韓國水資源學會論文集
第36卷 第3號 · 2003年 6月
pp. 345~363

전이함수모형과 일기발생모형을 이용한 유역규모 기후변화시나리오의 작성

Construction of Basin Scale Climate Change Scenarios by the Transfer Function and Stochastic Weather Generation Models

김 병 식* / 서 병 하** / 김 남 원***
Kim, Byung-Sik / Seoh, Byung-Ha / Kim, Nam-Won

Abstract

From the General Circulation Models(GCMs), it is known that the increases of concentrations of greenhouse gases will have significant implications for climate change in global and regional scales. The GCM has an uncertainty in analyzing the meteorologic processes at individual sites and so the "downscaling" techniques are used to bridge the spatial and temporal resolution gaps between what, at present, climate modellers can provide and what impact assessors require. This paper describes a method for assessing local climate change impacts using a robust statistical downscaling technique. The method facilitates the rapid development of multiple, low-cost, single-site scenarios of daily surface weather variables under current and future regional climate forcing. The construction of climate change scenarios based on spatial regression(transfer function) downscaling and on the use of a local stochastic weather generator is described. Regression downscaling translates the GCM grid-box predictions with coarse resolution of climate change to site-specific values and the values were then used to perturb the parameters of the stochastic weather generator in order to simulate site-specific daily weather values. In this study, the global climate change scenarios are constructed using the YONU GCM control run and transient experiments.

Keywords : Downscaling, General circulation models, Climate change, Weather generator model

* 인하대학교 토목공학과 박사과정
Doctoral Student, Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon, 402-751, Korea
(E-mail : hydrokbs@orgio.net)
** 인하대학교 토목공학과 교수
Prof., Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon, 402-751, Korea
(E-mail : seohydro@inha.ac.kr)
*** 한국건설기술연구원 수석연구원
Senior Researcher, KICT, Koyang, Kyungido, 411-712, Korea
(E-mail : nwkim@kict.re.kr)

요 지

대기순환모형(GCM)에 의하면 온실가스농도의 증가는 전구와 국지규모의 기후변화에 중요한 관련이 있음이 알려져 있다. GCM은 단일지점의 기상학적 순환과정을 분석하는데는 불확실성을 지니고 있기 때문에 현재로서는 축소기법이 대기순환모형(GCM)의 개발자들이 제공할 수 있는 것과 모형을 이용하여 기후영향을 평가하는 연구자들이 요구하는 것 사이의 차이점을 연계하기 위해 이용되고 있다. 본 논문에서는 통계학적 축소기법을 이용하여 국지규모의 기후변화의 영향을 평가할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다. 본 방법을 이용한다면 현재와 미래의 국지적 규모의 기후강제력 하에서의 지표 기상변수의 시나리오를 저 비용으로 신속하게 작성할 수 있다. 기후변화시나리오의 작성은 통계학적 회귀방법인 전이함수와 추계학적 일기발생모형을 이용하였다. 전이함수는 저해상도의 GCM 격자 변수들을 고해상도의 단일 지점의 변수들로 변환시키며, 이 변수들은 단일 지점의 특정 일 지표 기상변수를 모의하기 위해 추계학적 일기발생 모형의 매개변수를 수정하는데 이용되었다. 본 연구에서는 YONU GCM을 이용하여 제어실험과 점증실험을 실시하여 전구규모의 기후변화시나리오를 작성하였다.

핵심용어 : 축소기법, 대기순환모형, 기후변화, 일기발생모형

1. 서 론

수자원의 효율적 관리는 물의 수요와 공급을 얼마나 정확히 예측하느냐에 달려 있다. 최근 학자들의 관심이 집중되고 있는 기후변화(climate change)는 수문현상에 많은 영향을 미쳐, 이러한 수문학적 예측을 더욱 어렵게 하고 있다. 최근 들어 세계 각국에서는 자연적 또는 인간에 의해 야기된 지구환경변화와 사회, 경제와의 연관성에 지대한 관심을 기울이고 있는데, 이것은 비록 지구가 수백만 년에 걸쳐 변화되어 왔지만 남극의 오존 감소, 대기권에서의 이산화탄소의 증가와 같은 최근의 급격한 변화는 인간활동이 지구시스템에 영향을 미치고 또 영향을 받음을 보여주고 있는 것이기 때문이다. 지구환경은 끊임없이 변화고 있으므로 20세기에 비추어 볼 때 21세기는 상당히 다르게 변할 것이며, 이러한 변화의 일부는 인간활동에 의한 결과이면서 또한 인간의 통제할 수 없는 자연적인 현상의 결과이기도 하다. 이와 같은 지구환경의 변화를 현재의 과학으로는 정확히 이해하고 예측할 수는 없는 실정이다. 하지만, 이러한 지구환경의 변화는 엄연한 현실로 다가와 있으며 세계 각국에서는 이에 따른 영향이 전구적으로 어떤 식으로 나타날 것인가에 대해 연구를 지속적으로 실시하고 있다(안재현, 2001). WMO(세계기상기구)와 UNEP(국제연합 환경 프로그램)는 1988년에 정부간 기후변화 협의회(IPCC)를 조직하였으며, IPCC의 보고에 의하면 온실효과 기체의 증가경향이 현재와 같이 계속된다면 2030년도에는 이산화탄소 농도 관측이 게시된 1958년의 2배에 달하게 된다. 어떤 경우에도 현재 예상되는 지구 온난화가 지구의 생태계, 산업활동과 인간의 생활에 영향을 미칠 것은 틀림없는 사실이다. 따라서 비록 불확실성이 어느 정도 내포되어 있다고 해도 미래 기후에 대한 정보가 필요하다. 미래의 기후 변화에 대한 시나리오는 다음 두 가지 방법에 의하여 작성된다. 첫째는 과거자료로부터 미래기후를 추정하는 유사법이며. 둘째로는 각종 물리 과정을 포함한 수치 모델을 활용하여 실제로 미래 기후를 모의하는 방법이 있다. 이러한 기후변화에 대처하기 위해서는 그에 적합한 전략이 필요하며 그러기 위해서는 최대한 빠르게 그 영향을 평가하는 것이 중요하다. 기후변화의 영향을 예측하는 유일한 물리적 기구는 대기 순환모형(GCM)뿐이다. GCM은 약 30분에서부터 몇 시간까지의 세밀한 시간단위의 해상도를 가지나 공간적으로는 수백 km의 저 해상도를 지니고 있다. 기온, 강수, 바람, 복사량, 기압 같은 기상학적 변수들이 이 모형에 의해서 모의될 수 있으나 불행하게도 강우-유출 모형의 주 입력자료인 강수량은 GCM에 의해서 잘 모의되지 않으며, GCM 실험의 단일격자의 값이 특정지역의 대표적인 강수량으로 볼 수 없다. 그러므로, GCM 격자의 크기가 수문학적으로 의미가 있는 유역규모로 축소하는 과정이 필요하다.

본 연구에서는 유역 규모의 기후변화시나리오를 작성하기 위한 방법을 살펴보았으며 그 중에서 전이함수과 추계학적 일기발생모형을 이용하여 우리나라의 실제 유역에 대하여 유역규모의 기후변화시나리오를 작성하였다.

표 1. 기후변화 시나리오를 중소규모 유역에 적용한 연구사례

논문명(제목)	연도	(연구자)	연구내용
The effects of climate change on monthly river runoff	1992	Jame R. Miller	기후변화가 월유출량에 미치는 영향에 대한 분석
Effects of climate changes on water supplies	1992	K.R cooley	기후변화가 용수공급에 미치는 영향에 대한 분석
Downscaling GCM information to regional scales a non-parametric multivariate regression approach	1995	Joao Corte-Real,	비매개변수적 다변량 회귀식을 통한 축소기법의 개발
Statistical downscaling of hydrometeorologica variable using general circulation model output	1997	Robert L.wilby	통계적 방법을 통한 수문기상학적인자의 축소
Estimates of runoff using water - balance And atmospheric general circulation model	1999	David M	GCM(CCC)모형과 물수지분석을 통해 연 유출량의 변동성 분석
A comparison of downscaled and raw GCM output: implications for climate change scenarios in the Sanjurn River basin, Colorado	1999	R.L Willy	GCM의 원 수문기상인자와 축소된 수문기인자를 이용하여 유출량을 모의했을 때의 차이점 비교분석
Downscaled climate and streamflow tudy of the southwestern united states	1999	Norman L. Miller	통계적 방법을 통한 축소된 기후시나리오과 강우-유출모형을 통한 유출량의 산정
Precipitation differences amongst GCMs used for the U.S national assessment	1999	Benjamin Felzer	GCM모형에 따른 예측 강우량의 차이점 비교
General circulation_model simulations of future snowpack in the western united states	1999	Gregory J. McCabe	기후변화가 미국서부의 융설에 미치는 영향 분석
Potential consequences of climate variability and change for the water resources of the united states	1999	Katharine Jacobs	기후변화가 미국의 수자원, 농업, 임업, 해수면, 해안구조물, 수산자원 등에 미치는 영향을 분석

표 2. 기후변화 시나리오를 중소규모 유역에 적용한 연구사례

논문명(제목)	연도	(연구자)	연구내용
Simulation mean monthly precipit ation and streamflow in an east asia watershed	1999	Norman L Miller and Jinwon Kim	통계적 방법을 통한 축소된 기후시나리오을 이용한 강우량자료의 모의, 강우-유출모형을 통한 유출량의 산정
Uncertainty in Regional climate precipitation forecasts applied to streamflow	1999	Phaedon C. kyriakidis	중규모 순환모형에 의한 강우예측과 강우-유출모형을 통한 유출량의 산정
From GCM scales to hydrological scales : Rainfall variability in West Africa	2000	T. Lebel F. Delclaux	GCM의 격자크기가 강우량 변동에 미치는 민감도 분석(서부 아프리카 대륙)
Climate change sensitivity analysis for two california watersheds; addendum to downscaled climate and streamflow stu dy of the southwestern united states	2000	Norman L Miller	기후변화가 유역 유출량에 미치는 영향에 대한 민감도 분석
A comparison delta change and dow nscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the unites states	2000	Lauren E. Hay	통계적 축소기법과 delta change 방법을 이용한 기후시나리오의 비교 / PRMS 모형을 이용한 유출량의 산정
Statistical downscaling of GCM simulations to streamflow	2001	Willem A Landman	통계적 방법을 통한 축소된 GCM 결과를 이용하여 유출량의 산정 및 민감도 분석
A regional climate model for nort hern Europe model description and result from the downscaling of two GCM control simulations	2001	M. Rummukainen,J. R	유럽지역의 중규모 대기순환모형의 개발과 적용

2. 기후변화시나리오의 수자원 분야 적용에 관한 국외 연구동향

현재 GCM의 결과로부터 지역 기후를 만드는 방법으로는 내삽법, 제한 구역 모델 모의, 전이함수(transfer function)을 이용하는 방법, 혼합 경험-역학적접근(Mixed empircal-dynamic approach, MEDA)방법 등이 있다. 위의 방법은 모두 GCM의 결과를 이용하기 때문에 GCM의 능력에 의해 지배되는데 특성을 갖는다(김맹기, 1997) 본 논문에서는 축소기법 중 통계적인 방법론과 기후변화 시나리오를 중소규모 유역에 적용한 연구사례를 살펴보았다. 표 1과 2는 국외 연구사례를 정리한 것이다

3. 축소기법(Downscaling Technique)

기후변화가 수자원시스템에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 기후변화로 예측되는 하천유출 시나리오(streamflow scenarios)가 필요하다. 일반적으로 GCM 결과를 기존의 강우-유출모형에 이용하여 하천유출 시나리오를 발생시키는 Coupled precipitation- Streamflow 기법(그림 1.)이 널리 사용되고 있다. 이 기법은 주어진 기후변화에 대한 유역의 하천유출량의 변화양상을 예측하는 것으로서 GCM의 결과를 수문모형의 입력 자료로 적용할 때 GCM에 따라 기후 모의결과 얻어진 강수계열을 그대로 사용할 수도 있고, 강수량 증감율을 사용할 수도 있다. Coupled precipitation- Streamflow 기법을 사용하여 하천유출 시나리오를 작성하는 데 있어 GCM의 문제점은 공간적인 분해능(spatial resolution)이 낮다는 것이다. 대부분의 모형의 격자간격은 위도와 경도로 5。 내외로서 거리로서는 500km 이상이 된다. 그러므로 우리나라와 같이 500km ×500km이하인 반도나 섬은 무시되어 표면이 바다인 것으로 취급되기도 한다. 또한 기후요소를 결정하는데 중요한 지형효과는 해안선과 산맥인데 미국의 애팔라치아 산맥도 분해가 되지않을 정도로 분해능이 낮으므로(Cooter et al. 1993), GCM의 결과는 이러한 지형효과가 나타나지 않는다. 그러므로 우리나라의 기후에 중요한 역할을 하는 태백산맥은 물론 한반도의 존재가 무시되기도 하므로 지역적인 기후요소의 계산에는 오차가 생길 수 밖에 없다. 또한, GCM의 결과를 이용하는데 있어서 또 다른 문제점은 시간분해능(temporal resolution)이다. 현재 이용 가능한 GCM의 결과는 대부분 월 평균으로 주어지지만, 기후의 변화에 따른 수자원에의 영향을 평가하기 위하여 짧은 시간간격의 변수값이 필요한 경우에는 이용이 곤란하다(Cooter et al. 1993). GCM 모의에서 사용되어지는 변수들이 하천유출 시나리오 작성에 시공간적으로 비현실적이지만 축소기법(downscaling technique)을 적용하면 이런 문제를 해결할 수 있다. 축소기법은 크게 지역기후모형(RCM)을 이용하는 기법과 통계학적 축소(statistical downscaling)기법으로 구분된다. 통계학적 축소기법에 사용되는 대표적인 방법은 전이함수(Transfer functions)법, 일기발생(Weather generator)법, 일기분류(Weather Type)법 등이 있다. 표 3은 통계학적 축소기법의 적용사례를 나타낸 것이다.

4. 이 론

4.1 전이함수 모형의 이론 및 구성

본 연구에서는 CCIS(Canadian Climate Impacts Scenarios) project, ACACIA(A Consortium for

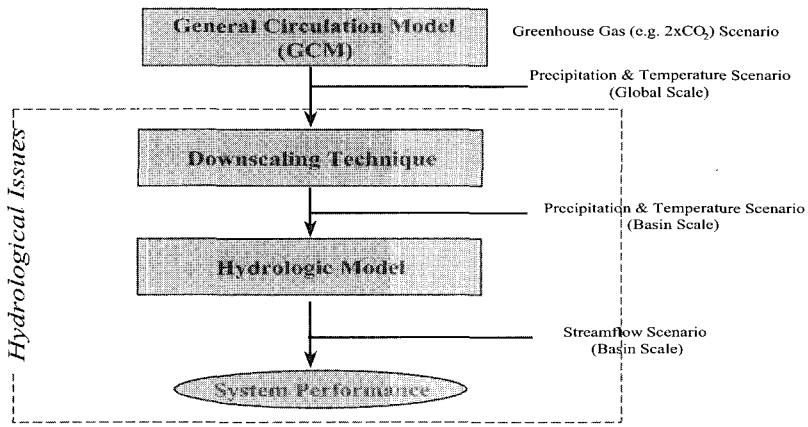

그림 1. Coupled Precipitation - Streamflow System

표 3. 통계학적 축소기법의 적용사례 (IPCC, 1996)

Region	Technique	Predictor	Predictand	Time	Author (s)
Africa					
South Africa	TF	C	P	D	Hewitson and Crane, 1996
America					
USA	WT	T	Tmax, Tmin	D	Brown and Katz, 1995
USA	WG	C	P	D	Zorita *et al.*, 1995
USA	WG, TF	C, T, VOR	P	D	Wilby and Wigley, 1997
USA	TF	C, Q	P	D	Crane and Hewitson, 1998
USA	WG, TF	C, T, VOR	T, P	D	Wilby *et al.*, 1998a, b
USA	WG, WT	C	T, P	D	Mearns *et al.*, 1999
USA	TF	C, T, RH, W	T	D	Sailor and Li, 1999
USA	WG		P	D	Bellone *et al.*, 1999
Mexico and USA	TF	C, TH, O	P	D	Cavazos, 1997
Mexico and USA	TF, WT	C, TH, Q	P	D	Cavazos, 1999
Central Argentina	TF	C, W	T, Tmax, Tmin	M	Solman and Nuñez, 1999
Asia					
Japanese coast	TF	C	Sea level	M	Cui *et al.*, 1995, 1996
Chinese coast	TF		Sea level variability	M	Cui and Zorita, 1998
Oceania					
New Zealand	WT	C	Tmax, Tmin, P	D	Kidson and Watterson, 1995
New Zealand	TF	C,TH,VOR,W	T, P	D	Kidson and Thompson, 1998
Australia	TF	C	Tmax, Tmin	D	Schubert and Henderson-Sellers, 1997
Australia	TF	C	Tmax, Tmin	D	Schubert, 1998
Australia	WT	C, T	P		Timbal and McAvaney, 1999
Australia	WT				Schnur and Lettenmaier, 1999
Europe					
Europe	WG	VOR, W			Conoway *et al.*, 1996
Europe	WG, TF	C, P, Tmax, Tmin, O	T, P	D	Semenov and Barrow, 1996
Europe	TF	C, W, VOR, T, Q, O	T, P	M	Murphy, 1998a, b
Europe	TF	C	T, P, vapour pressure	D	Weichert and Bürger, 1998
Germany	TF	T	Phenological event		Maak and vanStorch, 1997
Germany	TF	C	Storm surge	M	Von Storch and Reichardt, 1997
Germany	TF		Salinity		Heyen and Dippner, 1998
Germany	WT		Thunderstorms	D	Sept, 1998
Germany	TF		Ecological variables		Krönke *et al.*, 1998
Iberian Peninsula	WG	C	P	D	Cubash *et al.*, 1996
Iberian Peninsula	TF	C	Tmax, Tmin	D	Trigo and Palutikof, 1998
Iberian Peninsula	TF		T, P		Boren *et al.*, 1999
Iberian Peninsula	TF		T, P		Ribalaygua *et al.*, 1999
Spain (and USA)	TF	C	Tmax, Tmin	D	Palutikof *et al.*, 1997
Spain (and USA)	TF	C	Tmax, Tmin	D	Winkler *et al.*, 1997
Spain	WT			D	Goodess and Palutikof, 1998

주) **Technique** (utilised in the above categories):
WG = weather generators (e.g.: Markov-type procedures, conditional probability).
TF = transfer functions (e.g.: Regression, canonical correlation analysis, and artificial neural networks).
WT = weather typing (e.g.: cluster analysis, self-organising map, and extreme value distribution).
Predictor variables: C = circulation based (e.g.: sea level pressure fields and geopotential height fields).
T = temperature (at surface or on one or more atmospheric levels). TH = thickness between pressure levels.
VOR = vorticity. W = wind related. Q = specific humidity (at surface or on one or more atmospheric levels).
RH = relative humidity (at surface or on one or more atmospheric levels). Cld = cloud cover.
ZG = spatial gradients of the predictors. O = other.
Predictands: T (temperature); Tmax (maximum temperature); Tmin (minimum temperature); P (precipitation).
Region is the geographic domain.
Time is the time-scale of the predictor and predictand: H (hourly), D (daily), M (monthly), S (seasonal), and A(annual).

the applicaion of Climate Impact Assesment 등에서 채택하여 지금까지 수자원분야와 연계하여 사용되고 있는 전이함수모형을 이용한 통계학적 축소모형(SDSM, Statistical DownScaling Model)을 이용하여 유역 규모의 수문 기상자료를 얻었으며 이로부터 유역규모의 기후변화시나리오를 작성하였다. 본 연구에서는 1 CO_2와 2 CO_2의 YONU GCM 실험 결과 자료를 우리나라 주변의 9개의 격자로부터 추출하였으며 1961년부터 1980년 사이에 모의된 YONU GCM 격자점의 자료와 대상 유역의 지역 강수량, 기온등과의 상호상관성을 판단하여 아래의 식과 같이 다변량 회귀식을 만들었으며 이를 이용하여 GCM의 격자자료를 유역의 자료로 축소하였다. 그림 2은 본 연구에서 이용한 SDSM의 흐름도를 나타낸 것이며 그 이론은 다음과 같다.

4.1.1 일 강우사상의 발생

특정 일에 대한 강수 발생 확률을 다음의 회귀식을 이용하여 매개변수를 추정한다.

$$O_i = \alpha_0 + \alpha_{O_{i-1}} O_{i-1} + \alpha_{SH} SH_i + \alpha_{mslp} mslp_i + \alpha_H H_i \quad (1)$$

여기서, O_i : i 날에 있어 습윤일(wet day)일 확률(관측치)

α : 최소제곱법으로부터 추정된 매개변수

SH : 비습도(gm/kg)

mslp : 평균해면기압

H : 500hpa 고도자료(m)

매개변수 α는 최소 제곱법을 이용하여 추정되며, 균등분포난수 r($0 \le r \le 1$)을 발생시켜 $r \le O_i$일 경우에는 그 지역에 대하여 습윤일(wet day)로 판단하며, $r \ge O_i$일 경우에는 그 지역에 대하여 건조일(dry day)

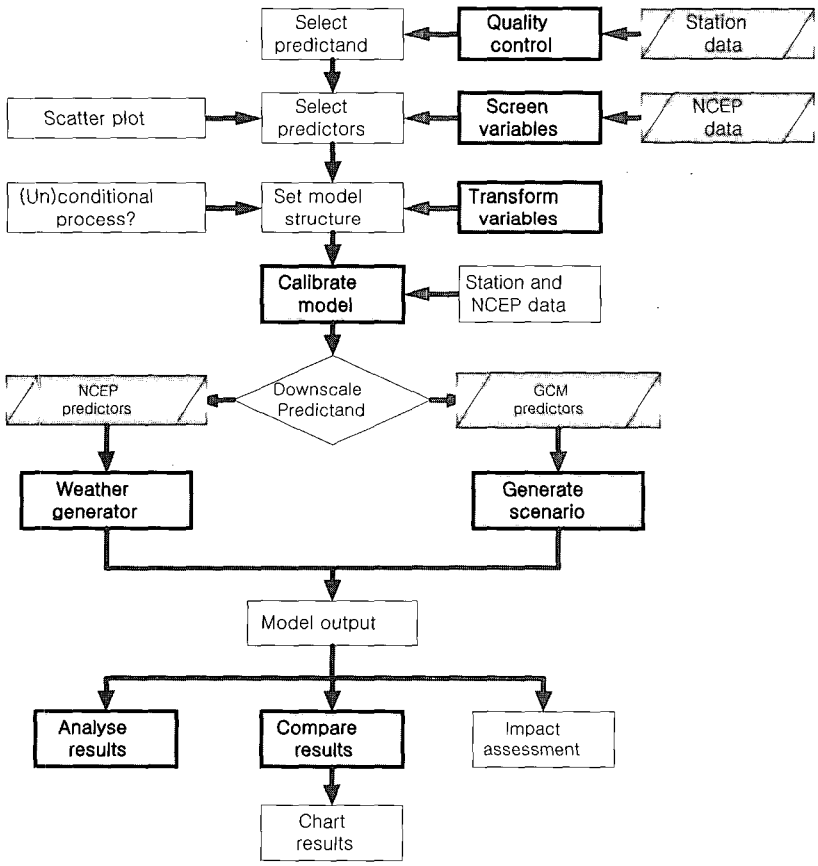

그림 2. 통계학적 축소모형(SDSM)의 흐름도

로 판단한다.

4.1.2 일 강수량 발생

위에서 강수가 발생된다고 판단될 경우에 대하여 세 개의 변수와 지역 강수량간의 관계를 다음의 회귀식을 이용하여 매개변수를 추정한다.

$$R_i = \exp(\beta_0 + \beta_{SH} SH_i + \beta_{mslp} mslp + \beta_H H_i \varepsilon_i) \quad (2)$$

여기서, R_i : 습윤일이 강우량(관측치)
β : 최소제곱법으로부터 추정된 매개변수
SH : 비습도(gm/kg)
mslp : 평균해면기압
H : 500hpa 고도자료(m)
ε : 난수

$$E(R_i) = \Phi C_R \mathrm{EXP}(\beta_O + \beta_{SH} \cdot SH_i + \beta_{mslp} \cdot mslp_i + \beta_H \cdot H_i) \quad (3)$$

여기서, Φ : random scaling factor
C_R : empirically derived correction ratio

4.1.3 일 기온 (TMAX와 TMIN) 발생

$$TMAX_i = \delta_o + \delta_{TMAXi-1} \cdot TMAX_{i-1} + \delta_{SH} \cdot SH_i + \delta_{mslp} \cdot mslp_i + \delta_H \cdot H_i + \varepsilon_i \quad (4)$$

$$TMIN_i = \gamma_o + \gamma_{TMINi-1} \cdot TMIN_{i-1} + \gamma_{SH} \cdot SH_i + \gamma_{mslp} \cdot mslp_i + \gamma_H \cdot H_i + \varepsilon_i \quad (5)$$

여기서, δ 와 γ : 최소제곱법으로부터 추정된 매개변수
ε : 잔차

4.2 추계학적 일기발생모형의 이론 및 구성

통계학적 축소기법(Statistical Downscaling Technique)을 이용하여 기후변화 시나리오를 작성할 경우 지역적 특성을 충분히 반영하지 못하는 단점을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 전이함수를 이용하여 얻은 기후변화 시나리오를 추계학적 일기발생모형(WGEN)을 이용하여 재 모의하였다. 본 모형에 사용된 방정식은 기존의 Richardson(1981)이 제안한 일기발생모형(WGEN, **W**eather **GEN**erator)에 근거를 두고 있으며 기후변화 시나리오에 따라 지역적 특성을 반영할 수 있도록 매개변수를 다음과 같이 수정하였다.

4.2.1 강수 요소

일 개념의 월 매개변수와 월 개념의 평균과 표준편차는 다음과 같은 관계가 성립한다(Wilk, 1992).

$$\mu_I = N\pi\alpha\beta$$
$$\sigma_I^2 \approx N\pi\alpha\beta^2[1 + \alpha(1-\pi) \cdot \frac{1+d}{1-d}] \quad (6)$$

여기서 μ_I는 월 강수량의 평균, σ_I^2는 월 강수량의 표준편차, N는 월의 일수, π는 습윤일의 비 조건부적인 확률, α, β는 감마분포의 규모,형상 매개변수, d는 강수의 지속을 나타내는 지수이다.

위의 관계로부터 기후변화가 반영된($2CO_2$)의 상황에서의 매개변수 α', β', π', d' 을 이용함으로서 기후변화가 반영된 강수를 발생시킬 수 있다.

표 4. 일기발생모형(WGEN)의 매개변수

변 수 명	모 형	매 개 변 수
precip. occurrence	Markov chain (Order=1)	π_1 (강우발생 확률) d (강우지속기간)
precip amount (RAIN)	Gamma distribution	α(scale), β(shape)
solar radiation (SARD) max. temp (Tmax) min. temp (Tmin)	AR model (Order = 1)	two 3*3 matrices - 3*(wet/dry)*(avg/std)

$$\frac{\mu_I'}{\mu_I} = \frac{\pi'\alpha'\beta'}{\pi\alpha\beta}$$
$$\frac{\sigma_I^{2'}}{\sigma_I^2} = \frac{\pi'\alpha'\beta'[1 + \alpha'(1-\pi')\frac{1+d'}{1-d'}}{\pi\alpha\beta[1 + \alpha(1-\pi)\frac{1+d}{1-d}} \quad (7)$$

여기서, '(prime)은 $2CO_2$상황에서의 매개변수를 의미한다.

식(7)의 방정식을 풀기 위해서는 2개의 제약 조건식이 더 필요하다. 기후변화가 반영된 습윤일의 확률(π')과 강수지속강도(d')는 $1CO_2$와 $2CO_2$의 비(Ratio)를 관측치에 곱해줌으로써 산정하였다.

$$\pi = \frac{\pi(2co2)}{\pi(1co2)} \times \pi(obs)$$
$$d' = \frac{d(2co2)}{d(1co2)} \times d(obs) \quad (8)$$

식(8)에서 산정된 습윤일의 확률(π')와 강우지속강도(d')는 마코프 연쇄 모형의 월별 천이확률과 식(9)와 같은 관계가 성립한다.

$$\pi = \frac{p_{01}'}{(1 + p_{01}' - p_{11}')}$$
$$d' = p_{11}' - p_{01}' \quad (9)$$

위 식으로부터 기후변화 반영된(2CO2) 마코프 연쇄 모형의 월별천이 확률을 구할 수 있다.

4.2.2 온도요소

Richardson(1981)은 잔차를 연속적으로 발생시키는데 이용되는 상관계수의 시간적 변화는 작다고 하였다. 따라서 그 작은 변화량은 무시하고 관측치의 값을 적용하였으며, 평균과 편차의 변화율을 고려하여 조화계수 값을 수정하였다.

$2CO_2$에서의 최고온도, 최저온도의 월 평균과 월 표준편차는 주기성을 고려해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_i'(\tau) = \mu_i' + \sum_{k=1}^{p/2}\left(A_k' \cos\frac{2\pi\tau k}{p} + B_k' \sin\frac{2\pi\tau k}{p}\right) \quad (10)$$

여기서 i는 1(Tmax), 2(Tmin), τ는 월(Monthly), A_k와 B_k는 조화계수이다. 식(10)의 '(prime)이 표시된 매개변수는 $1CO_2$ 와 $2CO_2$의 변화를 관측치에 더해줌으로써 구할 수 있다.

$$A_k' = \frac{2}{p}\sum_{\tau=1}^{p}[m_\tau(obs) + (m_\tau(2co2) - m_\tau(1co2))] \cos\frac{2\pi\tau k}{p}$$
$$B_k' = \frac{2}{p}\sum_{\tau=1}^{p}[m_\tau(obs) + (m_\tau(2co2) - m_\tau(1co2))] \sin\frac{2\pi\tau k}{p}$$
$$\mu' = \mu(obs) + (\mu(2co2) - \mu(1co2)) \quad (11)$$

여기서 m_τ는 최고 및 최저온도의 월 평균 및 표준편차, μ는 년 평균 및 표준편차, A_k', B_k'는 조화계수로서 $k \le 2$ 이다.

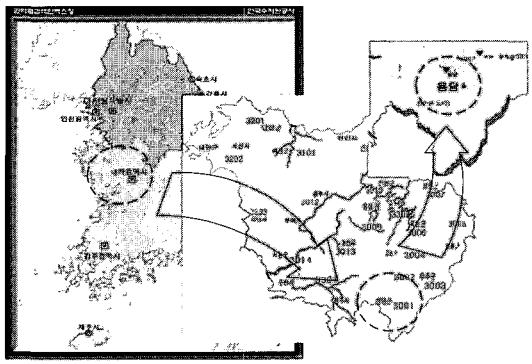

그림 3. 용담댐 유역(한국수자원공사)

표 5. YONU GCM에 의해 모의된 기상변수 자료

Daily	Description
Temp	Mean temperature
Tmax	Maximum temperature
Tmin	Mimimum temperature
Mslp	Mean sea level pressure
P500	500 hPa geopotential height
P850	800 hPa geopotential height
Rhum	Near surface relative humidity
Shum	Near surface specific humidity
S500	Specific humidity at 500 hPa height
S850	Specific humidity at 850 hPa height
P_f	Geostrophic airflow velocity
P_z	Vorticity
P_u	Zonal velocity component
P_v	Meridional velocity component
P_th	Wind direction
P_zh	Divergence

5. 적 용

본 연구에서는 YONU GCM의 기후변화실험(최영진, 2001; 박정현, 2001)에 의해 작성된 우리나라의 기후변화시나리오를 전이함수 모형(Wilby, 2001)과 일기발생 모형(Dubrovsky, 2001)을 이용하여 용담댐 유역(그림 3. 참조)의 기후변화 시나리오를 작성하였다. 본 연구에서 이용한 YONU GCM 자료는 표 5에 수록하였으며 각 격자점과 용담댐 유역의 무주, 진안, 장수 관측소 와의 거리를 고려, 역거리법을 이용하여 하나의 시계열 자료로 만들었다.

5.1 YONU GCM 모형에 의한 기후모의와 기후변화 시나리오의 작성

5.1.1 기후모의 실험

$1CO_2$ 제어실험(control run)과 $2CO_2$ 배증실험을 실

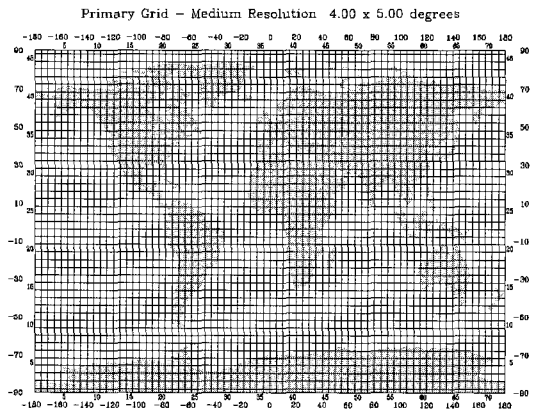

그림 4. 전구에 대한 YONU GCM의 격자망

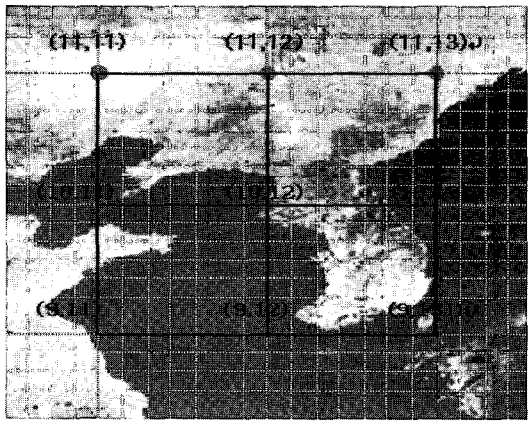

그림 5. YONU GCM 격자점의 위치

시하였으며 현재의 CO_2의 농도는 345ppm으로 처방하였다. 또한, $2CO_2$의 상황의 점증실험은 CO_2의 농도를 매년 1%씩 증가시켜 70년이 되는 해(IPCC, 1994)에 CO_2가 배증되도록 적분하였으며 CO_2가 배증되는 70년을 전후로 하여 61년부터 80년까지의 20년 기간에 대한 기후를 추정하였다. 그러므로 본 연구에서 실시한 기후변화실험의 기간은 현재($1CO_2$)는 1960년부터 1980년이며 미래 ($2CO_2$)는 2031년부터 2050년을 의미한다.

본 연구에서는 사용한 격자의 범위는 위도 0.0°N ~ 50°N(9 격자)와 경도 70.0°E ~ 150°E(14 격자)내의 것으로 이 중 우리나라 주변의 9개의 격자로부터 GCM의 기상변수를 시계열의 형태로 추출하였으며 이 자료를 이용하여 기후변화시나리오를 작성하였다. 그림 4은 YONU GCM의 전구에 대한 격자망을 나타낸 것이며

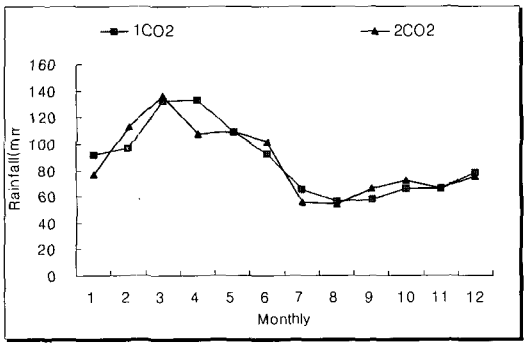

그림 6. 월 평균 강수량

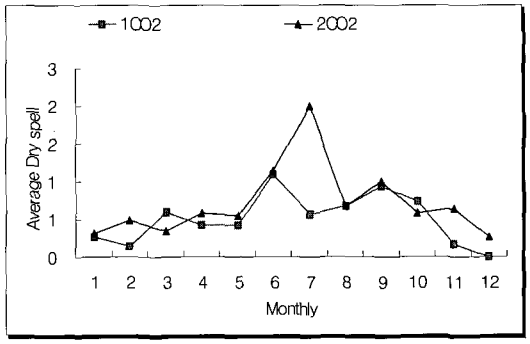

그림 7. 월 평균 건조 지속기간

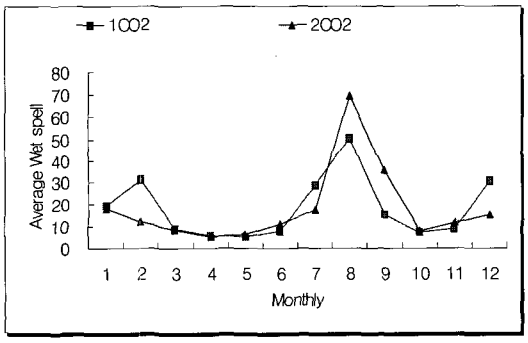

그림 8. 월 평균 습윤 지속기간

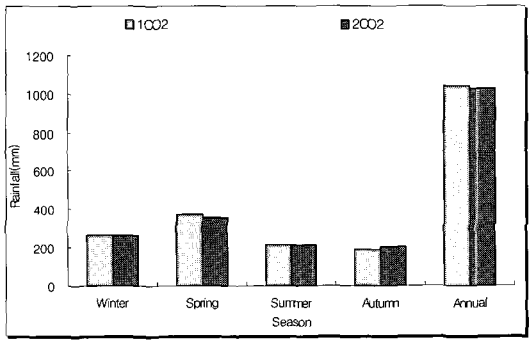

그림 9. 계절별 평균 강수량

그림 10. 월 평균 증발량

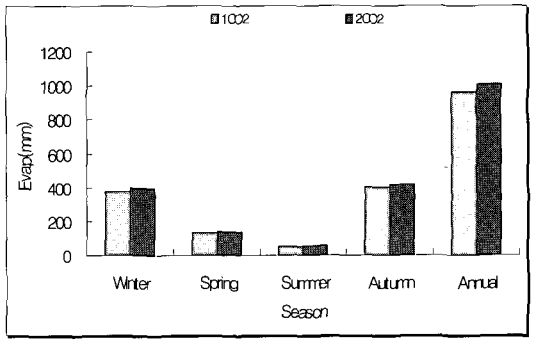

그림 11. 계절 평균 증발량

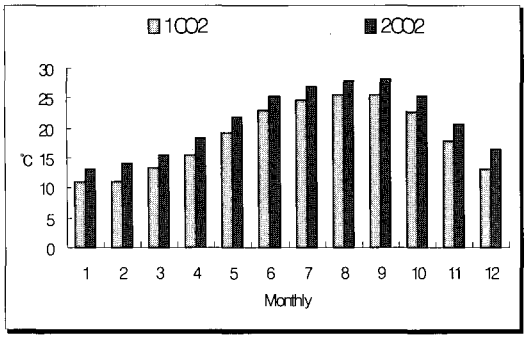

그림 12. 월 평균 최고온도

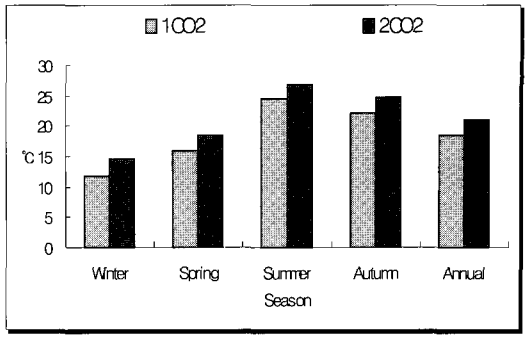

그림 13. 계절별 평균 최고온도

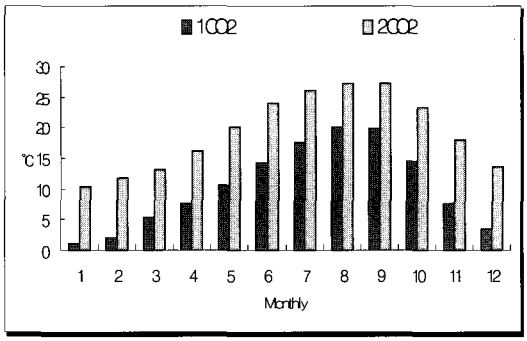

그림 14. 월 평균 최저온도

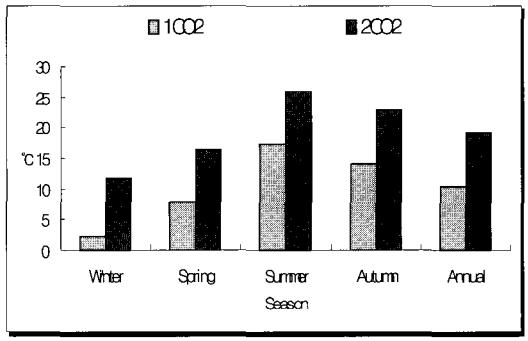

그림 15. 계절별 평균 최저온도

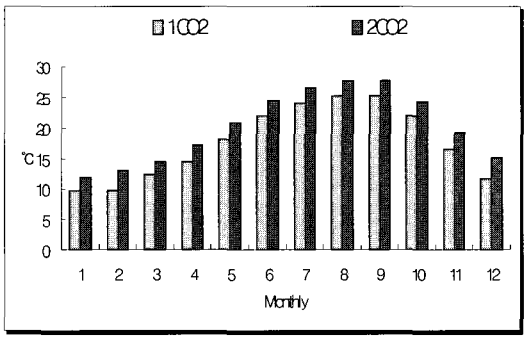

그림 16. 월 평균 온도

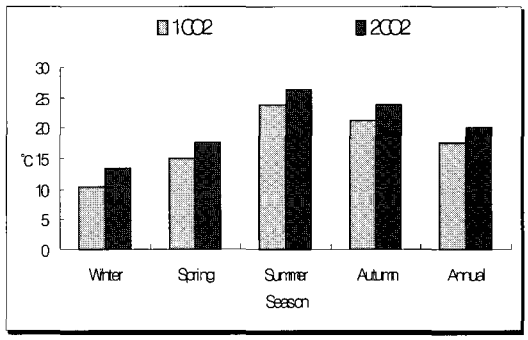

그림 17. 계절별 평균 최저온도

그림 5은 본 연구에서 이용한 우리나라 주변의 격자를 나타낸 것이다.

5.1.2 우리나라의 기후변화 시나리오 작성

본 연구에서 직접 실시한 YONU GCM의 기후변화 모의 결과를 이용하여 GCM에 의한 기후변화 시나리오를 작성하였다. 모의 결과는 20년의 일 시계열의 형태로 되어 있으며 그로부터 산정된 월별 기본통계치는 그림 6~17과 같다. 그림에서 $1CO_2$는 현재의 기후를 의미하며 $2CO_2$는 미래의 기후를 의미한다.

YONU GCM에 의해 우리나라의 기후변화 시나리오를 작성해 본 결과 평균, 최저, 최고 기온의 경우 실제 우리나라의 계절적 특성과 비슷한 양상을 보이고 있지만 강수량과 증발량의 경우 전혀 계절적 특성을 구현

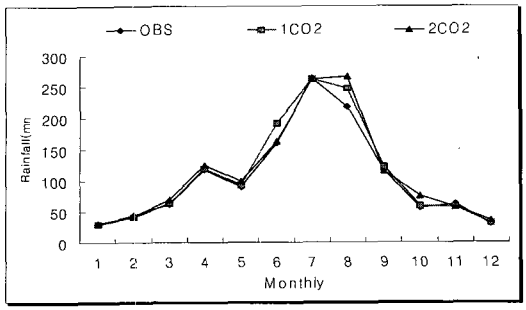

그림 18. 월 평균 강수량

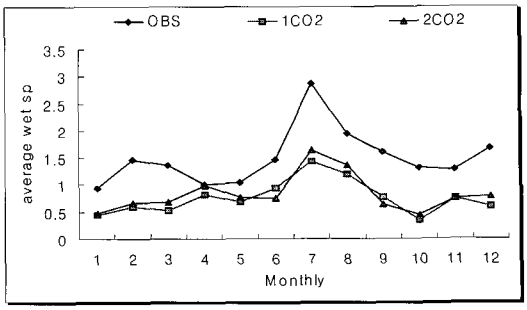

그림 19. 월 평균 습윤 지속기간

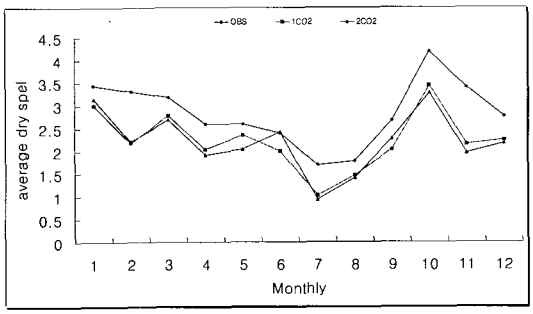

그림 20. 월 평균 건조 지속기간

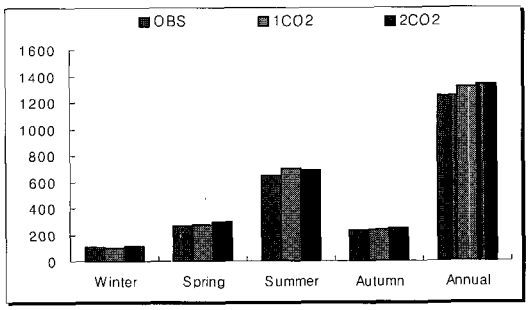

그림 21. 계절별 평균 강수량

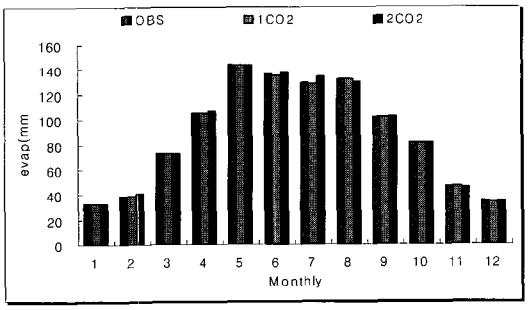

그림 22. 월 평균 증발량

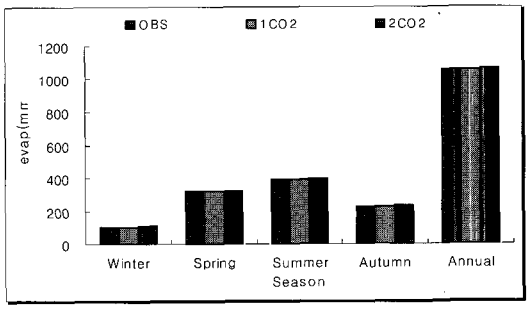

그림 23. 계절별 평균 증발량

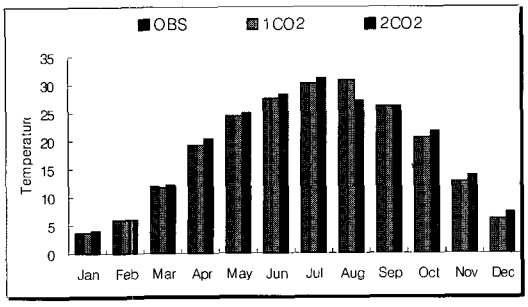

그림 24. 월 평균 최고기온

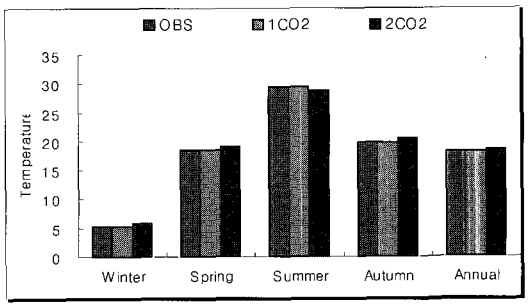

그림 25. 계절별 최고기온

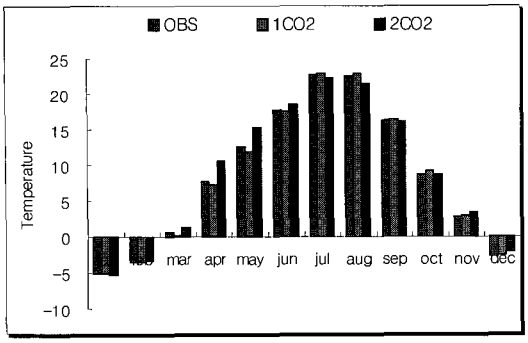

그림 26. 월 평균 최저기온

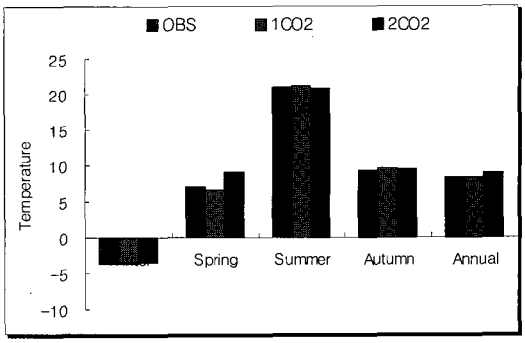

그림 27. 계절별 평균 최저기온

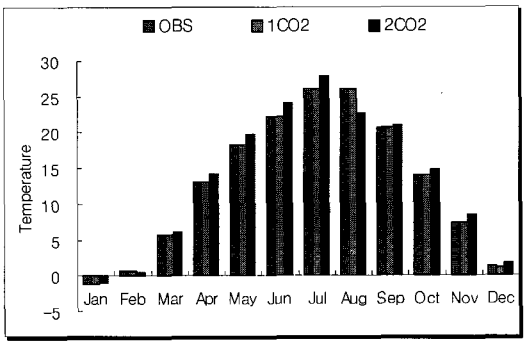

그림 28. 월 평균 기온

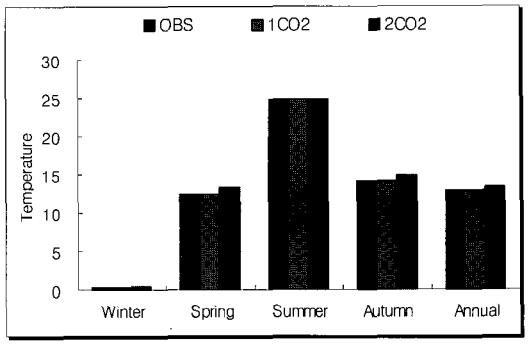

그림 29. 계절별 평균 기온

하지 못함을 확인하였다. 이러한 결과는 거의 모든 GCM의 공통된 약점이라고 할 수 있으며 동일한 연구 결과를 외국의 논문들에서도 쉽게 확인할 수 있었다. Bardossy(1993)는 이러한 이유로 계절적 특성을 반영할 수 있는 축소기법의 필요성을 제시한 바 있다. 본 연구에서도 이를 고려하여 YONU GCM에 의한 기후변화 모의 자료계열을 축소기법을 적용하여 유역단위 기후변화 시나리오를 작성하였다.

5.2 유역단위 기후변화 시나리오의 작성

그림 18~29는 앞에서 설명한 전이함수모형(식(1)~(5) 참조)을 이용하여 용담댐 유역의 기후변화시나리오를 작성한 결과이다. 그림들을 통해 알 수 있듯이 YONU GCM에 의해 작성된 우리나라의 기후변화 시나리오와는 달리, 용담유역의 관측치를 이용하여 축소한 경우 월 강수량과 증발량의 경우에도 관측치의 계절적 특성을 재현함을 확인할 수 있다.

5.3 기후변화가 반영된 수문기상자료의 모의발생

5.3.1 유역규모의 기후변화 시나리오를 이용한 일 강수량, 기온의 모의

일기발생 모형을 이용하여 유역에서의 기후변화에 의한 일 강수량, 기온자료를 모의하기 위해서는 기본적으로 과거에 관측된 일 강수량, 기온 자료와 유역단위 기후변화 시나리오에서 추정된 자료가 필요하다. 이를 위해 용담댐 유역의 관측 일 강수량자료, 기온자료와 앞에서 작성된 용담댐 유역과 우리나라 전역의 기후변화시나리오를 재구성하여 20년간의 일 강수량과 기온을 모의하였다. 여기서 표 6은 우리나라 전역의 기후변화 시나리오의 경우이며 표 7은 용담댐 유역의 기후변화시나리오의 경우이다.

본 연구에서는 이렇게 작성한 용담댐 유역의 기후변화 시나리오(표 7 참조)를 가지고 WGEN 모형의 매개변수를 수정하였다. 강수사상은 비 조건부적인 습윤일의 확률의 변화율을 고려해서 감마분포의 매개변수뿐 아니라 마코프 연쇄의 천이확률까지 수정하였다. 온

표 6. 우리나라의 기후변화 시나리오 (Raw GCM)

Data	m.rain	wet	dry	tem	sd
Jan	0.835	0.908	1.179	1.222	1.321
Feb	1.162	0.39	3.61	1.324	0.882
Mar	1.027	0.967	0.58	1.166	0.873
Apr	0.809	0.924	1.37	1.177	1.162
May	0.995	1.256	1.333	1.147	0.766
Jun	1.094	1.353	1.039	1.111	0.741
Jul	0.854	0.61	3.6	1.097	0.513
Aug	0.962	1.381	1	1.095	0.563
Sep	1.14	2.299	1.075	1.1	0.616
Oct	1.093	1.083	0.779	1.11	0.984
Nov	1.003	1.303	3.624	1.17	0.834
Dec	0.963	0.504	2.667	1.286	0.864

표 7. 용담댐 유역의 기후변화 시나리오 (Dowscaled)

Data	m.rain	wet	dry	tem	sd
Jan	1.084	1.067	1.046	0.774	1.065
Fen	1.03	1.107	1.017	0.832	1.462
Mar	1.105	1.312	0.967	1.052	2.155
Apr	1.045	1.208	0.943	1.085	1.422
May	1.064	1.103	0.868	1.08	1.179
Jun	0.85	0.807	1.208	1.09	1.46
Jul	1	1.142	0.915	1.071	1.799
Aug	1.077	1.137	0.961	0.866	0.782
Sep	0.935	0.821	1.119	1.017	1.285
Oct	1.258	1.342	0.952	1.059	1.387
Nov	0.986	1.016	0.911	1.155	1.406
Dec	1.152	1.313	0.967	1.438	1.108

주) Climate Change Scenario derived from YONU GCM experiment
Control run 1961-1980, Perturb run "2031 - 2050"
m.rain - relative change in monthly mean rainfall
wet / dry - relative change in duration of wet and dry spell
tem and sd - relative change in daily temperature and absolute changes in its sd

표 8. WGEN의 수정된 매개변수 (강수)

	현재(관측치)				Scenario			
월 \ parameter	α	β	pdw	pww	α	β	pdw	pww
Jan	0.45	8.82	0.20	0.46	0.54	7.28	0.21	0.48
Feb	0.35	15.19	0.19	0.46	0.36	15.35	0.19	0.45
Mar	0.25	26.82	0.22	0.45	0.22	33.81	0.21	0.45
Apr	0.17	60.51	0.23	0.46	0.17	57.70	0.25	0.48
May	0.15	75.74	0.23	0.40	0.18	63.95	0.25	0.42
Jun	0.16	94.40	0.27	0.51	0.15	100.09	0.25	0.48
Jul	0.10	183.12	0.33	0.63	0.11	158.59	0.38	0.68
Aug	0.11	161.24	0.34	0.58	0.11	152.64	0.38	0.62
Sep	0.13	116.37	0.21	0.50	0.13	123.19	0.22	0.50
Oct	0.19	51.59	0.16	0.38	0.17	55.26	0.16	0.38
Nov	0.26	24.09	0.26	0.44	0.29	21.00	0.26	0.44
Dec	0.45	7.77	0.23	0.38	0.45	8.00	0.25	0.39

표 9. WGEN의 수정된 매개변수 (온도)

구 분		최고온도				최저온도			
강수 상태		Wet day		Dry day		Wet day		Dry day	
hormonic 계수		1	2	1	2	1	2	1	2
OBS	A(k)	-7.5	-0.38	-7.84	-1.2	-7.93	0.24	-8.51	0.81
	B(k)	-9.78	-1.23	-11.23	-0.99	-9.99	-1.09	-10.7	-0.43
Scenario	A(k)	-7.69	-0.5	-8.02	-1.14	-8.17	0.22	-8.76	0.79
	B(k)	-9.68	-1.05	-11.13	-0.81	-9.72	-0.953	-10.43	-0.29

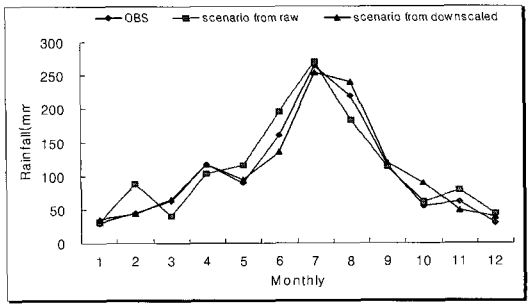

그림 30. 월 평균 강수량

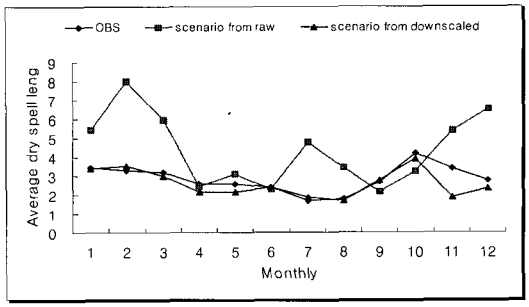

그림 31. 월 평균 건조 지속기간

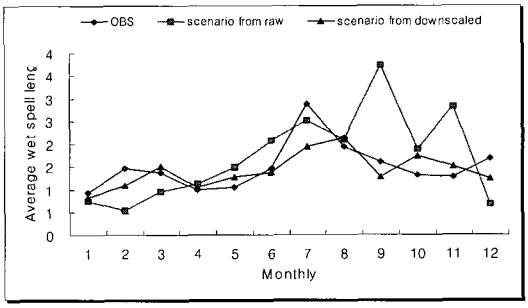

그림 32. 월 평균 습윤 지속기간

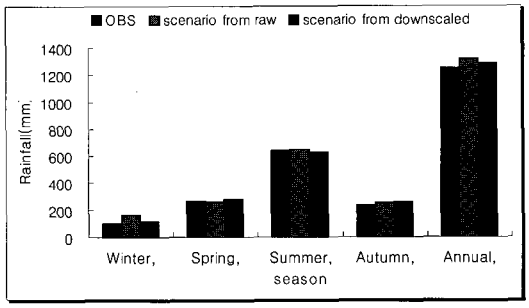

그림 33. 계절별 평균 강수량

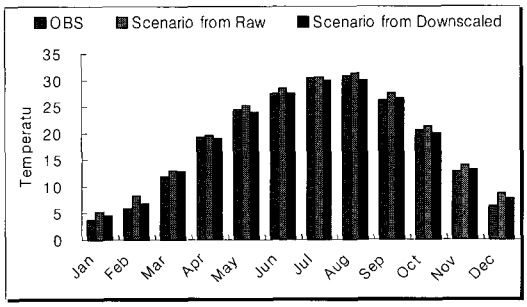

그림 34. 월 평균 최고기온

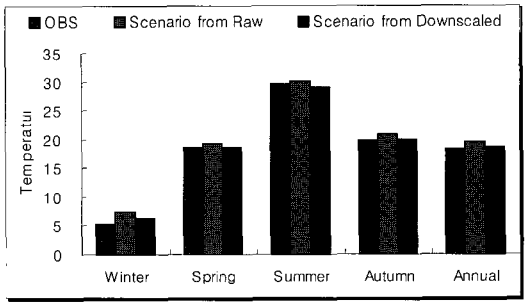

그림 35. 계절별 평균 최고기온

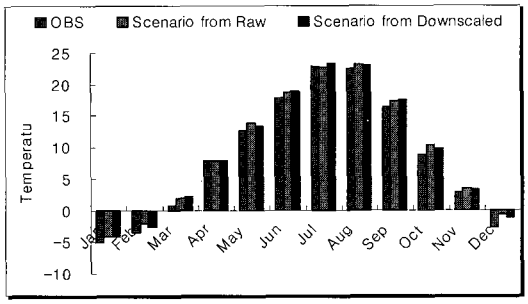

그림 36. 월 평균 최저기온

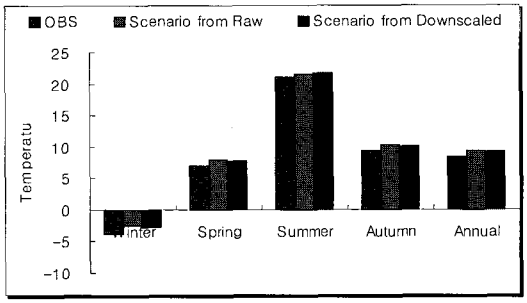

그림 37. 계절별 평균 최저기온

도의 경우는 평균의 양적인 변화율를 고려해서 조화계수 값을 수정하였다. 표 8과 표 9은 WGEN의 수정된 매개변수 값을 수록한 것이며 그림 30~37은 수정된 매개변수를 이용한 일기발생모형의 모의결과를 나타낸 것이다.

5.3.2 기후변화에 따른 강수 시나리오의 작성 및 비교

본 연구에서 유역규모의 기후변화 시나리오에서 작

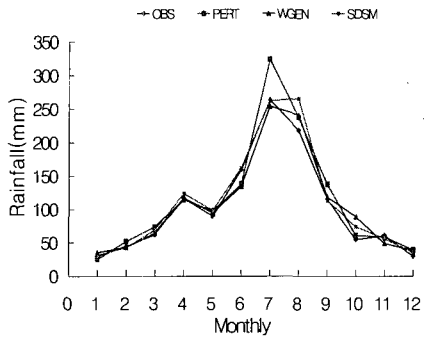

그림 38. 월 평균 강수량

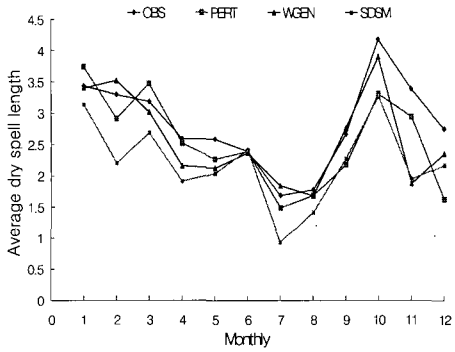

그림 39. 월 평균 건조 지속기간

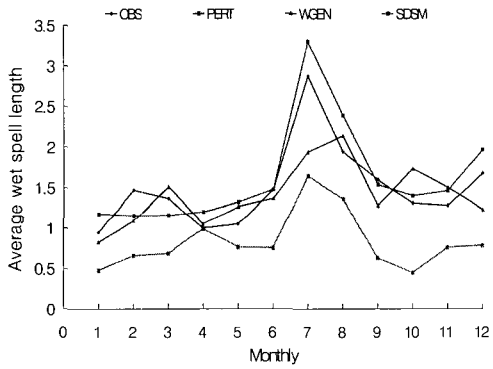

그림 40. 월 평균 습윤 지속기간

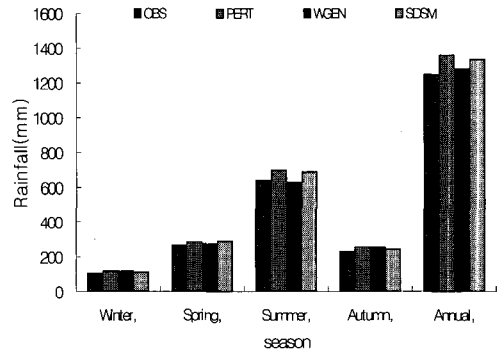

그림 41. 계절별 평균 강수량

표 10. 여러 기법에 의해 작성된 강수 시나리오의 특징 비교

특성 \ 기법		기왕	Raw GCM	SDSM	Pertubat	WGEN
자료의 형태		비(ratio)	time series	time series	time series	time series
계절적 특성 ($1CO_2$)		?	No	Yes	Yes	Yes
$2CO_2$	강수량 변화	?	Yes	Yes	Yes	Yes
	습윤 지속기간 변화	?	Yes	Yes	No	Yes
	건조 지속기간 변화	?	Yes	Yes	No	Yes
모의기간		?	임의	GCM에 종속	임의	임의

주) Pertubat ; 기존에 국내에서 사용된 방법(KICT, 2000)
? ; 판단 불가

성된 강수 시나리오(precipitation scenario)를 기존에 국내에서 사용된 방법(purtubation method)을 적용하여 얻어진 강수 시나리오와 비교, 분석하였으며 그 결과를 그림 38~41에 나타내었으며 각각의 기법에 의해 작성된 강수 시나리오의 특징을 표 10에 나타내었다.

purtubation 방법은 Lettenmaier와 Sheer그리고 Sefton과 Boorman에 의해 개발된 방법으로써 국내에서도 "수자원계획의 최적화 연구(IV)- 기후변화에 따른 수자원계획의 영향평가(KICT, 2000)"에서 사용된 바 있다. 이 방법에 대하여 간단히 요약하자면, 현재상태는 Markov chain 모형을 이용하여 현재까지의 자료를 확장하여 사용하며 $2CO_2$ 상태는 앞에서 강수량 및 기온의 변화를 고려하여 모의한다. purtubation 방법의 경우 단순히 현재의 관측 강수량에 직접 일정량의 값을 증감시키기 때문에 강수량의 변화는 있지만 강수발생사상은 관측 강수의 것과 동일하다는 약점이 있으며 이는 기후변화에 의해 야기될 수 있는 이상호우나 건기와 같은 강수사상의 변화는 나타낼 수 없음을 의미한다. 그러나 본 연구에서 이용한 WGEN과 SDSM 방법은 앞에서 설명한 방법에 의해 건·습일의 천이확률, 건습일의 지속기간 등(표 4. 참조)과 같은 매개변수들을 기후변화시나리오에 따라 변화시키기 때문에 purtubation 방법의 약점을 보완할 수 있다.

6. 결 론

용담댐 유역에서의 자료를 이용한 기후변화 모의모형 실험결과 얻어진 수문성분별 기후변화 특성은 다음과 같다.

(1) 기온

$2CO_2$의 상황에서는 관측자료에 비해 평균기온은 전반적으로 약간 상승 하였으나 최고 기온은 여름철에는 하강하고 겨울철에는 상승하는 것으로 나타났으며 최저기온의 경우도 동일하였다.

(2) 증발량

$2CO_2$ 의 상황에서는 관측자료에 비해 월 평균 증발량은 약간 증가하는 것으로 나타났다.

(3) 강수량

우리나라 전역의 $2CO_2$ 상황에서의 기후변화 시나리오에 의한 경우에는 년 평균 강수량이 약 18 % 정도로 감소하는 것으로 추정되었으며, 이는 강수량의 계절적 변동성향이 상이하게 모의된 결과라고 판단된다. 그러나 본 연구에서 개발된 축소기법을 이용하여 얻은 유역단위 기후변화 시나리오에 의한 경우에는 용담댐 유역에서 년 평균 강수량은 약 7.2% 정도 증가하는 것으로 추정되었으며 계절적 변동성도 양호하게 나타내었다.

(4) 강수일수

전구적인 기후변화가 발생했을 때 용담댐 유역의 경우 월 평균 강수량의 정량적인 차이는 크게 변하지는 않지만 특히 여름철의 월 평균 습윤 지속기간과 건조 지속기간이 관측기록보다 짧아지는 것으로 추정되었다. 이는 강수강도는 커지고 강수가 자주 발생한다는 것을 의미할 수 있고, 따라서 집중호우와 이상호우의 발생 가능성이 커질 수 있다고 예측할 수 있다. 그러나 본 연구에서의 기후변화 모의 실험과정에는 불확실성이 내재하고 있기 때문에 쉽게 결론에 도달할 수는 없다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 "수자원의 지속적 확보기술 개발사업단"의 연구비 지원(2-2-1)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김맹기 (1997). **지구 온난화에 따른 한반도 온난화와 북반구 대기 순환 패턴의 연관성**. 박사학위 논문. 서울대학교

박정현 (2001). **지역 기후모형 RegCm을 이용한 동아시아 여름 몬순의 모사**. 연세대학교 대기과학과 석사학위 논문.

안재현, 유철상, 윤용남 (2001). "GCM결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석." **한국수자원학회지**, 한국수문학회, 제34권, 제4호, pp. 335-345

최영진, 김정우(2001). "YONU CGCM Tr7W12를 이용한 지구 온난화 실험 결과들의 신뢰도와 활용." **기상학회지 학술발표논문집**, pp. 149-151.

한국건설기술연구원 (2000). **수자원계획의 최적화 연구(IV) ; 기후변화에 따른 수자원계획의 영향 평가**. 건설교통부.

Bardossy, A. (1993). "Knowledge Based Classification Of Circulation Patterns For Stochastic precipitation Modeling." *Stochastic And Statistical methods In Hydrology And Environmental*

Engineering, Vol. 13, pp. 19-32.

Benjamin, Felzer, and Preston, Heard (1999). "Precipitation Differences Amongst GCMs Used for U. S. National Assessment." *JAWRA*, Vol. 35, pp. 1327-1339.

Cooley, K. R., and Flerchinger, G. N., and Wight, J. R., and Hanson, C. L. (1992). "Effect of Climate Changes On Water Supplies." *Managing Water Resources During Global Change*, American Water Resources Association., pp. 185-194.

Cooter, E. J., and Eder, B. K., and Leduc, and Truppi, L. (1993). "Climate Change Models And Forest Research." *Journal of Forestry*, Vol. 91, pp. 38-43.

Dubrovsky, M. (2001). "Interdiurnal And Interannual Variability in Stochastic Daily Weather Generator.; Modelling and the Role in Agricultural And Hydroligic Studies." *8th international Meeting on the Statistical*

IPCC. (1996). *Climate Change 1995; Impacts, Adaptations And Mitigation of Climate Change*

Lauren, E. H., and Wilby, R. L., and George, h. Leavesley (2000). "A Comparison of Delta Change And Downscled GCM scenarios for Three Mountainous Basins in the United States." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 36, pp. 387-397.

Lebel, T., and Delclaux, F., and Barbe, L. Le, and Polcher, J. (2000). "From GCM scales to hydrological scales : rainfall variability in West Africa." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 14, pp. 275-295

McCabe, G. J., and Wolock, D. M. (1999). "General Circulation Model Simulations of Future Snowpack in the Western United States." *JAWRA*, Vol. 35, pp. 1473-1484

Miller, James R., and Russell, Gray L., and Van Blarcum, Scott C. (1992). "The Effects of Climate Change On Monthly River Runoff." *Managing Water Resources During Global Change*, American Water Resources Association, pp. 175-178

Miller, N. L. (1999). "Downscaled Climate Streamflow Study of the Southwestern United States." *JAWRA*, Vol. 35, pp. 1525-1537

Miller, N. L., and Kim, Jin won (1999). "Simulation of Mean Monthly Precipitation And Streamflow in an East Asia Watershed." *Climate Variability and Carbon Management Program*

Miller, N. L., and Kim, Jin won (2000). "Climate Change Sensitivity Analysis for Two California Watershed ; Addendum to Downscaled Climate And Streamflow Study of the southwestern United States." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 36, pp. 657-661.

Miller, N. L., and Kim, Jin won (2001). "Coupled Precipitation-Streamflow Simulations at the GAME / HUBEX Site ; Xixian Basin." *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 79, pp. 985-998.

Richardson, C. W. (1981). "Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature and Solar radiation." *Water Resources Research*, Vol. 17, pp. 182-190.

Rummukainen, M., and Bringfelt, B., and Ullerstig, A. (2001). "A Regional Climate Model for Northern Europe ; Model Description And Results from the Downscaling of Two GCM Control Simulations." *Climate Dynamics*, Vol. 17, pp. 339-359.

Semenov, M. A., and Barrow, E. M. (1997). "Use of A Stochastic Weather Generation in the Development of Climate Change Scenarios." *Climate Dynamics*, Vol. 35, pp. 397-414.

Wilby, R. L., and Hany Hassan, Keisuke Hanaki (1998). "Statistical downscaling of Hydrometeorological variables using general circulation model output" *Journal of Hydrology*, Vol. 205, pp. 1-19.

Wilby, R. L., and Hay, L. E, and Leavesley, G. H. (1999). "A comparison of downscaled and raw GCM output; implications for climate change scenarios in the San Juan River basin, Colorado" *Journal of Hydrology*, Vol. 225, pp. 67-91.

Wilby, R. L., and Wigley, M. L., and Conway, D. (2001). "Statistical downscaling of GCM simualtions to Streamflow." *Journal of Hydrology*, Vol. 252 pp. 221-236.

Wilks, Daniel S. (1992). "Adaptic Stochastic Weather

Generation Algorithms Climate Change Studies." *Climate Change*, Vol. 22, pp. 67-84.

Xuebin Zhang, and Joao Corte-Real, and Xiaolan Wanhg (1995). "Downscaling GCM Information to Regional Scales ; A non-parametric multivariate regression approach." *Climate Dynamics*, Vol. 11, pp. 413-424.

(논문번호:02-86/접수:2002.11.01/심사완료:2003.04.04)