

지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여 :

1. 국지규모 모형을 이용한 한반도 기온의 변화 분석

On the Change of Hydrologic Conditions due to Global Warming :

1. An Analysis on the Change of Temperature in Korean Peninsula using Regional Scale Model

안 재 현\* / 윤 용 남\*\* / 이 재 수\*\*\*

Ahn, Jae Hyun / Yoon, Yong Nam / Lee, Jae Soo

Abstract

Even though the increase of greenhouse gases such as CO<sub>2</sub> is thought to be the main cause for global warming, its impact on global climate has not been revealed clearly in rather quantitative manners. However, researches using General Circulation Model(GCM) has shown that the accumulation of greenhouse gases increases the global mean temperature, which in turn impacts on the global water circulation pattern. A climate predictive capability is limited by lack of understanding of the different processes governing the climate and hydrologic systems. The prediction of the complex responses of the fully coupled climate and hydrologic systems can be achieved only through development of models that adequately describe the relevant processes at a wide range of spatial and temporal scales. These models must ultimately couple the atmospheres, oceans, and land and will involve many submodels that properly represent the individual processes at work within the coupled components of systems. So far, there are no climate and related hydrologic models except local rainfall-runoff models in Korea. The purpose of this research is to predict the change of temperature in Korean Peninsula using regional scale model(IRSHAM96 model) and GCM data obtained from the increasing scenarios of CO<sub>2</sub> concentration by IPCC(1990). From the simulation results, it is predicted that annual temperature in Korean Peninsula increased by 2.5°C and the duration of Winter in 1xCO<sub>2</sub> condition would be shorter the 2xCO<sub>2</sub> condition due to global warming.

keywords : global warming, GCM, regional scale model, temperature, Winter

요 지

장래 CO<sub>2</sub>의 증가에 따른 지구 기온의 상승은 그 정도의 차이는 있으나 불가피한 것으로 예측되고 있으며, 강수량의 경우는 대기대순환모형(General Circulation Model, GCM)의 종류에 따라 감소에서 증가까지 다양한 결과를 보이고 있다. 특히, 강수량의 변화는 평균적인 개념의 연평균, 계절평균이나 월 평균도 중요하지만 국가적인 재해와 관련된 홍수나 가뭄의 발생도 중요한 관심사항이 된다. 홍수나 가뭄의 발생변화를 적절히 예측하기 위해서는 기술적인 측면에서 대기대순환모형의 결과를 중규모 또는 소규모 대기모형에 연계하여 한반도를 중심으로 해석하는 것이 필요하며, 궁극적으로는 수문 모형과의 연계를 통한 지면과 대기의 상호작용에 대한 고려가 이루어져야 한다. 그러나, 국내의 경우 아직까지 대기-수문 모형의 적용이 미미한 실정이다. 본 연구에서는 Kavvas 등(1995)이 지표면 과정과 중규모 대기모형을 집합하여 개발한 국지규모 수문-대기모형인 IRSHAM96 모형(Integrated Regional Scale Hydrologic/Atmospheric Model)을 이용하여 지구온난화에 따른 한반도 기온의 변화를 분석하였다. 이를 통해 CO<sub>2</sub> 배증에 따라 한반도의 기온은 연평균 2.5°C 정도의 상승이 예측되었으며, 2월과 11월의 기온은 각각 4.5°C와 5.5°C의 높은 상승이 예상되어 겨울이라는 계절이 짧아질 수 있을 것으로 분석되었다. 이와 같은 계절적인 변화로 인해 한반도 생태계에 커다란 변화가 초래될 가능성이 높아질 수 있으며, 다른 계절의 기온도 상대적으로 높아질 것을 감안한다면 생태계에 커다란 재앙일 수 있을 것이다. 또한, 겨울철의 상대적으로 높은 기온 상승은 수자원의 특성에도 커다란 변화가 생길 수 있음을 시사하고 있다.

핵심용어 : 지구온난화, 대기대순환모형, 국지규모 모형, 기온, 겨울

\* (주)건일엔지니어링 수자원부 차장  
Vice Director, Kunil Engineering Co., 891-44 Daechi-Dong, Seoul 135-280, Korea (E-mail : wrr@korea.com)

\*\* 고려대학교 토목환경공학과 교수  
Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

\*\*\* 전주대학교 토목환경공학과 조교수  
Assistant Professor, Dept. of Civil & Envir. Eng., Jeonju Univ., Jeonbuk 560-759, Korea

## 1. 서 론

수자원공학 분야에서 이루어지고 있는 지구온난화와 관련한 연구는 지구환경의 변화에 따른 강수량의 변화 및 증발산량의 변화와 같은 양적인 변화뿐만 아니라 궁극적으로는 홍수나 가뭄과 같은 극단기상의 빈도 변화까지 다양하다. 이들 중 연평균 강수량이나 평균온도의 변화에 따른 증발산량의 변화는 대부분 대기대순환 모형(General Circulation Model: GCM)을 이용하여 지구규모로 예측되고 있다.

GCM은 지구의 대기를 3차원의 불연속 격자 시스템으로 구성하고 각 격자점에서 대기 상태를 지배하는 방정식(운동량, 연속, 정역학, 열역학, 상태 방정식 등)을 시간적분하여 지구의 대기 상태를 재현 및 예측하는 모형이다. 이러한 GCM에는 해양, 육지, 빙하, 산악 등의 지표면 상태가 고려되며, 대기 내의 물리과정들인 복사, 강수, 혼합 등이 복잡하게 매개변수화 되어 있다(강인식, 1994).

GCM을 이용하여 지구온난화에 따른 변화를 Manabe와 Wetherald(1975)가 실시한 이후로 전 세계적으로 GCM을 이용한 연구를 활발히 수행하고 있으며, 사용한 GCM과 모델에 따라 그 결과의 차이는 있지만 전반적으로 현재에 비해 대기중의 CO<sub>2</sub> 농도가 배증된다면 지구 전체적으로 2~5°C 정도의 기온 상승이 발생할 것으로 예측되고 있다. 이러한 변화는 자연적인 변동폭을 훨씬 뛰어넘는 값이며, 이에 따른 전 지구적인 기상 메카니즘의 변화로 인해 추가적인 변동이 발생할 것임을 강력하게 시사하고 있다. IPCC(1990)에 의해 보고된 CO<sub>2</sub> 배증 상황이 발생할 경우 현재에 비해 전 지구적인 평균온도가 1.5~4.0°C 정도 상승하며, 그 공간적 변화도 훨씬 심각해질 것이라는 예측도 GCM 모의 결과에 대한 분석을 통해 도출된 결과이다.

GCM은 개발한 기관에 따라 격자 크기와 매개변수화 과정이 다르며, 이에 따른 모의 결과도 다르게 나타난다. 일반적으로 GCM에서 사용되는 격자의 크기(grid size)는 GCM의 종류에 따라 2.0~7.5°의 범위를 가지고 있으며(서용원과 김영오, 2000), 이를 거리로 환산하면 평균적으로 300km×300km의 범위를 포함하고 있는데, 이러한 규모는 수문기상학적 분석을 실시하기에는 너무 큰 것이 사실이다. 따라서, GCM을 이용한 수문기상학적 분석을 실시하기 위해서는 통계적인 방법을 통한 상관분석을 이용하여 작은 규모의

유역에 대한 분석을 실시하거나, GCM 결과를 경계조건으로 한 후 국지규모 모형(regional scale model)을 사용하여 국지 규모에 대한 분석을 실시하는 방법(downscaling) 등이 주로 이용되고 있다(Grotch와 MacCracken, 1991; Gyalistras 등, 1994; Wilby, 1994, 1997; Conway 등, 1996; Wilby와 Wigley, 1997).

국내의 경우에는 주로 국외에서 개발되고 운영중인 여러 GCM의 결과를 수집, 한반도 주변 또는 동아시아 주변에 대해 각각의 결과를 개별적으로 또는 평균적으로 분석하여 결과를 얻고 있는데, 그 분석은 주로 통계적인 내삽방법이나 다중회귀분석을 이용하여 추정하고 있으며(한국과학기술연구원, 1993a, b; 한국과학기술연구원, 1994, 1995; 한국과학기술연구원과 시스템공학연구소, 1993, 1994, 1995), 국지규모 모형을 이용한 방법은 시도된 예가 없다.

그러나, 일반적으로 GCM의 해상도 분석은 국지규모 모형의 이용을 통해서만 가능하다. 국지규모 모형은 GCM의 결과를 경계조건으로 하며, 지형, 토지이용, 식생, 토양수분 등의 조건을 고려하여 내부의 상태변화를 모의하게 되는데, 내부의 상태변화에는 증발산과정을 통한 지표면과정과 대기과정간의 상호작용이 고려된다. 총 강수의 최대 70%정도가 증발산과정을 통한 수분공급에 의해 이루어진다는 것을 고려할 때 이와 같은 지표면-대기의 상호작용의 중요성을 짐작할 수 있다.

수문기상학 연구의 목표는 지구환경의 변화에 따른 국지적인 수문환경의 변화 평가, 장기적인 측면에서의 수문환경의 변동 예측 및 인간활동이 유발하는 지표면 조건의 변화에 따른 수문환경의 변화 평가 등으로 요약할 수 있다. 따라서, 궁극적 적용대상을 유역규모로 볼 때 최대 수 km정도의 해상도는 필수적이며, 이 정도의 해상도를 가져야만 강우-유출의 해석이 적절히 이루어진다고 볼 수 있다. 인간활동에 의한 지표면 환경의 변화를 고려하기 위해서도 이 정도의 해상도는 필수적이다. 따라서, 국지규모 모형은 필수적이며 강우-유출모형과의 적절한 결합을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 국지규모 모형의 필요성에 따라 한반도에 적용 가능한 국지규모 모형을 선정할 후, 한반도의 기상, 수문 자료 및 지표면 자료를 이용하여 지구환경변화의 요인이 되는 CO<sub>2</sub> 배증 시나리오에 대해 한반도에서의 기온이 어떻게 변화할 것인지를 모의하고, 이에 따른 영향을 분석하고자 한다.

## 2. 국지규모 모형

지구-대기 시스템에서의 관심 있는 중요한 요소는 대기와 지표, 그리고 해수표면간의 상호작용이라 할 수 있다. 지표면과 대기사이의 열과 수분의 교환은 대기 동력학뿐만 아니라 인간에게 중요한 기온, 상대습도, 토양수분과 같은 지표면 상태를 결정하는데 있어 대단히 중요하다.

이와 같이 지표면과 대기사이에 발생하는 과정을 지표면 과정(land surface processes)이라고 부른다. 이러한 지표면 과정은 약 10-100km의 해상도를 요구하는 중규모 대기모형(Large Domain Mesoscale Atmospheric Model : LDMAM)보다 더 작은 수평 해상도를 필요로 한다. 그러므로, 대기모형에 이상적인 지표면 경계조건을 제공하기 위해 중규모 대기모형의 계산격자상에서 공간 평균적인 지표면 과정을 모의하는 이상적인 지표면 매개변수화가 필요하다. 한편 지표면 매개 변수화 과정과 조합된 중규모 대기모형은 강우, 토양의 함수상태, 토양으로의 침투(infiltration), 토양으로부터의 추출(exfiltration), 증발산 등의 공간적 분포와 같은 이상적인 입력자료를 국지 수문모형과 유역 수문모형에 제공할 수가 있다.

이와 같이 작은 영역에 있어서의 지표면 과정과 중규모 대기모형을 접목시키기 위해 Chen 등(1994a, b)은 비균일 토양의 침투 및 추출을 모의하기 위한 공간 수평 평균적인 Green-Ampt 모델을 개발하여 작은 영역의 중규모 대기모형에 조합함으로써 증발산률과 지표면 수분상태에 대해 더욱 개선된 예측을 할 수 있는 발판을 마련하였다.

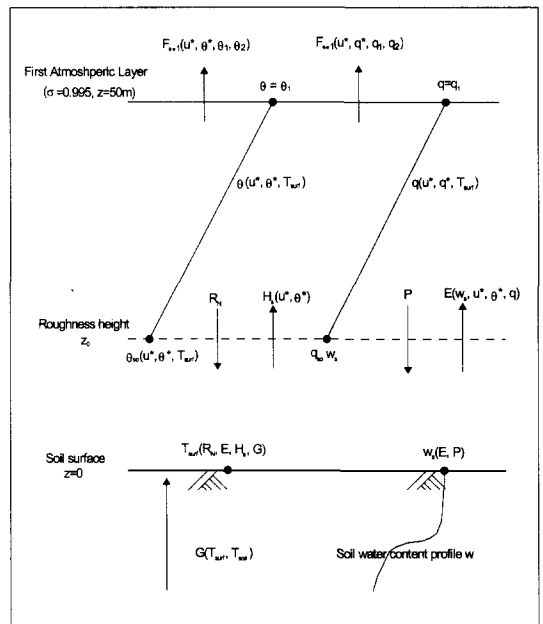
Kavvas 등(1995)이 이러한 지표면 과정과 중규모 대기모형을 결합하여 개발한 국지규모 수문-대기모형(Integrated Regional Scale Hydrologic/Atmospheric Model, IRSHAM96)은 기후 사상과 같은 대규모의 대기 상태를 106km<sup>2</sup> 안팎의 국지 규모로 전환하기 위해 개발한 국지규모(regional scale)에서의 수문과 대기과정의 조합모형이다. 이 모형은 수자원과 주위환경에 영향을 주는 기름이나 지구 기후변화와 같은 중요한 기후 시나리오에 따른 대기-토양온도, 지표수 및 토양수분저류량, 풍속, 상대습도, 강우, 태양 복사에너지, 증발산과 침투율과 같은 정보를 제공해 준다.

IRSHAM96 모형은 중규모 대기모형과 국지규모 지표수문모형으로 구성되어 있으며 대기모형은 대기동

력학, 수분 및 열역학의 보존방정식을 기본으로 한 정수(hyostatic)모형이고 대기 경계층모형을 통하여 국지지표 수문모형과 조합된다. 이러한 대기모형과 지표수문모형이 결합되는 양상을 그림 1에 도식적으로 표현하여 나타내었다.

IRSHAM96 모형에서 downscaling을 실시하는 절차는 그림 2와 같으며, 모형의 외부영역(Large Domain, LD)과 내부영역(Small Domain, SD)의 모의는 다음과 같은 4단계 과정으로 이루어진다.

1 단계 : GCM 모의 결과에 따른 지구규모의 대기 조건을 보간법을 이용하여 IRSHAM96 모형의 외부영역(LD)으로 전환하고, 외부영역(LD) 모의를 위한 초기 및 경계조건을 생성한다.



- $F_{\theta l}$  : 첫 번째 대기층 에너지의 연직 난류 유동 발산
- $F_{q l}$  : 첫 번째 대기층 수분의 연직 난류 유동 발산
- $\theta$  : 잠재온도,  $q$  : 혼합율,  $T_{surf}$  : 지표면온도,
- $w_s$  : 지표면 수분,  $u^*$  : 난류속도규모,  $\theta^*$  : 온도규모,
- $q^*$  : 수분규모,  $z_0$  : 거칠음 높이,
- $\theta_{so}$  :  $z_0$ 에서의 잠재온도,  $q_{so}$  :  $z_0$ 에서의 혼합율
- $R_N$  : 순복사에너지,  $H_s$  : 지표면수분의 대기유동,  $P$  : 강수
- $E$  : 증발산,  $G$  : 지중열유동,  $T_{soil}$  : 토양온도,
- $w$  : 토양수분

그림 1. IRSHAM96 모형의 대기와 지표면 과정의 결합 모식도

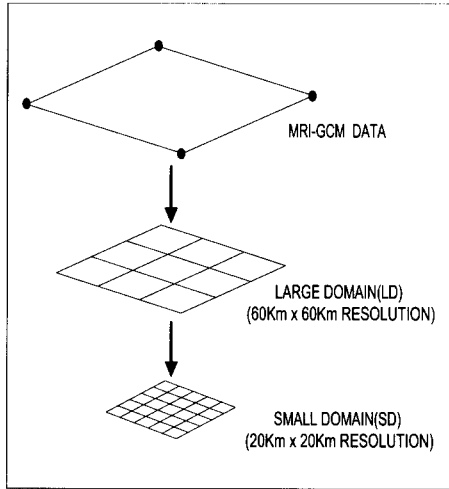


그림 2. IRSHAM96 모형의 Downscaling 절차

2 단계 : IRSHAM96 모형의 외부영역(LD)에 대한 자세한 지형특징이 고려된 대기조건의 생성을 위해

초기 및 경계조건을 이용하여 모의한다.

3 단계 : 내부영역(SD) 모의를 위한 초기 및 경계조건을 생성하기 위해 2단계에서 모의된 대기조건을 보간한다.

4 단계 : 3단계에서 생성된 초기 및 경계조건을 이용해서 내부영역(SD)에 상응하는 지표면 수문조건과 대기조건을 모의한다.

본 연구에서는 이와 같은 국지규모 수문-대기모형인 IRSHAM96 모형을 이용하여 지구온난화에 따른 수문환경의 변화를 분석하였으며, 이러한 IRSHAM96 모형의 계산절차는 그림 3과 같다.

### 3. 국지규모 모형을 이용한 지구온난화에 따른 한반도 기온의 변화 분석

#### 3.1 한반도에 대한 모형입력자료의 구축

이산화탄소의 변화에 따라 계산되는 GCM(Global Circulation Model) 자료는 약 300×300km의 격자별

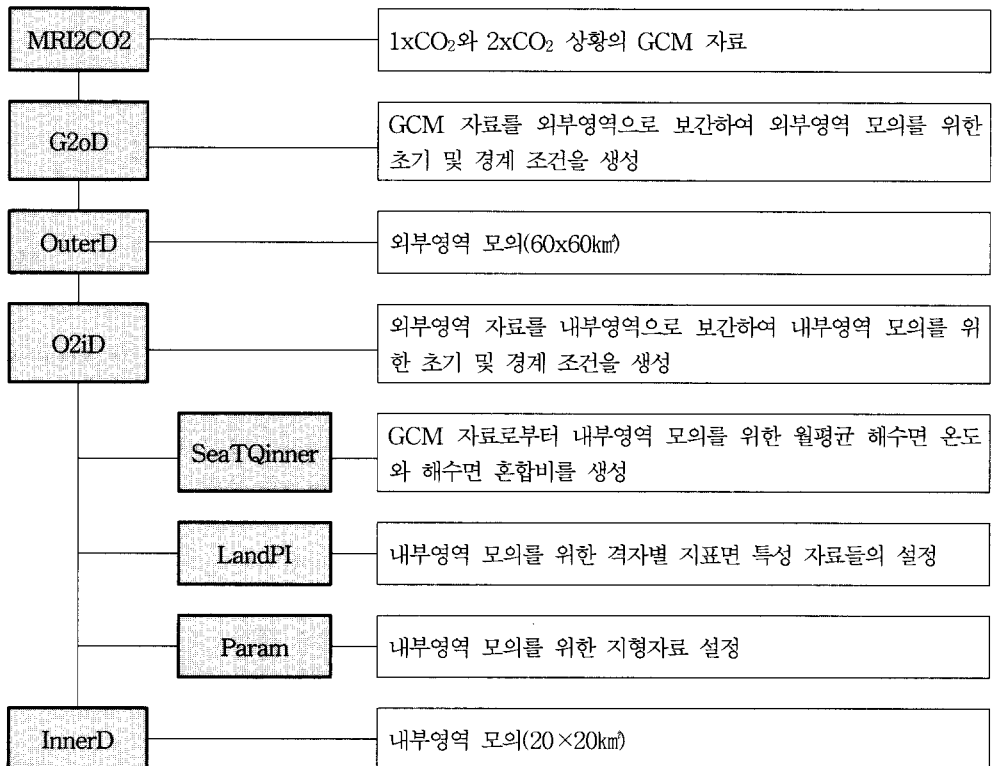


그림 3. IRSHAM96 모형의 계산 절차

로 하나의 값을 가진다. 따라서 이와 같은 격자 크기 별로 계산된 값을 특정지역에서 좀더 정밀한 값을 가지게 하려면 대상지역의 특성을 반영하면서 그 격자의 크기로 줄여나가며 특성 값을 얻어야 한다.

본 연구에서 사용한 IRSHAM96 모형은 Kavvas 등(1995)에 의해 일본에 적용되었던 모형으로서, 일본의 경우에는 300×300km<sup>2</sup> 격자의 GCM 자료를 먼저 60×60km<sup>2</sup>의 크기를 가지는 외부영역의 격자로 변환 한 후에, 최종적으로 20×20km<sup>2</sup> 크기의 내부영역 격자로 변환하여 각 격자별로 이산화탄소의 변화에 따른 여러 가지 기상 및 수문인자들의 변화를 살펴보고 분석하였다. 따라서, 본 연구에서는 IRSHAM96 모형을 적절하게 우리나라에 맞게 적용시켜서 한반도에서의 이산화탄소의 변화에 따른 기상 및 수문사상의 변화를 살펴보는 것이 주목적이 된다.

이를 위해서는 먼저 일본에 대해 설정되어 있는 격자의 범위를 한반도에 맞는 범위로 변화시키면서, 여러 가지 특성정보들(지형, 토지이용, 토양, 식생, 적설량 등)을 한반도의 자료로 변환하여 그 변화를 살펴보아야 한다. 또한 외부 및 내부영역의 모의에서 일본에 대해 적용되는 외부영역의 모의는 일본뿐만 아니라 한반도를 포함하는 동북아시아 지역을 모두 망라하고 있으므로, 그대로 일본의 모의 방법을 이용할 수 있으며 다만 내부영역의 모의시에만 적절하게 여러 자료들을 한반도의 특성을 반영할 수 있는 자료로 바꾸어서 모의하여야 한다.

그러므로, 20×20km<sup>2</sup> 크기인 64×64개의 격자로 실시되는 내부영역의 모의시에 격자 범위를 한반도로 변환시키면 대략 북위 33° ~44°, 동경 121° ~136°에서 모의가 이루어지며, 따라서 변환시켜야 할 특성정보들을 이 범위 내에서 같은 크기의 격자로 변환해 준다면 한반도에 적용할 수 있을 것이다.

### 3.1.1 기상자료

IRSHAM96 모형을 적용하기 위한 가장 기본적인

자료들은 해수면 온도, 해수면 혼합비, 압력, 온도, 바람 등이 있다. 이와 같은 자료들은 1xCO<sub>2</sub>와 2xCO<sub>2</sub> 상태에서 모의된 일본의 MRI-GCM 자료를 이용하여 입력되게 된다. MRI-GCM은 UCLA 모형을 기초로 하여 1980년대 초에 개발되었으며, 운동량, 질량, 열, 수분 방정식 등을 이용해서 대기상태를 구하는 모형으로 4.0×5.0°의 격자크기를 가지고 있다. 또한, MRI-GCM은 연직방향으로 대류권의 5층 모형과 성층권의 12층 모형으로 구성되어 있으며, 각 층에서 기온, 혼합비, 수평풍속, 바람, 고도 등을 계산하게 된다(日本 土木研究所, 1996).

본 연구를 위해 모의된 MRI-GCM 결과는 U & V(중·횡 방향의 수평 풍속), T(기온), Q(혼합비), 고도(Φ) 등의 자료로 구성되어 있으며, 이러한 자료들은 연직방향으로 10개의 입력층(150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000mb)별로 기록되어 있다. 또한, 이들 자료 외에 지표면 기온(T<sub>s</sub>), 월평균 해수면온도(T<sub>sea</sub>)와 월평균 해수면 혼합비(Q<sub>sea</sub>) 등의 자료가 포함되어 있다. 이러한 자료들은 12시간 간격으로 계산되어 있으며, IRSHAM96 모형에서 계산 영역별 입력 자료를 준비해서 모의하게 되면 다음 단계의 계산에 필요한 자료들을 생성하게 된다.

### 3.1.2 토양자료

IRSHAM96 모형에서 토양자료는 토양의 종류와 침투성에 따라 총 6개로 분류되고 있다. 먼저 갈색삼림토(brown forest soil)의 여부에 따라 1~3 및 4~6으로 분류한 후, 각각 침투성이 큰 순서로 표 1과 같이 토양형을 구분하였다. 여기서, 갈색삼림토는 한랭에서 난온대에 걸쳐 습윤기후하에서 발달된 토양을 말하며 전세계에 걸쳐 널리 분포가 되어있는 토양으로서, 주로 광엽 낙엽수림하에서 발생하는데 한반도의 경우는 남부 산림지대의 비교적 높은 위치에서 발견되며 산성이 강해서 산성 갈색삼림토라고 불리기도 한다.

본 연구에서는 한반도의 개략토양도 자료를 이용하

표 1. 토양 분류

구분	갈색삼림토외의 토양			갈색삼림토		
	大	中	小	大	中	小
침투성	大	中	小	大	中	小
분류번호	1	2	3	4	5	6
토양형	Af, Fb, Re, Ma, MI, Mm, Ms, Mv	An, Ap, Ra, RI, Rs, Rv	Fm, Ro	-	Mu	-

표 2. 토지이용 분류

분류번호	구분	중분류	토지이용	분류번호	구분	중분류	토지이용
1	田	농지	경작지	9	幹線交通用地	도시용지	도시
2	畑			10	그외 用地		
3	果樹園			11	湖沼	수면	물
4	樹木畑			12	河川地(A)		
5	森林	삼림	낙엽수/상록수	13	河川地(B)		
6	荒地	기타	기타	14	海浜	기타	기타
7	建物用地(A)	도시용지	도시	15	海水城		
8	建物用地(B)			16	計		

였으며, 토양도의 적절한 변화를 위하여 먼저 개략도양도에서 적용한 토양별 주요 특성을 이용하여 토양형에 따른 토양의 특성에 따라 각각의 토양에 대해 갈색삼림도 여부와 침투성을 분류하였으며, 이에 따라 토양형에 따른 특성 값을 1~6까지 부여하였다.

3.1.3 토지이용

IRSHAM96 모형에서 토지이용자료는 종류에 따라 표 2와 같이 총 15가지로 분류되고 있으며, 16번째는 그 합으로 구성된다. 또한, 실제 자료와의 적절한 분류를 위해서 15가지의 토지이용을 농지, 삼림, 도시용지, 수면, 기타의 5가지로 중분류 하였는데, 본 연구에서는 이 중분류의 기준을 이용하여 토지이용 자료를 준비하였다.

먼저, 본 연구를 위해 사용된 토지이용 자료는 토지이용이 물, 도시, 경작지, 낙엽수, 상록수, 기타의 6가지로 분류되어 있었다. 따라서 이 자료를 모형에 맞는 입력자료화 하기 위해서 6가지 분류를 표 2의 중분류에 맞게 변화시켰다.

위와 같은 기준에 따라 분류된 토지이용 자료를 15가지의 토지이용으로 적절하게 분할하였다. 즉, 경작지의 경우는 얻어진 면적을 4로 나눈 후에 각각을 1~4까지 할당하였으며, 다른 값들도 같은 방식으로 변환하였다. 따라서, 이런 방법을 통해 64×64개의 20×20km 크기의 격자를 가지는 토지이용 자료를 구축하여 입력하였다.

3.1.4 지형자료

지형자료는 남북한을 모두 포함하는 자료를 사용하였고, 20×20km 크기의 격자로 변환하여 64×64개의 평균고도자료를 구축하였으며, 격자별로 그 값을 입력

하였다.

3.1.5 식생자료

식생은 표 3과 같이 4개의 경우에 대해 1~4의 값을 가지는 식생 형태로 구분하였는데, 일본의 경우 대부분이 3이나 4의 경우인 낙엽광엽수림 혹은 상록광엽수림이었고 1의 경우도 간혹 나타났으나 2의 경우는 전혀 없었으며, 전반적으로 고도나 위도에 따라 비례해서 변화하는 값을 보여주었다.

한반도의 식생에 대한 분류는 일본과 동일하지는 않지만 비슷하다고 볼 수 있는데, 일반적으로 북한을 포함하여 한반도 전체를 한대, 온대, 난대의 3가지로 대분류를 하며, 좀더 세밀하게 할 경우에는 온대를 북동부, 북서부, 중부, 남부의 4가지로 추가 분류하게 된다(차종환 등, 1974). 한대의 경우는 고산지대를, 온대는 낙엽활엽수대, 난대는 상록낙엽수대를 나타내며, 본 연구에서는 표 3에 의한 식생분류를 한반도 자료에 맞게 변환시켜서 적용하였다. 한반도를 한대, 온대, 난대로 분류하는 기준은 일반적으로 위도와 표고를 기준으로 되어지며, 본 연구에서는 차종환 등(1974)의 분류를 기준으로 식생대를 분류한 후 표 3의 기준에 따라 각

표 3. 식생 분류

분류번호	식생분류	한반도의 식생분류
1	高山植生, 亞高山針葉樹林, 모미·ツ가林(진/소나무)	한대 (고산지대)
2	北方針, 廣混交林	-
3	落葉廣葉樹林	온대 (낙엽활엽수대)
4	常綠廣葉樹林	난대 (상록활엽수대)

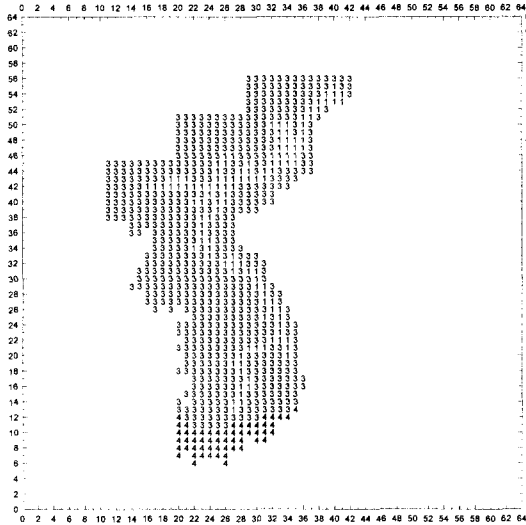


그림 4. 한반도의 식생 분포

각의 격자별로 그림 4와 같이 식생자료를 준비하였다.

### 3.1.6 최대적설심 자료

지역에 따른 최대적설심 자료는 표 4와 같이 최대적설심에 따라 총 7개의 경우에 대해 1~7의 값을 가지는 적설형태로 구분되고 있으며, 일본의 경우에는 대상 지역중에 3분의 2정도 되는 지역이 1의 값을 가지는 0~50cm의 최대적설심을 가지고 있었으며, 그 나머지 지역은 2~6까지 골고루 분포된 값을 가지고 있었다. 본 연구에서는 한반도의 지역별 최대적설심 자료(차종환 등, 1974)를 이용해서 일본과 같은 기준으로 최대적설심을 구분하였다.

## 3.2 지구온난화에 따른 한반도 기온의 변화 분석

지구온난화에 따른 한반도 기온의 변화를 살펴보기 위해서 IRSHAM96 모형의 결과를 이용하여 한반도의 기온 변화에 대한 분석을 실시하였다. 1xCO<sub>2</sub>와 2xCO<sub>2</sub> 상황에서 한반도 기온의 변화를 정리하여 나타내면 표 5와 같다. 표 5에서 1xCO<sub>2</sub>와 2xCO<sub>2</sub> 상황의 한반도 연평균 기온은 각각 9.0℃와 11.5℃로 모의되었음을 알 수 있다. 남한 지역의 연평균 기온은 11.9℃로 나타났는데 관측된 30년 평균 기온이 이 약 1~1.2℃임을 감안한다면 GCM을 통한 모의에서 기온의 경우는 상당한 신뢰성을 가지는 결과를 산출함을 확인할 수 있다.

표 4. 적설 분류

분류번호	최대적설심(cm)	분류번호	최대적설심(cm)
1	0 ~ 50	5	200 ~ 300
2	50 ~ 100	6	300 ~ 400
3	100 ~ 150	7	400 ~
4	150 ~ 200		

이와 같이 IRSHAM96 모형의 모의를 통해 분석되어 표 5와 그림 5에 나타난 CO<sub>2</sub> 배증에 따른 한반도의 기온 변화 특성을 살펴보면 다음과 같다. 표 5와 그림 5를 통해 알 수 있듯이 지구온난화에 따라 한반도에서의 연평균 기온은 2.5℃ 정도 상승하는 것으로 나타났으며, 공간적으로 남한과 북한으로 분리할 경우에도 똑같이 연평균 2.5℃가 상승함을 보였다.

이는 강인식(1994)이 4개의 GCM을 이용하여 CO<sub>2</sub> 배증에 따른 한반도 연평균 기온이 3.5~4.7℃ 정도 증가할 것이라고 예측한 결과보다는 약간은 적은 상승폭이지만, IPCC(1990)에 의해 보고된 CO<sub>2</sub> 배증에 따른 전 지구적 평균 기온의 상승폭이 1.5~4.0℃ 정도임을 감안한다면 합리적인 결과로 판단할 수 있다.

이와 같은 지구온난화에 따른 한반도의 기온 변화를 시간적으로 살펴본다면, 공통적으로 2월과 11월이 각각 4.5℃와 5.5℃의 높은 상승을 보였으며 상대적으로 1월과 3월이 각각 0.7℃와 0.2℃의 낮은 상승폭을 보

표 5. 1xCO<sub>2</sub>와 2xCO<sub>2</sub> 상황에서 한반도 기온(°C)의 변화

구분	월	1												년
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
한반도	1xCO <sub>2</sub>	-5.4	-4.6	3.3	6.0	14.6	21.6	23.7	23.7	18.1	10.8	0.1	-4.1	9.0
	2xCO <sub>2</sub>	-4.7	-0.1	3.5	9.0	17.5	23.7	25.6	25.3	21.3	13.5	5.6	-2.7	11.5
	변화	0.7	4.5	0.2	3.0	2.9	2.1	1.9	1.6	3.2	2.7	5.5	1.4	2.5
남한	1xCO <sub>2</sub>	-1.3	-0.5	6.6	10.1	17.8	23.1	24.7	25.3	20.4	13.4	3.4	-0.3	11.9
	2xCO <sub>2</sub>	-0.5	4.1	7.0	12.6	20.0	25.1	26.9	26.9	23.8	16.0	8.9	1.6	14.4
	변화	0.8	4.6	0.4	2.5	2.2	2.0	2.2	1.6	3.4	2.6	5.5	1.9	2.5
북한	1xCO <sub>2</sub>	-8.2	-7.3	1.1	3.3	12.4	20.6	23.0	22.6	16.4	9.0	-2.0	-6.7	7.0
	2xCO <sub>2</sub>	-7.5	-2.9	1.1	6.5	15.8	22.8	24.7	24.2	19.5	12.0	3.3	-5.5	9.5
	변화	0.7	4.4	0.0	3.2	3.4	2.2	1.7	1.6	3.1	3.0	5.3	1.2	2.5
한강	1xCO <sub>2</sub>	-3.8	-3.5	4.0	7.2	15.6	21.7	23.5	23.8	18.4	10.8	0.6	-2.9	9.6
	2xCO <sub>2</sub>	-3.4	1.9	4.9	10.2	17.9	24.3	25.7	25.5	22.4	13.4	6.6	-1.3	12.3
	변화	0.4	5.4	0.9	3.0	2.3	2.6	2.2	1.7	4.0	2.6	6.0	1.6	2.7
낙동강	1xCO <sub>2</sub>	-1.7	-0.9	6.0	9.3	17.1	21.9	23.3	24.9	19.7	12.7	2.8	-0.7	11.2
	2xCO <sub>2</sub>	-0.3	4.1	6.3	11.6	19.7	24.0	25.8	26.6	23.6	14.9	8.3	1.4	13.8
	변화	1.4	5.0	0.3	2.3	2.6	2.1	2.5	1.7	3.9	2.2	5.5	2.1	2.6
금강	1xCO <sub>2</sub>	-1.7	-0.5	6.4	9.7	17.3	22.9	24.5	24.3	20.1	13.4	3.1	-0.7	11.6
	2xCO <sub>2</sub>	-1.3	3.7	6.8	12.2	19.3	24.6	26.4	26.3	23.4	16.0	8.7	1.2	13.9
	변화	0.4	4.2	0.4	2.5	2.0	1.7	1.9	2.0	3.3	2.6	5.6	1.9	2.3
섬진강	1xCO <sub>2</sub>	-0.3	0.7	6.9	10.7	17.5	22.4	23.9	24.1	20.4	14.2	4.4	0.8	12.1
	2xCO <sub>2</sub>	-0.1	4.6	7.5	12.6	19.7	24.3	26.1	26.1	23.6	16.8	9.8	2.8	14.5
	변화	0.2	3.9	0.6	1.9	2.2	1.9	2.2	2.0	3.2	2.6	5.4	2.0	2.4
영산강	1xCO <sub>2</sub>	0.4	1.7	7.9	12.3	18.5	23.9	25.4	24.7	21.2	14.8	5.2	1.5	13.1
	2xCO <sub>2</sub>	0.7	4.9	8.4	14.0	20.7	25.5	27.4	26.5	23.7	17.7	10.4	3.5	15.3
	변화	0.3	3.2	0.5	1.7	2.2	1.6	2.0	1.8	2.5	2.9	5.2	2.0	2.2
임진강	1xCO <sub>2</sub>	-4.1	-4.1	3.9	7.0	15.6	22.7	24.5	24.9	19.2	11.5	0.7	-3.3	9.9
	2xCO <sub>2</sub>	-3.9	1.7	4.6	10.4	18.4	25.2	26.6	26.6	23.0	14.0	6.9	-2.0	12.6
	변화	0.2	5.8	0.7	3.4	2.8	2.5	2.1	1.7	3.8	2.5	6.2	1.3	2.7

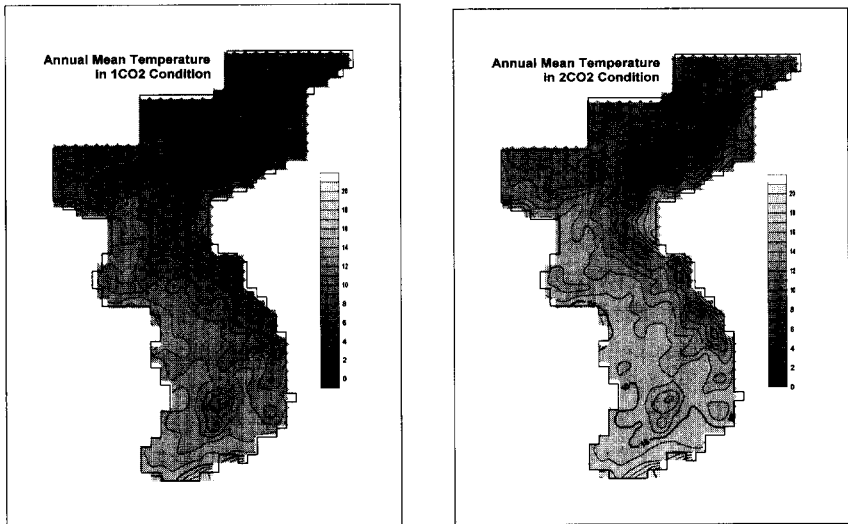


그림 5. 1xCO<sub>2</sub>와 2xCO<sub>2</sub> 상황에서 한반도 연평균 기온(°C)의 변화



였다. 이러한 CO<sub>2</sub> 배증에 따른 한반도의 기온 상승이 시사하는 바는 무척 크다. 즉, 모든 시기에 기온이 상승되기는 하지만 겨울이 시작되는 11월과 끝나는 2월의 기온 상승폭이 상대적으로 무척 크다는 것이며, 이는 지구온난화에 따라 겨울이라는 계절의 길이가 짧아질 가능성이 높아진다는 것이다.

이와 같은 계절적인 변화는 한반도 생태계에 커다란 변화가 초래될 가능성이 높아진다는 것이며, 다른 계절의 기온도 지구온난화에 따라 상대적으로 높아질 것을 감안한다면 생태계에 커다란 재앙으로도 다가올 수 있을 것이다. 또한, 강수량 변화의 분석을 통해 겨울철 강수량의 감소 가능성이 아주 높을 것이라고 판단할 때 겨울철의 상대적으로 높은 기온 상승은 수자원의 특성에도 커다란 변화가 생길 수 있음을 시사한다고 하겠다.

지구온난화에 따른 기온의 공간적인 변화를 살펴보면, 위에서 언급한 것처럼 남한과 북한은 모두 연평균 2.5°C의 기온 상승이 예측되고 있다. 유역별로는 상대적으로 북쪽에 위치한 한강과 임진강의 연평균 기온 상승이 약 2.7 정도로 가장 높고, 남쪽에 위치한 영산강 유역의 2.2°C 정도로 가장 낮은 특성을 보여주고 있다. 또한 시간적인 변화 특성은 한반도 전체의 경우와 마찬가지로 모든 유역에서 2월과 11월의 상대적인 높은 상승이, 1월과 3월의 상대적인 낮은 상승이 공통적으로 나타나고 있다.

따라서, 이러한 기온특성의 변화로부터 CO<sub>2</sub> 증가에 따른 지구온난화 현상에 의해 한반도에서 연평균 2.5°C 정도의 기온 상승과 겨울이라는 계절이 짧아질 가능성이 아주 높을 것임을 파악할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 최근 들어 빈번해지고 있는 기상이변들의 가장 큰 원인으로 지목 받고 있는 지구온난화 현상이 한반도 기온의 변화에 끼치는 영향에 대한 분석을 시도하였다. 이를 위해 본 연구에서는 지표와 대기 간의 에너지 및 수분의 순환을 고려하는 적절한 모형을 선택한 후, 이 모형의 입력자료로 한반도에 있어서의 수문자료, 기상자료 및 지표면자료에 대한 데이터 베이스를 구축하였으며, 지구온난화에 따른 한반도에서의 기온변화 특성을 CO<sub>2</sub>의 증가 시나리오에 따라 모의한 대기대순환모형 결과를 이용하여 분석하였다.

본 연구에서는 이상과 같은 분석 과정을 통해서, 최종적으로 지구온난화에 의한 한반도 기온의 변화에 대

해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 지구온난화에 따른 유역규모의 변화를 살펴보기 위해서, 지표면과정과 대기과정 사이의 상호작용이 고려되면서 수십km 정도의 해상도를 가진 국지규모 모형인 IRSHAM96 모형을 선정하였으며, 한반도의 특성을 반영하는 기상, 수문 및 지형 정보들을 입력자료로 구축하였다.

2) IPCC(1990)의 CO<sub>2</sub> 증가 시나리오에 따라 모의된 GCM 자료를 한반도에 적용 가능하도록 구축된 IRSHAM96 모형에 입력하여 모의하였다. 이를 통해 CO<sub>2</sub> 배증에 따라 한반도의 기온은 연평균 2.5°C 정도의 상승이 예측되었으며, 2월과 11월의 기온이 각각 4.5°C와 5.5°C의 높은 상승이 예상되어 겨울이라는 계절이 짧아질 수도 있을 것으로 분석되었다.

3) 유역별로는 상대적으로 북쪽에 위치한 한강과 임진강의 연평균 기온 상승이 약 2.7 정도로 가장 높으며, 남쪽에 위치한 영산강 유역은 2.2°C 정도로 가장 낮은 기온 상승이 예측되었다.

본 연구의 결과는 기본적으로 GCM의 모의결과에 기초하여 수행된 것이다. 따라서, 예측의 신뢰도는 GCM의 결과와 이를 분석한 모형이 가지는 물리적 과정의 정확성에 좌우되게 된다. 그러나, 현재까지의 기술수준으로는 GCM 자체의 불확실성이 너무 큰 것이 사실이며, 본 연구의 결과도 이러한 GCM의 한계를 감안하면서 이해되어야 할 것이다.

현재 GCM의 정확도는 컴퓨터의 발달과 더불어 계속해서 향상되는 추세이며, 추후 이러한 기술의 진보에 따라 얻어지는 정보를 이용한다면 지구환경의 변화에 대한 분석 및 예측에서 좀더 나은 결과를 도출해낼 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

강인식 (1994). "지구온난화와 동반된 한반도 기온변화의 시나리오 연구(I)." 한국기상학회지, 한국기상학회, 제30권, 제2호, pp. 247~260.

서용원, 김영오 (2000). "선진국의 기후변화 연구동향(I) : 유출에 대한 영향을 중심으로." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제33권, 제3호, pp. 22~31.

차종환, 이우철, 이순애 (1974). 한국의 기후와 식생, 문운당.

- 한국과학기술연구원 (1993a). 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움 : II. 해양, 수문학 분야, 기상청.
- 한국과학기술연구원 (1993b). 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움 : IV. 기후변화 예측 시나리오, 기상청.
- 한국과학기술연구원 (1994). 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구 환경관련 대책 연구(I), 과학기술처.
- 한국과학기술연구원 (1995). 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구 환경관련 대책 연구(II), 과학기술처.
- 한국과학기술연구원, 시스템공학연구소 (1993). 지구 환경 감시 및 기후 변화 예측 기술, 기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발연구(I), 환경부, 과학기술처.
- 한국과학기술연구원, 시스템공학연구소 (1994). 지구 환경 감시 및 기후 변화 예측 기술, 기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발연구(II), 환경부, 과학기술처.
- 한국과학기술연구원, 시스템공학연구소 (1995). 지구 환경 감시 및 기후 변화 예측 기술, 기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발연구(III), 환경부, 과학기술처.
- 日本 土木研究所 (1996). 地球温暖化が日本域における水文循環に及ぼす影響の豫測に関する研究報告書, 日本 建設省.
- Chen, Z-Q, Govindaraju, R.S. and Kavvas, M.L. (1994a). "Spatial averaging of unsaturated flow equations under infiltration conditions over areally heterogeneous fields : 1. Development of models." *Water Resource Research*, Vol. 30, No. 2, pp. 523~533.
- Chen, Z-Q, Govindaraju, R.S. and Kavvas, M.L. (1994b). "Spatial averaging of unsaturated flow equations under infiltration conditions over areally heterogeneous fields : 2. Numerical simulations." *Water Resource Research*, Vol. 30, No. 2, pp. 535~548.
- Conway, D., Wilby, R.L. and Jones, P.D. (1996). "Precipitation and air flow indices over the British Isles." *Climate Research*, 7, pp. 169~183.
- Grotch, S.L. and MacCracken, M.C. (1991). "The use of general circulation models to predict regional climate change." *J. of Climate*, 4, pp. 286~303.
- Gyalistras, D., von Storch, H., Fischlin, A. and Beniston, M. (1994). "Linking GCM-simulated climatic changes to ecosystem models: case studies of statistical downscaling in the Alps." *Climate Research*, 4, pp. 167~189.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (1990) *Climate Change : The IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kavvas, M.L., Chen, Z-Q and Tan, L. (1995). *Development of a mesoscale atmospheric model for the scale of Japan: Phase 4-Climate change study of Japan by fully coupled small domain hydrologic-atmospheric model of Japan*, Dept. of Civil & Envir. Eng., Univ. of California, Davis.
- Manabe, S. and Wetherald, R.T. (1975). "The effect of doubling CO<sub>2</sub> concentration on the climate of a general circulation model." *J. Atmos. Sci.*, 32, pp. 3~15.
- Wilby, R.L. (1994). "Stochastic weather type simulation for regional climate change impact assessment." *Water Resources Research*, 30, pp. 3395~3403.
- Wilby, R.L. (1997). "Non-stationarity in daily precipitation series: implications for GCM downscaling using atmospheric circulation indices." *International Journal of Climatology*, 17, pp. 439~454.
- Wilby, R.L. and Wigley, T.M.L. (1997). "Downscaling General Circulation Model output: a review of methods and limitations." *Progress in Physical Geography*, 21, pp. 530~548.

(논문번호:01-014/접수:2001.02.17/심사완료:2001.06.08)