ에로의 수송에 대한 북반구 아열대의 기여가 미미하다. 반면, ECMWF, NCAR, CNRM, DNM는 남반구 아열대의 수송기여가 크다.

3.3 지구온난화에 따른 물의 자오수송

지구온난화시 일어나게 될 물의 자오수송변화를 위해서 동일한 초기조건하에서 현재의 이산화탄소농도 ($1\times\text{CO}_2$)와 배증된 이산화탄소($2\times\text{CO}_2$) 상태의 YONU-CGCM을 각각 장기적분해서 얻은 기후값을 이용해 분석했다(박지업, 2000).

그림. 3에 보인 바와 같이 두 자료 모두 YONU AGCM과 AMIP 모형들의 그것과 유사한 패턴을 보인 가운데 ITCZ 로의 수증기 수렴을 잘 모의하고 있다. $2\times\text{CO}_2$ 의 경우 북반구 중위도에서 잠열의 북향 수송이 $1\times\text{CO}_2$ 보다 0.1~0.3 PW 컸고, 남반구 해양에서도 물 수송이 동일한 경향을 보였다. $2\times\text{CO}_2$ 와 $1\times\text{CO}_2$ 의 차이에서는 북반구 중위도와 남반구 중위도에서 차이가 두드러진다. 여기서 다루지고 있는 물수송의 단위는 PW로 1015W(Watt)이며, 이를 물의 총량으로 환산하면 35Gton/day (G:Giga)에 해당한다.

지구온난화시 물의 자오수송에 있어서 물의 수송이 기존에 크게 일어나는 곳에서는 더욱 크게 나타나며, 적게 나타나는 곳은 더 적어지게 된다. 즉 물수송에 있어서도 ‘부익부 빈익빈’현상이 확인된다. ITCZ를 포함하는 저위도대에 거의 차이가 없는 것으로 봐서 지구온난화시 물의 자오수송에 큰 변화를 받지 않을 것으로 예상되는 지역이며, 이는 양극지방도 마찬가지다. 결국 에너지 극향 수송의 차이, 즉 물의 자오수송의 차이가 크게 나타나는 곳은 인구밀집지역인 북반구 중위도, 남반구 중위도이다.

Northward Transports of Latent Heat(PW) by AMIP II Models

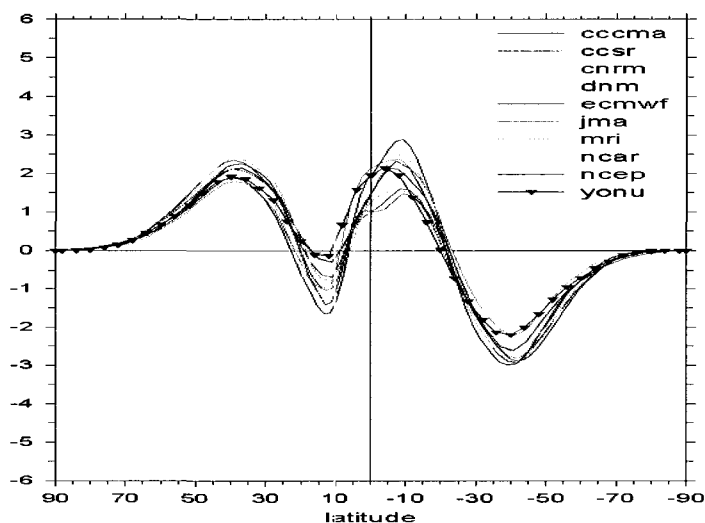


그림. 2 모형에서 계산된 잠열의 북향 수송. 표면 증발량과 강수량의 차이를 합해 얻어진 값(양의 값은 북향, 음의 값은 남향 수송임).

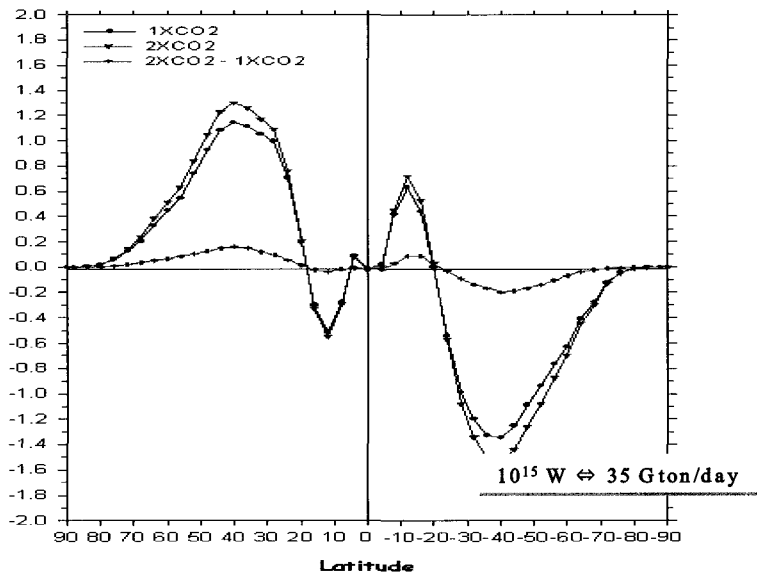


그림. 3 이산화 탄소 배증에 따른 전지구 온난화 효과(2×CO₂ - 1×CO₂)시 잠열의 북향 수송을 YONU CGCM 으로 계산한 값(양의 값은 북향, 음의 값은 남향 수송임).

4. 해양에서 육지로의 물 수송

4.1 전구 물 수송

전구를 육지와 해양으로 나뉘었을 때 두 지간의 에너지와 물 수송량을 추정 가능하다. 지표에서 대기 상단에 이르는 한 대기 기둥에 대하여, 에너지 또는 수증기를 나타내는 스칼라 Ψ 의 연직 수렴을 C_{Ψ} , 그리고 Ψ 의 대기 수송을 $\vec{F}(\Psi)$ 라 각각 두면, 연직 수렴과 수평 발산 사이의 균형식을 정리한 대기 수송량은 다음과 같다.

$$\oint_L F_n(\Psi) ds = \int_R C_{\Psi} dR \quad (3)$$

여기서 s 는 L 을 따라 양방향으로 켜진 거리, dR 은 대륙을 구성하는 미소 면적, 그리고 $F_n(\Psi)$ 는 둘레 방향에 직교하며 대륙의 밖으로 향하는 $\vec{F}(\Psi)$ 의 성분이다.

그림. 4는 YONU AGCM Tr7의 해양 대기에서 육지 대기로 수송되는 잠열의 분석 결과이다. 잠열 수송은 모든 대륙의 경우에 해양에서 육지로 향하며, 육지가 해양으로 물수송을 많이 받는 시기는 2, 3월이 된다. 반면 적은 수송이 일어나는 것은 여름 우기 시작 단계이다. 즉, 초기여름부터 우기가 포함되는 6, 7월이 극소에 해당된다.

대륙별 특징은 유라시아 대륙으로의 수송은 8, 9, 10월이 가장 많으며 4, 5월이 가장 적다. 이 패턴은 북아메리카도 유사하며 크기는 적게 모사된다. 반면 남아메리카와 오스트리아, 아프리카지역으로는 6,7,8월이 적고, 겨울철이 많게 수송된다. 즉, 북반구든 남반구든 여름철을 지난 건조한 시기(봄, 가을)에 해양으로부터 수증기 수송을 가장 많이 받으며, 우기 시작기에 적다. 반면, 해양성기후인 호주는 여름에 많고, 겨울에 적다

4.2. 유라시아/아프리카 물 수송

그림. 5와 그림. 6은 각각 AMIP II 모형을 통해서 계산된 유라시아와 아프리카 육지로 수송되는 물 수송 추정값이다.

앞서 보인 전구 육지로의 물 수송 계절변동은 유라시아와 북아메리카 대륙에서의 변동패턴과 유사함을 확인가능하다.

유라시아 대륙으로의 모사된 물 수송은 모두 뚜렷한 계절 변동을 보이며, NCEP/DOE 보다 수송량이 크다. 모형 평균된 수송은 4~5월에 극소를, 7, 8, 9월에 극대를 보인다.

아프리카에의 잠열 수송은 3월과 10~11월에 각각 극대이고 6~7월에 극소이다. 특히 아프리카 대륙은, 적도를 그 중앙부에 두고 있어, 미약하지만 반년 진동을 보인다.

잠열 수송의 크기 및 극값이 출현하는 달에 대하여,

Latent Heat Transports (PW) to the Continental Atmospheres
YONU AGCM Tr7: AMIP2

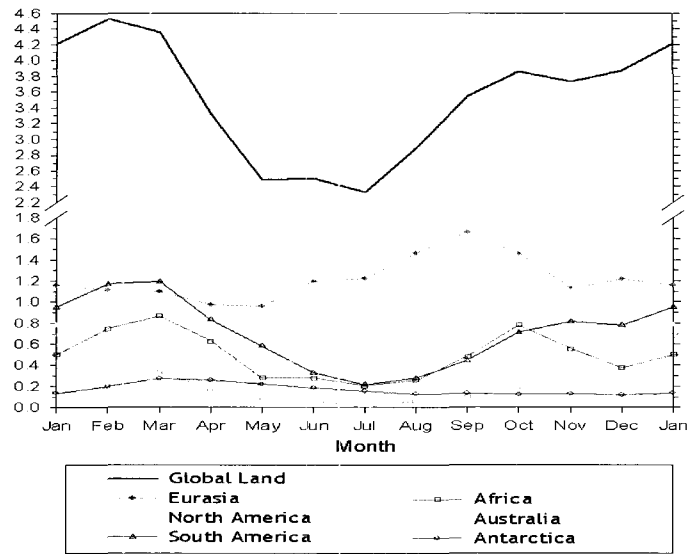


그림. 4 AMIP II 기간동안 YONU AGCM Tr7을 통해 계산된 해양으로부터 육지로의 잠열 수송

Latent Heat Transports (PW) to the Eurasian Atmosphere
8 AMIP2 GCMs and NCEP/DOE Reanalysis

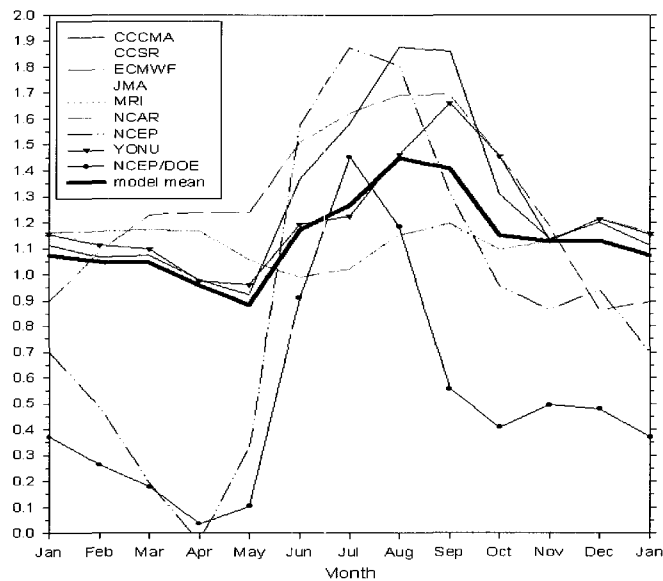


그림. 5 모형과 관측(NCEP/DOE)을 통해 얻어진 해양 대기로부터 유라시아 대륙으로의 잠열 수송

모형 결과들과 NCEP/DOE 분석 결과가 서로 매우 다르게 나타나기도 한다.

4.3. 지구온난화시 물 수송 변화

그림. 7은 이산화탄소 배증시 나타날 물수송의 변화량이다. 전구육지에 대해서 물수송변화량은 거의 연중 증가한다. 특히, 3월과 11월에 그 차이가 두드러지며,

여름철인 8,9월은 차이가 거의 없다.

대륙별 특징에서는 강수가 증가하는 지역과 부족한 지역의 차이가 극명하다. 특히, 몬순이 뚜렷한 유라시아는 연중 많은 증가, 건조기후인 사막은 11월을 제외하고는 감소가 뚜렷하다. 유라시아 대륙에의 물 수송은 지구 온난화에 따라 연중 내내 $170\sim 350 \times 10^6$ Mt/day 수준의 증가를 보이고, 이 증가는 현재 수송의 10%에

Latent Heat Transports (PW) to the African Atmosphere
8 AMIP2 GCMs and NCEP/DOE Reanalysis

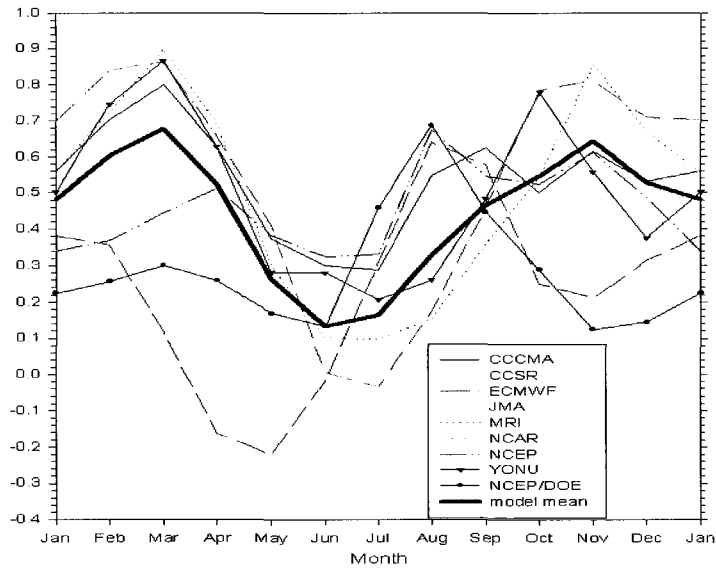


그림. 6 모형과 관측(NCEP/DOE)을 통해 얻어진 해양 대기로부터 아프리카 대륙으로의 잠열 수송

Climate Change in Latent Heat Transports ($10^{12}W$)
to the Continental Atmospheres
YONU CGCM T17W12: 2XCO₂-1XCO₂

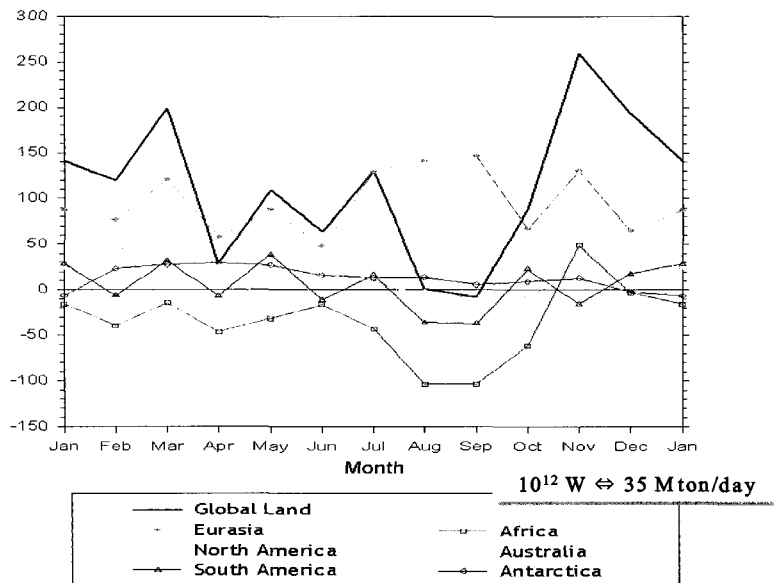


그림. 7 이산화 탄소 배증에 따른 전지구 온난화 효과($2\times CO_2 - 1\times CO_2$)시의 대륙으로의 잠열 수송을 YONU CGCM 으로 계산한 값

가까운 값이다. 이에 반해서, 아프리카를 제외한 다른 대륙들에의 수송은 $\pm 80 \times 10^6$ Mt/day 미만의 증가와 감소를 달에 따라 다르게, 그리고 불규칙하게 보인다.

반면, 아프리카대륙은 거의 모든 달 평균값이 물순환의 감소를 나타낸다. 특히, 8,9월 감소가 두드러진다. 아

프리카에의 수송은 11월을 제외한 모든 달에 감소를 보이고 특히 8월과 9월에 -350×10^6 Mt/day 의 최대 감소를 나타내며, 이 감소 크기 역시 현재 수송의 10%에 가깝다. 아프리카에서의 감소는 조민수 등 (1998)과 김정우 등(1997)이 주장한 지구 온난화에 따른 기존 사막의

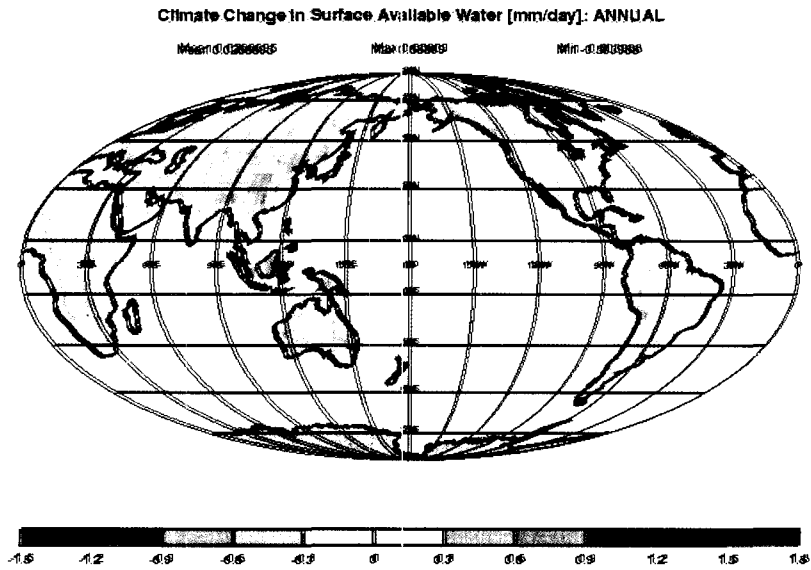


그림. 8 이산화탄소 배증에 따른 지구 온난화 효과(2×CO₂ - 1×CO₂)시 가용수의 년변화를 YONU CGCM으로 계산한 값.

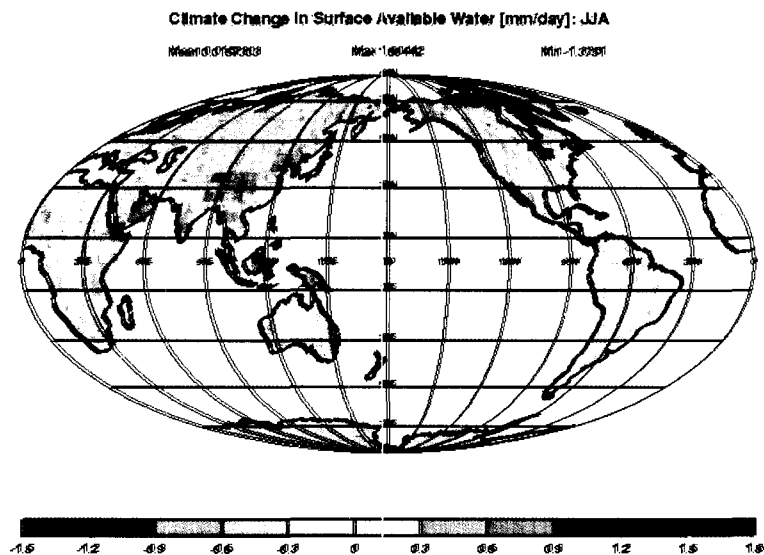


그림. 9 이산화탄소 배증에 따른 지구 온난화 효과(2×CO₂ - 1×CO₂)시 여름철 가용수 변화를 YONU CGCM으로 계산한 값.

확장을 강력하게 암시하는 것이다.

특정적인 유라시아와 아프리카를 제외하고 북아메리카, 남아메리카, 오세아니아, 남극으로는 월 변동이 크지 않으며, 온난화시 물 수송에 있어 시스템적인 큰 특징은 구별하기 어렵다.

가용수 A의 시간 변화율을 결정하는 방식을 지역 가용수 방정식으로 정의했다. 한 지역의 가용수 상태 A는 비록 매우 복잡한 방식으로 관정된다 해도 반드시 존재하는 것이며, 강수율과 증발율을 각각 P와 E라 할 때, 다음과 같다.

5. 지구온난화시 지표가용수 변화

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{P-E}{\tau_F} - \frac{A}{\tau_A} + O \quad (4)$$

5.1 지구온난화시 지표가용수 계산

최근 Kim(2002)에 의해 제안된 가용수정식에 따르면,

τ_F 는 자연적 조건인 담수 속이 가용수 A의 변화를

표 2. 이산화탄소 배증에 따른 지구 온난화(2×CO₂-1×CO₂)시 대륙 대기로의 잠열 수증의 변화를 YONU CGCM으로 계산한 값(색칠영역은 양의 값, 없는 것은 음의 값 임)

	GL 100%	EA 35.7%	NA 16.3%	SA 12.6%	Af 21.5%	Au 5.6%	AA 8.3%
1	0.99	1.71	1.04	1.57	-0.51	2.92	-0.56
2	0.84	1.50	0.47	-0.35	-1.28	6.78	1.95
3	1.39	2.36	2.34	1.77	-0.47	-2.69	2.30
4	0.20	1.12	0.29	-0.38	-1.50	-1.53	2.48
5	0.76	1.73	-0.91	2.14	-1.03	1.01	2.27
6	0.44	0.93	0.34	-0.62	-0.53	2.41	1.36
7	0.91	2.53	0.16	0.91	-1.39	1.34	1.11
8	0.01	2.76	-0.09	-1.98	-3.36	-1.53	1.17
9	-0.06	2.86	-0.57	-2.05	-3.36	-0.75	0.44
10	0.62	1.32	2.60	1.26	-2.00	-1.08	0.74
11	1.81	2.54	2.54	-0.85	1.59	2.91	1.09
12	1.35	1.26	3.25	0.99	-0.11	5.12	-0.19
ANN	0.77	1.89	0.95	0.20	-1.16	1.24	1.18

$$1 \text{ W/m}^2 \Leftrightarrow 0.035 \text{ mm/day} = 12.8 \text{ mm/year}$$

지배할 시간 상수이며, τ_A 는 가용 수가 소모되는 시간 상수이고, O 는 담수 속과 지역 소비를 제외하고 A 를 변화시키는 모든 다른 과정들의 집합을 의미한다. 이를 통해 한 지역의 가용 수에 대한 주변의 총체적 기여를 S 라 두고, 주변 기여를 내부적으로 재분배하는 과정들의 총체적 효율을 나타내는 시간상수 τ_s 를 고려하고, 기후상태를 고려한 뒤 일차적 어립을 하여 다음과 같은 가용수 방정식을 얻는다.

$$\Delta \bar{S} \approx -\frac{\tau_s}{\tau} \Delta(\bar{P} - \bar{E}) \quad (5)$$

그림. 8은 이산화탄소 배증시 나타나는 지표가용수 변화량의 지구분포다. 지구 평균적인 값은 0.026mm/day의 양의 값을 보였고, 유라시아와 북아메리카 대륙에서 양의 값이 두드러졌다. 반면 아프리카, 오세아니아 동남부, 북아메리카 중남부, 아시아 사막지역에서는 약간의 감소가 나타났다. 지구적으로 사막이 분포한 지역에서 가용수 감소가 뚜렷이 나타난 점은 특이할 만하다.

그림. 9는 JJA(June-July-August)에 나타난 지표가용수의 변화를 살펴본 것이다. 기존 사막지역에서는 JJA에서도 가용수 감소는 두드러졌으며 유라시아 대륙과 북아메리카 대륙으로는 지표가용수의 많고 적은 지역의 차이가 두드러졌으며, 지역적으로 큰 가용수 변화를 보였다. 특히, 여름철 아라비아 사막, 타클라마칸 사막의 가용수 감소가 두드러지며, 아시아 몬순 지역에 국지적으로 큰 가용수 증가를 확인했다.

이는 지구 및 여름철 지표가용수 증가를 초래하게 되는 강수의 증가가 강우 구역의 확대가 아니며, 기존 강우강도와 상승 기류의 강화를 의미한다. 이는 보상적 하강기류를 동반해야 하기에 하층 발산의 강화를 요구하게 되어 아열대 사막지대에서 사막화과정을 촉진시켜 기존 사막 확장에 기여하게 될 것이다. 이 결과는 IPCC(2001)의 온난화 예측결과인 몬순지역 강한 강수 증가와 여름철 대륙일부지역의 가뭄위험증가의 결과를 잘 설명한다.

5.2 지구온난화시 대륙별 가용수 변화

표 2는 지구온난화시 대륙별로 계산된 가용수의 증감을 보인 것이다. 이를 통해서 지구적으로는 지표 가용수에 있어 9.83mm/year의 증가를 보이며 지구 육지의 35.7%에 해당하는 유라시아(24.1mm/year), 16.1%인 북아메리카(12.1mm/year)등의 증가를 보였고, 이는 지구 평균값보다 높다.

특히 유라시아 대륙에서 7월(2.74mm/month), 8월(2.99mm/month), 9월(3.0mm/month)의 증가가 크게 나타나며 전월에 대해서 양의 값을 나타내고 있다. 반면, 아프리카 지역은 8월(-3.64mm/month), 9월(-3.64mm/month), 10월(-2.17mm/month)월에 강수의 부족이 가장 크게 나타나게 되며, 11월 한달을 제외하고는 년중 지표가용수 부족을 보인다. 그리고, 인구 밀집지역은 북아메리카지역에서도 강수의 증가가 대부분 크게 나타나게 되며, 일부 적게 나타나는 달에는 그 크기가 비교적 작다.

6. 결론 및 토의

이 연구는 YONU GCM으로 AMIP II 기간 및 지구 온난화에 해당하는 미래기후에 대해서 모사된 모형 대기의 에너지 수지를 분석하고, 해양 대기로부터 육지 대기에로의 에너지 수송 및 물 수지 변화를 파악하고자 했다. 이 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 유라시아 대륙에로의 물 수송은 지구 온난화로 인하여 연중 170~350×10⁶ Mt/day (≡50~100×10¹²W) 수준의 증가한다. 현재 수송의 전반적 크기의 10분 1에 해당하며 몬순 지역에 상당한 가용수의 증가를 암시한다. 다른 대륙들에로의 수송 변화는 달에 따라 불규칙한 ±80×10⁶ Mt/day (±50×10¹² W) 수준 미만의 증가와 감소가 있다.
- 2) 아프리카에의 수송 변화는 연중 감소한다. 특히, 8월과 9월에 -350×10¹⁰ Mt/day (100×10¹² W) 수준의 뚜렷한 감소를 보인다. 이는 지구 온난화에 따른 기존 사막의 확장을 암시한다.
- 3) 유라시아 대륙에로의 물 수송이 전체적으로 증가한다. 하지만, 이 대륙 안에 위치한 고비 사막, 타클라마칸 사막, 아라비아 사막 등에로의 물 수송은 전술한 논점에 따라 감소할 것으로 예상되므로, 사막을 제외한 부분, 특히 몬순 지역에 증가분이 집중될 것이고, 따라서 그곳에 상당한 가용수의 증가가 기대된다. 이는 지구온난화로 인한 동아시아 몬순강화(Bhaskharan 와 Mitchell, 1998)의 결과이다.

향후 지구온난화시에 나타나게 될 물 수송의 변화연구를 위해서 CMIP의 연구결과를 종합적으로 활용하여 세계의 다른 모형의 검증결과와 상호비교 및 발전적 제시를 할 계획이다.

감사의 글

이 연구 수행을 위해 격려와 조언을 해주신 기상연구소 기후연구실의 권원태 실장님께 감사드립니다. 이 연구는 기상청에서 수행하는 기상지진개발기술 사업의 하나인 “지구온난화 및 한반도 기후변화 예측기술개발” 과제에서 수행된 것입니다.

참고 문헌

김승, 심규철 (2003), “통합물관리를 위한 세계물활동-세계물활동 보고서를 중심으로-”, **한국수자원학회지**, 제36권, 제2호, pp.24-38.

김정우 등 (1997), “대기/해양 접합 GCM 개발.”, G7 프로젝트 제2단계 3차년도 보고서, 환경부/과학기술처, pp 1122-1125.

박지업 (2000). “YONU CGCM을 이용한 CO₂ 배증 시기 지구 온난화의 예측.”, 연세대학교, 박사학위논문, pp. 145-147.

안재현, 유철상, 윤용남 (2001a). “GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석.”, **한국수자원학회지**, 제34권, 제4호, pp. 335-345.

안재현, 윤용남, 이재수 (2001b). “지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여:1. 국지규모 모형을 이용한 한반도 기온의 변화 분석.”, **한국수자원학회지**, 제34권, 제4호, pp. 347-356.

안재현, 윤용남, 유철상 (2001c). “지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여:2. 물수지 모형을 이용한 대청댐 상류 유역 수문환경의 변화 분석”, **한국수자원학회지**, 제34권, 제5호, pp. 511-519.

오재호, 홍성길 (1995). “대기중 CO₂ 증가에 따른 한반도 강수량 변화.” **한국수자원학회지**, 제28권, 제3호, pp. 143-157.

윤용남, 유철상, 이재수, 안재현 (1999a). “지구온난화에 따른 홍수 및 가뭄 발생빈도의 변화와 관련하여:1. 연/월강수량의 변화에 따른 일강수량 분포의 변화분석.”, **한국수자원학회지**, 제32권, 제6호, pp.617-625.

윤용남, 유철상, 이재수, 안재현 (1999b). “지구온난화에 따른 홍수 및 가뭄 발생빈도의 변화와 관련하여:2. 지구 온난화에 따른 일강수량 분포의 변화 추정.”, **한국수자원학회지**, 제32권, 제6호, pp.627-636.

이우성 (2000). “CGCM을 이용한 ENSO 기작의 연구.”, **연세대학교**, 박사학위논문, pp 170-171.

조민수, 김정우, 정일웅 (1998). “지구온난화에 따른 사막화의 수치 실험.”, **한국 기상학회지**, 제34권, 제1호, pp. 65-74.

한국과학기술연구원 (1994). **기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구 환경관련 대책 연구(I)**, 과학기술처.

한국과학기술연구원 (1995). **기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구 환경관련 대책 연구(II)**, 과학기술처.

Bhaskharan B. and Mitchell J.F.B., (1998), “Simulated changes in the intensity and variability of the southeast Asian monsoon in the twenty first century resulting from anthropogenic emissions scenarios.” *Int. J. Climatol.*, vol. 18, pp. 1455-1462.

Gates, W. L., J. Boyle, C. Covey, C. Dease, C. Doutriaux, R. Drach, M. Fiorino, P. Gleckler, J. Hnilo, S. Marlais, T. Phillips, G. Potter, B. Santer,

- K. Sperber, K. Taylor and D. Williams, 1998: An Overview of the Results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73, pp. 1962-1970.
- IPCC, (2001), "Climate Change 2001: The Scientific Basis.", J. T. Houghton et al., Eds. *Cambridge University Press*, pp. 570-576.
- Jager, J. and Ferguson, H. L. (1991). "Climate Change : Science, Impacts and Policy", Proceeding of the Second World Climate Conference, *Cambridge University Press*, Cambridge.
- Kim, J. W. (2002), "Discourses on the Global Warming : Expansion of the Deserts, Change in Distribution of the Available Water, and Effects of the Atmosphere CO₂ Variability", *KOMES* invited lecture, Seoul, 10.14-25.
- Kitoh, A., S.Yukimoto, A. Noda and T. Motoi, 1997, "Simulated changes in the Asian summer monsoon at times of increased atmospheric CO₂." *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 75, pp. 1019-1031.
- Phillips, T. J., 1996: Documentation of the AMIP models on the World Wide Web. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, pp. 1191-1196.
- Rind, D. (1993). "Models see hard rain, drought if CO₂ doubles." *Climate Alert Newsletter*, Vol. 6, No. 2.
- Trenberth, K. E., J. M. Caron (2000), "Estimates of meridional atmosphere a ocean heat transports.", *J. Climate*, Vol. 14, No. 16, pp. 3433-3443.
- Zhang, Y.-C. and W. B. Rossow, (1997), "Estimating meridional energy transports by the atmospheric and oceanic general circulations using boundary fluxes." *J. Climate*, Vol. 10, pp. 2358-2373.

(논문번호:03-97/접수:2003.10.23/심사완료 :2004.01.09)