환경영향평가 제21권 제1호(2012) pp.105~117

연구논문

잠재 산림분포 변화를 고려한 토지이용도가 장래 기후변화에 미치는 영향 모사

김재철* · 이종범* · 최성호**
*강원대학교 환경과학과 ,**고려대학교 환경생태공학과
(2011년 9월 24일 접수, 2011년 12월 30일 승인)

A Simulation Study on Future Climate Change Considering Potential Forest Distribution Change in Landcover

Jea-Chul Kim* · Chong Bum Lee* · Sungho Choi**
*Dep. of Environmental Science, Kangwon National University
**Dep. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University
(Manuscript received 24 September 2011; accepted 30 December 2011)

Abstract

Future climate according to land-use change was simulated by regional climate model. The goal of study was to predict the distribution of meteorological elements using the Weather Research & Forecasting Model (WRF). The KME (Korea Ministry of Environment) medium-category land-use classification was used as dominant vegetation types. Meteorological modeling requires higher and more sophisticated land-use and initialization data. The WRF model simulations with HyTAG land-use indicated certain change in potential vegetation distribution in the future (2086-2088). Compared to the past (1986-1988) distribution, coniferous forest area was decreased in metropolitan and areas with complex terrain.

The research shows a possibility to simulate regional climate with high resolution. As a result, the future climate was predicted to 4.5° which was 0.5° higher than prediction by Meteorological Administration. To improve future prediction of regional area, regional climate model with HyTAG as well as high resolution initial values such as urban growth and CO2 flux simulation would be desirable.

Keywords : WRF, HyTAG, Climate Scenario, Climate Change

Corresponding Author: Jea-Chul Kim, Dep. of Environmental Science, Kangwon National University, Korea Tel: +82-33-250-8571
E-mail: kjc25@kangwon.ac.kr

I. 서 론

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 제 4차 평가보고서에 따르면 지구환경 변화에 따른 기후변화는 가뭄과 집중호우, 폭염과 같은 기상이변이 빈번이 발생할 뿐만 아니라 그 강도 역시 강해질 것으로 예상하고 있다. 특히 기후민감도가 높은 농업, 산림 생태계 및 해양, 수산업 분야에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되며 최근 기후변화에 따른 연구가 활발히 진행되고 있다(Yun, 2007; Frei *et al.*, 2006). 하지만 기후변화를 예측하기 위한 기후모델의 실행과 분석능력은 제한적이다. 특히 최근 기후변화 연구에 활용되고 있는 대기-해양-해빙-지면-생태계 접합 대순환 모형(Coupled General Circulation Model, GCM)은 다양한 형태의 모형을 복합적으로 적용한 모델이다. 이 모델은 수평격자가 너무 크기 때문에 수평격자보다 작은 규모의 물리현상을 모의하는데 한계가 있으며 전구모델의 결과를 이용한 지역규모의 기상결과가 관측값과 상이하게 예측되는 경향을 보이고 있다(Gao *et al.*, 2001; Giorgi *et al.*, 2006). 따라서 이 격자 규모는 종관기상의 평균적인 기상 특성을 나타내기는 적합하지만, 우리나라와 같이 국토가 좁고 지리적으로 지형이 복잡한 지역의 경우 상세한 지역기후 정보제공에 어려움이 있다. 이러한 대순환 모형의 제약을 극복하고 상세한 기후 정보를 얻기 위한 방법으로 특정지역을 고분해능으로 표현하고 특성화된 물리과정을 고려할 수 있는 지역기후모형을 이용한 역학적 규모 축소법이 최근 이용되고 있고(IPCC, 2007; Im *et al.*, 2008; 기상청, 2006; 안중배 등, 2010), Foley *et al.* (1998)은 전지구를 대상으로 식생변화를 고려한 기후모델의 실행을 시도한바 있으며, Claussen (1994)은 전구기후모델의 초기 경계 조건으로 지표식생 인자를 적용하여 기후모델과 생물모델을 접합(Coupling)하여 실행한바 있다. 또한 문난경 등(2009)은 장래 기후변화에 따른 한반도 대기질 변화를 파악하기 위하여 기후시나리오에 따른 지역규모의 수치모의를 실행하여 기온변화에 따른 지역별 대기질을 예측한 바 있다. 국내 기상연구소에서는 전지구 기후변화 시나리오 자료를 역학적 다운스케일링 기법을 이용하여 27km로 고해상도화 하는 작업을 수행하였다. 하지만 기상청에서 제공하는 지역기후변화 자료는 인위적 기후변화 강제력을 고려하여 지역기후에 적용한 반면 기후변화에 따른 토지이용도의 토지피복의 변화는 고려되지 못하였다. 한반도는 위도에 따라 다양한 식생이 분포하고 있기 때문에 토지피복에 따른 기후변화는 해당지역의 기후에 영향을 줄 것이라 사료된다.

본 연구에서는 기후시나리오의 결과를 보안하기 위하여 기후변화에 따른 잠재식생분포를 계산하는 모델인 HyTAG(Hydrological and Thermal Analogy Groups) 생태모델을 실행하여 산출한 토지피복결과를 지역기후모델의 토지피복 category의 변수로 변환함으로서 토지피복의 변화가 반영된 모델을 구현하였다. 이런 기후변화에 따른 생태변화(Dynamic Global Vegetation Model; DGVM)에 관한 연구는 Foley 등(1998)에 의해 시작되었으며, 국내에 대하여 김원식 등(2004)과 부경온 등(2004)이 조사한 바 있다. 그러나 국내지역에 대하여 기후시나리오를 WRF에 적용하여 식생변화가 지역규모 기후변화에 미치는 영향을 연구한 사례는 없다. 본 연구의 목적은 상세지역 기후모델로서 기상 모델인 WRF를 이용하여 기후변화정보센터의 지역기후시나리오 결과를 초기 및 경계조건으로 사용한 고해상도 지역기후예측모델을 구축하는 것이다. 또한 기후변화에 따른 식생변화를 고려하기 위한 생태모델인 HyTAG의 결과를 기후모델의 입력자료로 이용하여, 토지피복 변화에 따른 기상장 변화를 파악하는 것이다.

II. 자료 및 연구방법

1. 대상기간 및 모델링 영역

기후분석의 경우 연속적인 30년 이상의 대상일을 적분하여 그 결과를 분석하는 방법이 타당한 방법이다. 하지만 컴퓨터의 연산속도와 수치계산을 통

해 나오는 결과의 양이 너무 크기 때문에 본 연구에서는 특정 대상일을 선정하였다. 본 연구에 적용한 대상년도의 경우 기온과 비습의 변동 폭이 가장 작고 0에 가까운 1986년과 변동 폭이 비교적 큰 1987, 1988년을 대상 년으로 설정하였으며, 1년 중 가장 난월에 속하는 8월 달에 대하여 실행 기간을 설정하였다. 또한 장래의 기상 변화를 알아보기 위하여 100년 후인 2086년부터 2088년의 8월을 대상기간으로 선정하였다. 여기서 모델 결과를 설명하기 위하여 1986년부터 1988년 자료의 경우 "현재"로 표현하고, 2086년부터 2088년은 "장래"로 표현하였다. 또한 기상모델인 WRF는 본 연구에서 기후변화에 따른 장래를 예측하는 모델이므로 "지역기후모델"로 표현하였다. 그림 1은 본 연구에서 지역기후모델의 실행을 위해 사용한 대상 영역을 나타낸 것이다. 1km 대상영역의 경우 도시지역과 교외지역의 차이를 비교하기 위하여 3km 대상영역 내에 두 개의 격자를 각각 설정하여 모델링 하였다. 여기서 도시지역의 경우 도시성장을 고려 할 수 있는 변수가 적용된다면 보다 객관적인 분석이 가능하지만 본 연구는 산림의 변화만을 가정하기 때문에 산림변화가 도시기상에 미치는 영향만을 고찰하였다. 초기 및 경계조건은 기상청에서 제공한 기후변화 시나리오(MM5) 3시간 간격의 27km 자료를 사용하였고, 모델 실행에 사용한 물리적 옵션은 표 1에 나타내었으며, 모든 도메인에 대하여 동일하게 적용하였다.

2. MM5 지역기후모델 개요 및 사용

기상청(2009)은 ECHAM4(the fourth-generation atmospheric general circulation model)와 HOPE-G(Global Hamburg Ocean Primitive Equation Model)에 의해 생산된 전지구 기후변화 시나리오 자료를 역학적 다운스케일링 기법을 이용하여 고해상도화 하는 작업을 수행하였고, 기후변화정보센터(Climate Change Information Center, CCIC)를 통해 자체 실행한 지역기후 모델(MM5)을 온라인으로 일반 사용자에게 제공하고 있다. 여기

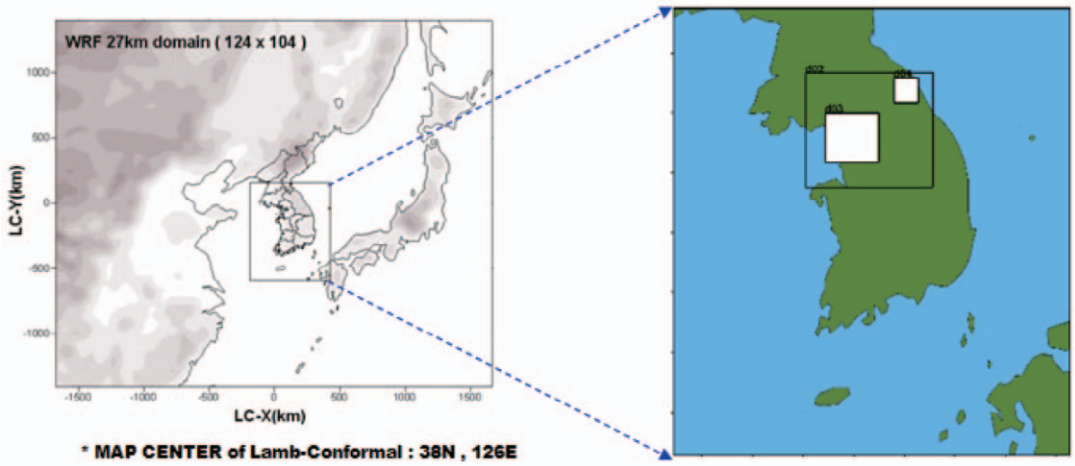

Figure 1. Domain architecture used in WRF model. Grid sizes for domain 1, 2, 3, 4 and 5 are 27km, 9km, 3km, 1km(Seoul) and 1km(Haean), respectively.

Table 1. Details of the physics scheme used in the WRF

WRF	Physics scheme				
	Microphysics	Radiation	PBL*	Cumulus	Land Surface
CASE	WSM6	RRTM, Dudhia	YSU	New KF	5-layer thermal

* PBL : Planetary Boundary Layer

서 제공하는 지역기후 모델의 시·공간해상도는 3시간 간격의 27km의 수평격자를 가진 모델이며, 한반도를 중심으로 중국 동부와 일본을 일부 포함하는 124 × 104격자 영역의 자료를 제공한다. 전구모델에 사용된 시나리오 자료는 SRES(Special Report on Emissions Scenarios)의 A1B 시나리오를 사용하였고, 지역기후 모델은 중규모 기상모델인 MM5(Mesoscale Meteorological Model Version5)를 사용하였다.

"지역기후시나리오 활용기술개발"(기상청, 2007) 연구에 따르면 MM5에 의한 A1B 시나리오 자료의 온도 결과는 기상청 관측자료와 비교를 통해 약 3.2℃의 cold bias를 가지는 것으로 나타났으며, 모델 결과를 통한 미래 전망은 모델의 bias를 고려해야 한다고 밝힌 바 있다. 본 연구에서는 기상청 지역기후 모델의 결과를 WRF 지역기후 모델의 초기·경계 입력자료로 사용하기 위하여 3시간 간격의 자료를 생성하여 WRF의 입력자료로 사용하였다.

3. 생태모델 개요 및 토지피복 재분류

국내의 경우 아직 선진국에 비하여 생태모델을 개발한 사례는 없지만, 생태계 영향평가를 위해 여러 가지 생태모델이 사용되고 있다(Y. Wakazuki *et al.*, 2007; 임희정과 이영희, 2008).

최성호 등(2009)은 MC1모델을 이용하여 기후변화에 따른 한반도 지역의 식생변화와 carbon flux를 모사하였고, 정휘철 등(2003)은 AIM 모델을 이용하여 기후변화에 따른 한반도 지역의 산림생태계 분포의 이동을 예측한바 있다. 본 연구에 사용한 생태모델인 HyTAG(Hydrological and Thermal Analogy Groups) model은 기존의 온도지수를 이용하여 식생분포 예측이 가능한 TAG모형에 유효강수지수를 고려하여 잠재적인 식생분포를 파악하는 모델이다(김재철 등, 2010). 특히, Choi (2010)와 이상철 등 (2011)은 기존에 넓은 지역에 적용되던 DGVM의 단점을 보완하고 고해상도 입력자료(환경부 중분류 토지피복자료)를 이용하여 기후변화에 따른 식생의 변화를 남한지역에 대하여 HyTAG에 적용하였고, 이 결과는 본 연구의 장래 토지피복 입력자료로 사용되었다.

HyTAG모델에서 분류된 토지피복자료를 지역기후모델의 입력자료로 사용하기 위하여 산림에 대한 HyTAG 모델결과를 USGS 모델 타입으로 재분류하였다(표 2). USGS의 산림에 대한 분류는 크게 5단계로 구분되며, 그 기준은 낙엽 활엽수림(11)과 낙엽 침엽수림(12), 상록 활엽수림(13)과 상록 침엽수림(14), 혼합림(15)으로 나눠진다. 본 연구에서는 HyTAG 모델의 결과를 USGS의 5가지 타입으로 분류하였으며, 그 결과를 지역기후모델의 토지이용자료로 사용하였다. 여기서 산림 변화에 의한 현재와 장래의 기상 차이만을 비교하기 위하여 산림 이외의 토지피복 자료는 환경부 중분류의 자료를 이용하였다. 따라서 산림 이외의 도시나 농업지역, 습지 등의 분포는 현재와 동일하며 변하지 않는다고 가정하였다. HyTAG 결과는 환경부 중분류와 국내 서식하는 수종에 대한 분포지역을 기본 입력자료로 사용하여 수종을 분류하였기 때문에 모델 결과 역시 남한 지역에 국한하여 나타난다.

Table 2. Classification of HyTAG type using USGS LULC

Land Use Category	USGS Land Use Type	HyTAG Type
11	Deciduous Broadleaf Forest	4) Group B 5) Group B-C 10) Ulleung Isl. type
12	Deciduous Needleleaf Forest	3) Group A-B
13	Evergreen Broadleaf	9) Subtropic type
14	Evergreen Needleleaf	1) Alpine type 2) Group A
15	Mixed Forest	6) Group C 7) Group C-D 8) Group D 11) National type

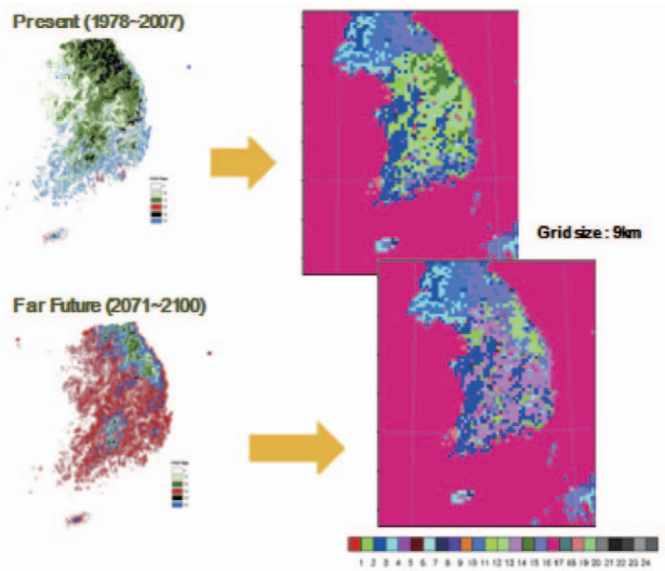

Figure 2. Horizontal distributions of WRF LULC applied HyTAG (Grid size of domain ; 9km).

Table 3. Percentage of Vegetation change in Seoul and Haean

Land-use Type		Seoul (1km)		Haean (1km)	
		Present	Future	Present	Future
11	'Deciduous Broadleaf Forest'	41.6	0.8	1.4	21.3
12	'Deciduous Needleleaf Forest'	52.6	0.1	59.8	45.0
13	'Evergreen Broadleaf Forest'	0.1	90.1	0.0	1.5
14	'Evergreen Needleleaf Forest'	1.4	0.1	38.8	12.7
15	'Mixed Forest'	4.3	8.9	0.0	19.5

그림 2는 9km 지역기후모델의 대상영역의 mapping 결과이다. 현재의 경우 5가지로 재분류된 모든 산림 분포가 한반도 전체에 나타나고 있으며 주로 낙엽 침엽수림의 분포가 주를 이루고 있다. 반면 100년 후인 장래의 토지피복 변화 결과 낙엽 침엽수림이었던 산림 분포가 태백산맥의 고지대를 제외하고 대부분 상록 활엽수림으로 변화였다. 표 3은 비교 대상지역인 도시(서울 1km 격자영역)와 교외(양구 해안면 1km 격자영역) 지역의 HyTAG 결과의 재분류 후의 산림 비율을 나타내었다. 비교적 산림의 비율이 적은 도시지역의 경우 도시가 분포한 대상지역의 중심 부분을 제외한 북동쪽과 남동쪽을 중심으로 낙엽 활엽수림과 침엽수림이 주를 이뤘던 현재에 비하여 장래에는 북동쪽 일부를 제외한 대부분의 지역이 상록 활엽수림으로 변환된 결과를 나타내었다. 복잡산악지형이며 대부분이 산림지역에 속하는 양구군 해안면은 산림지역의 분포가 낙엽 침엽수림과 상록 침엽수림이 주를 이루었던 현재에 비하여 장래의 산림변화는 5가지 산림이 복합적으로 나타나고 있으며, 낙엽 침엽수림과 상록 침엽수림이 주를 이뤘던 현재에 비하여 낙엽 활엽수림과 혼합림의 비율이 늘어난 특징을 볼 수 있다.

4. 지역기후모델의 실행 및 분석방법

고해상도 기상모델을 이용하여 생태모델에서 계산된 식생변화를 고려한 기후를 분석하기 위하여 먼저 동일한 격자에 대하여 환경부 중분류 토지피복도와 SRTM 지형자료를 입력자료로 사용한 지역기후모델을 구축하였다. 또한 환경부 중분류 토지피복자료을 지역기후모델에 적용한 모델결과와 환

경부 중분류 토지피복자료의 산림을 HyTAG모델 결과로 바꾸고 실행한 지역기후모델의 결과를 각각 비교하여 기상모델간의 동일한 초기 · 경계자료를 이용한 모델의 모사 능력과 토지피복자료의 산림 변화에 따른 기상변화를 비교 분석하였다.

또한 CASE에 따른 기후변화를 비교하기 위하여 기후변화만을 고려하여 실행한 모델 결과를 CASE A 비교하였고, 같은 대상년도에 대하여 식생변화만을 고려하여 실행한 모델 결과를 CASE B로 비교하였다. 마지막으로 기후변화와 기후변화에 따른 식생변화를 모두 고려한 기상모델 결과를 CASE C로 설정하여 각각 조건에 따른 기상요소의 변화를 비교 · 분석 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 지역 기후모델(WRF)의 검증

그림 3은 대상기간 동안 지역기후 모델의 현재 식생변화에 따른 기온변화를 파악하기 위하여 대상지역의 평균 기온 분포 차이를 나타내었다. 현재기간 3km 대상영역인의 환경부 토지피복자료와 HyTAG모델이 산출한 토지피복 자료를 비교한 결과 산림지역이 대부분인 강원도 지역을 중심으로 산림에 대한 토지피복의 변화가 나타났다. 수종의 변화가 크게 나타난 강원 영서지역과 영동지역의 경우 수종에 따라 온도 변화가 크게 나타난 반면, 산림의 분포가 적은 지역인 도시지역과 농작지 등의 온도 변화는 크게 나타나지 않았다. 이는 기후변화에 의한 산림분포 변화가 지역적인 온도 상승에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 사료된다.

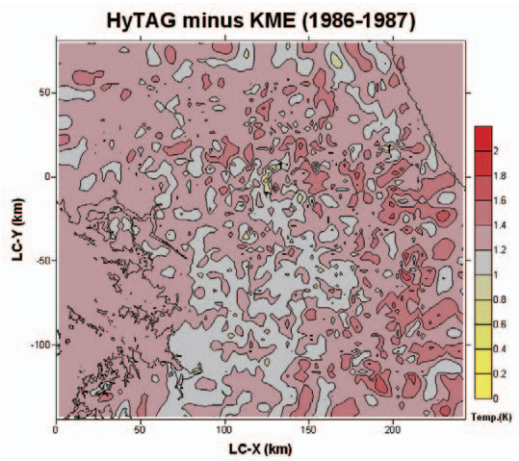

Figure 3. Difference map for temperature field between KME-LC and HyTAG-LC.

2. 지역기후모델을 이용한 장래 국지변화 모사

1) 수종변화에 따른 기후변화 요소 파악

기후 시나리오를 고려한 현재와 장래의 한반도 지역에 수종을 산출하기 위하여 HyTAG 모델을 실행 하였고, 변화된 수종을 지역기후모델에 적용하였다. 변화된 수종에 의한 기상변화를 파악하기 위하여 도시지역인 수도권 지역과 동일한 격자크기(1km 격자크기)의 양구군 해안면의 산악지형에 대하여 수종변화가 크게 일어난 대표지점을 각각 선정하였고, 변화수종을 표 4와 같이 분류하였다. 또한 수종변화에 따른 일주기 평균 온도변화를 각각 구분하여 그림 4에 나타내었다. 장래 수종변화에 따른 차이를 보이는 CASE B와 CASE C는 시간변화에 따라 서로 큰 차이를 보이지 않은 반면, CASE A와 두 CASE의 차이는 도시지역의 경우 최대 5℃까지 현재와 장래의 일주기 평균 온도 변화가 나타났

Table 4. Grid point of forest change in Seoul

		Land-use Type	
		Present	Future
Urban	A	'Deciduous Broadleaf Forest'	'Evergreen Broadleaf Forest'
	B	'Deciduous Needleleaf Forest'	'Mixed Forest'
	C	'Mixed Forest'	'Evergreen Broadleaf Forest'
Rural	D	'Deciduous Broadleaf Forest'	'Evergreen Broadleaf Forest'
	E	'Deciduous Needleleaf Forest'	'Mixed Forest'

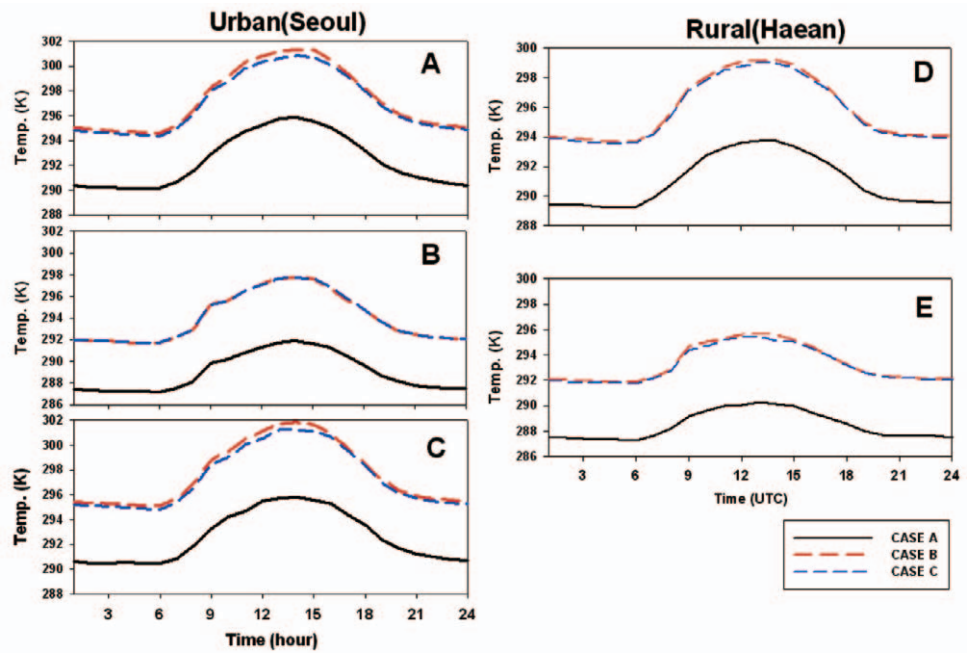

Figure 4. Temperature at 2m time series by to the vegetation change.

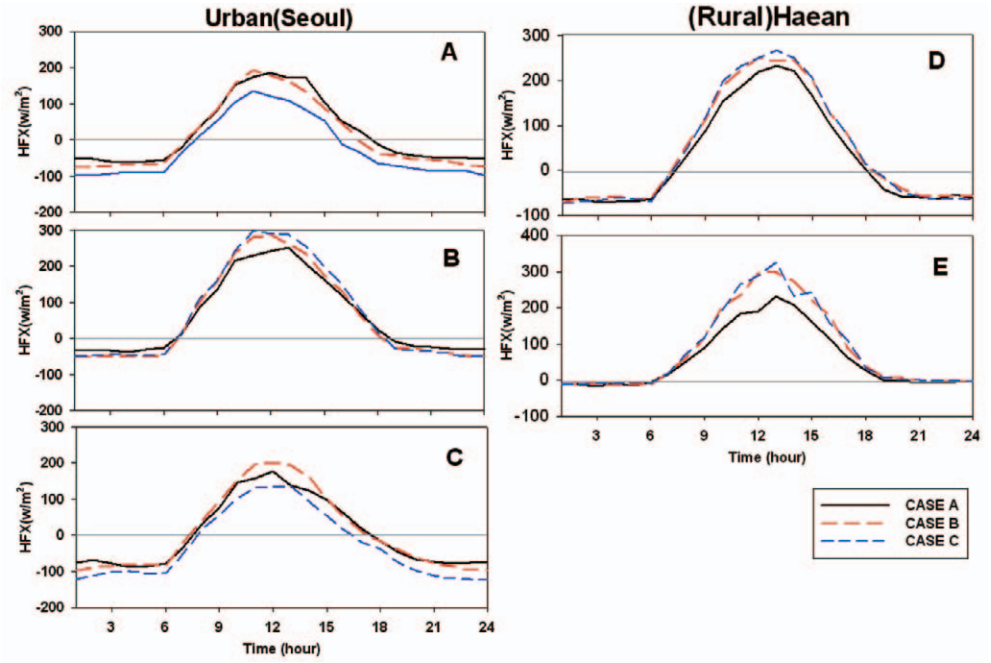

Figure 5. Sensible heat flux time series by to the vegetation change.

고, 교외지역인 해안면의 경우 기후변화에 의한 차이는 4.5℃로 교외지역이 도시지역에 비하여 낮은 증가를 보였다. 수종변화에 대한 차이는 도시에 비하여 교외지역이 미세한 온도차이를 보였고, 도시지역의 경우 식생변화를 고려한 결과에서 낮동안 수종에 따라 차이를 보였다. 지표 온도의 경우 2m

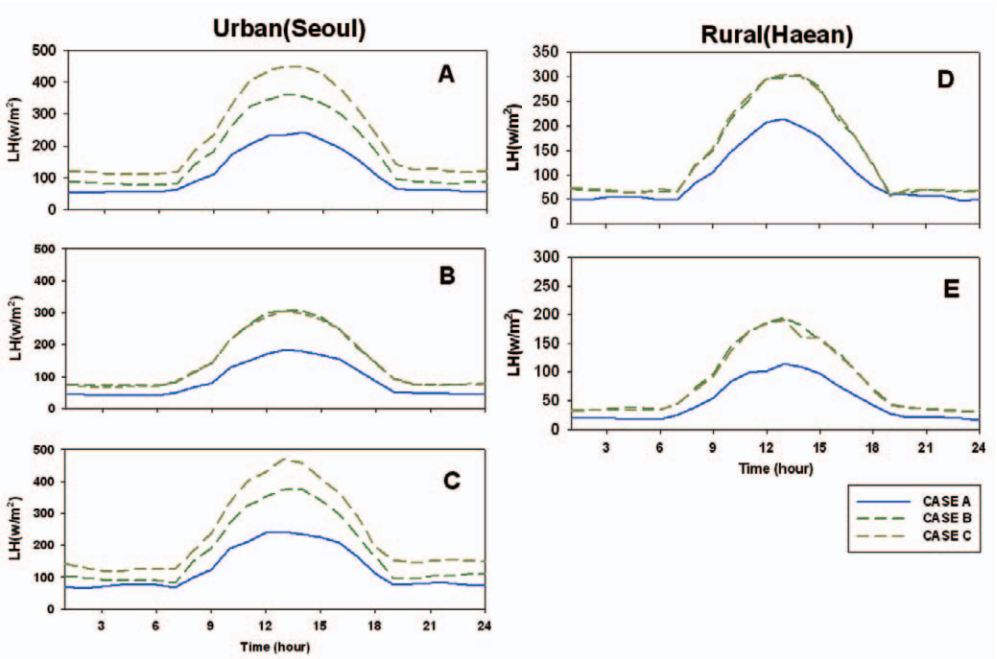

Figure 6. Latent heat flux time series by to the vegetation change.

높이의 온도와 유사한 온도차이의 시간패턴을 나타냈고, 비습의 경우 수종에 따라 크게 영향을 받지 않는 것으로 사료된다(그림 생략).

그림 5와 6은 지표열수지에 관여하는 현열과 잠열 플럭스의 일주기 평균값을 나타내었다. 수종에 따른 현열속의 경우 도시지역에 비하여 교외지역의 낮최고 현열속이 크게 나타났고, 현재에 비하여 장래에 높은 증가 추세를 보였다. 반면 도시지역은 수종에 따라 현재에 비하여 장래에 현열속의 크기가 감소하는 분포를 나타내고 있다(A와 C). 각각 대상지역내에 같은 수종변화를 보여준 B와 E는 유사한 현열속 시간변화를 보였고 도시에 비하여 교외지역의 장래 현열속 변화가 크게 증가하였다. 또한 도시지역의 경우 수종에 따라 각기 다른 현열속의 일변화를 보이고 있고 A와 C의 수종변화에서 기후와 식생의 변화를 동시에 고려한 CASE C의 현열속 변화가 가장 낮은 일변화를 나타냈다. 이는 침엽수림의 활엽수 변화에 따른 가장 큰 특징을 보여주고 있다.

잠열속의 경우 도시지역에서 A와 C수종 변화에 따라 장래 잠열속의 일변화가 크게 차이 났고 기후변화와 식생변화를 동시에 고려한 CASE C의 경우 낮동안 가장 큰 값을 보였다. 교외지역은 기후변화에 의한 잠열속 차이만 크게 나타나고 있고 E에 비하여 D의 수종변화에서 잠열속의 변화가 낮동안 더 큰 차이를 보였다. 일몰 후의 잠열속의 변화는 도시지역이 교외지역에 비하여 두배 가까이 큰 수치를 나타냈다. 이러한 결과는 현열속의 모델 결과와 유사하며, 도시지역의 전형적인 특징으로 나타난다(Foken, T, 2002).

2) 대상지역별 수평분포 비교

장래 토지피복의 분포가 서로 다른 도시지역과 교외지역의 기상요소별 고해상도 기후모델 수평분포를 CASE에 따라 살펴봤다. 또한 식생을 고려한 장래 기후모델 결과와 기후변화만을 고려한 기후모델의 결과 차이를 파악하기 위하여 대상기간동안 장래 기후모델의 평균 기후요소 결과와 현재 기후모델의 평균 기후요소 결과의 차이를 비교하여 수평공간상에 나타나는 기후변화를 파악하였다. 그림 7 부터 9는 현재와 장래의 3년 동안 실행한 기후모델의 평균 기상요소별 분포 차이를 나타냈다. 2m 높이의

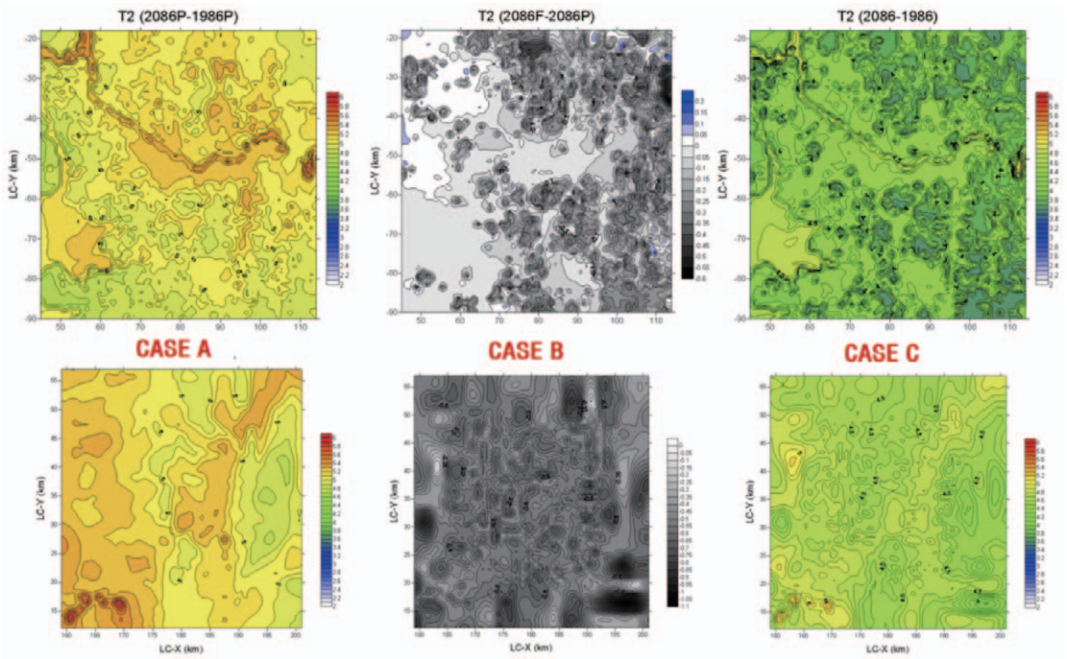

Figure 7. Difference of horizontal distributions change. Temperature by climate(CASE A), forest change(CASE B) and climate & forest change(CASE C).

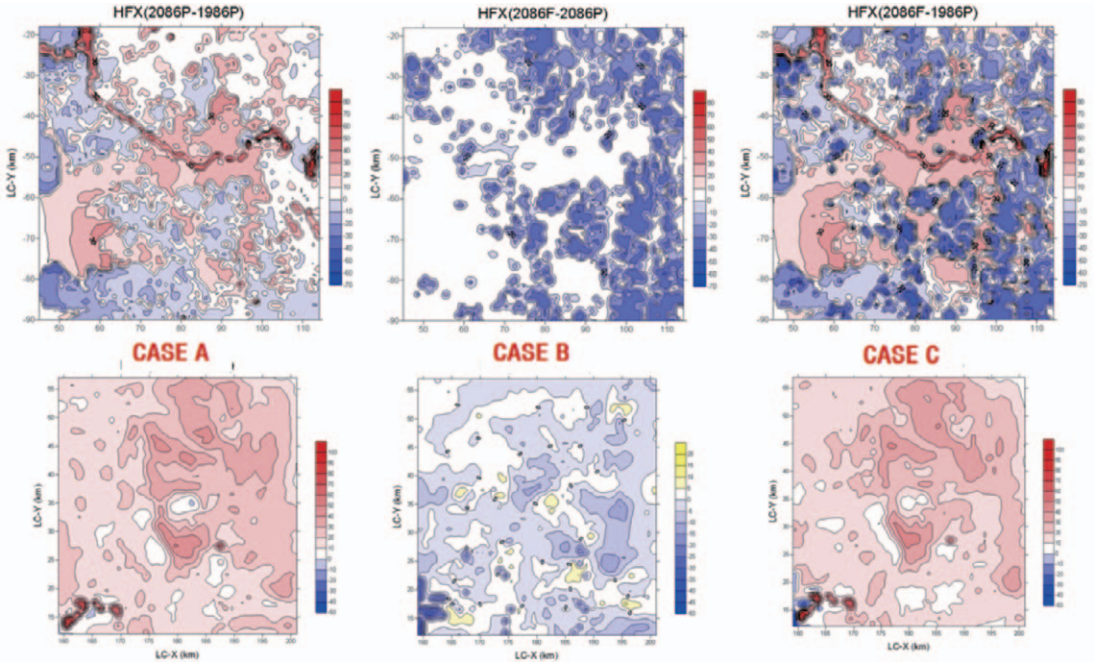

Figure 8. Difference of horizontal distributions change. Sensible heat flux by climate(CASE A), forest change(CASE B) and climate & forest change(CASE C).

온도(그림 7)는 기후변화만을 고려한 CASE A에서 도시지역을 중심으로 5℃ 이상의 큰 온도 차이를 보였고, 도시지역보다 교외지역인 해안면지역의 기온 변화가 고도에 따라 더 큰 온도차이를 보였다.

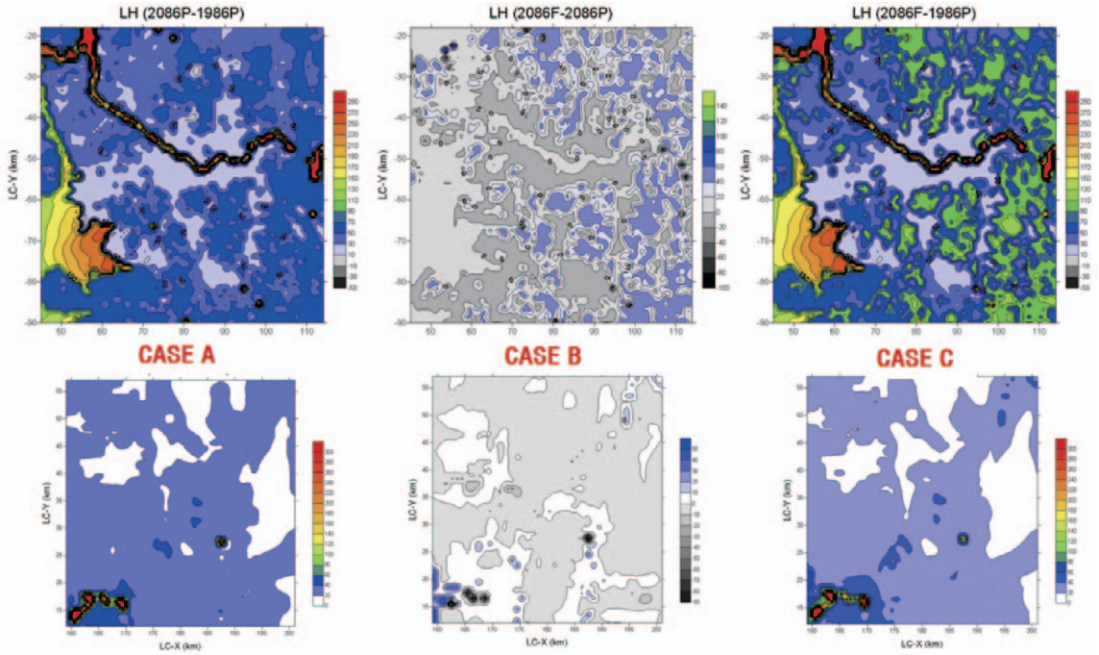

Figure 9. Difference of horizontal distributions change. Latent heat flux by climate(CASE A), forest change(CASE B) and climate & forest change(CASE C).

수종변화에 따른 온도분포를 나타낸 CASE B의 경우 산림으로 분류된 지역의 수종변화에 따른 온도차이가 확연히 보이고 있다. 마지막으로 기후변화와 식생변화를 동시에 고려한 CASE C는 CASE A에 비하여 약 1℃ 낮은 수평분포를 보이며 평균 4℃의 온도 상승분포를 보였고, 교외지역인 해안면의 경우 도시지역보다 약 0.5℃ 높은 온도 차이를 보였다. 이는 기상청과 IPCC에서 장래 한반도 지역의 평균기온 변화를 예측한 4℃와 유사한 예측 결과이다. 하지만 기후변화와 수종변화에 따라 나타나는 온도차이를 정량적으로 분석한 사례로는 의미가 크다.

지표온도의 경우(그림 생략) 2m 높이의 온도에 비하여 전체적인 온도증가가 더 큰 차이를 보이고 있고 분포 패턴은 2m 높이의 온도와 유사한 결과를 나타냈다. CASE C의 경우 CASE A에 비해 수종변화가 나타난 도시지역의 온도차이가 분명 나타나고 있으며, 교외지역도 전체적인 지표온도는 낮아졌다. 현열속의 차이를 나타낸 그림 8의 경우 식생변화에 의해 감소한 현열속의 변화를 고려한 CASE C의 결과가 CASE A에 비하여 장래 현열속의 감소를 보이고 있고, 교외지역의 경우 수종에 따라 차이를 보이고 있지만 산림지역의 현열속의 변화는 장래 증가하는 수평분포를 보였다. 잠열속의 경우(그림 9) 도시지역에 비해 산림에서 나타나는 현재와 장래의 분포차이가 큰 변화를 보이고 있고, 식생과 기후변화를 동시에 고려한 CASE C의 경우 CASE A에 비해 수종변화를 고려한 CASE B의 차이만큼 잠열속의 크기가 증가하였다. 교외지역은 수종에 따라 대부분 지역에서 잠열속이 감소하였고 그 차이로 인하여 CASE C가 CASE A에 비하여 작은 잠열 속 차이를 나타내었다. CASE에 따른 비습의 현재와 장래의 수평분포 차이는 수종에 따라 차이를 보이고 있고, 도시지역이 교외지역에 비해 비습의 증가가 크게 나타났다(그림생략).

그림 10은 각각 대상년도의 대상영역 전체의 격자평균 기상요소 값을 수치로 나타내었다. 온도의 경우 도시지역이 교외지역에 비하여 현저히 높은 수치를 보이며, 현재와 장래의 온도 차이가 각각 4.9℃와 4.5℃를 보이며 장래 온도가 증가하는 결

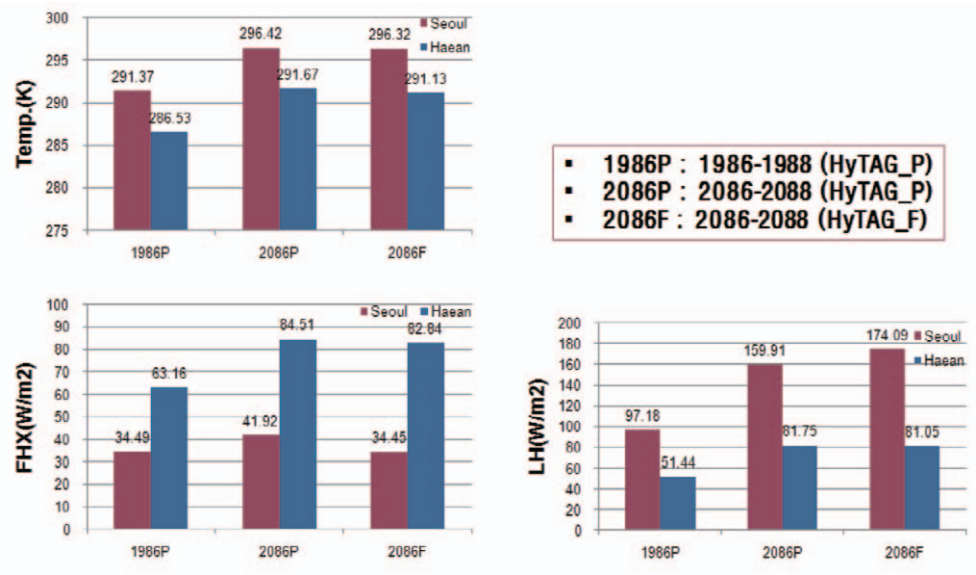

Figure 10. Temperature, sensible heat flux, latent heat flux between Seoul and Haean.

과를 나타냈다. 현열속의 경우 도시에 비하여 교외지역의 변화가 크게 나타났고, 현재와 장래의 현열속 차이도 도시에 비해 교외지역이 큰 차이를 보이며 증가했다. 잠열의 경우 현열속의 결과와는 반대로 도시지역의 잠열 속 변화가 교외지역보다 크게 나타났고, 도시지역의 현재와 장래 잠열속의 차이는 두배 가까이 나타났다.

IV. 결 론

본 연구에서는 기존 기상모형으로 사용된 WRF 모델을 이용하여 기후 시나리오에 따른 기상요소 변동값을 계산하였다. 또한 기상청의 기후시나리오에서 기후변화에 따라 LULC(토지이용도와 토지피복도)는 변하지 않는다고 가정하여 실행한 결과에 비하여 생태모델인 HyTAG 모델에서 계산된 기후변화에 따른 장래 토지피복 변화 정보를 고려함으로서 기후시나리오의 결과를 보다 논리적으로 보완하였다. HyTAG에서 정의한 PFT(Plant Functional Type)는 총 23가지로서 WRF 입력자료인 USGS LULC 타입에 해당하는 토지피복 타입 중 산림의 분류를 5가지의 타입으로 정의하여 기후변화에 상세기상요소를 예측하기 위한 자료로 활용하였으며, 도시 성장에 의한 도시관련 변수는 고려되지 않았다.

WRF 기상모델을 지역기후 모델로서 100년 후 장래 기상변화에 따른 식생변화를 고려한 기상모델을 실행하였다. 그 결과 현재와 장래의 대상지역내 평균 온도 차이는 지역에 따라 5℃까지 상승하는 결과를 보였고 이러한 결과는 IPCC(2007) AR4에서 제시된 2080~2099년 사이 동아시아에서의 평균 온난화(3.3℃)보다 높은 온도를 나타내었다. 또한 지표특성이 다른 대상지역(도시 & 교외)의 산림생태변화를 고려하여 지역기후모델을 실행한 결과 산림변화에 따라 지역적인 기후분포는 민감하게 변할 수 있음을 밝혔다.

향후 기후시나리오 자료를 활용한 기후모사시 지표 입력자료 개선을 통한 결과해석의 차이가 확인됨으로써 지역기후모델의 개선을 위하여 예측된 지표식생 피복자료를 이용한 생태모델의 결과(알베도, 거칠기 길이, LANDUSE와 LAND COVER의 변화 등)는 다시 상세지면모형의 입력자료로 사용되며 되먹임 효과를 통하여 장래 변화된 상세 식생 피복자료 생성을 기대할 수 있을 것이다. 본 연구는 산림 이외의 변수(도시성장, 농경지, 나지의 변화,

해수면 상승 등)는 불변으로 가정하고 산림의 변화만을 고찰한 연구임으로 식생변화보다 온도변화에 더욱 민감한 도시환경 변화 등을 고려한 지역기후 모델을 실행한다면 보다 객관적인 자료를 생성 할 수 있을 것이라 사료된다. 또한 생성된 모델의 상세 기상요소 결과는 특정지역에 대하여 둥지화 기법(nesting)을 이용하여 시 · 공간 해상도를 고해상도 작성하여, 기후변화에 민감한 농작물의 장래 농업기후지수와 적정 재배지 선정 등의 연구에 활용될 수 있고, 생태계변화 경향 예측의 입력자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 일부 한국연구재단(한국-독일 학술교류 TERRECO 프로젝트)의 지원에 의해 이뤄졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

기상청(2005-2008) 기후변화 협약대응 지역기후 시나리오 활용기술 개발 I, II, III, IV.

기상청 (2009) 기후변화정보센터, http://www.climate.go.kr.

김재철, 이종범, 최성호 (2010) 장래 기후 및 식생변화 시나리오를 이용한 복잡지형하에서의 국지기후변화 모사, 한국기후변화학회 추계학술대회 논문집, 36-37.

김형석, 김원식, 허창회 (2004) 식생역학모델을 이용한 기후-식생 관련성 연구, 한국기상학회 가을학술대회, 270-271.

문난경, 홍성유, 김종원, 임교선, 김순태 (2009) 지구온난화에 따른 한반도 대기질 영향평가를 위한 전구규모-지역규모-도시규모의 시스템 구축 및 검증, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 541 -543.

이상철, 최성호, 이우균, 유성진, 변재균 (2011) 기온감율을 적용한 기후자료가 잠재 산림분포 예측에 미치는 영향, 한국지형공간정보학회지, 19(2), 19-27.

안중배, 허지나, 심교문 (2010) 수치예보모형을 이용한 역학적 규모축소 기법을 통한 농업기후지수 모사, 한국농림기상학회지, 12(1), 1-10.

안중배, 홍자영, 심교문 (2010) 대기-해양-지면-해빙 접합 대순환 모형으로 모의된 이산화탄소 배증시 한반도 농업기후지수 변화분석, 한국농림기상학회지, 12(1), 10-22.

임희정, 이영희 (2008) 한국기후 조건에서 CLM-DGVM의 민감도 실험, 한국기상학회 가을학술대회 논문집, 384-385.

Beniston, M., Keller, F., Koffi, B., and Goyette, S. (2003) Estimates of snow accumulation and volume in the Swiss Alps under changing climatic conditions. Theor. and Appl. Clim., 76, 125-140.

Foley, J. A., S. Levis, I. Prentice, D. Colin-Pollard, and S. L. Thompson (1998) Coupling dynamic models of climate and vegetation, Global Change Biol., 4, 561-579.

Foken, T (2002) Micro-meteorology, Springer, e-ISBN: 978-3-540-74666-9.

Frei, C., R. Scholl, S. Fukutome, J. Schmidli, and P. L. Vidale (2006) Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climaet models, J. Geogpys, Res., 111, D06105.

Gerbaux, M., C. Genthon, P. Etchevers, C. Vincent and J.P. Dedieu (2006) Surface mass balance of glaciers in the French Alps : distributed modeling and sensitivity to climate change. Journal of Glaciology, Vol 51, n° 175, 561-572.

Im, E. S., J. B. Ahn, W. T. Kwon, F. Giorgi (2008) Multi-decadal scenario simulation

over Korea using a on-way double-nested regional climate model system. Part 2: future climate projection, Climate Dynamics, 30(2/3), 239-254.

IPCC (2007) General Guidelines on the Use of Scenarios Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment(TGICA).

Jonathan A. FOLEY, Samuel Levis, I.Colin Prentice, David Pollard, Starley L. Thompson (1998) Coupling dynamic models of climate and vegetation, Global change biology, 4, 561-579.

K. O. Boo, W. T. Kwon, J. K. Kim, H. J. Baek (2004) Changes of vegetation distribution over East Asia using the regional climate projection: An experiment with the BIOME4, 한국기상학회 가을 학술대회, 415-416.

Luo, Y (2007) Terrestrial carbon-cycle feedback to climate warming. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 38, 683-712.

Martin Claussen (1994) On coupling global biome models with climate models, Climate Research, 4, 203-221.

Rustad, L, Campbell, J, Marion, G. (2001) A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. Oecologia 126, 543-562.

S. H. Choi, W. K. Lee, H. Kawk, S. Kim (2009) Prediction the vgetation distribution and terrestrial carbon-fluxes using MC1 model. International Symposium on Remote Sensing Technical paper.

S. H. Choi (2010) Assessment of Climate Change Impact on Forest Cover Distribution using the Hydrological and Thermal Indices in Korea, The Degree of Master of Science, Korea university.

YJ Lim, SK Seoul, TY Lee, KY Byun, S-H Shin, N-S Cho, S-H Park (2008) Korea Land Data Assimilation System (KLDAS) and its application using WRF.

Yasutaka Wakazuki, Sachie Kanada, Chiashi Muroi, Akihiro Hashimoto, Teruyuki Kato, Masaomi Nakamura, Akira Noda, Masanori Yoshizaki, Kazuaki Yasunaga (2007) Regional Climate Projection Experiments on the Baiu Frontal Activity around the Japan Islands Using a Non-Hydrostatic Cloud-System-Resolving Model, Earth Simulator, 8, 13-25.

최종원고채택 12. 02. 07