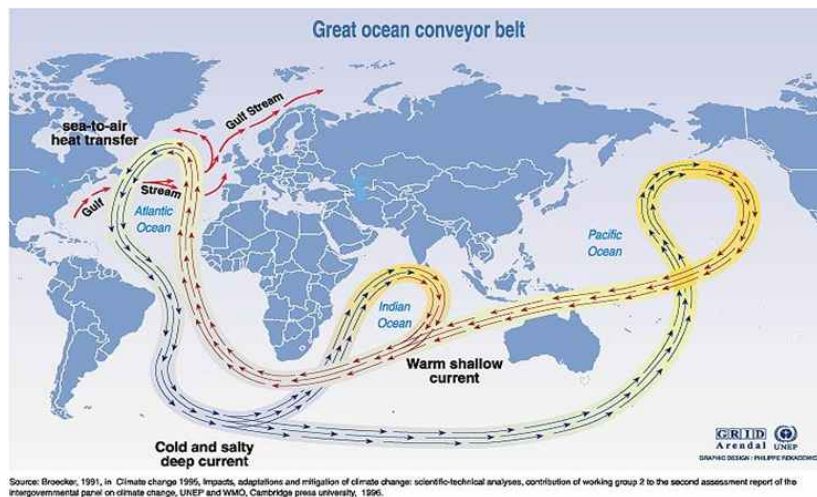


## &lt; 제4장 미래 기후의 예측 &gt;

## 1. 전지구 순환모형의 이론 및 한계점

## 가. 전지구적 해류순환



&lt;그림 1&gt; 대양 컨베이어 벨트

- ✓ 지구를 구성하고 있는 바닷물은 흐르고 또 흐른다. 과연 이 흐름은 어떤 힘에 의해 시작되고 조절되는 것일까?
- ✓ 위의 그림은 전지구적 해류순환을 보여주는 것으로서 대양 컨베이어벨트라고 불리우기도 한다. 먼저 해류의 흐름에 영향을 주는 요소들을 살펴보고, 그 다음에 이 지도를 다시 보고 왜 이런 흐름이 생기게 되었는지 살펴보도록 하자.

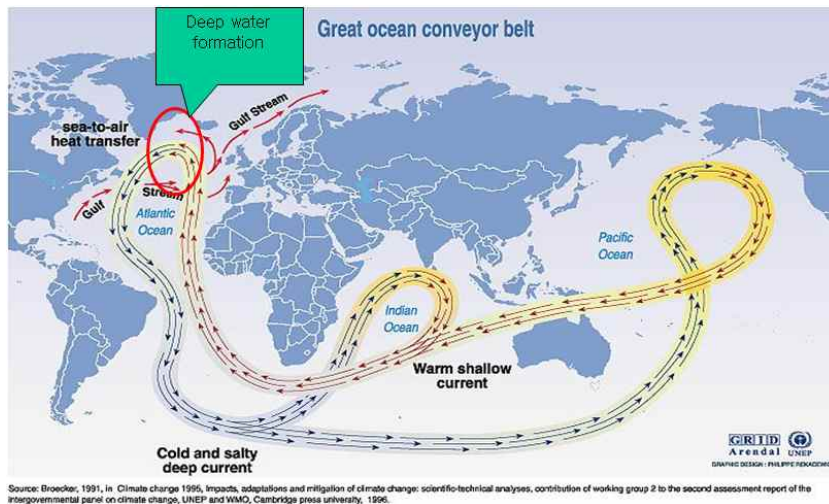
## 1) 전지구적 해류순환에 영향을 주는 요소

- ✓ 바람
  - 바람에 의한 표면의 해류는 눈으로도 관찰 가능하다. 호수나 강에 물결이 잡히는 것만 봐도 알 수 있다. 그러나 바람의 영향을 받지 않는 깊은 물 속에는 그럼 물의 흐름이 없는것일까?...아니다. 바람 이외의 다른 요인에 의해서도 물은 움직인다.
- ✓ 밀도
  - 해류는 바람의 영향 이외에도 바람의 영향이 없는 깊은 바다 속에서도 움직인다...어떤 힘에서일까? 밀도의 차이에 의해 일어나는 것이다...밀도는 온도와 염분농도에 의해 결정된다
  - 온도: 더운 물은 팽창한다. 그러므로 더 가볍다. 그래서 극지방(북쪽)으로 이동하게 됨
  - 염분농도: 염분 농도가 높을수록 그 물은 무겁다. 그래서 그 물은 침강하여 깊은 바다속 물의

흐름을 만든다.

## 2) 밀도차이에 의한 깊은 바다속 해류의 흐름

- ✓ 적도부근의 더운 물(난류)은 가벼우므로 북쪽으로 이동하게되는데, 물이 극쪽(poleward)으로 올라가면서 차가워지게되고, 또한 얼음형성 과정에 의해 물의 밀도가 증가하여, 이 무거운 물은 깊은 해저로 침강하게 된다. 이와 같은 침강 (deep water formation)은 북대서양 부근과 남극대륙을 둘러싼 지역에서 일어나게된다.
- ✓ 해저로 침강한 물은 이제 다시 적도쪽으로 움직이게 되고 적도쪽으로 이동하던 해류는 남아프리카 부근에서 두개로 나뉘어져 움직인다. 하나는 인도해 방향으로 다른 하나는 호주를 지나 태평양 쪽으로 나가게 된다.
- ✓ 이와 같은 기작에 의해 해류는 마치 컨베이어 벨트와 같은 순환을 하게된다 (global conveyor belt).
- 왜 얼음 형성과정에서 바닷물의 소금농도는 더 짙어지는가?
- 얼음 형성과정에 관여하는 것은 소금이 아니라 물, 즉 소금물을 구성하고 있던 물의 일부가 얼음이 되면 소금은 그대로 남아있는데 반해 물의 양은 줄게되므로 상대적 소금물 농도는 더 짙어지는 것이다.



<그림 2> 대양 컨베이어 벨트

## 3) 지구온난화가 전지구 순환에 미칠 수 있는 영향

- ✓ 이와 같은 순환은 적도부근의 에너지를 극지방으로 보내줌으로써 극지방 빙하의 크기를 조절하는 역할을 한다
- ✓ 이러한 전지구적 순환에 변화가 있게 되면 전지구적인 복사평형에도 영향을 주게 된다
- ✓ 이러한 순환은 deep water가 다시 어떻게 수표면으로 올라오는가의 속도를 결정하고 나아가 대기중 이산화탄소의 농도까지 영향을 줄 수 있다.

- ✓ 문제는 지구온난화로 인해 그린란드 주변에 빙하가 녹아 다량의 담수가 유입이 될 경우, 이 지역에서 생성되는 deep water가 원활히 생성되지 않을 수도 있다. 그럴 경우에는 global conveyor belt가 방해를 받아 전지구 해류 순환에 큰 영향을 미칠 가능성이 제기된다.
- ✓ 영화 투모로우도 바로 이런 컨베이어벨트의 작동이 멈춤으로 인해 생길 수 있는 전지구적 재앙을 그린 것이다. 지구온난화로 인해 생긴 인류의 재앙이 흑한을 가져올 수도 있다는 사실이 아이러니하다.

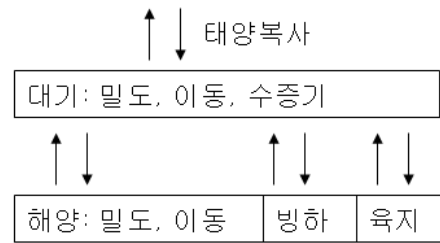
### 나. 일반 순환모형 (General Circulation Models)

#### 가) 일반 순환모형이란?

- ✓ 기후현상을 이해하고 기후를 예측하는 모형으로서 일반 기후모형 (General Climate Models)이라고도 불리움
- ✓ 이 모형은 기후를 구성하는 중요한 요소인 일별 날씨변화와 태양에너지 복사나 구름량 등 소규모 대기내믹에 관한 현상을 모사하는 다양한 유체역학적, 생물학적, 화학적 수식을 다루는 수치모형이다
- ✓ 이 모형에 포함되는 요소들
  - 대기 (atmosphere)
  - 해양 (ocean)
  - 설빙권 (cryosphere)
  - 생물권 (biosphere)
  - 암석권 (geosphere)

#### 나) 일반 순환모형의 종류

- ✓ 대기 순환모형 (Atmospheric GCM)
  - 대기의 순환에 영향을 주는 태양복사, 온도, 압력, 구름, 대기중 수증기, 이산화탄소, 황 등의 움직임을 모사하게 됨
  - 각 격자는 지형에 관한 정보와 알비도를 포함함
- ✓ 해양 순환모형 (Oceanic GCM)
  - 해양은 태양복사를 받아들이고 이를 해류를 통하여 재분배시킴
- ✓ 대기-해양 순환모형 (AOGCM)



<그림 3> 해양 순환 모형

#### 다) 일반 순환 모형의 한계점

- ✓ 격자의 크기가 60km\*60km 정도로 매우 큰데, 이 격자 안은 균일하다고 가정을 하는 모형이므로 국지적인 기후의 예측에는 한계가 있다.
- ✓ 온실효과기체의 전지구적 분포는 상대적으로 균일한데 반해, 에어로졸이나 수증기 입자는 전지구적으로 매우 불균일하게 분포되어있다. 이를 모사할 수 있는 능력이 일반순환모형은 부재하다
- ✓ 구름의 분포나 이것이 태양열 복사에 미치는 영향을 정확하게 모사할 수 없다.
- ✓ 육상에서의 물수지를 정확히 모사하기 힘들다 (토양수분, 지표유출수, 식물에서의 증발산)
- ✓ 생물계에 의한 피드백이나 토지이용변화 예측이 정확하게 되기 힘들다
- ✓ 사막화와 같은 급작스런 변화는 쉽게 모사될 수 없다.

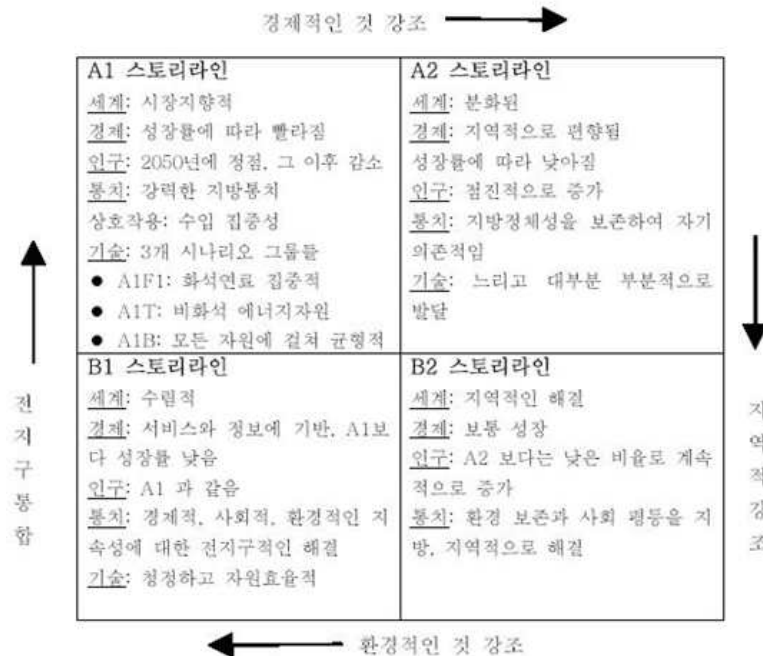
## 2. 향후 100년에 대한 전지구 기후의 예측

### 가. 기후변화 시나리오의 개발

- ✓ 미래의 기후변화 예측을 위해서 필요한 것은 바로 시나리오이다. IPCC는 1992년에 IS92 시나리오라고 불리는 6개의 시나리오를 작성하였다. 그러나 이 시나리오들은 1985년도 데이터에 기초하여 작성되었기 때문에 1990년 이후에 생긴 여러 가지 사회변화는 고려하지 못하였다. 소련 붕괴, 아시아 개발도상국 경제의 급성장, 자유무역체제의 도입 등은 1990년대에 들어 온실가스나 유황산화물의 배출량을 크게 변화시킨 요인이 되었다. 이와 같은 문제점은 계속 제기되었고 1996년에는 새로운 배출시나리오 작성을 위한 특별한 프로젝트팀이 조직되었다.
- ✓ 이렇게 하여 얻어진 일련의 성과들이 “배출 시나리오에 관한 특별 보고서 (Special Report on Emission Scenarios; SRES)”로 정리하여 2002년에 정식 IPCC 보고서로 간행된 것이다.

## 나. SRES 4개의 배출 시나리오

- ✓ SRES에는 크게 보면 네 개의 시나리오 라인이 존재한다. 아래의 A1, A2, B1, B2가 그것인데 A와 B는 각각 경제우선, 환경우선을 대변하고, 1,2는 세계화와 지역화를 대변한다. <그림 4>는 4가지 스토리라인의 특성을 나타내고 있다.



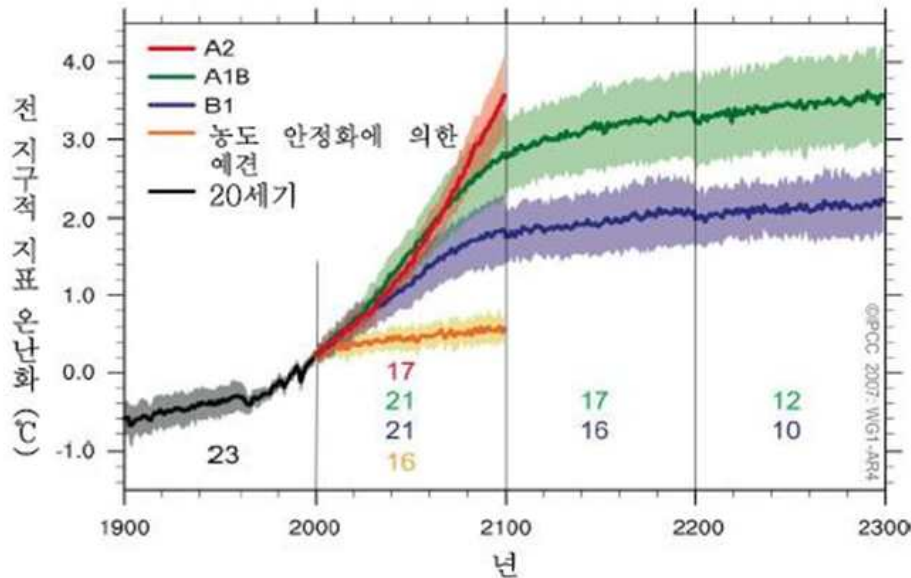
<그림 4> 4가지 스토리라인의 특성

- ✓ 스토리라인은 경제, 인구, 통치형태, 기술발달 수준에 따라 스토리라인이 결정된다.
- ✓ A1 시나리오의 경우는 경제성장률이 빠르고, 인구는 2050년에 정점에 이르렀다가 그 이후에는 감소한다.
- ✓ A2 시나리오의 경우는 경제가 지역으로 편향되고, 경제성장률이 낮고 기술발달이 늦다.
- ✓ B1 시나리오의 경우는 경제가 서비스와 정보에 치중하고, 경제성장률은 A1보다 낮고, 인구변화는 A1시나리오와 같다. 그리고 기술발달은 자원효율적인 것을 추구한다.
- ✓ B2 시나리오의 경우, 경제는 중간 성장정도이며, 인구는 지속적으로 증가하지만 A2보다는 성장률이 낮다. 기술개발속도는 A2보다는 빠르고 A1/B1보다는 느리고 다양하다.

## 다. IPCC 배출 시나리오에 따른 미래 기온의 변화 예측

- ✓ <그림 5>는 SRES 시나리오에 따른 전지구 2300년까지 보여준 것이다.
- 빨간색은 A2, 녹색은 A1B, 그리고 파란색은 B1에 대한 다중모델 평균 지표온난화이며, 20세기 시뮬레이션에 연장하여 표시한 것이다.
  - A1B와 B1 시나리오는 강제력을 일정하게 유지한 채 2100년 이후에도 계속된다.
  - 주황색은 강제력을 2000년 수준으로 유지한 추가 실험의 결과이다.

- 음영은  $\pm$  표준편차 범위를 나타낸다.
- 기간 간의 불연속성은 물리화적인 의미는 없으며, 주어진 시나리오를 가능한 모델의 수가 기간과 시나리오마다 다른 데서 생긴 결과일 뿐이므로 해석해서는 안된다.



<그림 5> 시나리오에 따른 미래 기온의 변화 예측

#### 라. IPCC의 지구평균기온 예측 및 해수면 상승 예측

- ✓ 해수면 상승은 최소 18cm에서 59cm까지 예측된다.<표1> CO<sub>2</sub>-eq 복사 강제력으로 인한 산업화 이전 대비 지구평균 평형 지표온도의 상승 추정치를 나타낸다.

평형 CO <sub>2</sub> -eq (ppm)	기온 상승 (°C)		
	최적 추정치	매우 가능한 범위의 하한	가능한 범위
350	1.0	0.5	0.6-1.4
450	2.1	1.0	1.4-3.1
550	2.9	1.5	1.9-4.4
650	3.6	1.8	2.4-5.5
750	4.3	2.1	2.8-6.4
1000	5.5	2.8	3.7-8.3
1200	6.3	3.1	4.2-9.4

<표 1> 지구평균 평형 지표온도의 상승 추정치

- ✓ 온도 변화의 예측은 앞서 그래프에서 설명한 대로이다. 만약 이산화탄소의 수준을 2000년도 농도 수준으로 동결시킬 경우는 2090-2099년사이의 평균기온이 1980-1999년의 평균기온에 비해 약 0.6도 상승할 것으로 예측되는 반면, 각각의 시나리오에 따라 기온의 상승폭은 1.8-4.0도까지 변화할 것으로 예측되고, 해수면 상승은 최소 18cm에서 59cm까지 예측된다.



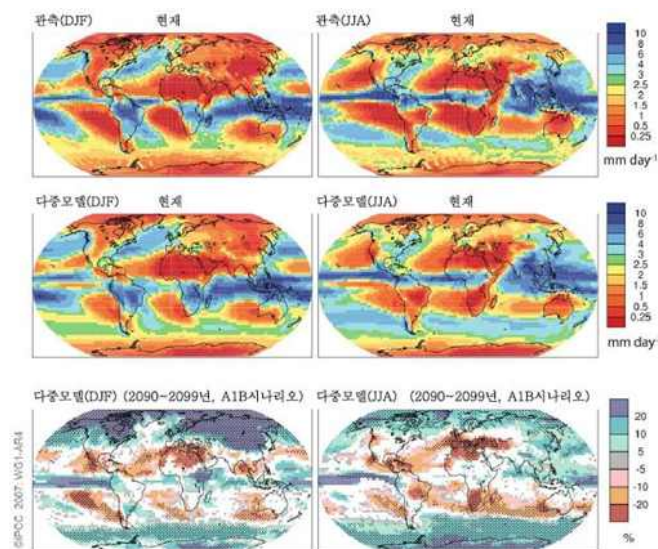
종류	온도 변화 (1980~1999년 대비 2090~2099년, °C) <sup>a</sup>		해수면 상승 (1980~1999년 대비 2090~2099년, m)
	최적추정치	가능범위	모델 기반의 범위 (미래에 얼음흐름의 급속한 역학적 변화는 제외)
2000년 수준으로 농도 고정 <sup>b</sup>	0.6	0.3 - 0.9	NA
B1 시나리오	1.8	1.1 - 2.9	0.18 - 0.38
A1T 시나리오	2.4	1.4 - 3.8	0.20 - 0.45
B2 시나리오	2.4	1.4 - 3.8	0.20 - 0.43
A1B 시나리오	2.8	1.7 - 4.4	0.21 - 0.48
A2 시나리오	3.4	2.0 - 5.4	0.23 - 0.51
A1FI 시나리오	4.0	2.4 - 6.4	0.26 - 0.59

주: a) 이 추정치는 1개의 단순 기후 모델, 몇 개의 EMIC, 다수의 AOGCM을 포함한 모델 계층으로부터 산출되었음 b) 2000년도 농도 안정화는 AOGCM으로부터만 도출되었음

<표 2> 시나리오에 따른 온도변화와, 해수면 상승수치

#### 마. IPCC의 강수량 예측

- ✓ <그림 6>은 1979~1993년 계절평균 강수량에 대한 관측값(위)과 다중모델 평균(가운데)의 공간 패턴과 SRES A1B 시나리오에 기초한 1980~1999 대비 2090~2099년까지의 변화에 대한 다중모델 평균(아래)이다.
- ✓ 왼쪽의 칼럼은 12~1월(DJF)의 평균이며, 가운데 칼럼은 6~8(JJA) 평균이다.
- ✓ 아래 그림에서 흰색 영역은 66% 미만의 모델이 변화의 부호가 일치하는 지역이며, 빗금친 영역은 90% 이상의 모델이 변화의 부호가 일치하는 지역이다.
- ✓ 관측패턴의 최근 추세와 유사하게 강수량은 고위도에서 증가할 가능성이 매우 높고, 대부분 아열대 육지에서 감소할 가능성이 있다.

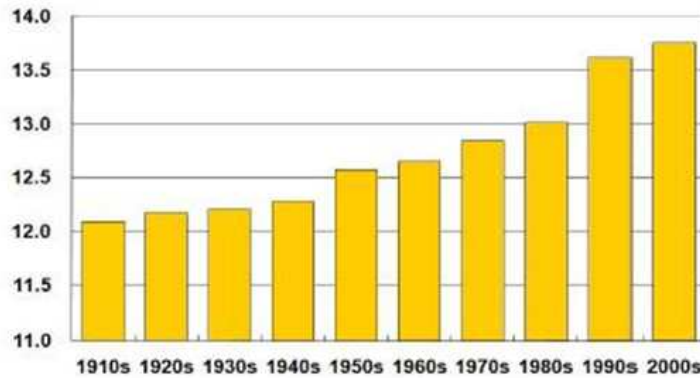


<그림 6> IPCC의 강수량 예측

### 3. 한반도 기후의 예측

#### 가. 한국의 기온 변화

##### 1) 지난 100년간 한국 평균 기온의 변화 (1912-2008)

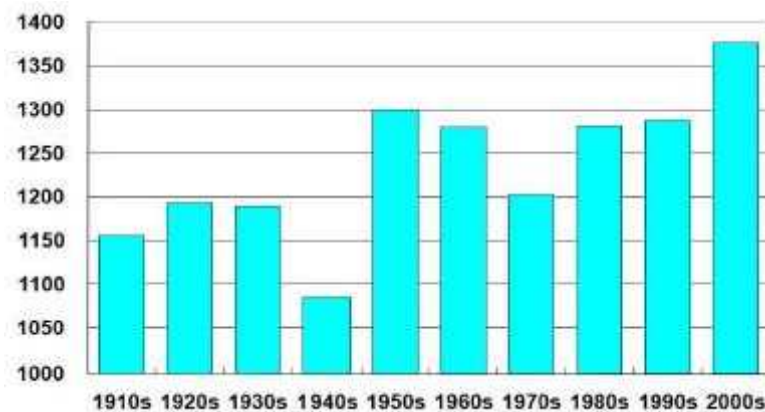


출처 : 기후변화이해하기 II(국립기상연구소, 2009)

<그림 7> 지난 100년간 한국 평균 기온의 변화

- ✓ 6개 지역(서울, 강릉, 인천, 대구, 부산, 목포)의 10년 평균 기온을 표시
- ✓ <그림 7>을 살펴보면, 지난 100년간 한반도의 기온은 약 1.7도 상승한 것을 볼 수 있다.
- ✓ 이는 전지구 평균기온 상승률( $0.74 \pm 0.03^{\circ}\text{C}$ )에 비해 높으며, 기온 상승값의 약 20-30%는 도시화 효과로 추정된다.

##### 2) 지난 100년간 연평균 강수량의 변화 (1912-2008)



출처 : 기후변화이해하기 II(국립기상연구소, 2009)

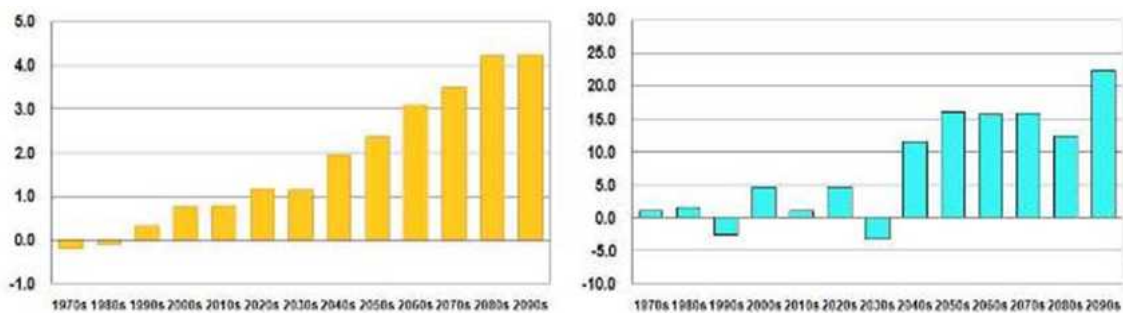
<그림 8> 지난 100년간 연평균 강수량의 변화



- ✓ 전국의 10년별의 평균 강수량을 표시
- ✓ 지난 100년간 한반도의 강수량은 그 추세가 기온처럼 뚜렷하지는 않지만 증가추세에있는 것으로 보고하고 있다. 기상전문가들은 강수의 절대량보다 강수의 강도(강수량/강우일수)가 증가한 것으로 보고한다.

### 나. 한국의 기후변화 예측 - A1B 시나리오

#### 1) 지난 100년간 한국 평균 기온의 변화 (1912-2008)



출처 : 국립기상연구소, 2008

<그림 9> 한국의 기후변화 예측 시나리오

- ✓ 전지구 순환모형에 의한 기후의 예측은 한반도와 같은 작은 규모에서의 기후 예측을 정확하게 할 수 없다. 그래서 전지구 규모의 기후예측을 지역 규모로 축소시키게 되는데, 이 과정을 다운스케일링 (downscaling)이라고 한다. 이 과정을 기상연구소가 담당하고 있고 A1B 시나리오에 의한 다운스케일링은 위와 같다.
- ✓ 이에 따르면 한반도는 20세기말 대비 21세기말 연평균 기온은 4도까지 상승하게 되며, 강수량은 17% 증가가 전망된다.