

CO₂ 점증 실험의 광역 규모 예측인자를 이용한 한반도 겨울철 강수 시나리오

김맹기¹ · 강인식² · 허창회²

¹공주대학교 대기과학과, ²서울대학교 대기과학과
(1999년 7월 19일 접수)

Scenario of Korean winter precipitation using large-scale predictors of a gradual CO₂ increasing experiment

Maeng-Ki Kim¹ · In-Sik Kang² · Chang-Hoi, Ho²

¹Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Kongju, Korea

²Department of Atmospheric Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Manuscript received 19 July 1999)

Abstract

Scenario of Korean winter-mean precipitation is obtained from the large-scale predictors of GFDL coupled ocean-atmosphere model experiment, which is based on the downscaling method of Kim and Kang (1997). Downscaling model was constructed from both observed regional-scale winter precipitation and large-scale sea level pressure during the last 40 years. Korean winter-mean precipitation was increased in circulation pattern with the negative SLP anomalies of Siberian high and the positive SLP anomalies of Allucian low regions, implying that this pattern makes the warm moist air from south-east direction over the Korean Peninsula to be enhanced. These relationships between regional climate and large-scale circulation indicate that large-scale SLP can be a good predictor to predict regional climate in Korea, under the condition that model can simulate the variability of the observed SLP very well. Based on the EOF(empirical orthogonal function) analysis, the SLP variability of GFDL coupled ocean-atmosphere model was compared with that of the observed SLP. Spatial patterns in the first and second mode of the model SLP were similar to the observed SLP patterns except for some regions of Asian continents in the second mode of EOF analysis. Under the assumption of gradual CO₂ increasing of about 1% per year in the future, Korean winter-mean precipitation will be strong precipitation period lasting for about 10 years and sequent strong drought period lasting for about 5 years before CO₂ doubling time, but there will be a small decrease of Korean winter-mean precipitation at CO₂ doubling time.

1. 서 론

현재 해양-대기결합모델의 수평해상도는 아직 너무 낮고, 한반도와 같이 복잡한 지형을 지닌 지역에서 지역적 강제력 효과를 잡아낼 수 없기 때문에, 모델의 결과가 농업이나 수문 등의 영향평가 연구에 적절한 정보를 제공하지 못한다. 그런 이유로 낮은 해상도의 대기대순환 모델(General Circulation Model, GCM) 모의 결과로부터 고해상도의 지역기후 정보를 제공하려는 여러 시도가 있어왔다(IPCC, 1995; Karl *et al.*, 1990). 지역 기후를 예측하기 위한 방법으로써 간단한 내삽법(Smith, 1991), 제한지역 상세 모델(Giorgi, 1990; Giorgi *et al.*, 1993), 규모 축소법(Downscaling method) (Zorita *et al.*, 1992, 1995; von Storch *et al.*,

1993; 오재호 외, 1994; 김맹기와 강인식, 1997) 등이 있다. 여기서 규모축소법(Downscaling method)이란 지역기후 변수와 대규모 예측인자간의 통계적 관계를 GCM 실험결과에 적용하여 지역기후를 예측하는 통계적 방법을 의미한다. 위 방법들은 각각 장점과 단점을 갖고 있으나 산출된 지역 기후는 기본적으로 대기대순환 모델의 성능과 밀접한 관련을 갖고 있다(Grotch and MacCracken, 1991). 제한지역 상세모델은 상세한 지역 기후를 얻을 수 있으나 모델의 경계에서 유발되는 GCM의 오차가 상세 모델내의 국지 규모로 전달되는 문제를 지니고 있고, 규모 축소법은 적용이 간편하고 계산이 단축되지만, GCM의 광역규모 예측인자(예를 들면 해면기압)를 사용하기 때문에 GCM이 광역규모를 얼마나 잘 모의할 수 있는가가 중요하다.

또한 GCM이 광역규모를 잘 모의할 수 있더라도 GCM의 광역규모 예측인자가 한반도와 같은 작은 지역의 기후 변수를 어느 정도 설명할 수 있는가를 파악하는 것도 중요하다.

GCM의 광역 기후 정보를 지역 기후 예측에 사용하기 위한 연구는 1980년대 이후에 Kim *et al.* (1984), Wigley *et al.* (1990) 등에 의해 시작되었다. Kim *et al.* (1984)은 GCM의 격자점에 해당하는 지역 평균값과 지역내의 기후변수에 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function, EOF)분석을 적용하여 얻은 주성분사이의 상관성에 기초하여 GCM으로 지역기후를 나타낼 수 있음을 밝혔다. Wigley *et al.* (1990)은 미국 오레곤주 각 관측소의 기온(또는 강수량)에 대한 예측 인자(predictor)들을 이용하여 회귀 방정식을 만들고, 이로부터 각 관측소에 대해 각각의 회귀계수를 구하여 GCM의 격자점으로부터 기온 및 강수의 공간 분포를 얻었다. 한편 Zorita *et al.* (1992)은 북대서양의 관측 해면 기압 분포 등과 이베리아 반도의 관측 강수량 변동사이의 관련성을 찾는데 CCA (Canonical Correlation Analysis)를 이용하였다. von Storch *et al.* (1993)은 GCM의 북대서양의 해면 기압과 이베리아 반도의 관측 강수량사이의 관련성을 CCA를 이용하여 찾고, 모델의 해면 기압으로부터 투영된 강수량 변동이 이베리아 반도의 관측 강수량 변동과 매우 유사하게 나타남을 밝혔다. 또한 이들은 같은 방법을 해양-대기 결합모델의 해면기압에 적용하여 이베리아 반도의 강수량 변화를 예측하였는데 예측한 강수량 변동이 모델이 모의하는 변동보다 더 큰 변동을 나타냄을 밝혔다. 또한 Noguer (1994)는 Zorita *et al.*과 같은 방법을 같은 지역에 적용하였으나 이베리아의 관측 강수량 대신에 GCM의 강수량을 사용하여 해면기압과 강수량사이의 상관 패턴을 얻었다. 한반도의 기후 변화 예측을 위한 전환 함수의 연구로서, 오재호 외 (1994)는 여러 GCM들의 1xCO₂ 자료에 나타나는 광역 강수량과 한반도 강수량사이의 전환 함수를 구하였고, 이를 2xCO₂ 자료에 적용하여 한반도의 기후 평균 강수량이 증가한다는 결과를 얻었다. 김맹기와 강인식(1997)은 광역규모 기후변수와 지역 규모의 기후변수에 각각 EOF분석을 적용하여 주요 주성분을 얻고 이를 고유치분리법(Singular Value Decomposition, SVD) (Preisendorfer and Mobley, 1988; Bretherton *et al.*, 1992)에 적용하여 결합모드를 구하므로써 광역규모로부터 지역규모의 기후 변수를 추정할 수 있는 방법을 제시하였다. 이들은 이 방법을 이용하여 한반도의 온난화와 연관된 북반구 대기순환 패턴을 조사하였다. 최근에는 대기대순환 모델의 광역 규모 예측인

자를 이용한 연구가 계절 평균이나 월평균에 대한 기존의 예측에서 extreme events와 같은 현상에 대한 연구도 활발히 진행되고 있으며(Schubert and Henderson-Sellers, 1997), 향후 규모 축소법은 제한지역 상세모델과 함께 지역기후를 예측하기 위한 중요한 도구로써 활용도가 높다. 그러나 현재까지 지역기후 시나리오에 대한 연구는 주로 이산화탄소의 배증시점을 기준으로 연구되어 왔다. 이러한 접근은 기온의 경우 타당할 수 있으나 강수의 경우는 그렇지 못하다. 왜냐하면 기온은 과거의 관측 기록으로 볼 때 증가 경향을 보여주고 있으나 강수의 경우는 경향이 잘 나타나지 않고(곽중흠 외, 1997), 오히려 장주기 변동 등의 다른 요인이 더 지배적으로 나타나기 때문이다. 특히, 시나리오의 대상이 되는 시간규모가 연별 변동보다는 장주기적인 진동에 관심이 있는 경우에는 적용하는 방법이 관측에서 나타나는 장주기 변동을 잘 나타낼 수 있어야 한다. 따라서 이 연구에서는 김맹기와 강인식(1997)의 규모 축소법이 관측에서 나타나는 장주기 강수량 변동을 잘 나타낼 수 있는지를 먼저 조사하여 적용방법의 신뢰도를 평가한 후, 이 방법을 GCM의 CO₂ 점증 실험의 광역규모 예측인자에 적용하여 겨울철 강수량 변화 시나리오를 제시하고자 한다. 겨울철을 택한 이유는 겨울철이 다른 계절이 비해 이류 효과가 뚜렷하고, 예측인자로 사용할 해면 기압 변동이 수증기 수송에 필요한 이류 효과를 잘 나타낼 수 있기 때문이다. 이 연구의 제 2장에서는 자료 및 방법을 기술하였으며, 제 3절에서는 관측 자료를 토대로 한반도 강수량과 한반도 주변 해면기압 패턴과의 연관성을 논의하였다. 제 4장에서는 해양-대기결합모델의 이산화탄소 점증실험 자료를 통계모델에 적용하여 얻은 한반도 강수량 변화 시나리오를 제시하였으며, 제 5장은 결론으로 구성되었다.

2. 자료 및 방법

이 연구에 사용한 관측자료로는 한반도 12개 지점의 일평균 강수량 자료와 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) / NCAR (National Center for Atmospheric Research) 에서 재분석한 월평균 해면기압 자료가 사용되었다. 한반도 12개 지점은 부산, 목포, 서울, 대구, 강릉, 전주, 광주, 여수, 울산, 추풍령, 포항, 인천이며, 해면기압 자료는 CDC (Climate Diagnostic Center)로부터 인터넷을 통하여 입수하였다 (<http://www.cdc.noaa.gov>). 이 자료는 전구 2.5도의 격자자료이나 광역규모만을 고려하고, 이 연구에서 사용하는 GCM 자료의 격자 간격과 유사한 해상도를 갖

도록 하기 위하여 위도와 경도 5도의 격자 자료로 선형내삽하여 사용하였으며, 영역은 북위 15°에서 70°. 동경 60°에서 서경 150°까지로 동아시아 몬순 순환의 영역이 포함되도록 선정하였다. 해면기압 자료의 기간은 1948년 1월 1일부터 1999년 7월까지이지만 12개 지점의 한반도 강수량 자료와 같이 1954년부터 1993년까지 40년간을 사용하였다. GCM 적분 자료는 GFDL 해양-대기결합모델로 얻은 180년간의 기준실험 결과와 1년에 1%씩 CO₂를 증가시켜 얻은 적분자료(이하 점증실험자료)이며, 위도 4.5도, 경도 7.5도의 해상도를 갖는 월평균 자료이다. 참고로 기준실험은 1958년 값을 적용하여 얻은 적분자료이며, 점증실험은 1958년부터 1년에 1%씩 증가시켜 얻은 적분 자료이다. 하와이의 마우나 로아를 기준으로 보면, 1958년의 이산화탄소 농도는 약 315 ppm이며, 1990년의 농도는 약 354 ppm, 1998년의 농도는 약 366.7 ppm이다. 기준 해를 1990년으로 설정할 경우 1958년에서 1990년까지 증가한 이산화탄소 농도는 1년에 1%의 증가율로 환산하면 10년을 약간 넘는 기간에 해당한다. 적분 시작시기인 1958년부터 기준 해까지의 이산화탄소의 농도 증가량은 약 39 ppm이지만 기준 해부터 70년후까지의 이산화탄소 증가량은 354 ppm이다. 상대적인 농도 증가량을 볼 때, 기준해 이전의 증가량은 기준해 이후의 증기량의 약 11% 정도에 불과하다. GFDL 해양-대기결합모델에 대한 상세한 내용은 Manabe *et al.* (1991)에 제시되어 있다.

한편 한반도와 같은 작은 지역에 GCM 격자내의 기후요소를 적용하기 위하여 김맹기와 강인식(1997)의 방법에 따라 다음과 같이 광역규모와 지역규모간의 결합 상관성을 찾아보았다. 우선 지역규모와 광역규모 변수에 각각 EOF 분석을 적용하여 서로 독립된 여러 개의 주요 모드를 추출하고, SVD 방법을 적용하여 지역 규모 변수를 EOF 분석하여 얻은 시간계수와 광역규모 변수를 EOF 분석하여 얻은 시간계수사이의 결합 모드를 추출한다. 그리고 결합 모드간의 관계식을 구한다. SVD를 사용하여 두 변수사이의 연관성을 파악하는 데에 원래의 시계열을 사용하지 않고 EOF의 각 주성분을 사용하는 이유는 보다 적은 변수만으로도 원래의 시계열이 갖고 있는 대부분의 변동을 포함하면서 결합 모드를 구성하는 입력 변수가 서로 독립된 조건을 갖기 때문이다. 또한 EOF는 원래의 시계열에서 역학적으로 설명하기 어려운 잡음(noise)을 필터하는 역할도 한다. 이러한 과정을 거쳐 얻어진 통계 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$P(x^*, t) = \sum_{i=1}^p a_i Y_i(t) R_i(x^*) \quad (1)$$

여기서 P 는 공간 x^* 와 시간 t 에 대하여 추정된 예측값(predictand)을 나타내며, $Y_i(t)$ 는 SVD 분석으로부터 얻어지는 광역 변수에 대한 i 번째 모드의 시간계수, $R_i(x^*)$ 는 $Y_i(t)$ 에 대응되는 지역 변수의 시간계수($T_i(t)$)와 지역 변수사이의 i 번째 상관 패턴을, a_i 는 $Y_i(t)$ 와 $T_i(t)$ 사이의 상관계수를 나타낸다. 또한 i 는 1에서 p 까지의 값을 갖으며, p 는 예측에 사용할 SVD의 결합 모드수를 나타낸다. 식 (1)을 이용하여 광역 변수 분포로부터 지역 변수 분포를 계산하기 위해서는 3개의 변수 즉, 시간과 공간에 무관한 a_i 값, 시간과 무관하고 공간에만 좌우되는 $R_i(x^*)$, 공간과 무관하고 시간에 지배되는 $Y_i(t)$ 를 결정해야 한다.

위 식에 의해 지역 기후를 예측하기 위해서는 두 가지 과정이 필요하다. 우선 관측자료를 사용하여 식 (1)의 a_i 값과 $R_i(x^*)$ 를 결정해야 한다. 이 값들은 EOF와 SVD 분석으로부터 결정되며, 이 과정에 대한 상세한 설명은 김맹기와 강인식(1997)에 제시되어 있다. 여기서는 두 번째 과정으로써 GCM의 점증실험의 해면기압 자료로부터 한반도 강수량을 예측하는 방법에 대해 설명하기로 한다. 첫 번째 과정에서 결정된 a_i 와 $R_i(x^*)$ 는 시간과 무관한 함수로써 관측에서 나타나는 광역규모와 지역규모사이의 상관성을 반영하는 값들이다. 따라서 미래에도 그러한 관련성은 그대로 유지된다고 가정할 수 있다. 그러나 광역변수의 변동을 설명하는 $Y_i(t)$ 는 시간의 함수이므로 이 값을 결정해야만 시간에 따른 지역 강수량 P 를 예측할 수 있다. 이를 위해서 우선 기준실험의 기후평균값을 점증실험의 해면기압 값으로부터 빼서 편차장을 만들고, 편차장과 관측에서 얻은 EOF의 고유벡터를 선형결합시켜 EOF의 시간계수를 모드별로 구한다. 이렇게 구한 각 모드별 EOF의 시간계수와 관측에서 구한 singular vector를 선형결합시켜서 $Y_i(t)$ 를 구한다. 결과에 $Y_i(t)$ 는 단순히 시간 변동만을 나타내는 것처럼 보이지만 이 값을 얻기 위한 중간과정에서 관측자료에 EOF 및 SVD 분석을 적용하여 얻은 고유벡터와 singular vector를 이용하기 때문에 GCM의 광역규모 인자의 시공간 변동에 대한 정보를 함축적으로 갖고 있는 변수라는 것을 알 수 있다.

이러한 규모 축소법의 가장 큰 단점은 광역규모와 지역규모사이의 연관성이 약할 경우 의미있는 결과를 얻기가 어렵다는 것이다. 그러나 지역기후의 예측변수와 역학적으로 연관되어 있는 적절한 광역 예측인자를 찾는다면 단점을 극복할 수 있다. 한 예로, von

Storch *et al.* (1993)이 CCA를 적용한 이베리아 반도는 북대서양에서 뚜렷한 남북 진동 모드를 보이는 NAO (North Atlantic Oscillation)에 의해 영향받는 지역이며, 이들은 NAO를 잘 대변하는 해면기압을 예측인자로 사용하여 이베리아 반도의 강수 변동을 잘 재현하였다. 같은 맥락에서 한반도의 겨울철 지역 강수가 시베리아 고기압과 알투산 저기압의 변동에 의해 상당부분 영향을 받는다면, 광역 규모의 해면기압 변동으로부터 구한 한반도 강수량은 그 관련성 만큼 예측의 정확도가 증가할 것이다.

3. 광역규모 해면기압 패턴과 한반도 겨울철 강수량 간의 연관성

Fig. 1에는 우리나라 겨울철 강수량의 기후평균 분포(a)와 그 표준편차(b)를, 그리고 연별 및 5년 이동평균 한반도 겨울철 강수량(실선)의 시계열(c)을 각각 나타내보았다. 겨울철 강수량의 분포는 한반도 평균 33.7 mm/month에 대해 호남지방과 강릉지방에서 더 많은 강수량 분포를 나타내며, 여름철의 분포 특성과는 정반대의 분포를 나타낸다(허창희와 강인식, 1988).

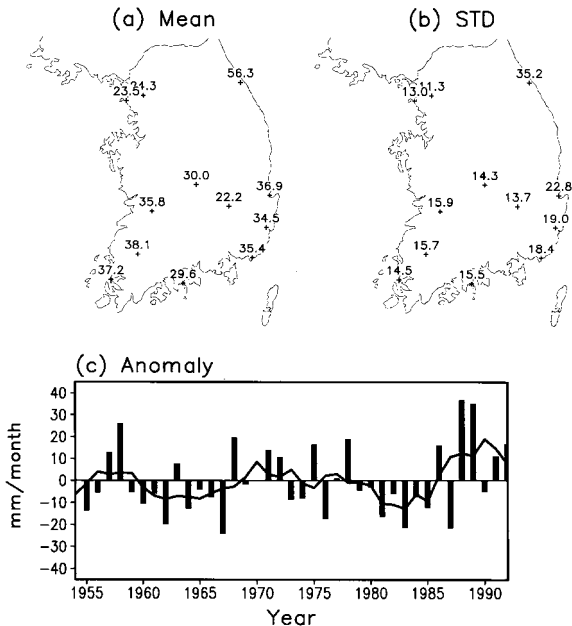


Fig. 1. Distribution of (a) climatological mean and (b) standard deviation of precipitation amounts in winter. (c) Time series of area averaged winter-mean (bar) and 5 years running mean (solid line) precipitation amounts. Units in each panel are mm/month.

겨울 강수량의 표준편차는 반도의 서쪽보다는 동쪽에서 더 큰 값을 나타낸다. 따라서 영동지방의 겨울철 강수량은 다른 지역에 비해 평균 강수량도 많고, 그 변동성도 크게 나타난다. 한반도 평균 강수량 시계열에는 비록 주기적이지는 않지만 10년 이상의 준 주기적인 장주기 변동이 나타나고 있다. 특히 두드러진 양의 편차를 보이는 기간이 한 구간(1988-1992)에서 나타나고, 두드러진 음의 편차를 보이는 기간이 두 구간(1961-1965, 1981-1985)에서 나타난다. 이 연구에서는 이러한 편차 구간을 편의상 각각 P1, N1, N2로 표기하였다. 5년 이동평균한 강수량의 변동은 과거보다는 1980년대 이후에서 그 편차의 크기가 더 증가하고 있다. 한반도 겨울철 강수량의 변동이 광역규모의 대기 순환과 어떤 관계에 있는지를 조사하기 위하여 양의 편차를 나타내는 P1과 음의 편차를 나타내는 두 구간 N1과 N2사이의 차를 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 2의 (a)와 (b)는 각각 P1과 N1 그리고 P1과 N2사이의 해면

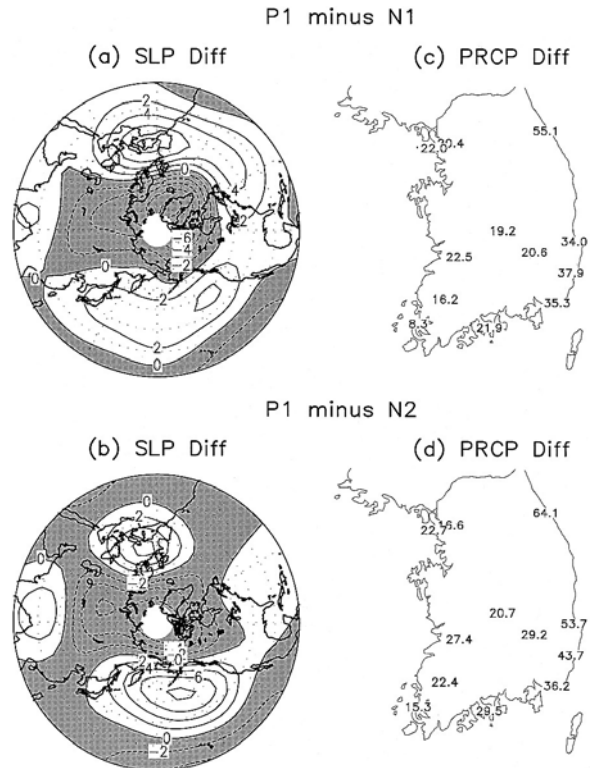


Fig. 2. Distribution of winter mean sea level pressure between P1 and N1. (b) As in (a) except for N2. P1, N1 and N2 indicate period 1988~1992, 1961~1965 and 1981~1985, respectively. (c) and (d) As in (a) and (b) except for precipitation amounts (mm/month)

기압의 차이를 나타내며, (c)와 (d)는 각각 (a)와 (b)에 상당하는 한반도 겨울철 강수량 차이를 나타낸다. 해면기압의 분포는 두 경우 모두 알루산 지역에 양의 편차가 나타나고 시베리아 고기압 지역을 포함한 고위도 전역에서 음의 편차가 나타난다. 이러한 해면 기압 편차의 분포가 나타날 때 한반도의 겨울철 강수량은 모두 양의 편차를 보인다. 또한 한반도 주변의 해면기압 편차가 더 큰 경우(b)가 강수량의 편차도 더 크게(d) 나타난다. 이는 알루산 저기압 지역에서 양의 기압 편차가 나타날 때 한반도에는 남동쪽으로부터 온난습윤한 공기가 유입되기 좋은 조건을 갖고 있기 때문이다. 특히 겨울철 우리나라의 남동 해상은 잠열 속이 다른 계절이나 다른 해역 보다 가장 크게 나타나는 지역이다(강인식 외, 1994). 또한 남동쪽의 습윤 공기가 한반도에 유입될 때 태백산맥을 만나 지형성 강수가 나타나기 때문에 한반도의 서쪽보다는 동쪽에서 강수량이 더 크게 나타난다. 따라서 이러한 결과는 한반도 주변의 대기순환의 변화를 이용하여 한반도의 강수량을 예측할 수 있음을 의미한다.

Fig. 3은 전체 변동의 약 25.7%를 설명하는 첫 번째

모드에 대한 상관패턴과 시간 계수를 나타낸다. (a)는 해면기압의 상관패턴을, (b)는 (a)와 연관된 강수량 상관패턴을, (c)는 관계된 첫 번째 모드의 시간 계수를 나타낸다. (c)에서 보여주는 실선과 파선은 각각 해면기압과 한반도 강수량의 시간변동을 나타내며, 두 시간변동사이의 상관관계는 약 0.82이다. 해면 기압 패턴은 한반도에서 알루산 지역에 이르는 지역과 티벳고원 주변에 양의 값을 보이며, 시베리아 지역에서 뚜렷한 음의 값을 보인다. 따라서 한반도의 겨울철 강수량 변동은 해면기압 패턴의 편차의 크기를 볼 때 시베리아 지역과 북태평양사이의 해면 기압의 진동패턴과 밀접한 관련을 갖는 것으로 판단된다. 해면기압 패턴과 연관된 한반도 강수 패턴은 모든 관측소에서 양의 값을 보이며 한반도의 서쪽보다는 동쪽에서 더 큰 양의 값을 나타낸다. Fig. 3의 (a)와 (b)에서 보여주는 해면기압 및 강수량의 패턴은 Fig. 2의 (b)와 (d)에서 보여준 분포와 상당히 유사하다. 이는 광역규모의 해면기압 패턴의 변화가 한반도의 강수량 변화에 매우 밀접하게 연관되어 있음을 의미한다. 또한 Fig. 3의 (c)에서 나타난 시간변동이 Fig. 1의 (c)에서 보여

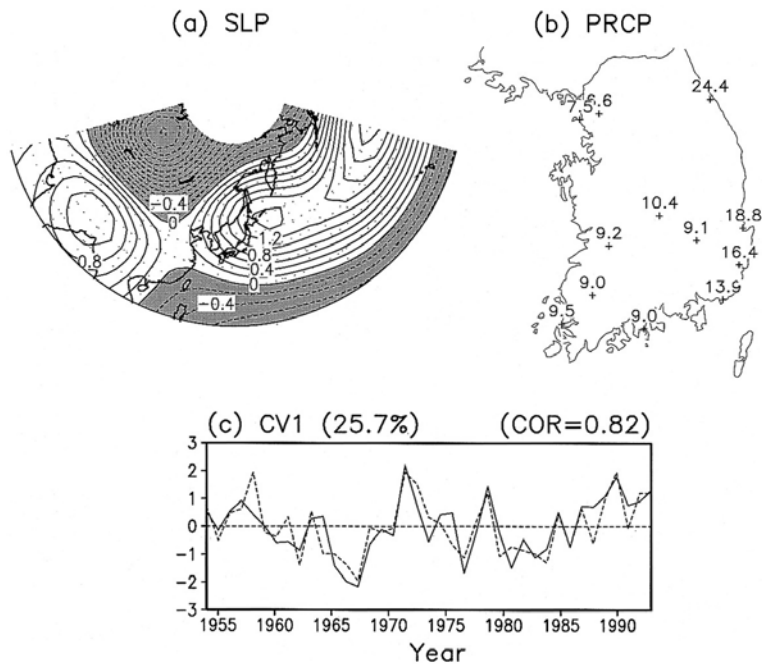


Fig. 3. Coupled mode between winter-mean sea level pressure and precipitation in Korea. (a) and (b) are the spatial pattern of sea level pressure and precipitation amounts, respectively. (c) The corresponding time coefficients for sea level pressure (solid line) and Korean precipitation (dashed line), respectively. The first mode explains about 25.7% of total variability. The correlation between dashed line and solid line is about 0.82 in (c).

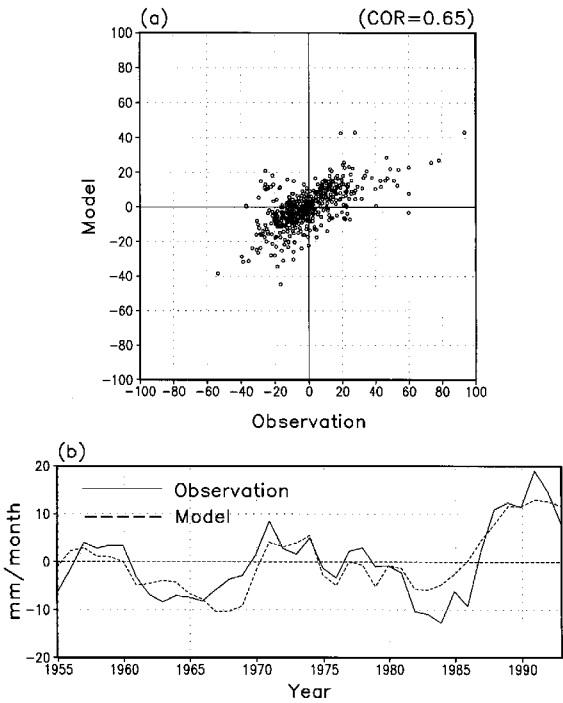


Fig. 4. (a) Scattogram of the observed(x axis) and the predicted (y axis) precipitation amounts for each stations. (b) Times series of the observed (solid line) and the predicted (dashed line) precipitation amounts. The correlation between the observed and the predicted is about 0.65 in totally.

준 장주기의 강수량 변화(실선)과 유사하다는 점도 이를 입증한다.

식 (1)에서 제시한 통계모델을 이용하여 관측 해면 기압 분포로부터 한반도 관측소별 겨울철 강수량을 예측하였다. Fig. 4의 (a)는 매년 12개 관측소에 대해 예측값과 관측값의 관계를 나타낸 것이다. 평균 상관계수는 약 0.65이며, 관측소에 따라 최소 0.54에서 최대 0.74까지의 상관관계를 나타냈다. Fig. 4의 (b)는 예측값과 관측값의 시계열을 나타낸다. 이 그림은 각 관측소 값을 평균하여 지역평균을 만들고, 이를 5년 이동평균하여 나타낸 것이다. 비록 1980년대 초반의 예측값이 관측에서 나타나는 비교적 큰 음의 편차를 충분히 나타내지는 못하지만 통계모델을 이용하여 해면기압 패턴으로부터 구한 예측값은 관측에서 나타나는 10년 이상의 장주기를 비교적 잘 나타내고 있다.

4. GFDL 해양-대기결합모델 자료를 이용한 예측

Fig. 5는 한반도 강수량의 분포를 월별로 관측값, 1xCO₂, 2xCO₂의 순으로 막대그래프로 나타낸 것이다. 여기서 2xCO₂의 결과는 CO₂ 점증실험의 결과중 이산화탄소의 배증 시점인 70년을 중심으로 전후 10년 기간인 60년에서 80년사이의 평균을 나타낸다. 여기서 GCM에서 모의하는 한반도 강수량 값은 한반도에 위치하는 2개의 격자점 값을 평균하여 얻었다. 관측에서

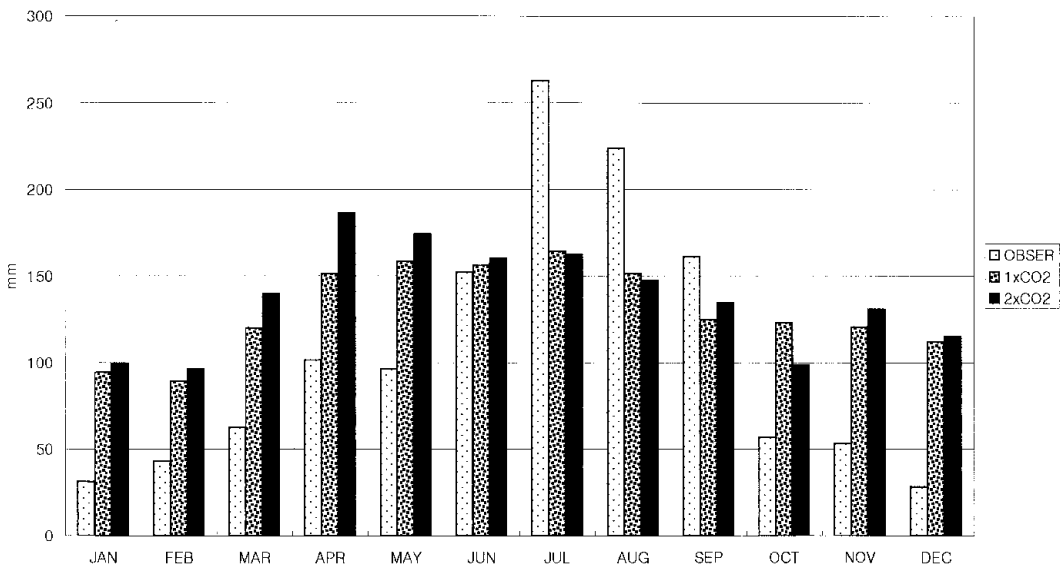


Fig. 5. Monthly variation of (a) observed(left bar), (b) 1xCO₂ (center bar) and 2xCO₂ (right bar) precipitation amounts in Korea.

나타난 한반도의 기후 평균 강수량은 약 1272 mm이며, 1xCO₂의 기후평균 강수량은 약 1565 mm로 관측보다 약 23%가 많은 강수를 보인다. 2xCO₂의 경우는 약 1645 mm로 1xCO₂에 비해 약 5%의 증가가 나타난다. 7월에서 9월에 걸쳐 모델은 관측값보다 적게 모의하며, 그외의 계절은 모델 강수가 관측값보다 전체적으로 크게 나타난다. 6월의 경우는 비교적 관측값과 유사하고, 12월의 경우는 관측값의 약 3 배에 달하는 강수를 모의한다. 따라서 모델이 모의하는 강수는 관측 강수가 많은 달에는 적게 모의하고 관측 강수가 적은 달에는 많게 모의하여 계절 변화를 충분히 잘 나타내지 못한다. 이산화탄소가 배증되었을 때 관측 강수량이 많은 7, 8월에는 강수가 약 2% 정도 감소하고, 관측 강수량이 적은 달에는 강수가 증가하는 특성이 나타난다. 특히 겨울철 강수량은 이산화탄소가 배증되었을 때 약 5% 증가하였으며, 봄철에 가장 크게 증가하여 약 16% 정도이다.

모델이 모의하는 대기순환 변동이 관측에서 나타나는 변동을 어느 정도 나타낼 수 있는가를 조사하기 위하여 Fig. 6에 GFDL 모델의 규준실험(1xCO₂)에서 얻은 해면기압 자료와 NCEP 해면기압자료의 EOF분석 결과를 나타냈다. (a)와 (b)는 각각 NCEP 자료에 나타난 처음 두 개의 고유벡터의 분포를, (c)와 (d)는 각각 GFDL 모델 자료에 나타난 고유벡터의 분포를 나타낸다. NCEP 자료에 나타난 첫 번째 모드

는 전체변동의 약 23.6%를 설명하며, 인도와 북태평양에 양의 값을, 시베리아 지역에 음의 값을 보여 시베리아 고기압이 약화될 때 알류산 저기압도 약화되는 패턴을 보인다. 모델 결과에 나타난 첫 번째 모드는 전체변동의 약 20.1%를 설명하며, 관측에서 나타난 특성이 비교적 잘 나타나고 있다. NCEP에서 보여주는 두 번째 모드는 전체변동의 약 19.6%를 설명하는데, 태평양에서 뚜렷한 남북진동의 형태를 보인다. 모델의 경우도 이러한 패턴이 잘 나타난다. 다만 시베리아 지역의 경우 관측에서는 뚜렷한 시그널을 보이지 않지만 모델의 경우는 양의 값을 나타낸다. 비록 모델과 관측의 변동 패턴이 일부 지역에 따라 다소 차이를 보이고 있으나 모델의 결과는 관측에 나타난 해면기압 변동을 비교적 잘 나타내는 것으로 평가된다.

Fig. 6에서 제시한 바와 같이 GFDL GCM의 해면기압 패턴의 주요 모드는 관측에서 나타난 해면기압 패턴과 상당히 유사하다. 여기서 제시하지는 않았으나 모델의 해면기압과 모델의 한반도 강수량사이의 결합모드는 관측에서 얻은 결합모드(Fig. 3)와 다소 차이를 보인다. 그러나 이 연구에서 사용하는 규모축소법은 모델이 잘 모의하는 광역규모 순환(예를들면 해면기압)을 이용하여 지역규모의 기후를 예측하기 때문에 모델이 모의하는 한반도의 강수는 전혀 중요하지 않다. Fig. 7은 GFDL GCM의 해면기압을 이용하여 구한 한반도 겨울철 강수량 변동을 지역 평균 및 5년 이동평균하여 나타난 것이다. 한반도의 강수량은 점차 감소해 가는 경향이 나타나며, 이산화탄소가 배증되는 시점의 강수량을 60년에서 80년까지의 평균으로 하여

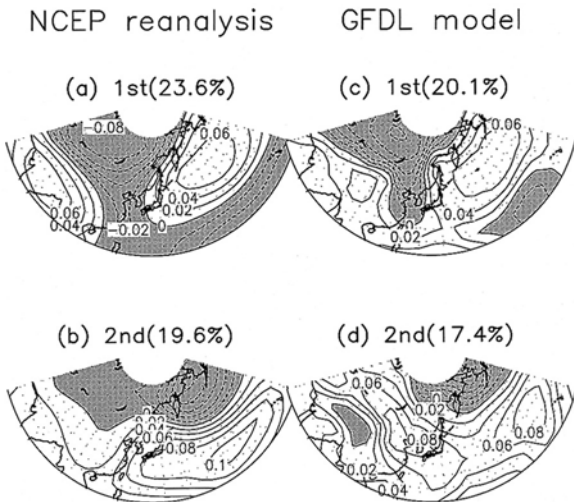


Fig. 6. Spatial distributions of (a) the first and (b) the second eigenvectors of the observed sea level pressure. (c) and (d) As in (a) and (b) except for GFDL coupled ocean-atmosphere model, respectively. The amounts of variability explained by each mode was shown in each panel.

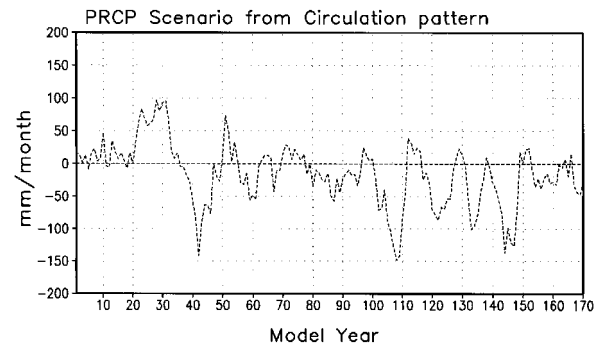


Fig. 7. Korean winter precipitation scenario obtained from the downscaling method. The predictor is winter sea level pressure simulated by GFDL coupled ocean-atmosphere model with the CO₂ increasing rate of 1%/1yr. The line indicates the area averaged and 5 years running mean value.

계산했을 때 한반도 겨울철 강수는 약 6.2 mm/month 감소한다. 이 값은 기후평균 관측강수량에 비해 약 18% 정도 감소한 양에 해당한다. 현 연구의 결과를 이산화탄소 배증 시점에 대한 강수량 시나리오를 구체적으로 제시한 오재호 외(1994)의 연구 결과와 비교해 보았다. 오재호 외(1994)는 3종류의 GCM 광역 강수량 자료를 바탕으로 전환 행렬을 이용하여 한국내의 강수량 변화를 제시하였는데, GCM에 따라 각각 다른 강수량 변화가 산출되었다. 겨울철의 경우, CCC (Canadian Climate Center) GCM은 28% 감소, GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) GCM은 9% 증가하는 것으로 산출되었다. 반면, UI (University of Illinois) GCM의 경우는 변화가 없었다. 이들 결과와 현 연구의 결과와의 차이는 여러 가지 요인에 의해 발생할 수 있다. 첫째는 현 연구에 사용한 GCM 자료는 이산화탄소 점증 실험의 결과이며, 오재호 외(1994)에서는 이산화탄소 배증실험의 결과라는 점이다. Manabe *et al.* (1991)에서 제시한 바와 같이 배증 실험의 결과는 점증실험의 결과보다 지표 기온은 높게, 강수량은 더 많게 모의하는 특성을 갖는다. 특히 이러한 차이는 적도보다는 중위도에서 두드러지게 나타난다. 오재호 외(1994)의 연구에서 GCM의 강수량에 전환 행렬을 적용하여 지역 강수량을 추정하기 때문에 GCM이 모의하는 강수량의 크기가 지역강수량의 크기에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 두 번째로 예측에 사용하는 GCM의 변수를 보면, 이 연구에서는 GCM의 해면기압을 사용하였으나 오재호 외(1994)는 GCM의 강수량을 사용했다는 점이다. 현 연구에서 사용한 방법은 광역 변수와 지역 변수사이의 상관성(예를 들면 Fig. 3)에 기초하기 때문에 광역변수의 시공간 패턴이 지역변수의 시공간 패턴과 관련성이 적을 경우 예측 신뢰도가 낮아진다. 따라서 GCM의 광역변수의 차이도 시나리오의 차이에 일정 부분 기여할 것으로 판단된다.

이 연구 결과에서 주목해야 할 부분은 이산화탄소 배증 시점의 강수량 변화 이외에도 10년 이상의 장주기 변동이 두드러지게 나타난다는 점이다. 이산화탄소가 배증되는 70년을 전후해서 나타나는 강수량의 변동은 그 외의 기간에 나타나는 음과 양의 편차에 비하면 매우 적은 변동을 갖는다. 특히 이산화탄소 배증 시점 이전에 한 번의 강한 양의 편차가 10년 이상 지속되고, 이후에 한 번의 강한 음의 편차가 나타난다. 따라서 이러한 장주기 변동성은 관측과 시나리오에서 나타난 특성으로써 장기적인 물관리 정책, 농업 정책 등에 유용한 정보로 활용되어야 할 것이다. 또한 오성남 외(1998)에서 제시한 바와 같이 온난화에 따른 수

문수지 변화 등을 강수의 장주기적인 관점에서 고찰하여야 할 것이다.

5. 결론

이 연구에서는 광역규모 예측인자와 예측변수사이의 결합모드를 김맹기와 강인식(1997)의 방법에 따라 구축하고, 이를 GFDL 해양-대기결합모델의 이산화탄소 점증실험의 결과에 적용하여 한반도 겨울철 강수량의 변화 시나리오를 제시하였다. 통계모델의 구축에 사용한 예측인자는 NCEP 해면기압 자료이며, 예측변수는 한반도 겨울철 평균 강수량이다. 관측 강수량 자료는 12개 관측소의 자료로 최근 40년간의 일 평균 자료를 계절평균하여 사용하였다. 모델의 자료는 표준 실험 및 이산화탄소 점증 실험 자료이며 180년간의 자료가 사용되었다. 사용한 예측인자의 영역은 북위 15°에서 70°, 동경 60°에서 서경 150°까지로 동아시아 몬순 순환의 영역을 포함한다.

관측에서 나타난 해면기압의 장주기 변동은 한반도의 겨울철 강수량의 변화와 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다. 특히 해면기압으로부터 예측한 강수량은 관측값에서 나타나는 10년 이상의 장주기 변동을 비교적 잘 설명하였다. 기압 패턴을 보면 알루산 지역의 해면 기압 편차가 나타나고 시베리아를 포함한 고위도에 음의 해면기압 편차가 나타날 때 한반도의 강수는 모든 관측소에서 양의 편차를 나타냈으며, 그러한 해면 기압의 편차가 클수록 한반도 강수량의 양의 편차는 증가하였다. 그 이유는 이러한 기압 패턴이 나타날 때 한반도의 남동쪽으로부터 고온 다습한 공기가 유입되기 좋은 구조를 갖기 때문이다. 또한 한반도의 서쪽보다는 동쪽에서 양의 편차가 더 크게 나타났는데 이는 유입된 습윤 공기가 태백산맥에 의한 지형 효과와 관련되어 있는 것으로 판단된다. 통계 모델에 의해 예측한 겨울철 강수량은 관측값과 평균적으로 약 0.65의 상관 관계를 보였으며, 관측소에 따라 적게는 0.54, 크게는 0.74의 상관관계를 보였다. 지역 기후를 예측하기 위한 광역규모 예측인자의 적합성은 광역 규모 해면기압 변동과 한반도 강수량사이의 연관성이 얼마나 강인가에 좌우된다. 이를 조사하기 위해서 관측자료를 이용하여 두 변수사이의 결합모드가 조사되었다. 첫 번째 결합모드는 전체 변동의 약 25.7%를 설명하였으며, 두 변수의 시간변동을 나타내는 시간계수사이에는 약 0.82의 상관관계를 나타냈다. 해면기압 패턴은 북태평양과 시베리아 지역에 양과 음의 진동형태를 보여주는 EOF의 첫 번째 모드에 대한 고유벡터와 유사하였다. 해면기압 패턴과 연관된

한반도 강수는 모든 관측소에서 같은 부호로 진동하는 형태를 나타냈으며 한반도의 서쪽보다는 동쪽에서 더 큰 시그널을 보였다.

경험적적교합수 분석을 이용하여 GCM의 기준실험 (1xCO₂)에서 나타난 해면기압 변동이 관측에서 나타난 해면기압 변동을 어느 정도 잘 설명할수 있는가를 조사하였다. 그 결과 관측자료에 나타난 첫 번째 고유모드는 전체 변동의 약 23.6%를 나타냈으며, 북태평양과 시베리아 지역에 양과 음의 중심을 둔 진동 형태를 보였다. 모델의 첫 번째 고유모드는 전체 변동의 약 20.1%를 설명하였으며, 관측에서 나타난 패턴과 상당히 유사하였다. 관측에서 나타난 두 번째 고유모드는 전체변동의 약 19.6%를 나타냈으며, 태평양상에서 뚜렷한 남북 진동모드를 보였다. 전체변동의 약 17.4%를 설명하는 모델의 두 번째 모드는 관측에서 나타난 태평양상의 남북진동 형태는 비교적 잘 재현하였으나 시베리아 지역의 경우 관측보다 모델에서 더 강한 시그널을 보였다. 이러한 결과는 지역에 따라 부분적으로 차이는 있으나 모델의 광역규모 순환이 관측에서 나타나는 광역규모 순환과 좋은 상관성이 있음을 의미하므로 지역기후를 예측하기 위한 예측인자로써 적절하다는 것을 의미한다.

관측자료를 이용하여 구축한 통계모델을 GFDL 모델의 광역규모 예측인자인 해면기압에 적용하여 이산화탄소 점증에 따른 한반도의 겨울철 강수량 변화를 예측하였다. 그 결과 한반도의 겨울철 강수량은 기온과 달리 경향이 중요한 것이 아니라 10년 이상의 장주기가 두드러지게 나타났다. 특히 이산화탄소 배증시점 이전에 약 10년이상 지속되는 강한 양의 편차가 한 번 나타나고, 이어서 강한 음의 편차가 한 번 나타났다. 이 연구에서는 GCM이 잘 모의하는 대기순환과 관측에서 얻은 시그널을 모두 활용하여 미래의 한반도 겨울철 강수량을 예측하였으며 예측의 신뢰도를 가능하는 다음의 두가지 조건이 만족되었다. 첫째는 예측에 사용한 통계모델을 관측 해면기압에 적용하였을 때 관측에서 나타나는 강수량의 장주기 변동을 잘 설명한다는 점이며, 두번째는 예측에 사용한 GCM의 해면기압이 관측에서 나타나는 해면기압 변동을 비교적 잘 나타낸다는 점이다. 따라서 이산화탄소가 1년에 1%의 증가율로 증가한다는 가정하에서 한반도 겨울철 강수량은 수십년 주기의 장주기 변동이 매우 뚜렷하게 나타날 것으로 예측된다. 이러한 결과는 차후의 강수 시나리오에 대한 연구가 이산화탄소 배증 시점에서 강수량의 증감을 논하는 것보다는 장주기 변동의 편차가 나타나는 시점과 그 관련 역학이 중요하게 다루어져야 한다는 것을 의미한다.

감 사

이 연구는 환경부에서 주관하고 있는 G7 연구과제 『지구온난화 시나리오 개발』의 지원에 의해 이루어졌다.

참고문헌

- 강인식, 김맹기, 심태보, 1994 : 한반도 주위 해양에서의 해면 열수지와 응력의 계절변화. 한국해양학회지, 29권 4호, 325-337.
- 곽종흠, 김희수, 김맹기, 1997 : 우리나라 대도시 기후 변수들의 변동성과 그 연관성. 한국지구과학회지, 18권 3호, 207-216.
- 김맹기, 강인식, 1997 : 광역 기후 변수와 지역 기후 변수사이의 통계적 연관성: 한반도의 온난화와 연관된 북반구 해면기압패턴. 한국기상학회지, 33권 2호, 261-271.
- 오성남, 하경자, 김기영, 김정우, 1998 : 배증 이산화탄소 기후에 따른 동북아시아 지역의 수문영향. 한국기상학회지, 34권 2호, 293-305.
- 오재호, 박지업, 김정우, 성학중, 1994 : CO₂ 배증이 한반도 기후변화에 미치는 영향 (강수량 변화 예측 시나리오). 한국기상학회지, 30권 3호, 335-362.
- 허창희, 강인식, 1988 : 한국 지역 강수의 변동성에 관한 연구. 한국기상학회지, 24권 1호, 38-48.
- Bretherton, C. S., C. Smith, and J. M. Wallace, 1992 : An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. *J. Climate*, 5, 541-560.
- Giorgi, F. G., 1990 : Sensitivity of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Climate*, 3, 941 - 963.
- _____, M. R., Marinucci, and G. T. Bates, 1993 : Development of a second-generation regional climate model. Part I. Boundary layer and radiative processes. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2794 - 2813.
- Grotch, S. L., and M. C. MacCracken, 1991 : The use of general circulation models to predict regional climatic change. *J. Climate*, 4, 286-303.
- IPCC, 1995 : Second Scientific Assessment of Climate Change, Summary for Policemakers. Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO/UNEP, Cambridge University Press, Cambridge.
- Karl T. R., W. C. Wang, M. E. Schlesinger, R.W.Knight, and D.Portman, 1990 : A method of relating general circulation model simulated climate to the observed local climate. *J. Climate*, 3, 1053-1079.
- Kim, J.-W., J.-T. Chang, N. L. Barker, D. S. Wilks and W. L. Gates, 1984 : The statistical problem of climate inversion: Determination of the relationship between local and large-scale climate. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 2069-2077.
- Manabe, S., R. J. Stouffer, M. J. Spelman, and K. Bryan,

- 1991 : Transient response of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes in atmospheric CO₂. Part 1 : Annual mean response. *J. Climate*, **4**, 785-818.
- Martin, E. B. Timbal, and E. Brun, 1997 : Downscaling of general circulation model outputs: simulation of the snow climatology of the French Alps and sensitivity to climate change. *Climate Change*, **13**, 45-56.
- Noguer, M., 1994 : Using statistical techniques to deduce local climate distributions. An application for model validation. *Met. Apps.*, **1**, 277-287.
- Preisendorfer, R. W., and C. D. Mobley, 1988 : Principal component analysis in meteorology and oceanography. *Elsevier Sci. Pub.*, 425pp.
- Smith, J. B., 1991 : The potential impacts of climate change on the Great Lakes. *Bull. Amer. Meteo. Soc.*, **72**(1), 21-28.
- Schubert, S. and A. Henderson-Sellers, 1997 : A statistical model to downscale local daily temperature extremes from synoptic-scale atmospheric circulation pattern in the Australian region. *Climate Dynamics*, **13**, 223-234.
- von Storch H., E. Zorita, and U. Cubasch, 1993 : Downscaling of global climate estimates to regional scales: an application to the Iberian rainfall in wintertime, *J. Climate*, **6**, 1161-1171.
- Wigley, T. M. L., P. D. Jones, K. R. Briffa, and G. Smith, 1990 : Obtaining sub-grid-scale information from coarse-resolution general circulation model output. *J. Geophys. Res.*, **95**(D2), 1943-1953.
- Zorita, E., V. Kharin, and H. von Storch, 1992 : The atmospheric circulation and the sea surface temperature in the North Atlantic area in winter: their interaction and relevance for the Iberian Peninsula. *J. Climate*, **6**, 1097-1108.