

# 한반도 기후 100년 변화와 미래 전망

기상연구소 기후연구실

## 1. 20세기 지구 기후의 변화

기후변화를 객관적으로 평가하기 위해서 관측자료는 필수적이다. 전세계적으로 근대기상관측은 19세기에 시작되었으며, 전세계를 대표할 수 있는 관측자료는 20세기에나 가능하다. 특히 해양이나 사하라 사막, 시베리아, 열대우림과 같이 사람이 살지 않는 지역은 1970년대 위성관측이 본격화되면서 자료가 축적되기 시작하였다. 기상관측은 계기의 발달에 따라 달라지고, 관측위치도 달라졌다. 그러므로 기후변화 분석에 사용된 자료는 어느 정도의 관측 및 분석 오차를 포함하고 있다.

### ◆ 20세기 지구 온난화의 추세

- 1) 지구 평균 지표면 기온의 상승: 지구 평균 육지와 해양의 표면 기온은 지난 20세기에  $0.6\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  상승하였다. 20세기 중 두 기간(1910-1945년, 1976-현재)은 전지구적으로 온난화가 매우 두드러지게 진행되었다. 기온은 해양보다 육지에서 더 빨리 상승하는 추세이며, 특히 북반구 고위도 육지에서 상승추세가 크다.

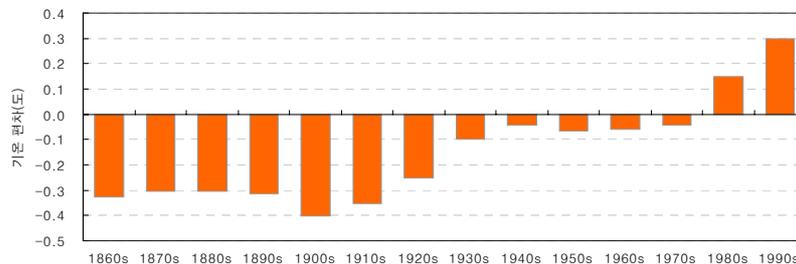


그림 1 1860년대-1990년대 지구 평균기온의 변화  
(1961-90년 평균과의 차이) (CRU 자료)

- 2) 육지에서 일교차가 줄어드는 경향이 나타나는데 이는 구름, 강수량과 공기 중 수증기의 증가와 일치한다. 지역에 따라 서리일이 감소하고, 식물의 성장기간이 증가하였다.
- 3) 고산지역의 빙하와 얼음의 질량 감소는 전세계적인 기온의 상승과 일치한다. 일부 해안 지역에서 적설량이 증가하는 것은 강수량이 증가하였기 때문이다. 북반구 육지 기온의 상승에 따라 눈덮임 면적이 줄어들고 호수와 강의 결빙 기간이 짧아지고 있다.

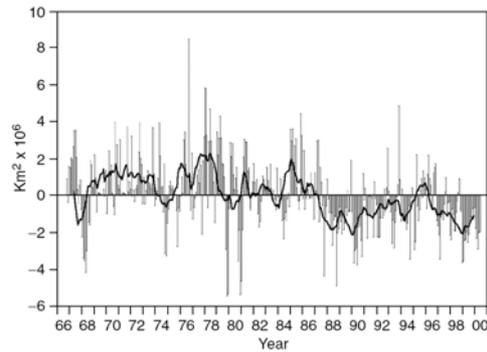
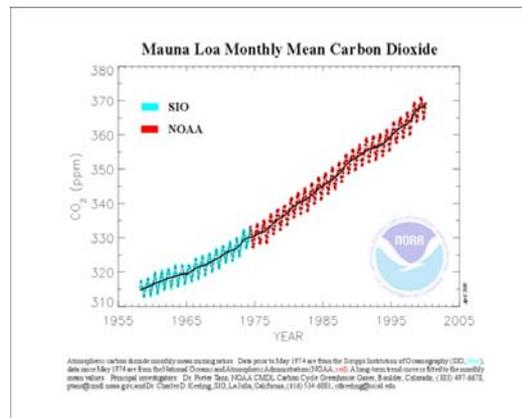


그림 2 북반구 적설면적의 변화(IPCC)

- 4) 북극에서 주변 육지와 해양의 기온이 상승함에 따라 봄과 여름에 해빙 범위와 두께가 점진적으로 감소하였다.
- 5) 해양의 열용량은 증가하였으며, 평균 해수면은 상승하였다.
- 6) 지난 25년간 대류권의 총수증기량의 증가는 대류권의 기온 상승과 물순환 강화와 정성적으로 일치하며 북반구의 중고위도 지역 등에서 강수량의 증가로 더 극심한 강수 현상을 초래하였다.
- 7) 남반구와 남극대륙의 일부에서는 최근 기온이 상승하지 않았다.
- 8) 20세기 후반에 열대와 중위도의 폭풍의 세기와 빈도의 변화는 수십 년 주기 진동이 나타나기는 하나 명확한 추세를 보이지 않는다.
- 9) 이산화탄소 등 온실효과를 유발하는 온실기체의 농도 증가가 관측되었다. 이산화탄소의 농도는 산업혁명의 280 ppm과 비교하여 2000년에는 370 ppm으로 약 30% 증가하였다.



하와이 마우나 로아 관측 이산화탄소 농도

#### ◆ 특이 기상 현상의 변화

- 관측된 특이 기상 및 기후 현상의 변화가 모델의 결과와 비교되기 시작한 것은 겨우 최근의 일이다(표 1). 대부분의 육지지역에서는 폭염일과 열파가 더 많이 발생하고 있는 추세이다. 이러한 증가 현상은 주로 토양 수분의 감소가 일어나는 지역에서 가장 크게 나타날 전망이다. 일 최저기온의 증가는 거의 모든 육지에서 나타날 것이고 일반적으로 눈과 얼음이 후퇴하는 지역에서 더 크게 증가할 것이다. 서리일과 한파는 매우 드물게 발생할

것이다. 지표기온과 지표 절대습도의 변화는 열지수를 증가시킬 것으로 예상된다 (열지수는 기온과 습도의 결합효과를 나타내는 척도이다). 지표기온의 증가는 또한 “냉방도일(cooling degree days)”의 증가와 “난방도일(heating degree days)”의 감소를 유발할 것이다.

표 1 관측과 예측에 나타난 특이 기상 및 기후 현상의 변화 신뢰도 추정.

관측된 변화에 있어서의 신뢰도(20세기 후반부)	현상의 변화	예측된 변화에 있어서의 신뢰도(21세기)
그럴 것임(L)	육지에서 최고기온과 더운 날이 증가	매우 그럴 것임(VL)
매우 그럴 것임(VL)	육지에서 최저기온이 증가하고, 추운 날과 서리일 발생 감소	매우 그럴 것임(VL)
매우 그럴 것임(VL)	육지에서 기온의 일교차가 줄어들음	매우 그럴 것임(VL)
많은 지역에서 그럴 것임(L)	육지지역에서 열지수가 증가함	대부분 지역에서 매우 그럴 것임(VL)
북반구 중·고위도의 많은 지역에서 그럴 것임(L)	폭우 현상이 증가함	많은 지역에서 매우 그럴 것임(VL)
몇몇 지역에서 그럴 것임(L)	여름철 대륙의 건조현상과 가뭄이 증가함	대부분 중위도 대륙의 내륙에서 그럴 것임(L)
활용된 몇 개의 분석에서 관측되지 않음	열대 태풍의 최대풍속의 강도가 증가함	몇몇 지역에서 그럴 것임(L)
평가할 자료가 부족함	열대 태풍의 평균 및 최대 강수 강도가 증가함	몇몇 지역에서 그럴 것임(L)

주: VL, very likely; L, likely 신뢰도의 척도임

- 강수량은 예상된 평균값과 강도의 증가를 뛰어넘는 정도로 특이 현상이 더욱 늘어날 것이다. 강수량의 특이 현상의 발생 빈도는 거의 모든 지역에서 증가할 것이다. 여름철에는 대륙의 중앙에서 대체적으로 건조 현상이 발생할 것이다. 이는 기온 상승으로 인한 잠재 증발량의 증가가 강수량의 증가보다 많기 때문이다. 중위도 지역에서 폭풍의 강도와 빈도 그리고 변동성이 앞으로 어떻게 변할 지에 대해서는 아직까지 모델들 간에 결과가 일치되지 않으며, 열대 태풍의 발생 빈도와 생성 지역의 변화에 대한 예측에 있어서도 일치된 결과가 나타나지 않는다. 그러나 일부 관측에 의하면 태풍의 강도는 증가할 것으로 보이고 또한 일부의 이론적 연구와 모델링 연구에 의하면 이러한 태풍 강도의 상한선은 증가할 것으로 보인다. 또한 열대 태풍에 의한 강수의 평균값과 최대값은 눈에 띄게 증가할 것이다.

#### ◆ IPCC 제3차 보고서의 중요한 결론

- 인간 활동으로 인한 온실가스와 에어러솔의 배출은 기후에 영향을 줄 것으로 예상되는 방향으로 대기를 지속적으로 변화시킴
- 대기 온실가스 농도와 그 복사강제력은 인간 활동의 결과로 인해 계속 증가되고 있음
- 지난 50년 동안 관측된 대부분의 온난화는 인간 활동에 기인한 것이라는 새롭고 유력한 증거가 있음

- 21세기 동안 인간의 영향에 의해 대기 조성은 계속해서 변화할 것임
- 전지구 평균온도와 해수면은 모든 IPCC SRES 시나리오에서 상승되는 것으로 예측됨
- 인위적인 기후변화는 여러 세기 동안 지속될 것임

※ IPCC는 ‘기후변화에 관한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change)’로 세계기상기구(WMO)와 UN환경프로그램(UNEP)에 의해 1988년 설립되었으며, 지금까지 모두 세 차례 기후변화에 관한 보고서를 UN 기후변화협약(UNFCCC)에 제출하였다. IPCC의 보고서는 UNFCCC의 결정에 객관적인 근거자료를 제공함으로써, 막대한 영향을 미치고 있다.

※ SRES는 온실가스 및 에어러솔 배출에 관한 특별보고서(Special Report on Emission Scenario)로 2000년 발간되었으며, 6종류의 IPCC의 공식 온실가스 시나리오를 포함하고 있다.

## 2 우리나라 기후변화의 현황

기상관측자료가 80년 이상인 지역을 중심으로 20세기 우리나라의 기후변화를 분석하였다. 관측기간이 80년 이상인 지점은 서울, 인천, 강릉, 대구, 전주, 목포, 부산 등이다.

### ◆ 기온 변화

- 1904년 이후 2000년까지 우리나라에서 관측된 20세기 기온자료를 분석해 보면 평균기온은 1.5℃ 상승하여 우리나라에서 나타나는 온난화 추세는 전지구적인 온난화 추세를 상회하고 있음을 알 수 있다. 그림3과 4는 우리나라 연평균기온의 변화를 나타낸 것이다. 10년 평균기온의 변화를 보면 우리나라의 기온은 지속적으로 상승하고 있다. 이러한 기온 상승의 원인은 지구온난화와 도시화를 들 수 있으며, 도시화 효과는 약 20-30%로 분석되었다.

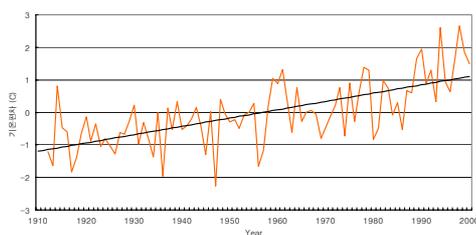


그림 3 우리나라 연평균기온의 변화

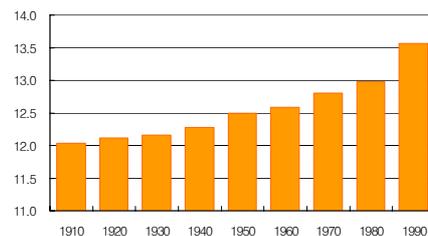


그림 4 십년 평균 기온(℃)의 변화

- 지난 20세기 동안 우리나라의 중부지방 강릉, 서울, 인천 및 남부지방 대구, 전주, 부산의 일최고기온과 일최저기온의 극값을 분석하였다. 80년간(1920-1999)의 우리나라 중부지방 및 남부지방의 일최고기온과 일최저기온 평균 극값은 여름철보다는 겨울철에, 특히 겨울철 주간보다는 겨울철 야간에 그 지역적 편차가 심하게 나타났다. 겨울철 추위와 관련된 일최고기온 저온특이일과 일최저기온의 저온특이일은 현저하게 줄어들었고, 여름철 야간의 일최저기온의 고온특이일의 발생빈도는 증가하였다.

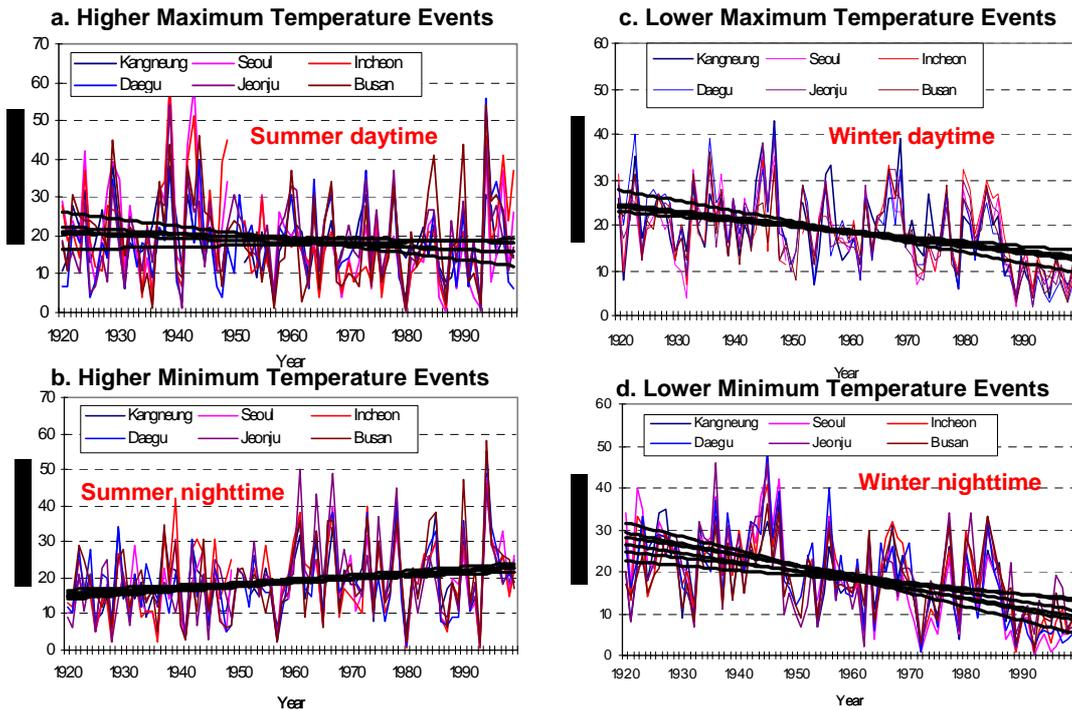


그림 5 80년간 지점별 일최고기온(a,c)과 일최저기온(b,d)의 상위(a,b) 및 하위(c,d) 5 퍼센타일 발생빈도의 변동 추세

- 생활 기온 지수는 겨울철 혹한과 관련된 지수의 발생빈도는 줄어들고, 여름철 혹서와 관련된 지수는 증가하는 경향을 보였다. 일최저기온 18℃이상의 냉방일은 약 20일/100년의 비율로 증가하는 추세를 보였고, 일최고기온 18℃이하의 난방일은 약 15일/100년의 비율로 감소하는 추세를 보였다. 또한 여름철 야간의 열대야 현상도 약 5일/100년의 비율로 미약하게 증가하는 추세를 보인 반면, 일최저기온 0℃미만의 서리일은 약 30일/100년의 비율로 뚜렷하게 감소하였고, 최고기온 0℃이하의 결빙일도 전주와 강릉을 제외하면 거의 15일/100년의 비율로 감소하였다.

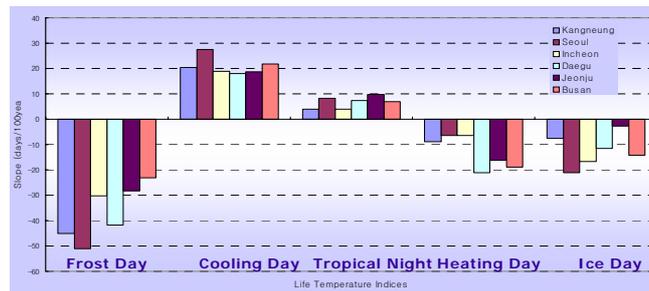


그림 6 80년간 생활기온지수 발생빈도 변동 추세

- 열파지속기간(Heat wave duration): 1961-1990년 기준으로 최고기온이 평년보다 5도 이상 높은 날이 5일 이상 지속되면 열파지속기간으로 정의하고, 열파지속지수(Heat Wave Duration Index, HWDI)를 구하였다. HWDI는 사망률과 관련이 있다. 열파는 토양 수분이 감소하는 지역에서 더 오래 지속되며 더 악화될 것으로 예상된다.

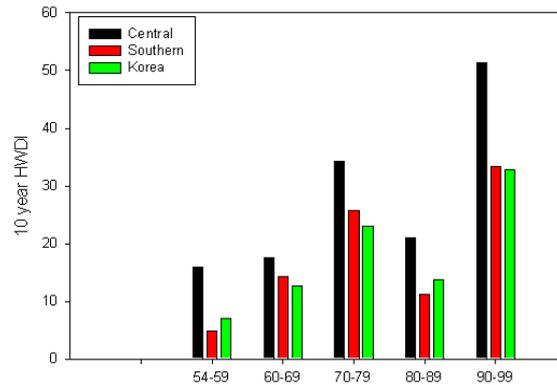
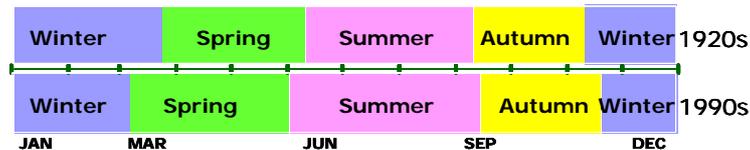


그림 7 HWDI의 십년 평균의 변화.

◆ 계절의 변화

- 기후변화와 관련하여 자연계절의 변화도 탐지되었다. 일평균기온 5°C 이하를 겨울, 20°C 이상을 여름으로 정의하고 그 사이를 봄과 가을로 정의하면, 겨울은 1920년대에 비하여 1990년대에 약 한달 정도 짧아졌으며, 여름과 봄은 기간이 길어졌다. 또, 기온의 상승으로 겨울이 짧아져서 봄꽃의 개화시기가 빨라지는 것도 관측되었다. 특히 지난 20년간 온난화 경향은 뚜렷하게 나타난다. 온난화의 영향으로 봄꽃의 개화가 빨라졌다는 연구결과는 우리나라뿐만 아니라 영국, 미국, 일본 등 세계 각지에서 보고되었다.



Winter in 1990s is shortened by 27 days relative to 1920s.

그림 8 서울의 1920년대와 1990년대 자연계절 변화

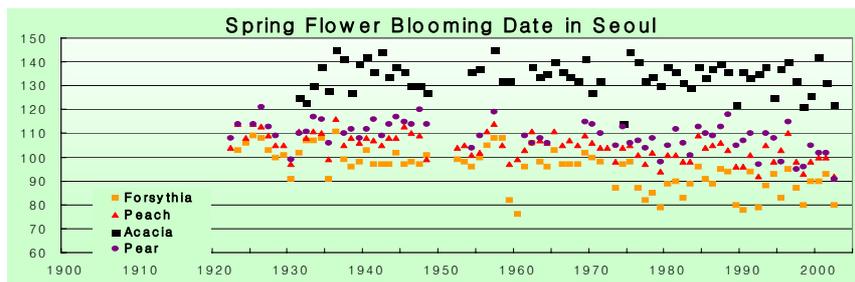


그림 9 서울에서 관측된 봄꽃 개화시기(개나리, 복숭아, 아카시아, 배)

◆ 강수량 변화

- 관측자료에 의한 20세기 동안 10년 평균 강수량의 변화는 그림 10과 같다. 10년 평균 강수량은 장기적으로 증가하는 경향이만 강수량의 변동폭이 매우 커서 증가추세는 기온과 같이 뚜렷하지는 않다. 1910년대, 1940년대, 1970년대는 강수량이 다른 기간보다 비교적 적은 건조기가 나타난다.

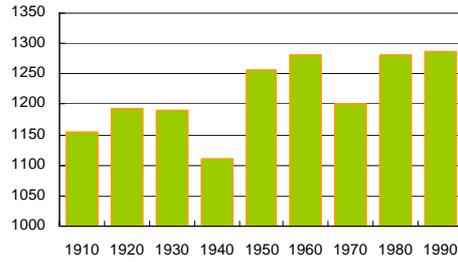


그림 10 십년 평균 강수량(mm) 변동추세

- 결측이 없는 남부지방의 자료를 이용하여 강수일수, 강수량에 나타난 변화를 살펴보았다. 그림 11은 연강수일수(Precipitation Day, PD), 연강수량(Total Precipitation, TP)의 편차 시계열이다. 연강수일수는 감소하였으나 연강수량은 증가하여 결과적으로 연강수량을 연강수일수로 나눈 강수강도(Precipitation Intensity, PI)가 증가하였다(그림 11(c)). 남부지방에서 연강수량 7% 증가와 연강수일수 14% 감소로 최근 20년간 과거에 비하여 강수강도가 18% 증가했고, 극한 강수사상의 발생빈도도 증가하고 있는데, 특히 여름에 현저하게 나타나고 있다(Choi, 2002).

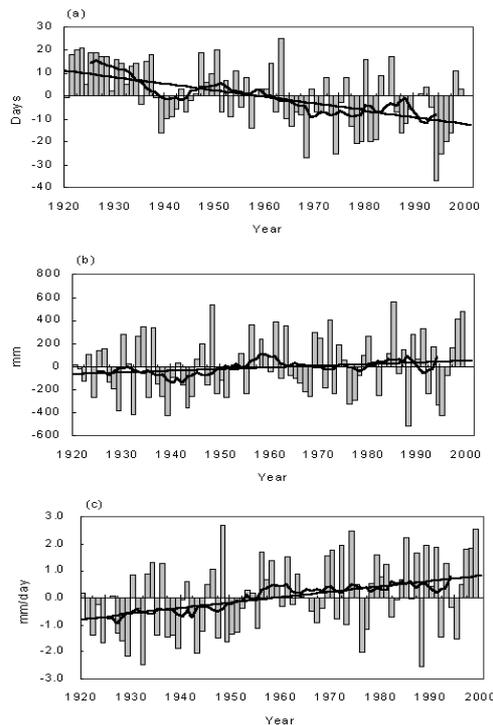


그림 11 80년간(1920-1999) 남부지방의 (a)강수일수(PD), (b) 연강수량(TP), (c)강수강도(IP)의 편차 시계열.

- 최근 50년간(1954-2003) 14개 관측지점(강릉, 서울, 인천, 울릉도, 추풍령, 전주, 대구, 울산, 포항, 광주, 부산, 목포, 여수, 제주)에서 강수일수(강수량 0.1 mm 이상)는 감소하고, 일강수량이 80 mm 이상인 호우 일수는 연평균 호우발생빈도는 1954-1963년 평균은 약 1.6일/년인데 비하여 1994-2003년은 2.3일/년으로 증가추세이다.

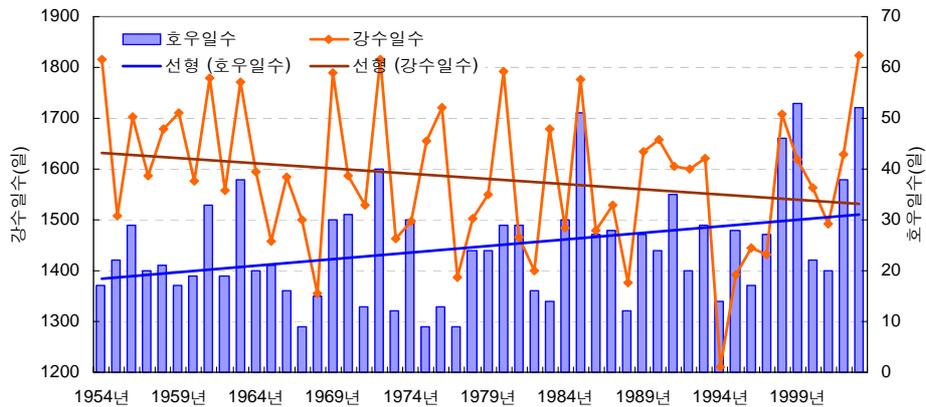


그림 12 최근 50년간 14개 지점 누적강수일수와 누적호우일수의 변화

#### ◆ 대기 중 이산화탄소 농도 변화

- 우리나라의 대표적 배경대기 지역인 제주도 고산에서 최근 10년간의 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도 변화를 분석한 결과 1991년에 357.8 ppm를 기록한 이후 2000년도에 373.6 ppm에 이르기까지 지속적으로 증가하는 추세를 보였다. 1991년부터 2000까지 지난 10년간에 걸친 CO<sub>2</sub> 농도 증가율은 약 1.58 ppm/yr 정도로서 환산될 수 있으며, 이 값은 NOAA/CMDL에서 측정한 1979-1999년 사이의 평균 CO<sub>2</sub> 증가율인 1.5 ppm/yr 보다 약간 높은 값이다.

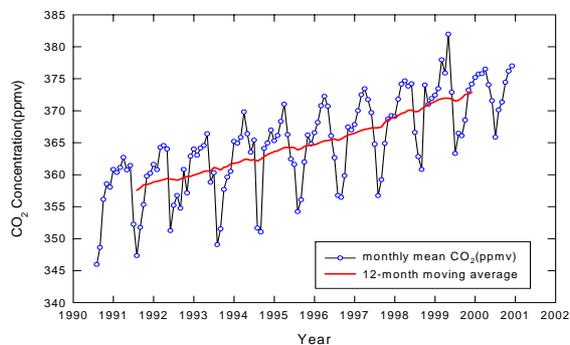


그림 13 제주도 고산에서 측정된 CO<sub>2</sub> 농도 변화추세 (1990년 8월- 2000년 12월)

#### ◆ 생태계에 나타난 변화

- 우리나라의 기후구를 구분하기 위해서 기후에 민감한 식생의 분포를 조사하였다(건국대와 공동연구). 왕대의 분포에 관한 과거의 연구는 19세기 조선시대의 지리지에 근거하여 작성되었는데, 2001년 답사한 결과(그림에서 ●로 표시) 왕대의 분포가 약 100 km 정도 북쪽에서 발견되었다. 이외에도 품종에 따른 마늘재배 지역의 변화 등이 연구되었다.

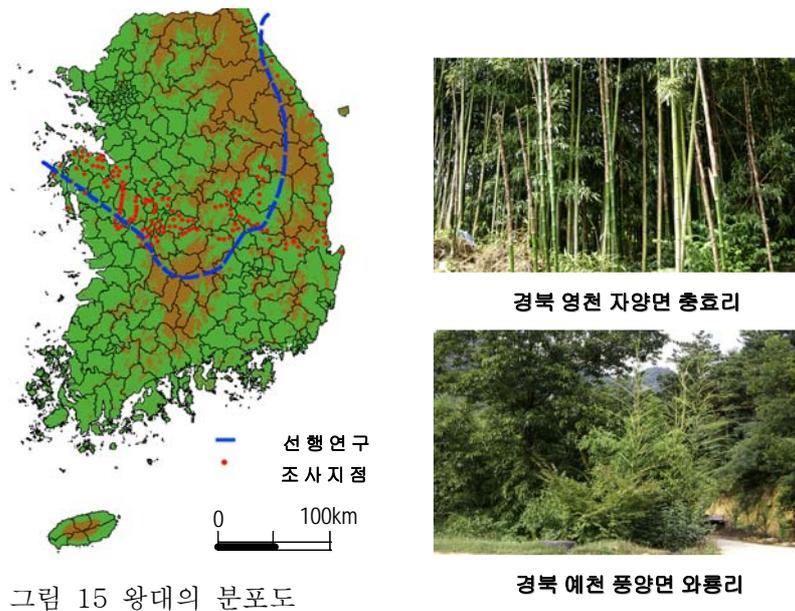


그림 15 왕대의 분포도

### 3. 미래 기후변화 전망

미래의 기후변화를 전망하기 위해서 대기, 해양, 지표, 설빙, 식생 등 지구기후시스템과 각 요소들 사이의 상호작용을 모의할 수 있는 기후모델이 사용된다. 기후모델은 다시 말하면 지구의 기후시스템을 단순화하여 수식적으로 표현한 것이다. 만약 기후에 영향을 미치는 요인들이 어떻게 변하는지 알 수 있다면 기후가 앞으로 어떻게 변할 것인지 시뮬레이션이 가능하다. 미래 기후에 영향을 미치는 요인으로 온실가스 농도의 변화에 대하여 다양한 시나리오가 IPCC에서 작성되어 미래의 기후를 전망하는데 사용되고 있다. 가장 많이 사용되는 시나리오는 A2와 B2 시나리오로 A2는 이산화탄소의 배출량이 비교적 급격하게 증가하여 2100년에는 820 ppm이 되며 이산화탄소가 완만하게 증가하는 B2 시나리오는 2001년까지 이산화탄소의 농도가 610 ppm이 될 것으로 예상된다. 그러므로 이 온실가스 농도 변화 시나리오에 의해 미래의 기후가 어떻게 변할 것인지 기후모델을 이용하여 시뮬레이션을 함으로써, 미래 기후를 전망할 수 있다. 이 시뮬레이션은 기상청의 슈퍼컴퓨터에서 수행되었다.

#### ◆ 전지구 기후변화 전망

- 기상연구소는 독일 막스플랑크 기상연구소에서 개발된 기후변화모델(ECHAM4/HOPE-G, ECHO-G)을 도입하여 장기간(1860-2100년, 240년) 시나리오 모의실험을 수행하였다. ECHO-G 모델은 기온, 강수량, 해면기압 등의 연평균, 계절변화, 변동성 등이 현재 기후를 잘 모의하고 있는지 검증되었다. IPCC 배출시나리오(SRES) 중 A2와 B2 시나리오에 따른 온실가스 농도 시나리오 자료를 수집하고, 이를 ECHO-G에 입력하여 기후변화 장기 시나리오 모의실험을 수행하였다. 온실가스 증가 시나리오에는 주요 온실가스인 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O)를 비롯한 총 19종의 온실가스가 포함되었으며, A2 시나리오는 온실가스의 급격한 증가를 보이는 반면, B2 시나리오는 완만한 증가를 나타낸다.

- A2[B2] 시나리오 모의결과 CO<sub>2</sub> 농도가 820 ppm[610 ppm]에 달하는 2100년에 전지구 기온은 현재보다 4.6℃[3.0℃] 정도 증가할 것으로 나타났으며, 동아시아 지역(80°E-180°, 20°N-60°N)의 경우 전지구평균보다 높은 6.5℃[4.5℃]의 증가 경향을 보여주었다(그림 14). 2100년의 전지구평균 강수량은 약 4.4%[2.8%] 증가할 것으로 모의되었으며, 동아시아의 경우는 10.5%[6.0%]로 매우 높게 나타났다. 온실가스 농도가 급격히 증가하는 A2 시나리오에 의한 기후변화는 완만히 증가하는 B2 시나리오에 비하여 기온과 강수량이 더 크게 증가하였으며, 전지구에 비하여 동아시아 지역의 변화가 더 클 것으로 전망되었다. 동아시아는 북서지역에서 기온이 가장 높게 상승하고, 강수량은 유라시아 대륙 연안에서 큰 변화를 보인다.

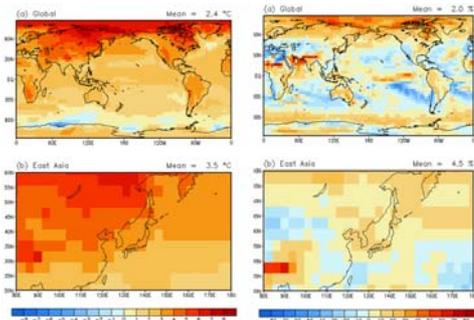


그림 17 IPCC SRES A2 온실가스 증가 시나리오에 따른 2050년경 기후변화 시뮬레이션 결과

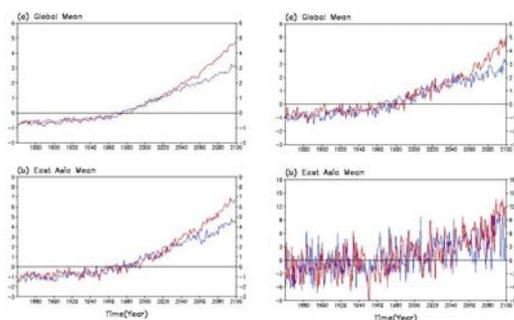


그림 18 IPCC SRES A2와 B2 시나리오를 이용한 ECHO-G 모델의 장기(1861-2100) 기후변화 전망

- 장기 기후변화는 계절에 따라 분석해보면(그림 16) 기온은 여름과 가을에 비하여 겨울과 봄에 상승하는 폭이 클 것으로 전망된다. A2와 B2 시나리오에 의한 차이는 계절과는 크게 상관없이 B2 시나리오가 A2 시나리오보다 2℃ 정도 기온이 낮은 것을 볼 수 있다. 이것은 온실가스 저감효과를 의미한다. 강수량은 특히 여름철에 증가폭이 크게 나타나며, 다른 계절에는 증가가 뚜렷하지 않다. 기온 상승에 따라 증발량의 증가가 강수량의 증가보다 커져서 많은 지역에서 건조해질 것으로 예상된다.

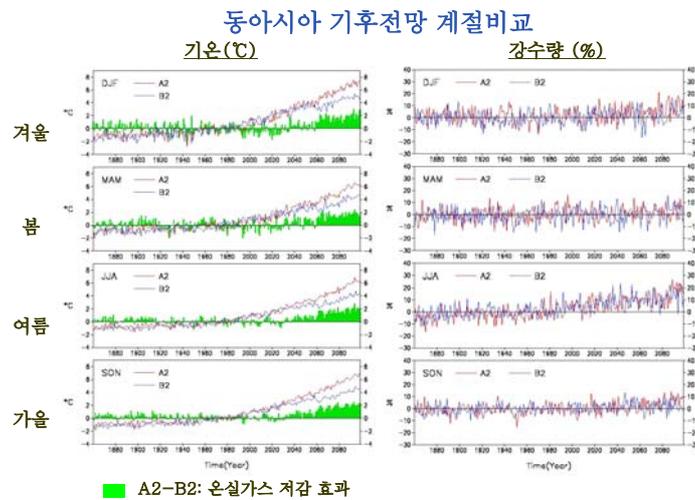
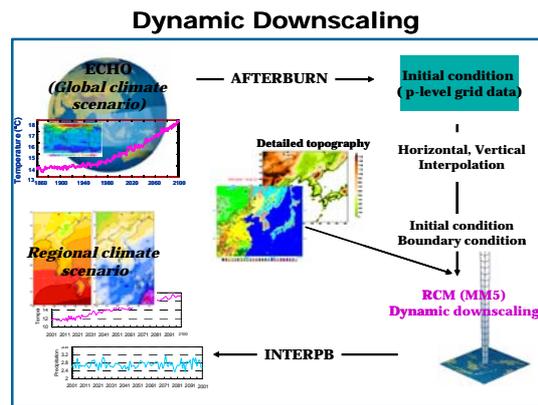


그림 19 동아시아 장기 기후전망의 계절 변화. 그림에서 막대 그래프로 표시된 것은 A2와 B2 시나리오에 의한 차이이다.

◆ A2 시나리오에 근거한 우리나라 장기 기후 전망

- 전지구기후모델에 의한 시뮬레이션 자료를 우리나라와 같이 좁은 지역에 적용하는 것은 여러 가지 문제점이 있다. 우리나라는 지형이 복잡하고 남북으로 길게 위치하고 있으며 삼면이 바다로 둘러싸여 있어서 지역에 따라 기후 특성이 달리 나타난다. 또한 기후모델에서 한반도 남부는 육지가 아닌 바다로 표현되어 전지구모델의 결과를 직접 활용할 수 없다. 그러므로 기후변화 시나리오를 우리나라에 활용하기 위해서 고해상도 기후변화모델을 이용하거나 제한지역기후모델(RCM)을 이용하여 우리나라의 지형에 적합한 자료를 생산하여야 한다.



- 이 연구에서 사용한 기후변화모델은 약 400 km 해상도를 가지고 있으나 지역기후모델(RCM)은 해상도가 약 30 km로 고해상도 자료를 생산할 수 있다. 이 부분의 연구는 부경대학교와 공동으로 추진하였으며, 150년(1951-2100년) 고해상도 자료를 산출하였다. 현재 모델의 편이(bias), 관측기후와 비교분석, 모델의 계통오차 수정기법 등 고해상도 자료에 대한 검증이 수행 중이다. 그림 16은 RCM을 이용하여 시뮬레이션한 2040년대와 2090년대 우리나라 주변의 기온과 강수량의 변화를 그린 것이다. 기온은 2040년대에 비하여 2090년대 크게 상승하였으며, 특히 북부지방의 상승이 더 뚜렷하다. 강수량은 여름철에 크게 증가하였으며, 2090년대에 증가폭이 더 큰 것으로 나타났다.

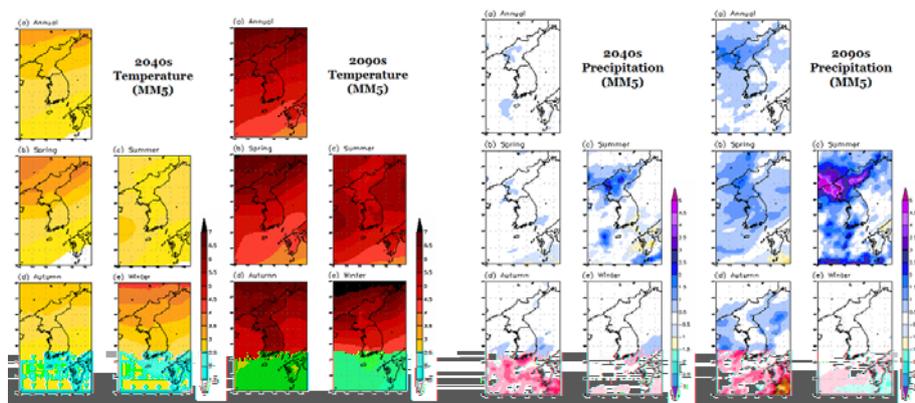
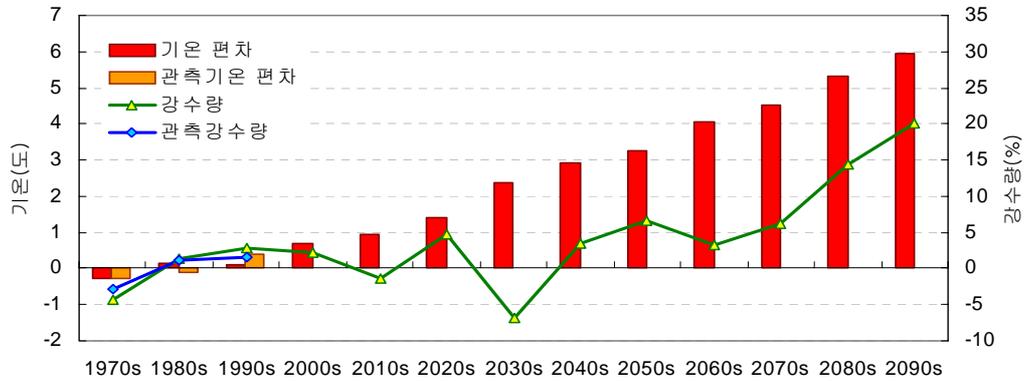


그림 21 고해상도 자료를 이용한 2040년대와 2090년대 우리나라 주변의 기온(좌)과 강수량(우) 변화 분포

- 150년 시뮬레이션한 결과를 1971-2000년을 기준으로 10년 평균하여 나타낸 것이다. 관측기온과 강수량도 그림에 같이 표시하였다. 21세기에는 서리일의 발생횟수 감소, 열파현상 증가, 겨울의 단축, 강수일수 감소, 호우 및 가뭄 증가 등 온난화에 따른 변화가 심화될 것으로 전망되었다. 앞으로 이 자료는 더욱 자세히 분석될 것이다.



- 이 연구결과는 미래 기후변화 시나리오의 하나로 온실가스의 농도가 급속도로 증가하는 것을 가정한 것이다. 그러므로 미래 기후변화를 예견하기 위해서 다양한 시뮬레이션을 통한 시나리오가 작성되어야 할 것이다. 기상연구소에서는 앞으로 기후변화에 영향을 미치는 에어러솔의 농도변화를 포함하는 연구를 수행할 예정이다. 또한 기후의 자연변동성은 모델에서 충분히 모의되지 못하고 있다. 그러므로 자연변동성이 어떤 영향을 미치는 지에 대한 연구도 지속되어야 한다. 궁극적으로 국가의 지속가능한 발전을 위해서 기후변화 과학연구를 기반으로 기후변화에 따른 우리나라 사회경제 및 자연생태계에 미치는 영향을 평가하고 그에 따른 대비책을 강구되어야 할 것이다.