

## 대기중 CO<sub>2</sub> 증가에 따른 한반도 강수량 변화 Precipitation Change in Korea due to Atmospheric CO<sub>2</sub> Increase

오 재 호\* · 홍 성 길\*  
Oh, Jal-Ho · Hong, Sung-Gil

### Abstract

A precipitation change in Korea due to atmospheric CO<sub>2</sub> doubling has been estimated with a mixed method (Robinson and Finkelstein, 1991) to represent regional precipitation distribution from the simulated precipitation data by three GCM(general circulation model) (CCC, UI, and GFDL GCM) experiments. As a result of this analysis, the precipitation change by atmospheric CO<sub>2</sub> doubling can be summarized as follows: The precipitation increases as much as 25mm/yr during spring season and more than 50mm/yr during summer and autumn. However, it decreases as much as 13mm/yr during winter. In terms of percentage with respect to current precipitation climatology, we may have more rain as much as 10%, 13% and 24%, respectively, for spring, summer and autumn than current precipitation. However, we may have less winter precipitation than current climatological average.

### 요 지

대기중 CO<sub>2</sub> 배중에 따른 한반도 강수량 변화가 3개 GCM(CCC, UI와 GFDL)의 기후변화 실험에 따른 광역적 강수변동 자료로부터 Robinson과 Finkelstein이 제시한 혼합적 방법에 의하여 계산되었다. 계산 결과 도출된 대기중 CO<sub>2</sub> 배중에 따라 예상되는 강수량 변화는 다음과 같다. 봄철에 예상되는 강수량 증가는 약 25mm/yr 정도이며 여름철과 가을철의 강수량 증가는 50mm/yr를 상회하였다. 그러나 겨울철에는 13 mm/yr 감소하였다. 현 강수량에 대한 백분율로 보면 봄철, 여름철과 가을철에 각각 10%, 13%와 24%의 강수량 증가를 보인 반면에 겨울철에는 현재보다 다소 감소할 것이 예상된다.

### 1. 서 론

17세기 산업 혁명 이후 나날이 가속되고 있는 화석 연료의 사용 증가 때문에 대기중 온실 기체의

함유량도 급속히 증가되고 있다(Trend, 1991). 기후학자들은 이런 화석연료 사용 증가추세로 다음 세기 중엽에는 CO<sub>2</sub>가 산업혁명 이전의 대기중 CO<sub>2</sub> 양보다 약 두 배에 도달하리라 예상하고 있다. 한편으로는, 산업의 발달과 더불어 급속히 늘어나고

\* 기상청, 기상연구소

있는 인구는 이미 중위도 지방의 경제 선진국의 삼림을 잠식했다. 계속되는 이러한 개발은 지구상에 남아 있는 유일한 원시 삼림지역인 적도 우림 지역과 시베리아의 처녀림 지역으로도 확대되어, 그나마 대기중의 탄소를 고화시킬 수 있는 기회를 줄이고 있다. 즉, 자연적 탄소 순환에서 화석연료 사용에 이어 또 다른 제약을 가함으로써 대기중 탄산가스 증가를 촉진하고 있다(Pastor와 Post, 1986). 1990년 세계의 300여 명의 기후학자들이 모여 이런 대기중 온실 기체의 급격한 증가가 태양으로부터 들어오는 일사를 투과시키고 지구 특히 지표에서 외부로 방출되는 지구 복사를 흡수한 다음 지표로 되돌려 보내는, 온실효과를 강화시켜 지구 온난화가 일어날 수 있다는 사실과, 온난화에 따른 빈번한 악기상의 발생, 강수대 변화, 해수면 상승 등 인류 생존 자체에 대한 위협을 경고하게 되었다(Climat change, 1990).

특히 현재 우리가 직면하고 있는 지구 온난화는, 긴 기간에 걸쳐서 일어나거나 또는 주기적으로 일어나는 자연적 기후 변화라기 보다는 인위적일 수 있다는 것과, 그 진행 방향이 주기적이 아닌 것, 또 그 진행 속도가 과거의 대기 중의 온실 기체 변화보다 상당히 빠르다는 사실은, 우리 모두에게 경각심을 불러일으키고 있다. Bruce(1994)는 지난 10년간 자연재해에 의하여 발생한 경제적 손실은 1960년대에 발생한 것보다 약 4배에 달한다고 보고하였다. 이러한 추세는 앞으로 더 증가될 것이라고 추정하였다. 이러한 이유로는 자연재해가 발생할 가능성이 있는 지역에서 경제 개발을 지속함으로써 자연재해 증가를 억제하는 산림을 개발하여 산지에서 토사발생이 증가, 도시화에 따라 많은 지역이 건축물화, 포장화하여 강수의 일시적 방출로서 자연재해의 강도와 발생빈도가 변화함을 꼽을 수 있다. Organization for Economic Cooperation and Development의 보고(1986)에 의하면 Canada의 남부 Ontario 지역에서의 도시화에 따른 강수 유출의 증가는 약 10~43% 정도에 달한다고 보고된 바 있다.

최근의 전지구 순환 모형(general circulation model, GCM)을 이용한 온실기체 증가에 의한 기후변화 연구에서 대기중 CO<sub>2</sub>가 배증되면 많은 지

역이 지금보다 더 극심한 홍수와 가뭄을 겪을 것이라고 보고된 바 있다(Rind, 1993; Rowntree, 1993). 즉, 현재 강수가 많은 지역은 홍수가 더욱 빈번하며 또 강수가 비교적 적은 지역은 더 빈번한 가뭄을 예상하고 있는 것이다(Meehl, 1993). 이는 앞에서 언급된 바와 같이 인위적인 경제 개발에 따른 자연재해 피해의 증가와 더불어 또 하나의 인류에 대한 위협이 되고 있는 것이다.

지구 온난화에 따른 자연재해의 증가를 억제하는 방법은 그 요인을 없애는 것으로서 대기 중의 온실기체량을 줄이는 것이다. 화석연료 사용을 억제하여 대기 중 온실 기체의 증가 근원을 줄이고, 삼림을 확장시켜 대기중 탄산가스를 식물체를 이용해 고착시키는 방법이다. 최근에는 바닷물에 철분을 투입함으로써 조류를 번성하게 하여 대기중 CO<sub>2</sub>를 고착시키는 시도가 미국의 3개 해양연구소에서 공동으로 추진되고 있다고 보도되고 있다(중앙일보, 1994. 12. 20일자). 그러나 그 어느 하나도 쉽게 효과적으로 이루어질 수 있는 것은 아니다. Pearce(1991)가 보고한 바와 같이 화석연료 사용을 억제하는 것은 곧 경제의 위축을 유발할 수 있으며, 이미 개발된 지역을 삼림으로 되돌려 보내는 것이나 해양 조류의 성장을 촉진시키는 노력들은 이들 식물체가 성장하는데 걸리는 시간들을 고려할 때 쉽게 해결책으로 고려되기는 어렵다.

따라서 이러한 지구 온난화의 피해를 극복하기 위해서는 각 산업별로 효과적인 대책이 수립되어야만 한다. 특히 이 대책은 기후 변화 예측을 바탕으로 그 영향을 가장 완화시키면서 우리의 사회적, 경제적 환경에 대한 손상을 극소화하는 방향으로 이루어져야 한다. 이를 위해 이 연구는 지난 지구 역사 중 가장 급격한 변화로써 생태계와 산업활동에 큰 영향을 줄뿐만 아니라 인류생존에까지 위협을 줄 수 있는 지구 온난화에 따른 기후변화가 한반도 지역 강수량에 미칠 정도의 가능성을 제시함으로써 대응방안 모색에 도움을 제공하고자 한다. 본 연구에서는 오재호(1993)와 오재호 등(1994)에 의하여 보고된 CO<sub>2</sub> 배증에 따른 한반도 강수량 변화 시나리오를 보완한 것이다.

## 2. GCM을 이용한 기후 모사

기본적인 물리 법칙들에 기초를 둔 많은 수치 모형들 중 특히 GCM이 지구적인 기후를 모사하기 위하여 개발되고 개선되어왔다. 이런 기후 모형은 기후를 결정하는데 중요한 여러 물리과정의 상호작용을 동시에 고려하여 과거, 현재 및 미래의 기후 변화를 객관적인 수치로 제공하여 주는 까닭에 기후 변화 연구를 하는데 있어서 현재까지 유일하고 강력한 수단으로 알려지고 있다.

GCM은 복잡한 기후 시스템을 모사하기 위한 과학적 법칙, 경험적 지식 등을 바탕으로 하는 복잡하고 많은 수치적 방법들의 집합체이다. 현재 대부분의 GCM은 기술상 제약 때문에 그 해상도가 충분히 세밀하지 못하다. 따라서, 격자점보다 매우 작은 규모 현상의 역할을 나타내기 위해서 GCM은 소위 모수화(parameterization)라는 수학적 특성화(mathematical characterization)를 이용한다. 전형적인 GCM은 수많은 변수들과 관련된 방정식들을 포함하고 있으며, 지금 이 시간에도 다른 변수들과 방정식들이 현 기후의 보다 나은 재현을 위해 GCM의 일부로 계속적으로 도입되고 있다.

그러나 현재 운용되고 있는 대부분의 GCM들의 약점은, 특히 강수량 예측과 관련하여, 우리가 살고 있는 지구가 다른 행성과는 달리 물의 행성(aqua-planet)이라 불릴 정도로 물이 지구 기후에 중요한 역할을 함에도 불구하고, 기후 변화에 큰 영향을 주는 과정들인 구름, 해양 그리고 물 순환의 상호작용들이 충분히 반영되고 있지 못하다는 점이다. 따라서 이러한 GCM 수준에서 수십년 이후의 기후를 정확하게 예측한다는 것은 쉽지 않다. 하나의 예로, Cess 등(1990)은 구름을 제거한 경우의 GCM들간의 계산은 비교적 유사한 결과를 보이는 반면에 구름이 작용하면 그 결과는 큰 차이를 나타냄을 보고하였다. GCM속에서는 기후시스템 속에서 일어나는 여러 물리적 현상을 기술하기 위해서 많은 모수화를 포함하고 있다. 같은 조건에서도 각 GCM마다 차이를 보이는 것은 일부 물리과정의 모수화가 증명되지 않은 많은 가설 또는 가정을 근거로 한 까닭이다. 또 다른 이유는 현재 대

부분의 모형 격자 간격이 잘 알려진 주요 강수대를 자세히 모사하기에는 충분히 조밀하지 못하다는 점이다. 이상과 같이 GCM을 이용한 단계적 또는 점진적 CO<sub>2</sub> 증가 실험은 5° 격자 간격의 대규모 강수량 관측 자료와 같은 대규모적인 지역 강수 분포는 반영할 수 있어도 이보다 작은 알프스나 아프리카 고원 분지 등에서의 강수 특성은 반영하지 못한다(Hulme, 1992).

또 다른 어려운 점은 현재 예상되는 대기중 온실기체 증가로 인한 기후 변화 정도가 비교적 작을 때이다. 특히 지표면 기온과 강수량 변화가 자연적인 일변화, 계절 변화 또는 다년간에 걸쳐 일어나는 다년간 변동(interannual variation) 보다 그 정도가 작을 때, 이 기후 변화의 신호는 다른 자연적 변화의 신호보다 약해서 파악하기가 쉽지 않다.

이상과 같은 부족한 점들을 포함하고 있음에도 불구하고 기후 모형들은 기온과 강수의 위도별 분포, 기온의 계절 변화, 광역적 기압 분포와 연변화, 바람 분포, 성층권 하부의 Jet 기류와 연관된 주요 기압골(storm track) 등, 여름과 겨울의 지구적 기후 요소 분포를 상당한 정도로 모사하고 있다.

## 3. CO<sub>2</sub> 배증에 의한 GCM 기후 변화

CO<sub>2</sub> 배증에 따른 각 GCM들에 의한 광역적 강수량 변화는 오재호 등(1994)에 의하여 보고된 바 있다. 본 연구에 이용된 CCC(Canadian Climate Center) GCM(Boer 등, 1992), UI(University of Illinois) GCM(Schlesinger와 Zhao, 1989)과 GFDL(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) GCM(Manabe 등, 1991)의 역학적, 물리적 특성은 Table 1과 같다. Table 1에서 보는 바와 같이 이 연구에 이용된 GCM들은 대부분 유사한 물리적 과정과 경계 조건들을 갖고 있다. 그러나 CCC와 UI GCM은 일사의 일변화를 고려하고 있는 반면, GFDL GCM은 일사의 일변화를 고려하고 있지 않다. 모형 특성상 또 다른 큰 차이는 모형 속에서 해양의 취급을 꼽을 수 있다. GFDL GCM은 3차원적 해양 모형을 포함하고 있으나, 나머지 GCM들은 단지 간단한 혼합층 해양(mixed layer ocean)만 고려하고 있다. 또 강수는 구름

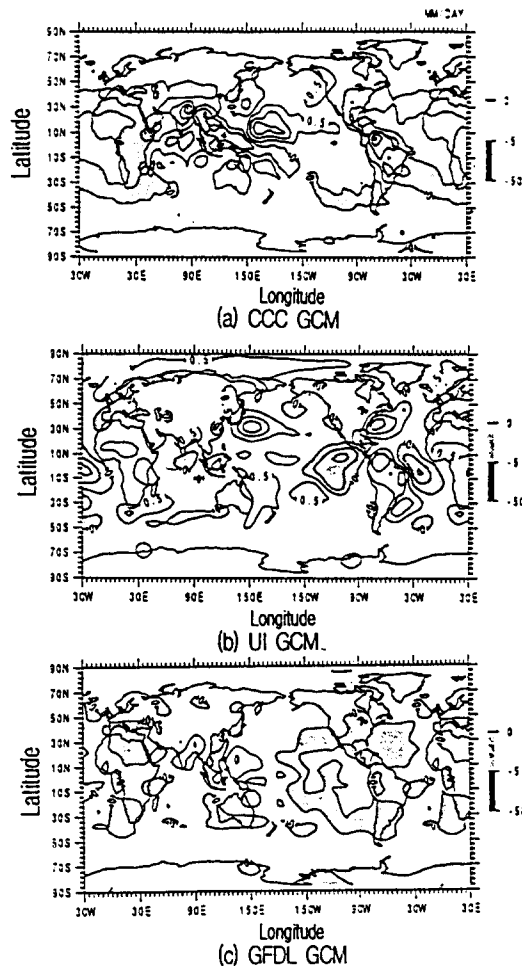


Fig. 1. Precipitation Change by GCMs with Atmospheric CO<sub>2</sub> Doubling(Contour interval:0.5mm/day)

속의 미세물리 과정들(micro-physical processes)에 의하여 생성되며, 이 미세 물리 과정들을 유발하는 요인은 지역적 특성과 아울러 대기의 대규모 순환과 밀접한 관련이 있다. 특히, 우리의 관심사가 강수 이벤트(event) 자체에 있는 것이 아니라 기후값(climatological value)에 있는 경우, 지역적 강수의 특성을 이해하기 위해서는 먼저 전구적인 관점(global perspective)에서 살펴 보아야 한다.

Fig. 1은 오재호 등(1994)의 결과를 정리하여 요약한 것으로 Fig. 1(a)는 CO<sub>2</sub> 배증에 의한

CCC GCM 강수량 변화를 보여주며 Fig. 1(b)는 UI GCM 그리고 Fig. 1(c)는 GFDL GCM에 의한 강수량 변화를 보여주고 있다. CO<sub>2</sub> 배증에 의한 전구적인 강수량 변화는 전구 평균의 약 4~12% 강수 증가를 나타내고 있으며 동북아시아에서는 UI, GFDL 모형에서 평균 5~21% 증가를 보이고 있고, CCC는 CO<sub>2</sub> 배증에 의한 강수량 변화가 아주 작음을 보여주고 있다.

전구적 강수량 변화 경향은 대부분 지역에서 CO<sub>2</sub> 증가에 따라 많은 지역에서 강수량이 증가하였다. 그러나 CCC GCM은 인도양을 중심으로 적도 수

Table 1. General Characteristics of Three Climate Models Used on the CO<sub>2</sub> Doubling Experiment.

Parameter	Models		
	CCC	GFDL	UI
Horizontal spatial resolution(lat. by lon.)	T32	4.5 by 7.5	4 by 5
Vertical resolution (no. of layers)	10	9	2
Geography of land/ocean distribution	Realistic	Realistic	Realistic
Topography	Realistic	Realistic	Realistic
Solar radiation	Seasonal and diurnal cycles	Seasonally varying, not diurnal	Seasonal and diurnal
Cloud distribution in troposphere: computed or specified	Computed	Computed	Computed
Aspects of sea-surface temperature(SST) calculation	Computed SST based on surface energy budget and specified ocean heat transport and mixed-layer heat capacity	Ocean temp. change computed by OGCM	Computed oceanic mixed-layer temperature and SST
Surface albedo over snow-free land	Depend on local vegetation	Prescribed geographically	
Normal Atmospheric CO <sub>2</sub> concentration used for 1×CO <sub>2</sub> control run	330 ppmv	300 ppmv	326 ppmv
Basis of soil moisture budget calculations	Bucket method	Bucket method: one-layer of soil: only one specified soil field capacity	
Number of cloud layers permitted	9	Clouds are allowed from in each layer	Clouds are allowed from in each layer
Type of ocean model: depth of mixed layer	Mixed-layer ocean model: constant 50m depth of mixed layer	OGCM	Mixed-layer ocean model: constant 50m depth of mixed layer
Horizontal oceanic heat transport?	No	Yes	No
Oceanic heat exchange between mixed-layer and deeper layer of ocean?	No	Yes	No

럼 지역을 비롯한 쿠로시오 지역, 남태평양 수렴 지역에서 강수량이 많이 감소됨을 보여 준다. UI GCM은 CCC GCM 보다 더 많은 지역에서 강수량이 증가함을 보여준다. 특히 중위도 대륙의 동쪽 해양에서 강수량이 현저하게 증가되었다. 그러나 적도 등 태평양과 대서양에서 강수량이 많이 감소되었다. GFDL GCM도 인도-티벳 지방과 적도 서태평양 지역에서 강수량이 특히 증가하였으며 지중해

를 중심으로 한 남부 유럽과 북부 아프리카, 중국의 남동부 지방과 베트남 지역, 그리고 미국과 중앙 아메리카에서 강수량이 감소함을 보여 준다.

한반도 부근의 강수량 변화 경향은 전체적으로 강수량은 증가되었으나 CCC GCM의 경우 일본을 비롯한 동쪽 태평양 지역, 화남과 몽골 지방에서 강수량이 감소함을 보였다. UI GCM의 경우 한국의 동해와 일본을 포함하는 서태평양에서 강수량이 현저

하게 증가되며, 다만 중국의 화중 지방에서 강수가 다소 감소함을 보여준다. 또 GFDL GCM은 한반도 주변에서 전반적으로 강수량이 증가되나 화중, 화남 지방에서 각각 감소함을 보였다.

이와 같이 대기중 CO<sub>2</sub> 배중에 의한 전구 평균은 이 분석에 이용된 GCM 모두 증가됨을 보이고 있으나 지역적 강수량 변화는 각 GCM 마다 독특한 특성을 보이고 있다. 이런 차이의 주 원인중 하나는 Table 1에서처럼 각 GCM의 역학적, 물리적 과정들이 같지 않기 때문이다.

#### 4. GCM과 지역 강수 분포간의 상관관계

현재 대부분의 GCM으로부터 얻을 수 있는 기후 자료의 수평 해상도는 수백 km 이상이어서 지역 기후 변화에 대해서는 충분한 정보를 얻지 못한다(Fig. 2 참조). 따라서 이러한 GCM의 약점을 보완할 수 있는 방법이 연구되어 왔다. 그중에서 가장 쉽게 생각할 수 있는 것이 넓은 GCM 격자에서의 정보를 세밀하게 내삽하여 구하는 방법인데, Grotch와 McCracken(1991)은 이 방법이 지역 기후를 산출하는데는 적절하지 않음을 지적하였다.

최근에 GCM의 광역적 정보를 지역적 모형에 제공하여 필요한 지역의 자세한 정보를 구하는 방법으로, Wigley 등(1990)은 지역적 기후 변동의 현재 기후의 변동과 미래 기후 변동간의 관계를 선형적 회귀 관계로 가정하고 산출하는 방법을 제시하였다. 그들은 월 평균 기온, 강수량, 평균 해면 기압과 700hPa 고도 자료를 이용하여 대규모 기후와 지역적 기후의 상관 관계를 설명함으로써 GCM 결과의 지역적 기후 변화 설명을 시도하였다.

이 연구에 이용된 지역기후 작성 방법은 Robinson과 Finkelstein(1991)이 제시한, 현재 널리 사용되고 있는 기후 변화 시나리오 작성 방법 중 Fig. 3에서 보는 바와 같이 혼합적 방법을 이용하여 온실 기체 증가에 의한 한반도 주변의 지역적 강수량 변화를 계산했다. 한반도내 각 관측소의 강수량 자료가 한반도 주변에 위치한 GCM의 대규모 격자점들과 어떤 상관 관계가 있다는 가정하에, 다음과 같이 한반도 내의 각 관측소와 GCM 자료

간의 선형적 관계를 구하였다(오재호 등, 1994). 즉,

$$P_j^{(t)} = \sum_{i=1}^I a_i R_i^{(t)} + \epsilon_j^{(t)}, \quad i=1, \dots, 9; j=1, \dots, 85 \quad (1)$$

여기서  $P_j$ 는 그림 2에서 표시된 한반도 내에 있는 각 관측 지점의 강수량을 나타낸다. 아래 첨자  $j$ 는 한반도 내의 각 관측소를 표시하며 1부터 85까지 변한다.  $i$ 는 한반도 주변의 GCM 격자점을 의미하며 여기서는 9개 격자점이 고려되었다(Fig. 4).  $R$ 은 GCM 격자점에서 강수량을 표시하며,  $a$ 는 지역 강수( $P$ )와 광역 강수( $R$ ) 사이를 연결하는 전환 매트릭스(transfer matrix)이다.  $\epsilon$ 는 오차이다. 또 첨자  $t$ 는 시간의 함수임을 나타낸다.

부록에서 상세히 소개된 바와 같이 식 (1)의 오차 제곱 합이 최소화하는 경우를 택하면 다음과 같은 GCM 격자점의 강수량과 한반도 지역 강수량 값 사이의 관계식을 각 지점의 표준 편차와 correlation  $\gamma$ 에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\sum_{i=1}^I a_i \sigma_{\gamma_{ij}} \sigma_k + \lambda \bar{R}_k = \sigma_{\gamma_{jk}} \sigma_k, \quad i=1, \dots, 9; k=1, \dots, 9, \quad (2)$$

그리고

$$\sum_{i=1}^I a_i \bar{R}_i = \bar{P}_j \quad (3)$$

여기서,  $(-)$ 는 시간 평균을,  $j$ 와  $k$ 는 임의의 GCM 격자점을 나타내며  $\lambda$ 는 임의의 변수이다. 또

$$\sigma_{\gamma_{jk}} \sigma_k = \overline{R_j' R_k'} \quad (4)$$

그리고

$$\sigma_{\gamma_{jk}} \sigma_k = \overline{R_j' R_k'} \quad (5)$$

이다. 또 식 (4)와 (5)에서  $\overline{R_j' R_k'}$ 는 GCM 격자값

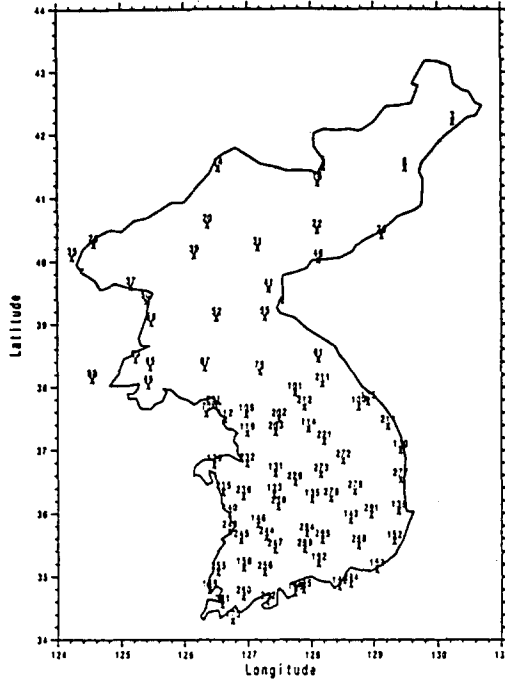


Fig. 2. Location of Rain Gauge Stations in Korea with Their Station Numbers.

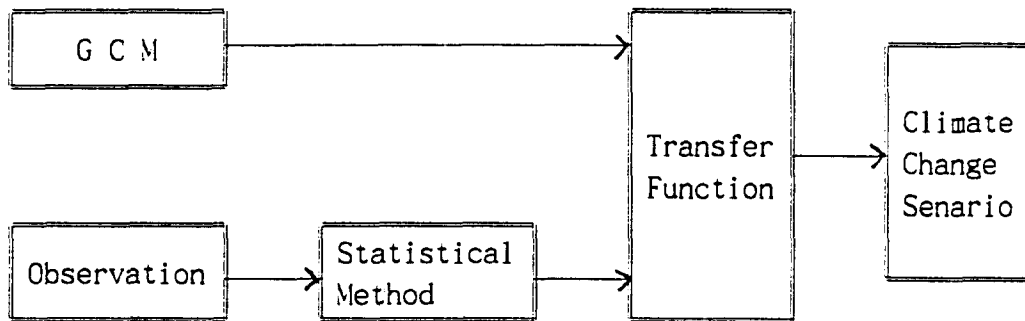


Fig. 3. Combined Scheme for Scenario Development(from Robinson and Finkelstein, 1991).

들 간의 공분산(covariance),  $\overline{R_i R_k}$ 은 지역 강수량과 GCM 격자값들 간의 공분산을 각각 나타낸다. 따라서, 만약 전환 매트릭스  $a_i$ 를 알고 있으면 GCM 강수 자료 ( $\overline{R_i}$ )로 부터 지역 강수량( $\overline{P_i}$ )을 추정할 수 있다. 즉 전환 매트릭스  $a$ 는 GCM 강수량( $R$ )과 지역강수량( $P$ )으로부터 선형방정식 (3)을 이용하여 구할 수 있다. 또 이 전환 매트릭스가 시간에 따라 변하지 않는다고 가정하면 GCM에

의한  $2 \times \text{CO}_2$  때의 강수량 실험 결과로부터  $2 \times \text{CO}_2$  때의 지역강수량을 구할 수 있다.

본 연구에 이용된 한반도 강수량 자료는 1983~1992년까지의 10년간 85 지점의 관측자료이며 GCM 강수자료(CCC, UI와 GFDL)는  $1 \times \text{CO}_2$  기후를 대표하는 10년간 모형 강수자료가 사용되었다. GCM을 이용한 기후재현은 어떤 사상의 모의 발생이 기후의 장기간 평균 현상을 표현하는 것이

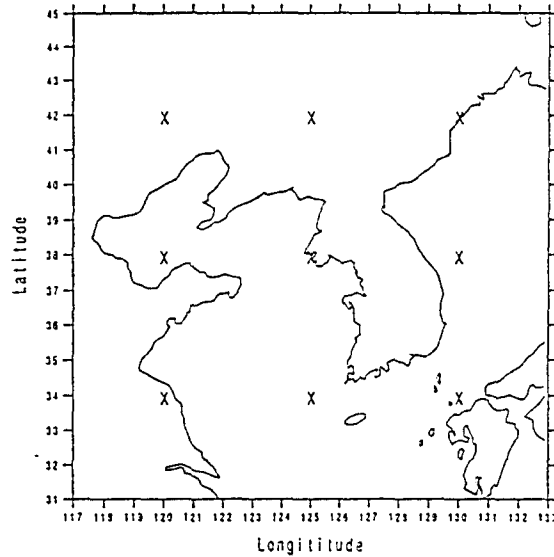


Fig. 4. Typical Location of GCM Precipitation Data Points Marked by x's near Korea.

기에 이 모형 자료는 각 GCM마다 특정한 기간이 아니라 현기후 모사의 적분에서 마지막 10년 동안 자료이다.

특히, 앞에서 언급된 전환 매트릭스는 물리적으로 지역적 특성을 내포하고 있다고 간주할 수 있다. 따라서, 이 전환 매트릭스는 공간구조 뿐만 아니라 시간 구조도 포함될 수 있다. 그러나, 본 연구에서는 이 전환 매트릭스의 시간에 따른 변화는 고려하지 않았다. 그 이유는 현재 GCM이 생산하는 강수량 자료의 질에 견주어 볼 때, 너무 자세한 통계 분석은 형평이 맞지 않기 때문이다. 즉, 이 전환 매트릭스는 기후값에 대하여 의미가 있기 때문에 시간적 변화에 대하여 너무 자세한 고려는 객관성을 잃게 할 염려가 있기 때문이다. 그러나, 현재 세계적으로 확실히 진행되고 있는 물리과정 모수화 개선에 따라 GCM의 강수량 자료 신뢰도가 향상될 때는 보다 더 정밀한 통계 분석이 의미를 가질 것이다.

##### 5. CO<sub>2</sub> 배증에 따른 지역 강수량 변화

각 GCM 자료에 의한 한반도 지역의 강수량 변화는 오재호 등(1994)에 상세하게 보고된 바 있다.

앞 4장에서 제시된 방법을 이용하여 대기중 CO<sub>2</sub>가 배증되었을 때 GCM에 의한 광역적 강수량 변화 자료를 바탕으로 전환 매트릭스에 의한 한국내의 강수량 변화를 산출하였다. 그 결과를 다음과 같이 요약해서 정리할 수 있다. 첫째, CO<sub>2</sub> 증가에 따라 강수량은 전국적으로 증가했다(CCC GCM, UI GCM). 이는 대부분 지역에서 광역적 결과와 유사하다. 그러나 GFDL GCM은 CCC GCM과 UI GCM 경우의 13~15% 강수량 증가에 비하여 매우 적은 2% 증가를 보였다. 둘째, 여름철(6, 7, 8월) 강수는 CCC GCM과 UI GCM에서 각각 약 15%와 26% 증가했다. 이와는 달리 GFDL GCM은 약 20~30% 강수가 감소한 것으로 나타났다. 셋째, 겨울철(12, 1, 2월)은 여름과는 반대로 CCC GCM은 25~30% 감소, UI GCM은 -4~40%의 지역 변화와 전국 평균으로 미미한 변화, 그리고 GFDL GCM은 4~12% 증가를 보였다.

이와 같이 한반도에서 CO<sub>2</sub> 배증에 의한 강수량 변화가 GCM에 따라 상반된 결과를 보여주고 있는 것은 앞에서 언급한 각 GCM속의 역학적, 물리적 과정의 차이점과 전환 함수를 산출하는 방법이 충분히 객관적이지 못하기 때문일 것이다. 이는 현재 우리의 지식과 기술 수준으로는 정확한 강수량 변화 예측이 쉽지 않음을 단편적으로 보여준다.



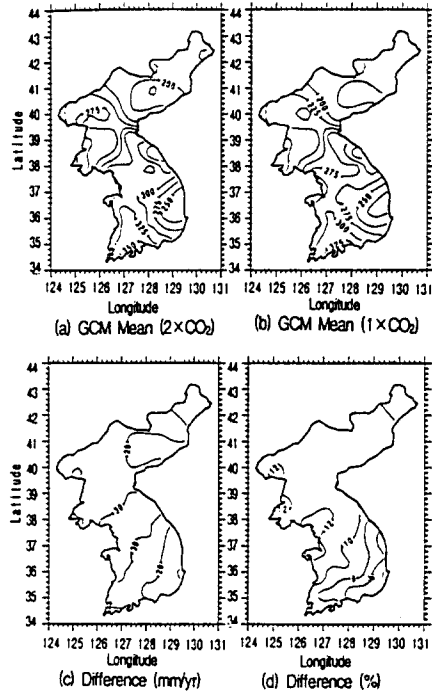


Fig. 5. Regional Spring Precipitation Estimated from Three GCMs' Precipitation Data.

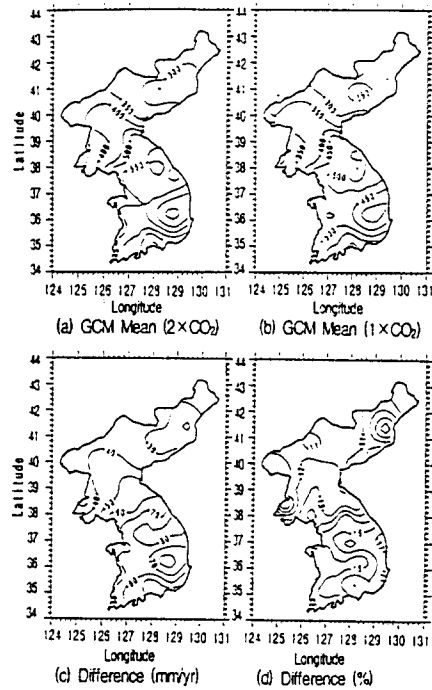


Fig. 6. Regional Summer Precipitation Estimated from Three GCMs' Precipitation Data.

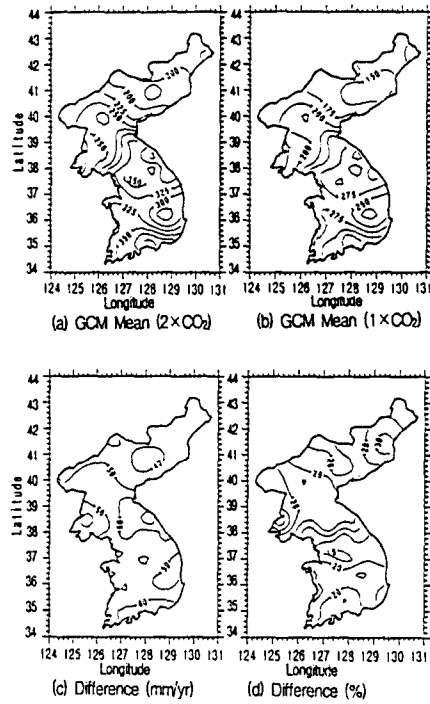


Fig. 7. Regional Autumn Precipitation Estimated from Three GCMs' Precipitation Data.

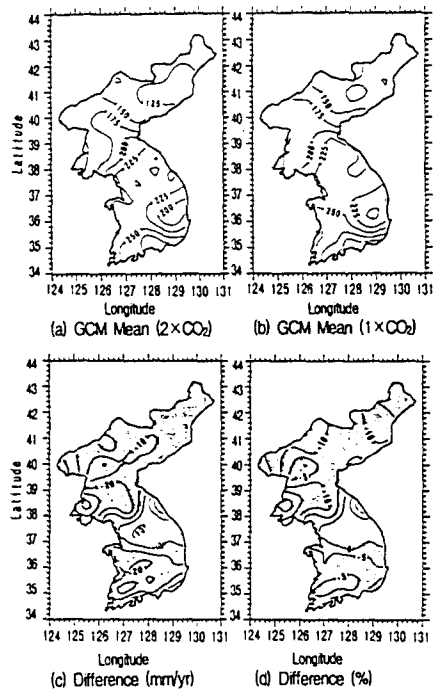


Fig. 8. Regional Winter Precipitation Estimated from Three GCMs' Precipitation Data.

Figs. 5~8은 앞에서 정리된 각 GCM의 결과를 평균한 것이다. 이 연구에서 이용된 GCM의 수가 단지 3가지에 불과하다는 것과 2장에서 설명된 것과 같이 대부분의 GCM이 그들의 구조적 오류를 다소 범하고 있는 까닭에 GCM에 의한 결과를 평균한 것이 결코 진정한 기후변화를 설명하는 것은 아니다. 그러나 현시점에서 어느 특정 GCM의 결과를 신뢰하는 것은 또다른 오류를 범할 수 있다. 이는 각 GCM이 기후를 모사할 때 보이는 오류가 아직 명확하게 그 원인과 오류의 방향 및 정도가 분명하게 이해되지 못하기 때문이다. 이와 같이 현재로서는 어떤 특정한 GCM의 결과가 더 타당하다는 판단이 어렵기 때문에 본 연구에서는 각 GCM에 대한 결과의 산출 평균을 취하였다.

Figs. 5~8의 각 그림에서 (a)와 (b)는 각각 봄, 여름, 가을, 겨울철의 대기중 CO<sub>2</sub>가 배증되었을 때(2×CO<sub>2</sub>)와 현기후(1×CO<sub>2</sub>)의 한반도 강수량 분포를 나타낸다. 또 (c)와 (d)는 각각 CO<sub>2</sub>배증때의 강수량 변화(단위 mm/yr)와 이 강수량 변화를 현기후 강수량에 대한 백분율(%)로 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 봄철(3, 4, 5월)의 경우 CO<sub>2</sub>가 배증됨에 따라 평균적으로 약 24mm/yr가 증가했다. 중부지방에서는 30mm/yr 이상 증가했으나 영남지역의 동남지방에서의 강수량 증가는 20mm/yr 미만이다. 또 대부분 함경도지방에서도 강수량 증가는 20mm/yr 미만이다. 현 강수량에 대한 백분율로 보면 대기중 CO<sub>2</sub>배증에 의하여 약 10% 정도 강수량 증가를 보였다. 지역적으로는 대부분 한반도 지역에서 10% 이상의 증가를 보였으며 영남 해안지방에서는 다만 6% 이하의 증가를 보였다. 그러나 평안도, 황해도와 경기도의 서부일원에서 12% 이상의 강수량 증가를 보였다.

Fig. 6은 여름철 경우이다. Fig. 6(c)에서 보는 바와 같이 CO<sub>2</sub>배증에 따른 한반도 평균 강수량 증가는 50mm/yr를 상회하였다. 특히 남해안지방과 중부지방에서 80mm/yr 이상의 증가를 보이고 있으며 대구를 중심으로 한 경상북도 일부지방에서는 남한지역에서 가장 적은 60mm/yr 증가를 보였다. 북한지역에서의 강수량 증가는 남한지역보다 적으며 북으로 갈수록 강수량 증가도 적다. 그러나

강수량 증가를 현 강수량에 대한 백분율로 보면 한반도 평균 13% 증가했다. 가장 많이 증가한 곳은 영남 동해안지역이며 남해지역에서는 대략적으로 15% 이상의 증가를 보였으며 북한지역에서는 함경도 일부 지방을 제외하고는 CO<sub>2</sub>배증에 의한 강수량 증가는 10%를 약간 상회하고 있다.

Fig. 7은 가을철(9, 10, 11월) 경우이다. CO<sub>2</sub>배증에 의한 한반도 평균 강수량 증가는 여름철과 비슷한 약 50mm/yr 정도이다. 그러나 지역적으로 남해안지방과 강원도 지역에서 가장 많은 60mm/yr 이상의 증가를 보였으며 함경도지방이 한반도 평균보다 적게 증가하였다. 현 강수량에 대한 백분율로 보면 함경도에서는 가장 많은 26% 이상의 강수량 증가를 보였다. 그 이유는 Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 현기후(1×CO<sub>2</sub>)에서 대부분 함경도지방의 강수량이 한반도에서 가장 적은 175mm/yr을 보이고 있으며 이는 한반도 평균보다도 약 50mm/yr 적은 값이기 때문이다. 대략적으로 현기후에 대한 백분율로 보면 대부분 북한지역에는 25% 이상의 증가를 보였으나 남한지역은 20% 내외의 증가를 보였다.

다른 계절의 경우와는 달리 Fig. 8에서 보이고 있는 겨울철의 경우에는 강원도를 비롯한 중부일원을 제외한 지역에서 강수량이 감소하였다. 그 결과 CO<sub>2</sub>배증에 따른 겨울철 한반도 평균 강수량은 현기후보다 약 13mm/yr 적었다. 이는 백분율로 보면 현기후에서 겨울철 강수량이 약 200mm/yr인 것을 염두에 둘 때 약 7% 감소에 해당되는 것이다. 가장 많이 감소한 곳이 남부지방과 황해도지방이며 이 백분율로 볼 때도 유사한 분포를 보이고 있다.

## 6. 토 의

현재 우리가 직면하고 있는 기후 변화 중에서 가장 중요한 것 중 하나가 강수량 변화이다. Table 2에서 보이는 바와 같이 1967년부터 1991년까지 25년 동안 전 세계 기상 재해별 인명 피해는 홍수와 가뭄에 의한 것이 대부분이다. 물론 이와 같은 강수량 변동에 따른 재해가 대기중 CO<sub>2</sub> 증가에만 기인하는 것은 아니다. 한반도 강수량에 변화를 주

Table 2. Total Number of People Affected by Type of Natural Disaster for the Period of 1967 to 1991(Obasi, 1994).

Disaster Type	Event Number	Number Affected	Number Killed
Flood	1,358	1,057,193,110	304,870
Drought	430	1,426,239,250	1,333,728
Cyclone, Hurricane, and Typhoon	894	149,835,879	896,063
Storm	819	68,122,680	54,500
Cold and Heat Wave	133	71,000	4,926
High Wind	unknown	2,960	13,904

는 주요 요인들은 다음과 같이 대략 정리할 수 있다.

첫째는 자연적 변동을 꼽을 수 있다. 우리가 살고 있는 지구촌에는 늘 어느 지역에서는 가뭄이, 또 다른 지역에서는 홍수가, 또 혹서와 냉해가 동시에 서로 다른 지역에서 특별한 원인 없이 일어나고 있다. 지구촌에는 기후가 늘 일정한 것이 아니라 항상 변동하고 있다. 따라서 한반도의 강수량도 이에 따라 변한다.

그 다음은 엘리뇨 현상과 관련된 중규모 순환의 이변으로 꼽을 수 있다. 적도지역의 약 1/3을 차지하는 태평양상에서 엘리뇨에 의하여 발생하는 중규모 순환의 파동은 세계 각 지역으로 전달되어 곳에 따라 홍수, 가뭄 또는 혹서와 냉해현상이 일어난다. 이러한 엘리뇨 현상은 대략 3~7년 주기로 나타났으나 최근에는 그 주기가 빨라지는 경향을 보이고 있다. 이에 따라 세계적인 기상이변이 더 많이 나타난다고 볼 수 있다. 한반도도 이 열대 태평양에서 일어나는 엘리뇨 현상의 영향권에 있는 까닭에 강수량 또한 엘리뇨의 강약에 따라 영향을 받는다.

이상과 같은 강수량 변동 요인중 가장 염려스러운 것은 CO<sub>2</sub> 증가에 따른 강수량 변화이다. 그 이유는 다른 것은 자연적 변동인 반면에 온실기체 증가에 의한 지구온난화는 인위적이기 때문이고 그 변화는 다른 요인들과는 달리 비주기적이기 때문이다. 강수가 우리의 생존 및 산업 활동과 밀접한 관계가 있음에도 불구하고 강수에 대한, 특히 강수의 변동에 대한 우리의 지식은 대단히 제한적이다. 강수 관측의 중요성과 이에 따른 기술이 이미 약

550년 전에 제기되고 개발되었으나(Kim, 1990), 아직 전구적인 강수 관측망은 지구의 제한적인 영역에서만 구성되어 있는 정도이다. 특히 바다가 전 지구 표면의 70%에 해당됨에도 불구하고, 아직까지 바다에서의 관측은 대부분 실제적인 관측보다 통계적 처리에 의존할 수 밖에 없다(Jaeger, 1976; Legates와 Willmott, 1990). 전 지구 평균 일 강수량은 2.6mm/day에서 3.15mm/day까지 변한다(Jaeger와 Kellogg, 1983; Korzoun, 1978). 최근 바다에서의 관측상 취약점을 보완하기 위하여 위성으로부터 원격탐사에 의한 강수 관측이 시도되고 있으나(Arkin과 Ardanuy, 1989) 기술적 제약 때문에 아직 연구 단계이다.

## 7. 결론 및 제언

제한된 GCM 자료를 바탕으로 한 대기중 CO<sub>2</sub> 배증에 의한 한반도 평균 강수량 변화는 봄철에는 약 25mm/yr 증가, 여름철과 가을철의 강수량 증가는 약 50mm/yr를 상회하였다. 이와는 달리, 겨울철에서는 약 13mm/yr 감소를 보였다. 이는 현 강수량에 대한 백분율로 보면 봄철, 여름철, 가을철에는 각각 10%, 13% 또 24% 정도 더 많은 강수가 예상되나 겨울철에는 약 7% 적은 강수가 예상된다.

본 연구에 사용된 광역 강수 분포와 지역 강수 분포사이의 관계는 CO<sub>2</sub> 배증에 따른 기후 변화에 관련이 없이 늘 일정하다고 가정하였다. 이는 지역 강수량을 결정하는 주요 요소 중 하나가 지리적 특성으로 꼽을 수 있기 때문이다. 그러나 각 계절마

다 CO<sub>2</sub> 배증에 따른 지역 강수량의 변화 차이가 나는것은 지역 강수량을 결정하는 GCM 격자의 광역 강수량 분포가 계절에 따라 다르기 때문이다.

이상의 결과는 한반도 지역의 강수량 변화가 객관적인 수치모형의 결과에 의해 도출된 것이 아니라 영성한 GCM 격자점 자료로부터 간접적으로 산출되었다는 사실을 고려해야 한다. 따라서 GCM의 격자점 자료로부터 상세한 한반도의 지역 강수량을 산출하는 방법에 따라 그 결과가 차이를 보일 수 있다는 점은 앞으로 개선되어야 할 점이다. 특히 기후시스템을 모사하는데 사용되는 컴퓨터의 발달은 멀지 않은 장래에 본 연구에서 이용된 간접적 방법보다는 직접 한반도의 기후변화를 계산할 수 있는 기회를 마련하리라 본다.

끝으로 CO<sub>2</sub> 배증에 따른 강수량 변화를 이용할 때 염두에 두어야 할 점은 강수는 계속되는 기상 현상이 아니라, 어느 일정 지역에서 어느 기간 동안만 일어나는 이벤트(event) 현상이라는 점이다. 따라서 강수량 변화에 있어서 월평균 강수량 변화와 더불어 고려되어야 할 사항 중 가장 중요한 것은 집중호우의 발생빈도이다. 산업의 종류에 따라서 평균 강수량 자체의 변화보다 호우 발생빈도 변화가 더 민감할 수 있다. 따라서 예상 강수량은 단순한 통계처리 뿐만 아니라 모형 기후 속에서 산업별 위험 수준 (critical precipitation rate)을 능가하는 집중호우 사례 빈도가 어떻게 변하는지도 함께 검토하여야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구에 많은 조언을 하여주신 김정우 교수에게 감사드린다. 또 연구 결과를 산출하고 도식화 하는데 도움을 준 박지업씨와 김승환씨, 그리고 원고를 정리하여 주신 안병숙씨에게도 감사한다. 본 논문의 격을 높일 수 있게 조언하여 주신 심사자들에게 함께 감사드린다. 이 연구는 한국과학재단의 93-0700-06-02-3과 환경부와 과학기술처의 선도 기술 개발 사업 9-7-1의 지원으로 이루어졌다.

### 참 고 문 헌

- 오재호 (1993). "기후 변화가 한반도에 미치는 영향 (기후 변화 예측 시나리오)." 특정과제 보고서, 과학기술처.
- 오재호, 박지업, 김정우, 성학중 (1994). "CO<sub>2</sub> 배증이 한반도 기후 변화에 미치는 영향 (강수량 변화 예측 시나리오)." 한국 기상학회지, 제30권, pp. 335-362.
- Arkin, P.A., and Ardanuy, P.E. (1989). "Estimating climatic-scale precipitation from space: a review." *J. Climate*, Vol. 2, pp. 1229-1238.
- Boer, G., McFarlane, N.A., and Lazare, M. (1992). "Greenhouse gas-induced climate change simulated with the CCC second-general circulation model." *J. Climate*, Vol. 5, pp. 1045-1077.
- Bruce, J.P. (1994). "Natural disaster reduction and global change." *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 75, pp. 1831-1835.
- Cess, R.D., Potter, G.L., Blanchet, J.P., Boer, G. J., Deque, M., Gates, W.L., Ghan, S.J., Kiehl, J.T., Le Treut, H., Liang, Z.-X., McAvaney, B.J., Meleshko, V.P., Royer, J.F., Schlese, U., Sheinin, D.A., Slingo, A., Sokolov, A.P., Taylor, K.E., Washington, W.M., Wetherald, R.T., and Yagai, I. (1990). "Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in seventeen general circulation models." *J. Geophys. Res.*, Vol. 95, pp. 16601-16615.
- Climate change*. (1990). "The IPCC scientific assessment." Eds. Houghton, J.T., Jenkins, G.J., and Ephraums, J.J., Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO/UNEP, Cambridge University Press, Cambridge.
- Grotch, S.L., and McCracken, M.C. (1991). "The use of general circulation models to predict regional climate change." *J. Climate*, Vol. 4, pp. 286-392.
- Hulme, M. (1992). "A 1951-80 global land precipitation climatology for the evaluation of general circulation models." *Clim. Dynam.*, Vol. 7, pp. 57-72.

- Jaeger, L. (1976). "Monatskarten des Niederschlags für die ganze Erde." *Report No. 139*, German Weather Service, Offenbach A.M., Germany.
- Jager, J., and Kellogg, W.W. (1983). "Anomalies in temperature and rainfall during warm Arctic seasons as a guide to the formulation of climatic scenarios." *Climatic Change*, Vol. 5, pp. 39-60.
- Kim, S.S. (1990). "Comments on the Chinese claim for the invention of rain gauges." *Korea Journal*, pp. 22-32.
- Korzoun, V.I. (1978). "World water balance and the water resources of earth." UNESCO.
- Legates, D.R., and Willmott, C.J. (1990). "Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation." *Int. J. Clim.*, Vol. 10, pp. 111-128.
- Manabe, S., Stouffer, R.J., Spelman, M.J., and Bryan, K. (1991). "Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO<sub>2</sub>. Part 1: Annual mean response." *J. Climate*, Vol. 4, pp. 785-818.
- Meehl, G.A. (1993). "Changes in variability in the climate with increased CO<sub>2</sub>: El Niño-Southern Oscillation and the Asian summer monsoon. Workshop on Socio-Economic Aspects of Changes in Extreme Weather Events." Free University, Amsterdam, Netherland.
- Obasi, G.O.P. (1994). "WMO's role in the international decade for natural disaster reduction." *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 75, pp. 1655-1661.
- Organization for Economic Cooperation and Development (1986). "Control of water pollution from urban runoff." *OECD Report*.
- Pastor, J., and Post, W.M. (1986). "Influence of climate, soil moisture and succession on forest carbon and nitrogen cycles." *Biogeochemistry*, Vol. 2, pp. 3-27.
- Pearce, D. (1991). "Evaluating the socio-economic impacts of climate change: An introduction." *Climate Change Evaluating the Socio-Economic Impacts*, OECD, France, pp. 9-20.
- Rind, D. (1993). "Models see hard rain, drought if CO<sub>2</sub> doubles." *Climate Alert Newsletter*, Vol. 6, No. 2.
- Robinson, P.J., and Finkelstein, P.L. (1991). "The development of impact-oriented climate scenarios." *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 72, pp. 481-490.
- Rowntree, P. (1993). "Climate change and extreme weather events," *Workshop on Socio-Economic Aspects of Changes in Extreme Weather Events*, Free University, Amsterdam.
- Schlesinger, M.E., and Zhao, Z.-C. (1989). "Seasonal climate changes induced by doubled CO<sub>2</sub> as simulated by the OSU atmospheric GCM/mixed-layer ocean model." *J. Climate*, Vol. 2, pp. 459-495.
- Trend (1991). "A compendium of data on global change." T.A. Boden, R.J. Sepanski, and F. W. Stoss, eds., Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U. S. A., pp. 665.
- Wigley, T.M.L., Jones, P.D., Briffa, K.R., and Smith, G. (1990). "Obtaining sub-grid-scale information from coarse-resolution general circulation model output." *J. Geophys. Res.*, Vol. 95, pp. 1943-1953.

**부록. GCM 강수량과 지역강수량 간의 상관 관계 식의 유도**

한반도내 각관측소( $j=1, \dots, 85$ )와 GCM 자료간의 상관 관계로 다음과 같이 선형방정식으로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다고 가정하였다. 식 (1)에서  $P$ 와  $R$ 은 시간의 함수이다. 이하 편의상 시간의 함수를 표시하는 첨자  $t$ 는 생략하였다. 따라서, 시간에 대하여 평균을 하면 식 (1)은 다음과 같은 평균(mean)과 교란(perturbation)의 두 개의 식으로 나누어 질 수 있다.

$$\bar{P}_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^1 a_i} \bar{R}_i + \bar{\epsilon}_j, \quad (6)$$

그리고

$$P_j' = \sum_{i=1}^1 a_i R_i' + \epsilon_j', \quad (7)$$

여기서 위쪽의 줄은 시간 평균을 의미하며  $\bar{\epsilon}_j$ 는 이 방법으로 지역 강수량을 표시할 경우에 나타날 수 있는 계통 오차를,  $\epsilon_j'$ 은 각 시간의 오차에서 계통 오차 $\bar{\epsilon}_j$ 를 제거한 무작위 오차로 간주하였다. 식 (6)과 (7)에서 전환 매트릭스  $a$ 는 시간에 따라 변하지 않는 것으로 간주하였고, 변수  $P$ 와  $R$ 은 이미 알고 있는 값이다. 따라서 오차에 대한 구속 조건이 없으면  $a$ 는 어느 값이나 될 수 있다. 이와 같은 경우를 피하고 오차를 가장 작게 하는  $a$ 값을 정하기 위한 구속 조건으로  $|\epsilon_j'|$ 의 값을 최소화 하는 동시에  $\bar{\epsilon}_j=0$ 을 만족시키는  $a$ 값을 지역 강수량값과 주위 GCM의 격자값 사이를 연결하는 전환 매트릭스로 간주하였다. 이러한 구속 조건을 만족시키기 위해서 다음과 같은 변형을 시도하였다.

$|\epsilon_j'|$ 을 최소화하는 경우를 파악하기 위해서  $\epsilon_j'$ 을 자승하고 시간에 대한 평균을 취하면, 다음과 같다.

$$\overline{\epsilon_j'^2} = \overline{(P_j' - \sum_{i=1}^1 a_i R_i')^2} \quad (8)$$

앞의 두 구속 조건은 새로운 변수  $F$ 를 다음과 같이 정의함으로써 한 개의 구속 조건으로 나타낼 수 있다:

$$F_j = \overline{\epsilon_j'^2} - 2\lambda \bar{\epsilon}_j \quad (9)$$

식 (6)과 (8)을 이용하면 식 (9)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_j = \overline{(P_j' - \sum_{i=1}^1 a_i R_i')^2} - 2\lambda \overline{(P_j' - \sum_{i=1}^1 a_i R_i')} \quad (10)$$

따라서 앞의 구속 조건은  $F_j$ 를 최소화하는 조건으로 전환될 수 있다. 여기서  $\lambda$ 는 임의의 변수이고,  $F_j$ 는  $(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{ij}, \lambda)$ 의 함수로 나타나며  $F_j$ 가 최소값을 갖는 경우는 다음 식들이 만족될 때이다.

$$\frac{\partial F_j}{\partial a_{kj}} = 0, \quad (11)$$

그리고

$$\frac{\partial F_j}{\partial \lambda} = 0. \quad (12)$$

식 (10)을 이용하여 식 (11)과 (12)의 조건을 정리하면 다음과 같다.

$$2(P_j' - \sum_{i=1}^1 a_i R_i') (\sum_{i=1}^1 \delta_{ik} R_i' - 2\lambda (-\sum_{i=1}^1 \delta_{ik} \bar{R}_i)) = 0 \quad (13)$$

그리고

$$-2(P_j' - \sum_{i=1}^1 a_i \bar{R}_i) = 0 \quad (14)$$

여기서  $\delta_{ik}$ 는 Kronecker-delta로,

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{if } i=k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

와 같이 정의된다. 이를 이용하면 식 (13)과 (14)를 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$\sum_{i=1}^1 a_i R_i' R_k' + \lambda \bar{R}_k = \overline{P_j' R_k'} \quad (16)$$

그리고