

# 기후변화개론

## 04. 미래 기후의 예측



## 1. 전 지구적 해류순환과 기후

전 지구 해류 순환은 전 지구 순환에서 가장 중요한 부분을 차지하고 있는 것으로, 대양 컨베이어벨트라고 불리우기도 합니다. 이러한 전 지구적 해류순환에 영향 주는 주요 요소로는 바람과 밀도를 들 수 있습니다. 우선 바람에 의한 표면의 해류는 눈으로도 관찰이 가능하고 호수나 강에 물결이 잡히는 것만 봐도 알 수 있습니다. 해수면 위로 바람이 계속 불면 바람과 해수면 사이의 마찰에 의해 표층 해수가 움직이게 됩니다. 예를 들어 무역풍이나 편서풍으로 인해 특정방향으로 바닷물이 움직이게 되는 것이 그 사례입니다. 바람의 영향이 없는 해양의 심층에서는 밀도의 차이에 의해 해수가 움직이기도 하며, 이를 심층해류라고 합니다. 이러한 밀도차이는 온도와 염분농도에 의해 결정됩니다. 더운 물은 팽창하기 때문에 더 가볍습니다. 그래서 적도지방의 밀도 낮은 물은 상대적으로 밀도가 높은 극지방(북쪽)으로 이동하게 되는 것입니다. 염분 농도가 높을수록 그 물은 무겁습니다. 해수가 수온이 낮아 열게 되면 염분과 밀도가 높아지고, 그 물은 침강하여 깊은 바닷속 물의 흐름을 만들게 되는 것입니다.

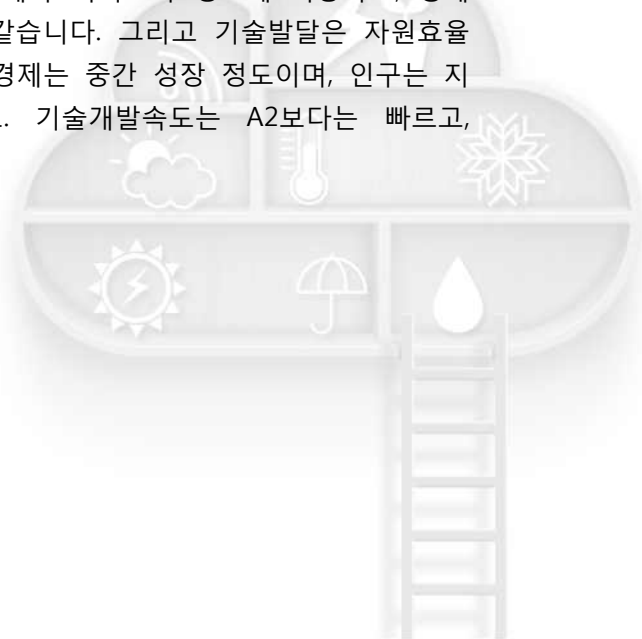
바람과 밀도차이에 의한 바닷속 해류의 흐름을 자세히 살펴보겠습니다. 적도부근의 더운 물(난류)은 가볍고 또한 바람의 영향으로 북쪽으로 이동합니다. 물이 극쪽으로 올라가면서 차가워지게 되고, 또한 얼음형성 과정에 의해 물의 밀도가 증가하여, 이 무거운 물은 깊은 해저로 침강하게 됩니다. 이와 같은 침강은 북대서양 부근과 남극대륙을 둘러싼 지역에서 일어납니다. 해저로 침강한 물은 이제 다시 적도 쪽으로 움직이게 되고 적도 쪽으로 이동하던 해류는 남아프리카 부근에서 두 개로 나뉘어져 하나는 인도해 방향으로, 다른 하나는 호주를 지나 태평양 쪽으로 나가게 됩니다. 이와 같은 순환은 적도부근의 에너지를 극지방으로 보내줌으로 인해 극지방 빙하의 크기를 조절하는 역할을 합니다. 이러한 전 지구적 순환에 변화가 있게 되면 전 지구적인 복사평형에도 영향을 주게 되고 deep water가 다시 어떻게 수표면으로 올라오는가의 속도를 결정하고 나아가 대기 중 이산화탄소의 농도까지 영향을 줄 수 있습니다. 지구온난화가 전 지구 순환에 가져올 수 있는 문제는 지구온난화로 인해 그린란드 주변에 빙하가 녹아 다량의 담수가 유입이 될 경우 해수의 밀도가 낮아져 이 지역에서 deep water가 원활히 생성되지 않을 수도 있습니다. 이에 따라 global conveyor belt가 방해를 받아 전 지구 해류 순환에 큰 영향을 미칠 가능성이 제기되는 것입니다.

전 지구적 해류순환과 기후의 관계를 알아봄에 있어, 일반 순환모형이란, 기후현상을 이해하고 기후를 예측하기 위해 해류의 순환과 대기와의 밀접한 상호작용을 고려한 모형입니다. 또한 기후를 구성하는 중요한 요소인 일별 날씨변화와 태양에너지 복사나 구름량 등 소규모 다이내믹에 관한 현상을 모사하고 다양한 유체역학적, 생물학적, 화학적 수식을 다루는 수치 모형입니다. 일반 순환모형에 포함되는 요소들에는 대기, 해양, 설빙권, 생물권, 암석권이 있습니다. 일반 순환모형은 상당히 복잡한 수치모형이지만 단순화하면 대기 순환모형, 해양 순환모형, 대기-해양 순환모형으로 구성되어 있습니다. 대기 순환모형은 대기의 순환에 영향을 주는 태양복사, 온도, 압력, 구름, 대기중 수증기, 이산화탄소, 황 등의 움직임을 묘사하게 되는데, 각 격자는 지형에 관한 정보와 알비도를 포함하고 있습니다. 해양 순환모형은 해양은 태양복사를 받아들이고 이를 해류를 통하여 재분배시키며 대기-해양 순환모형은 다음과 같

이 표현할 수 있습니다. 그렇지만 지구시스템이라는 복잡한 현상을 설명하는 데에는 여러 가지 한계점이 있을 것입니다. 일반 순환모형은 지구를 일정한 크기의 격자로 세분화하고 이 격자 내의 여러 현상들을 수치화하여 모형을 구동하게 되는데, 일반순환모형은 전지구를 대상으로 돌리려다 보니 격자의 크기가 60km\*60km 정도로 매우 크고, 해상도가 낮습니다. 즉, 이 격자 안은 균일하다고 가정을 하는 모형이므로 국지적인 기후의 예측에는 한계가 있습니다. 또한 온실효과기체의 전 지구적 분포는 상대적으로 균일한데 반해, 에어로졸이나 수증기 입자는 전 지구적으로 매우 불균일하게 분포되어있어 이를 모사할 수 있는 능력이 일반순환모형에는 없습니다. 다른 한계점으로는 구름의 분포나 이것이 태양열 복사에 미치는 영향을 정확하게 모사할 수 없고 육상에서의 물수지를 정확히 모사하기 힘들며 생물계에 의한 피드백이나 토지이용변화 예측이 정확하게 되기 어렵습니다. 그리고 사막화와 같은 급작스런 변화는 쉽게 모사될 수 없는 등의 많은 한계가 있습니다. 이런 한계점에도 불구하고 일반 순환모형은 미래기후를 예측하는 데에 있어서 널리 사용되고 있는 것은 미래 기후에 대한 개략적인 전망이라도 가지고 있다면 이를 통해 영향을 예측하여 대응할 수 있기 때문입니다.

## 2. 향후 100년에 대한 전 지구 기후의 예측

미래의 기후변화 예측은 시나리오를 기반으로 이루어집니다. IPCC는 1992년에 IS92 시나리오라고 불리는 6개의 시나리오를 작성하였습니다. 그러나 이 시나리오들은 1985년도 데이터에 기초하여 작성되었기 때문에 1990년 이후에 생긴 여러 가지 사회변화는 고려하지 못하였습니다. 소련 붕괴, 아시아 개발도상국 경제의 급성장, 자유무역체제의 도입 등은 1990년대에 들어 온실가스나 유황산화물의 배출량을 크게 변화시킨 요인이 되었는데 이와 같은 문제점은 계속 제기되어 1996년에는 새로운 배출시나리오 작성을 위한 특별한 프로젝트팀이 조직되었습니다. 이렇게 하여 얻어진 일련의 성과들이 "배출 시나리오에 관한 특별 보고서"로 정리하여 2002년에 정식 IPCC 보고서로 간행된 것입니다. SRES에는 크게 보면 네 개의 시나리오 라인이 존재합니다. 아래 그림의 A1, A2, B1, B2가 그것입니다. A와 B는 각각 경제우선, 환경우선을 대변하고, 1,2는 세계화와 지역화를 대변합니다. 또한 각 스토리라인은 경제, 인구, 통치형태, 기술발달 수준에 따라 시나리오가 결정됩니다. 스토리라인 별로 자세히 살펴보면 A1 시나리오의 경우는 경제성장률이 빠르고, 인구는 2050년에 정점에 이르렀다가 그 이후에는 감소합니다. A2 시나리오는 경제가 지역으로 편향되고, 경제성장률이 낮으며 기술발달이 늦습니다. B1 시나리오의 경우는 경제가 서비스와 정보에 치중하고, 경제성장률은 A1보다 낮으며 인구변화는 A1시나리오와 같습니다. 그리고 기술발달은 자원효율적인 것을 추구합니다. 끝으로 B2 시나리오의 경우, 경제는 중간 성장 정도이며, 인구는 지속적으로 증가하지만 A2보다는 성장률이 낮은데요. 기술개발속도는 A2보다는 빠르고, A1/B1보다는 느리고 다양합니다.





경제적인 것 강조 →

↑ 전 지구 통합	<b>A1 스토리라인</b> <b>세계</b> : 시장지향적 <b>경제</b> : 성장률에 따라 빨라짐 <b>인구</b> : 2050년 정점, 이후 감소 <b>통치</b> : 강력한 지방통제 <b>상호작용</b> : 수입 집중성 <b>기술</b> : 3개 시나리오 그룹들 <b>•A1F1</b> : 화석연료 집중적 <b>•A1T</b> : 비화석 에너지 자원 <b>•A1B</b> : 모든 자원에 걸쳐 균형적	<b>A2 스토리라인</b> <b>세계</b> : 분화된 <b>경제</b> : 지역적으로 편향됨 <b>성장률에 따라 낮아짐</b> <b>인구</b> : 점진적으로 증가 <b>통치</b> : 지방정체성을 보조하여 자기의존적임 <b>기술</b> : 느리고 대부분 부분적으로 발달	↓ 지역적 강조
	<b>B1 스토리라인</b> <b>세계</b> : 수렴적 <b>경제</b> : 서비스와 정보에 기반, A1 보다 성장률 낮음 <b>인구</b> : A1 과 같음 <b>통치</b> : 경제적, 사회적, 환경적인 지속성에 대한 전 지구적 해결 <b>기술</b> : 청청하고 자원효율적	<b>B2 스토리라인</b> <b>세계</b> : 지역적인 해결 <b>경제</b> : 보통 성장 <b>인구</b> : A2 보다는 낮은 비율로 계속적으로 증가 <b>통치</b> : 환경 보존과 사회 평등을 지방, 지역적으로 해결	

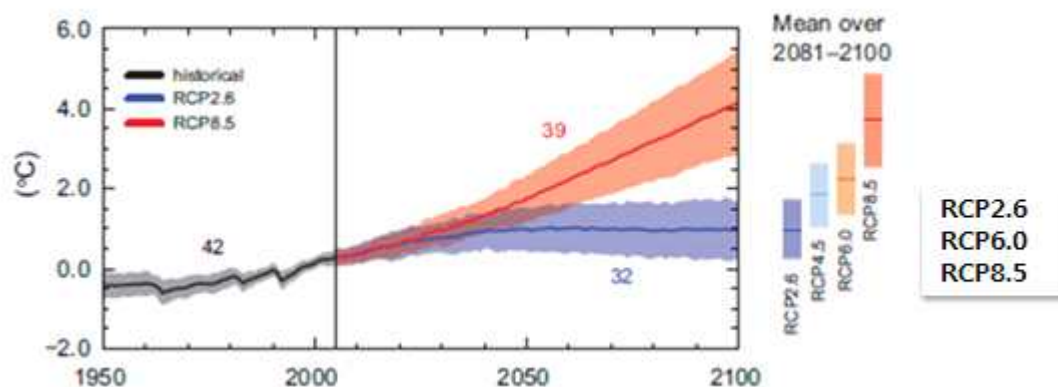


[SRES의 4개의 배출 시나리오]

2007년 발간된 IPCC 5차 평가보고서에는 인간활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하고, 하나의 대표적인 복사강제력에 대해 사회-경제 시나리오는 여러 가지가 될 수 있다는 의미에서 “대표농도경로”라고 명명하였습니다. 경로의 의미를 포함한 이유는 온실가스 배출 시나리오의 시간에 따른 변화를 강조하기 위해서죠. 앞서 설명한 SRES와 RCP 시나리오의 비교해 보면, RCP 시나리오는 최근 온실가스 농도 변화경향을 반영하였고 해상도 등이 업데이트 되었습니다. 또한 RCP 시나리오의 경우 온실가스 농도 산출과정에서 사회경제적 가정을 기후변화 대응정책 수행여부에 고려하고 있습니다. RCP 시나리오의 종류에는 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5로써 여기에서의 숫자는 복사강제력을 의미합니다. 이때, 복사강제력은 온실가스 등으로 에너지의 평형 변화를 시키는 영향력의 정도를 뜻합니다. 각 시나리오를 살펴보면, RCP 2.6은 인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우이고, RCP 4.5는 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되었으며 RCP 6.0은 온실가스 저감정책이 어느 정도 실현된 경우입니다. 그리고 RCP 8.5는 변화 추세로 저감 없이 온실가스가 배출되는 경우라 할 수 있습니다.

미래의 기온 변화를 예측해 보겠습니다. 아래의 그래프는 RCP 시나리오에 따른 전세계 평균 온도의 변화를 보여줍니다. 보라색은 RCP2.6 시나리오를, 빨간색은 RCP8.5 시나리오를 의미하며 RCP4.5와 RCP6.0은 그 사이에 존재하고 있습니다. RCP 8.5 시나리오에 따르면 21세기 말 전지구 평균기온이 4.8℃ 상승하고 강수량은 6% 증가할 것으로 전망합니다. 그러나

만약 온실가스 저감정책이 실현된다면 RCP 4.5에 의해 2.8°C의 기온상승과 4.5%의 강수량 증가를 전망할 수 있습니다. 즉, 저감노력 및 기후변화 대응정책 시행여부에 따라 전지구 기온 상승률은 더 낮아질 수도 있는 것입니다.



\* 출처: IPCC AR5 (2013)

[RCP 시나리오 기반 전세계 평균 온도의 변화]

아래의 표는 복사 강제력으로 인한 산업화 이전 대비 지구평균 평형 지표온도의 상승 추정을 나타냅니다. 이는 한반도 기후변화 전망보고서에서 나온 내용으로서 RCP 시나리오를 기반으로 하여 이산화탄소 평형 농도가 350ppm에서 1200ppm까지 변한 때 기온상승의 가능한 범위가 0.6도씨에서 9.4도씨까지 변화할 수 있음을 보여줍니다.

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

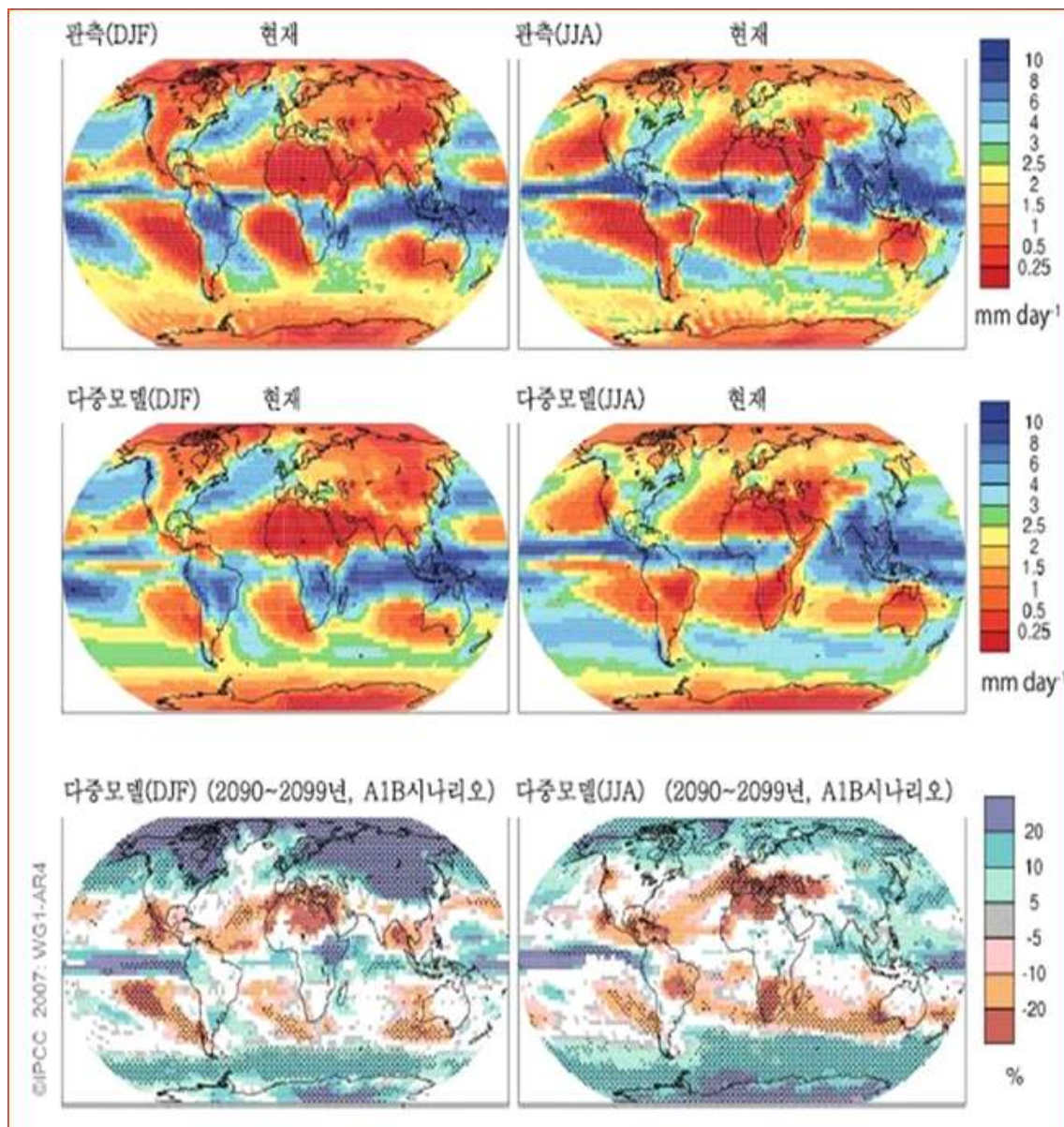
\* 출처: 한반도 기후변화 전망보고서, 2013

[2100년 기준 이산화탄소 농도 평형농도에 따른 산업화 이전 대비 기온 상승 추정치]

IPCC는 2013년 발표한 5차 평가보고서에서 RCP 시나리오에 따른 해수면 상승을 최소 26cm에서 82cm까지 예측하고 있습니다. 이는 여러 순환모델의 결과치를 종합하여 발표한 것으로 지난 100년 간 해수면이 약 17cm 상승한 속도에 비하면 엄청나게 증가된 수치입니다.

다.

이번엔 강수량을 예측해 보겠습니다. 아래 그림은 1979~1993년 계절평균 강수량에 대한 관측값, 다중모델 평균의 공간패턴과 SRES A1B 시나리오에 기초한 1980~1999 대비 2090~2099년까지의 변화에 대한 다중모델 평균입니다. 왼쪽의 칼럼은 12~1월의 평균이며, 오른쪽칼럼은 6~8월의 평균을 보여 주고 있습니다. 맨 아래 그림만 따로 살펴보면, 흰색 영역은 66% 미만의 모델이 변화의 부호가 일치하는 지역이며, 빙금 친 영역은 90% 이상의 모델이 변화의 부호가 일치하는 지역입니다. 관측패턴의 최근 추세와 유사하게 강수량은 고위도에서 증가할 가능성이 매우 높고, 대부분 아열대 육지에서 감소할 가능성이 있습니다.



[1979~1993년 계절평균 강수량에 대한 관측값, 다중모델 평균의 공간패턴과 SRES A1B 시나리오에 기초한 1980~1999 대비 2090~2099년까지의 변화에 대한 다중모델 평균]



### 3. 우리나라 기후의 변화

지난 100년간 한국 평균 기온의 변화를 살펴보면, 한반도의 기온은 약 1.7도 상승하였음을 알 수 있습니다. 이는 전 지구 평균기온 상승률에 비해 높으며, 기온 상승값의 약 20-30%는 도시화 효과로 추정됩니다. 지난 100년간 한반도의 강수량은 그 추세가 기온처럼 뚜렷하지는 않지만 증가추세에 있는 것으로 보고하고 있습니다. 기상전문가들은 강수의 절대량보다 강수의 강도가 증가한 것으로 보고하고 있습니다.

시나리오를 기반으로 우리나라의 기후를 예측해보면 RCP4.5 시나리오에서는 연평균 기온이 21세기 전반기에 1.4℃, 중반기에 2.4℃, 후반기에 3.0℃ 상승을 전망합니다. 강수량은 21세기 후반기에 1,348.1mm로 예상되며 이는 현재 기후대비 약 16% 증가하는 것입니다. 그리고 RCP8.0 시나리오에서는 연평균 기온이 현재 11℃ 수준에서 21세기 전반기에 1.5℃, 중반기에 3.4℃, 후반기에 5.7℃ 만큼 상승할 것으로 보고 있습니다. 강수량은 21세기 후반기에 약 1,366.9mm로 예상되며 이는 현재 기후대비 약 17.6% 증가하는 것입니다. 이와 같이 시나리오에 기반하여 우리나라의 기후를 예측한 결과, 우리나라의 연평균 기온은 온실가스 증가에 의해 21세기 후반까지 계속 상승하고 온난화가 더욱 가속화할 것으로 예측할 수 있습니다. 또한 강수량의 현재 기후대비 증가폭은 전지구 평균 증가의 약 3배에 달하는 것으로 평가됩니다.

#### 참고 문헌

1. IPCC AR5 (2013)
2. IPCC WG1 SPM (2013)
3. 한반도 기후변화 전망보고서, 2013
4. 6개 지역(서울, 강릉, 인천, 대구, 부산, 목포)의 10년 평균 기온을 표시 기후변화이해하기 II(국립기상연구소, 2009)

