
정책결정자를 위한 요약보고서 (Summary for Policymakers)

Based on a draft prepared by:

Daniel L. Albritton, Myles R. Allen, Alfons P. M. Baede, John A. Church, Ulrich Cubasch, Dai Xiaosu, Ding Yihui, Dieter H. Ehhalt, Christopher K. Folland, Filippo Giorgi, Jonathan M. Gregory, David J. Griggs, Jim M. Haywood, Bruce Hewitson, John T. Houghton, Joanna I. House, Michael Hulme, Ivar Isaksen, Victor J. Jaramillo, Achuthan Jayaraman, Catherine A. Johnson, Fortunat Joos, Sylvie Joussaume, Thomas Karl, David J. Karoly, Haroon S. Kheshgi, Corrine Le Quéré, Kathy Maskell, Luis J. Mata, Bryant J. McAvaney, Mack McFarland, Linda O. Mearns, Gerald A. Meehl, L. Gylvan Meira-Filho, Valentin P. Meleshko, John F. B. Mitchell, Berrien Moore, Richard K. Mugara, Maria Noguera, Buruhani S. Nyenzi, Michael Oppenheimer, Joyce E. Penner, Steven Pollonais, Michael Prather, I. Colin Prentice, Venkatchala Ramaswamy, Armando Ramirez-Rojas, Sarah C. B. Raper, M. Jim Salinger, Robert J. Scholes, Susan Solomon, Thomas F. Stocker, John M. R. Stone, Ronald J. Stouffer, Kevin E. Trenberth, Ming-Xing Wang, Robert T. Watson, Kok S. Yap, John Zillman

with contributions from many authors and reviewers.

정책결정자를 위한 요약보고서 (Summary for Policymakers, SPM)

정부간 기후변화패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 제 1 실무그룹(Working Group I)의 제3차 평가보고서(Third Assessment Report, TAR)는 이전 평가서를 토대로 하여, 지난 5년간의 기후변화¹⁾ 연구 결과를 종합하여 작성되었다. 이 평가서의 준비와 검토에는 많은 나라들의 수 백명의 과학자들²⁾이 참여했다.

2001년 1월 중국 상하이³⁾에서 IPCC 회원국 대표들에 의해 승인된 이 『정책결정자를 위한 요약보고서』는 기후시스템에 대한 현재의 이해 상태를 설명해 주고, 예측되고 있는 앞으로의 전개 상황과 불확실성의 추정값을 제공하고 있다.

관측시스템의 발전으로 기후시스템 내의 지구온난화를 포함한 여러 변화들이 보다 확실하게 드러나고 있다.

제2차 평가보고서(SAR)⁴⁾가 발표된 이후 현재와 과거 기후에 대한 새로운 연구에서 얻어진 자료뿐만 아니라 자료분석기법의 향상, 자료 질에 대한 보다 정확한 평가, 그리고 다른 자료들간의 비교는 기후변화에 대한 이해의 폭을 넓혔다.

전지구 평균 지면 온도는 20세기 동안 대략 0.6°C 정도 상승하였다.

- 전지구 평균 지면 온도(지표 부근 기온과 해수면 온도의 평균)는 1861년 이후 상승해 왔다. 20세기 동안 0.6±0.2°C⁵⁾⁶⁾ 만큼 증가하였다(그

림 1a). 이 값은 1994년까지의 기간 동안 SAR에서의 값보다 약 0.15°C 정도 크다. 이것은 1995~2000년 기간 동안 상대적으로 온도가 높았고 자료처리기법이 향상되었기 때문이다. 이 값들은 도시 열섬효과를 포함한 여러 가지 요인에 의하여 수정되었다. 이 값은 커다란 변동을 보여주고 있는데, 20세기 동안에 대부분 일어난 1910~1945년과 1976~2000년 기간 동안의 온난화가 그 예이다.

- 전지구적으로 1861년 이후에 계기(計器)에 의한 관측기록상으로 1990년대는 가장 따뜻한 10년이었고, 그 중 1998년은 가장 더웠던 해였던 것 같다(VL)⁷⁾(그림 1a 참조).
- 북반구에 대한 프록시 자료(proxy data)의 새로운 분석을 통해서 보면 20세기의 온도 상승은 지난 1000년 동안의 어떠한 세기보다도 가장 컸었던 것 같다(L)⁷⁾. 또한 북반구에서 1990년대는 가장 따뜻한 10년이었고, 그 중 1998년이 가장 더웠던 해였던 것 같다(L)⁷⁾(그림 1b). 왜냐하면, 활용할 수 있는 자료가 적을수록 현재 이전의 지난 1000년 동안의 연평균과 1861년 이전의 남반구 대부분 지역에서의 지배적인 상태들에 대하여 알기가 어렵기 때문이다.
- 평균적으로, 1950~1993년 기간 동안, 육지에서 밤 시간대 일 최저기온은 10년에 약 0.2°C (0.2°C/decade) 정도 상승하였다. 이것은 낮 시간대 일 최고기온의 상승 비율(0.1°C/decade)의 2배에 해당하는 것이다. 이것은 많은 중·고위도 지역에서 얼음이 녹는 기간을 장기화하였다. 이 기간 동안 해수면 온도 상승은 육지 지표면 평균 기온 증가율의 약 1/3에 해당한다.

준이 적용된다.

- 7) 이 정책결정자를 위한 요약보고서와 기술 요약보고서에서는 다음 단어들은 확신성의 판단 정도를 알리기 위하여 적절히 사용되었다: 거의 확실(virtually certain, 결과가 사실인 확률이 99% 보다 큰), 매우 그럴 것임(very likely, 90~99% 확률), 그럴 것임(likely, 66~90%), 그럴 것으로 봄(medium likelihood, 33~66%), 그럴 것 같지 않음(unlikely, 10~33%), 그럴 가능성이 상당히 낮음(very unlikely, 1~10%), 그럴 가능성이 매우 희박함(exceptionally unlikely, 1% 미만)

※ 이 국문 번역 보고서에는 영문 보고서의 의미를 정확히 알리기 위하여 위의 단어들을 다음과 같이 약칭해 삽입하였다. virtually certain: VC, very likely: VL, likely: L, medium likelihood: ML, unlikely: U, very unlikely: VU, exceptionally unlikely: EU

1) IPCC 용어에서 기후변화란 자연변동에 의한 것이든 또는 인간 활동의 결과에 기인한 것이든 기후에 있어서의 모든 변화를 의미한다 이는 기후변화협약에서 정의한 것과는 다르다. 기후변화협약에 있어서 기후변화란 지구 대기 조성을 바꾸는 직·간접적인 인간활동에 기인된 기후의 변화를 의미하며 여기에 충분히 오랜 기간 동안 관측된 자연적 기후변동으로 인한 것을 추가하여 일컫고 있다.

2) 전체적으로 조정 선도저자와 선도저자 122명, 기여저자 516명, 검토 편집자 21명, 그리고 전문가 검토자 337명이다.

3) 99개국의 IPCC 회원국 대표단들이 2001년 1월 17-20일까지 상하이에서 열린 제 8차 IPCC 제 1 실무그룹 회의에 참가하였다.

4) 이 보고서에서 IPCC 제2차 평가보고서(the IPCC Second Assessment Report)는 SAR로 약칭한다.

5) 일반적으로, 자료 활용 정도에 따라 종종 기간이 제한되어 왔기 때문에 온도 경향은 단위시간당 0.05°C 단위로 반올림한 근사치를 사용한다.

6) 일반적으로, 5%의 통계적 유의수준과 95%의 신뢰수

지구 표면온도의 변동

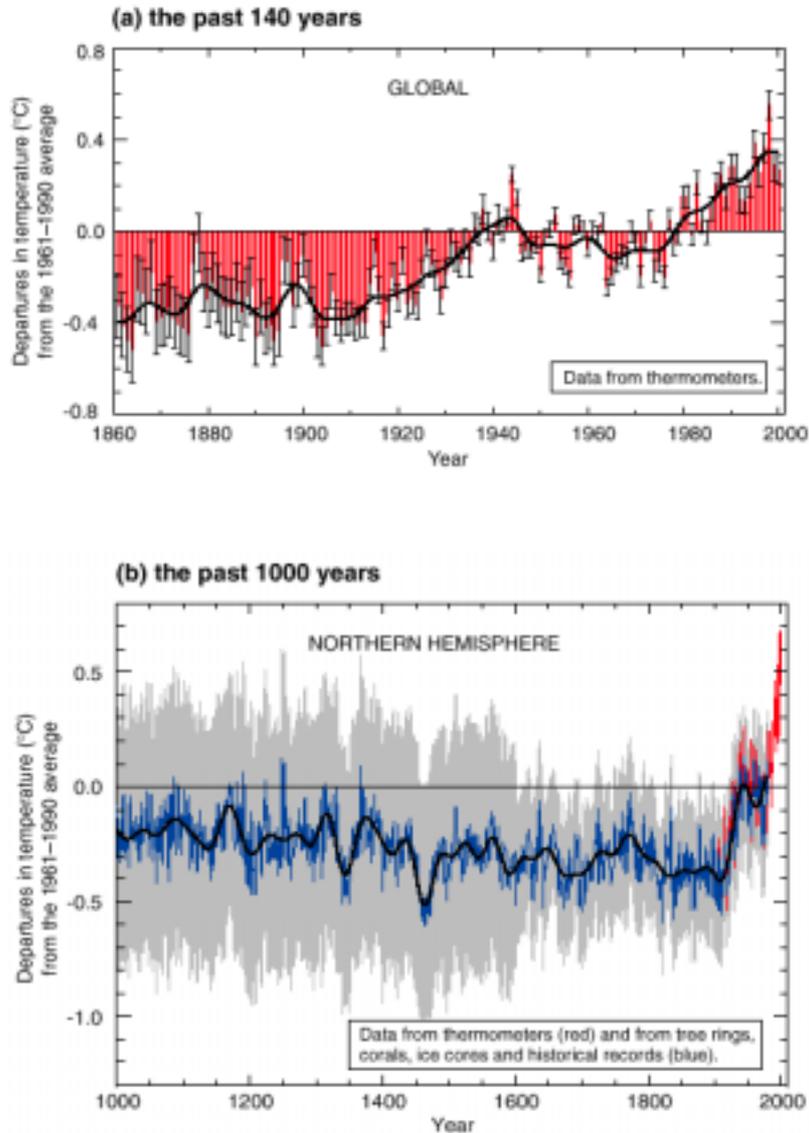


그림 1: 지난 140년간과 1,000년 동안의 지면 온도의 변화.

- a) 지구 지면 온도를 년도별(붉은막대), 10년별(검은색 곡선은 대체로 시간 규모가 10년 이하인 변동을 제거하여 매끈하게 만든 연변화 곡선이다)로 나타내고 있다. 자료의 공백, 임의의 계기 오차와 불확실성, 해면온도자료에 있어서 바이어스(bias) 보정과 육지에서의 도시화에 대한 보정(adjustments)시에 존재하는 불확실성으로 인해 매년의 자료(얇은 검은색 구간표시 막대는 95% 확신 범위를 의미한다)에는 불확실성이 있게 된다. 지난 140년 동안과 100년 동안 모두, 최적의 추정값(estimate)은 전지구 평균 지면 온도가 $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 로 증가했다는 것이다.
- b) 추가적으로, 지난 1000년동안의 북반구 평균 지면 온도의 연도별 변동(파란 곡선)과 50년평균(검정 곡선)변화는, 온도 자료에 대하여 보정된 프록시 자료를 이용하여 재구성한 것이다(그림의 주요 프록시자료 목록 참조). 연단위의 데이터에 있어서 95% 신뢰구간(confidence range)은 회색지역으로 표시되었다. 이런 불확실성은 시간이 멀어질수록 증가하고, 상대적으로 빈약한 프록시자료의 사용 때문에 계기관측 기록보다 항상 훨씬 더 불확실성이 크다. 그럼에도 불구하고 20세기 온난화의 비율과 기간은 이전의 어떠한 9번의 세기보다도 컸다. 마찬가지로, 1990년대는 가장 온난했던 10년이었고, 1998년이 천년 동안 가장 온난했던 해였다. (그림 2.7c의 a와 그림 2.20의 b를 근거로)

Summary for Policymakers

0~8 km 대기의 온도는 지난 40년 동안 상승하였다.

- 1950년대 후반 이후 (고층기상 관측 기구(weather balloon)에 의한 적절한 관측이 수행된 기간), 전지구적으로 0~8 km 대기와 지구 표면의 온도 상승률은 10년에 0.1°C로 비슷하였다.
- 1979년 인공위성 관측이 시작된 이후, 인공위성과 기구 측정값 모두 전지구적인 0~8 km 대기의 평균온도는 10년에 $+0.05\pm 0.10$ °C 상승하였으나, 전지구적인 평균 지구표면 온도는 10년에 $+0.15\pm 0.05$ °C로 두드러지게 상승하였다. 온도 상승률에서의 차이는 통계상으로 뚜렷하다. 이 차이는 주로 열대지역과 아열대지역에서 나타난다.
- 0~8 km 대기와 지구 표면은 성층권 오존 감소, 대기 에어로졸, 그리고 엘니뇨현상과 같은 요소에 의해 다르게 영향을 받는다. 그러므로 짧은 기간(예, 20년) 동안 온도 경향에 차이가 있을 수 있다고 예상하는 것은 물리적으로 그럴듯하다. 또한 공간적 샘플링 기법은 경향값에서 어느 정도 차이점을 설명해 줄 수는 있지만 이러한 차이들은 완전히 분석되지 않는다.

눈덮임과 얼음지역이 감소했다.

- 위성자료는 지난 1960년대 이후로 눈덮임 지역이 약 10% 정도 감소한 것 같음(VL)⁷⁾을 보여주고 있고, 지상 관측값은 20세기 동안 북반구 중·고위도 지역에서 일년 중 호수 및 강의 얼음덮임 기간이 약 2주정도 감소한 것 같음(VL)⁷⁾을 보여준다.
- 20세기 동안 극지방 이외 지역에서 산의 빙하가 광범위하게 감소되었다.
- 북반구의 봄과 여름철 기간에 바다의 빙하지역은 1950년대 이후로 약 10~15% 정도 감소하였다. 최근 수 십년 늦여름에서 초가을 기간에 북극 바다의 얼음 두께가 약 40% 감소하였고 겨울 바다의 얼음 두께는 상당히 느린 감소를 나타내는 것 같다(L)⁷⁾.

전지구 평균 해수면은 상승하였고 해양의 열 용량은 증가하였다.

- 조수 측정 자료에 의하면 20세기 동안 전지구 평균 해수면은 0.1~0.2 m 상승하였다.
- 전지구 해양 열 용량은 1950년대 후반 이후 증가하였다. 이 시기는 해수면 바로 아래층의 온도를 적절하게 관측할 수 있게 된 때이다.

기후의 다른 중요한 면에 있어서도 변화가 일어났다.

- 20세기 동안 북반구 대륙의 대부분 중·고위도 지역에서 강수량은 아마도 10년에 0.5~1% 증

가한 것 같고(VL)⁷⁾, 열대(10°N~10°S) 육지지역에서 강수량은 10년에 0.2~0.3% 증가한 것 같다(L)⁷⁾. 지난 수 십년 동안 열대지역에서의 증가는 확실하지 않다. 또한, 20세기 동안 북반구 아열대(10°N~30°N) 육지의 상당한 지역에서 강수량은 10년에 약 0.3% 정도 감소한 것 같다(L)⁷⁾. 북반구와는 대조적으로, 남반구 지역에서 넓은 위도대의 평균값에서 비교할 만한 구조적인 변화가 탐지되지 않았다. 해양에서의 강수량 경향 도출에 필요한 자료가 부족한 실정이다.

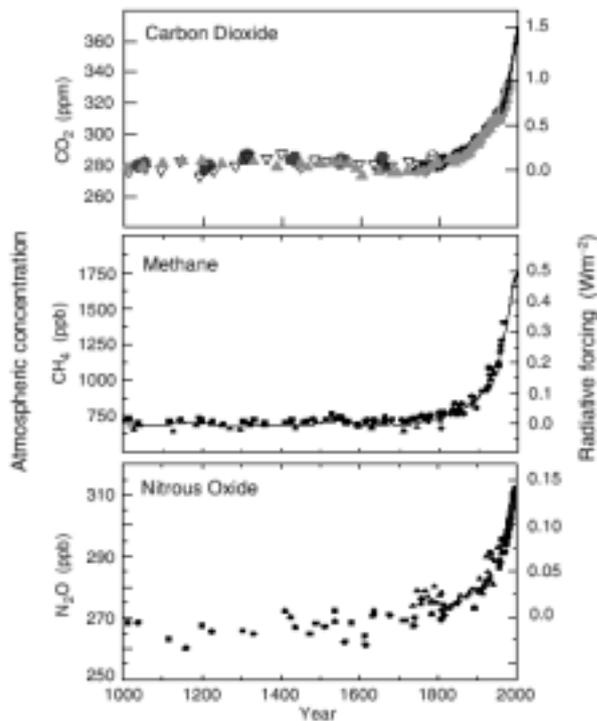
- 20세기 후반기 동안 북반구의 중·고위도 지역에서는 극심한 강수 현상의 발생이 2~4% 증가한 것으로 보여진다(L)⁷⁾. 극심한 강수 현상의 증가는 대기 중 습기, 뇌우 활동과 대규모 폭풍 활동의 변화와 같은 많은 요인에 의해 발생할 수 있다.
- 20세기 동안 중·고위도 육지지역의 구름량은 2% 증가한 것으로 보인다(L)⁷⁾. 대부분의 지역에서 이 경향은 일 온도 범위에 있어서 관측된 감소와 잘 연관되고 있다.
- 1950년 이후 아마도 극히 낮은 기온의 발생 빈도가 감소되었고, 이와 함께 극히 높은 기온의 발생 빈도는 더 작은 증가율을 나타낸 것으로 여겨진다(VL)⁷⁾.
- 엘니뇨-남방진동(El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 현상(대부분의 열대지역, 아열대지역, 그리고 중위도 일부지역에 걸쳐 강수량과 온도의 지역적 변화에 지속적으로 영향을 줌)의 온난 에피소드는 지난 100년과 비교해 보면, 1970년대 중반부터 보다 빈번하고, 지속적이고 강화되었다.
- 20세기(1900~1995년) 동안 전지구적으로 극심한 가뭄 또는 호우를 경험한 육지지역은 상대적으로 적게 증가하였다. 많은 지역에서, 이러한 변화는 더 강한 온난화 현상을 일으키는 방향으로의 ENSO 변이와 같이 십년(interdecadal)과 수 십년(multidecadal) 주기의 기후변동에 의해 지배된다.
- 아시아와 아프리카의 일부지역과 같은 몇몇 지역에서 가뭄 현상의 빈도와 강도는 최근 수 십년간 증가된 것으로 관측되었다.

기후의 몇몇 중요한 양상은 변하지 않은 것으로 보여진다.

- 지구상의 몇몇의 지역, 주로 남반구 해양과 남극대륙의 몇몇 지역에서는 최근 수 십년간 온도가 상승하지 않았다.
- 신뢰도 높은 인공위성 관측기간인 1978년 이후 남극의 바다 얼음 넓이가 두드러지게 변화한

산업화 기간동안 대기에 영향을 미친 인위적 요소

(a) 온실가스별 지구대기농도



(b) 그린랜드 빙하속에 침적된 황산염 에어러솔

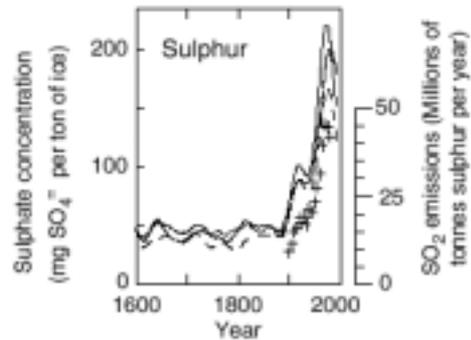


그림 2: 대기중의 성분에서 과거의 변화의 장기간 기록을 보면 인위적인 배출의 영향에 대한 전후관계를 알 수 있다.

a)는 지난 1,000년 동안 이산화탄소, 메탄, 아산화질소의 대기 중 농도 변화를 보여준다. 남극대륙과 그린랜드(서로 다른 기호로 표시된)에서 몇몇 장소에서 얼음봉과 만년설 자료는 지난 몇 십년동안으로 직접 채취한 대기 샘플로부터 자료가 보충(CO₂에 대한 곡선에서 보여주고 있으며 CH₄의 전지구 평균농도를 나타낸 곡선에서는 통합하여 표시하고 있다)되었다. 이런 기록으로부터 기후시스템의 양의 복사강제력을 추정하여 오른쪽 눈금(scale)으로 나타내었다. 이런 기체는 십년 또는 그 이상 대기에서 잔류하기 때문에, 잘 혼합되며, 그 농도는 전지구를 걸친 배출원(sources)으로부터의 배출량을 반영한다. 3개의 기록 모두에서 산업혁명 이후 시대(Industrial Era)에 인위적 배출량이 크게 증가한 영향을 받고 있음을 보여준다.

b)는 대기 중의 황산염(sulphate) 농도에서 산업 배출량의 영향을 보여준다. 이것은 음의 복사강제력을 생산한다. 보여진 것은 황산염 농도의 시간 역사이고, 대기 중에서가 아니라 그린랜드의 얼음봉에서이다. (선으로 나타내어졌고, 화산 폭발의 일시적인 영향은 제거되었다) 그런 자료는 그 장소에서 황산염 에어러솔의 국지적인 침전물(deposition)이고 북반구의 중위도지역에서 SO₂ 배출을 반영하고 있다. 이 기록은 전지구적으로 혼합된 온실가스의 것보다 더 지역적일지라도, 산업시대 동안 인위적인 SO₂ 배출량이 크게 증가하였음을 증명하고 있다. 플러스 기호(+)-들은 이와 관련하여 지역적으로 추정된 SO₂ 배출량(오른쪽 눈금)을 나타낸다.

경향은 나타나지 않았다.

- 20세기 동안 전지구적으로 열대지역과 열대 이외 지역의 폭풍 강도와 빈도의 변화는 두드러진 경향 없이 십년(inter-decadal)에서 수 십년(multi-decadal) 변화에 의해 지배되고 있다. 특히 적도 이외 지역에서 폭풍 활동의 변화에 대한 명확한 결론을 도출하는 것은 상반되는 분석 때문에 어렵다.
- 토네이도의 빈도, 천둥 일수, 또는 우박 현상 발생에 있어서 제한된 영역에서 분석된 계통적인 변화는 분명하지 않다.

기후변화는 기후시스템 내에서의 내부적인 변동과 외부적인 요인(자연적 및 인위적 요인)들의 결과로서 발생한다. 외부 요인이 기후에 미치는 영향은 복사강제력⁸⁾ 개념을 사용하여 광범위하게 비교될 수 있다. 온실가스 농도의 증가로 인해 유발되는 것과 같은 양의 복사강제력은 지구 표면을 따뜻하게 하는 경향이 있다. 몇몇 형태의 에어러솔(미세

인간 활동으로 인한 온실가스와 에어러솔의 배출은 기후에 영향을 줄 것으로 예상되는 방향으로 대기를 지속적으로 변화시킨다.

8) 복사강제력(radiative forcing)은 어떤 한 요인이 지구-대기 시스템에서 흡수하고 방출되는 에너지의 균형을 변화시키는 영향의 정도를 나타낸 것이고, 잠재적인 기후변화 메커니즘으로서 그 요인의 중요도를 지수화하여 나타낸다. 단위는 Wm⁻²이다.

1750년과 비교하여 볼 때, 서기 2000년에 있어서 기후 시스템의 전지구적 평균복사강제력

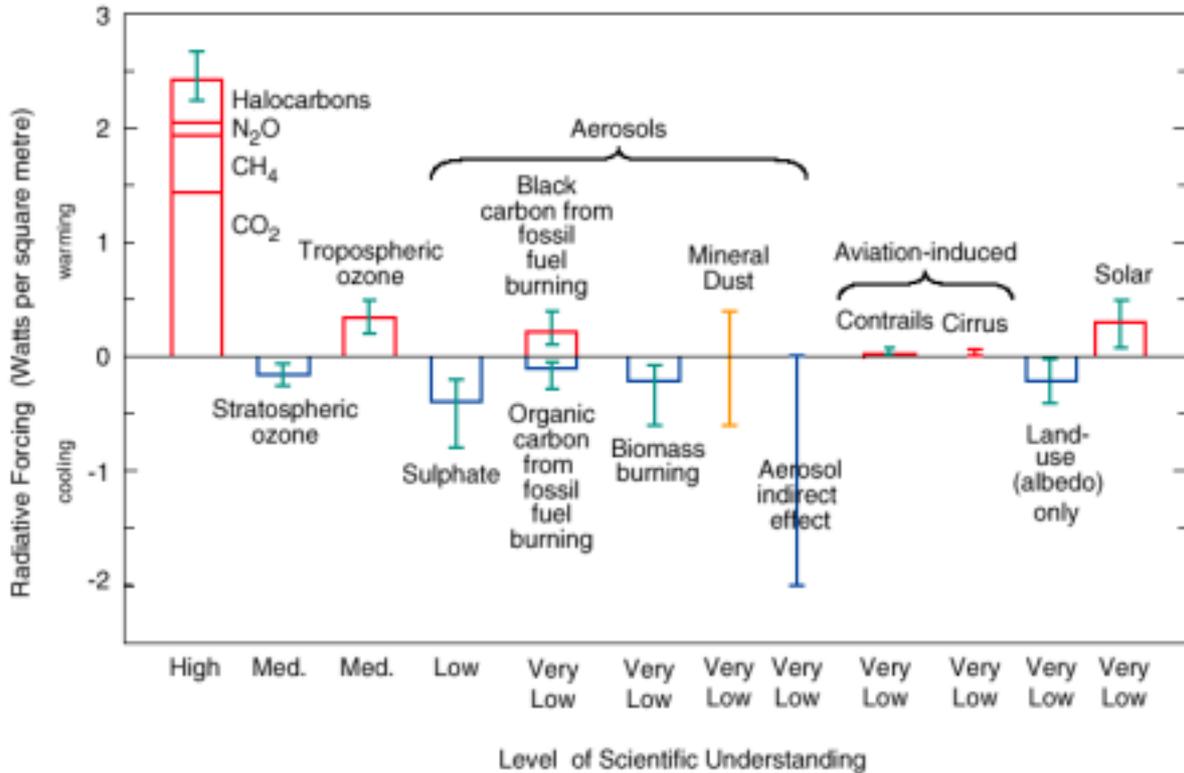


그림 3: 많은 외부적 요소들은 기후변화를 강요하고 있다.

이런 복사강제력은 대기 구성, 토지 이용도에 의한 지표면 반사율의 변경, 태양에너지 변동의 변화로 발생한다. 태양 변화를 제외하고, 인간 활동의 몇몇 형태(form)는 서로 연결되어 있다. 직사각형 막대는, 일부는 온도 상승을 가져오고 일부는 온도 하강을 가져오는데 - 이런 강제력의 기여(contributions) 정도의 추정값을 나타낸다. 일시적 화산폭발로 인한 강제력은, 단 몇 년간만 지속되는 음의 강제력을 일으키기 때문에 여기서 보이지 않았다. 보여진 에어러솔의 간접적 영향은 구름 입자의 크기와 수에 영향을 주는 것이다. 구름에 대한 에어러솔의 두 번째 간접 영향 즉, 구름의 수명에 영향을 주고, 이것은 음의 강제력으로 나타나는데, 이것은 표시하지 않았다. 항공기 운항이 온실가스에 미치는 영향은 개별적인 막대에 포함시켰다. 직사각형 막대 주위에 있는 수직선은 추정값의 범위를 나타내는데, 이는 강제력에 있어서 이미 발표되어진 값들과 물리적 이해에 있어서 가질 수 있는 범위를 알려주고 있다. 강제력의 몇몇은 다른 것보다 더 큰 정도의 확실성을 가지고 있다. 직사각형 막대가 없는 수직선은, 불확실성이 크기 때문에 최적의 추정값을 지정할 수 없는 강제력을 나타낸다. 각각의 강제력에 대한 과학적 이해의 전반적인 수준은 적혀진 것과 같이 상당히 변화한다. 복사강제력을 일으키는 물질 중 몇몇은, 예를 들어 이산화탄소와 같이 전지구적으로 볼 때 잘 혼합되어 있어, 전지구적인 열 평형을 교란시킨다. 에어러솔과 같이 또 다른 물질들은 공간적 분포로 인하여 더 강한 지역적 특성을 가지고 변동한다는 것을 보여주고 있다. 이런저런 이유로, 양과 음의 막대들의 단순한 합계를 가지고 기후시스템에 미치는 순(net) 영향을 산출할 수 없다. 이 평가보고서의 모의 결과(예를 들어 그림 5)는 이러한 섭동에 대해 추정된 순 영향은 1750년 이후로 전지구적 기후를 따뜻하고 해 왔다는 것을 말해 주고 있다.

대기입자) 증가로 발생할 수 있는 음의 복사강제력은 지구 표면을 냉각시키는 경향이 있다. 또한 태양 활동 또는 폭발적인 화산 활동의 변화와 같은 자연적 요소도 복사강제력을 유발할 수 있다. 이와 같은 기후강제 인자 특성과 그것들의 시간에 따른 변화(그림 2 참조)는 자연변화의 맥락에서 과거의 기후변화를 이해하고, 기후변화가 앞으로 어떻게

일어날 것인지 예상하는데 필요하다. 그림 3은 대기 성분 농도의 증가와 다른 메커니즘으로 인해 발생하는 복사강제력의 현재 추정값을 보여준다.

대기 온실가스 농도와 그 복사강제력은 인간 활동의 결과로 인해 계속 증가되었다.

- 1750년 이후, 대기 중 이산화탄소(CO₂) 농도는

31% 증가하였다. 지난 420,000년 동안의 CO₂ 농도는 현재의 CO₂ 농도를 넘어 본 적이 없고 지난 2천만년 동안에도 없었던 것 같다(L)⁷⁾. 현재 증가율은 적어도 지난 20,000년 동안 전례가 없는 것이다.

- 지난 20년 동안 대기 중으로의 인위적인 CO₂ 배출의 약 3/4은 화석연료의 연소로 인한 것이다. 그 나머지는 주로 토지 이용도의 변화, 특히 산림 개간 때문이다.
- 현재 해양과 육지는 인위적인 CO₂ 배출의 절반 정도를 흡수하고 있다. 1990년대 동안 육상에서 인위적인 CO₂의 흡수는 아마도 삼림 벌채에 의한 CO₂ 배출을 초과했었던 것 같다(VL)⁷⁾.
- 지난 20년 동안 대기 중 CO₂ 농도의 증가율은 일년에 약 1.5 ppm (0.4%)이었다. 1990년대 동안 매년 0.9 ppm⁹⁾ (0.2%) ~ 2.8 ppm (0.8%) 증가하였다. 이 변동의 대부분은 육지와 해양에서 흡수되고 배출된 CO₂에 대한 기후변동(예, 엘니뇨현상)의 영향으로 인한 것이다.
- 1750년 이후, 대기 중 메탄(CH₄)의 농도는 1060 ppb (151%) 증가하였고, 계속 증가하고 있다. 현재 CH₄의 농도는 지난 420,000년 동안의 농도를 초과하지 않았다. 메탄 농도는 매년 천천히 증가하고 있고 1980년대와 비교할 때 1990년대에 더 큰 변화를 나타내었다. 현재 CH₄ 배출량의 절반 이상이 인위적 요인(예, 화석연료의 사용, 가축, 벼농사, 쓰레기 매립지)에 의한 것이다. 게다가, 최근에 일산화탄소(CO) 배출은 CH₄ 농도의 증가 원인으로 규명되었다.
- 1750년 이후, 대기 중 아산화질소(N₂O) 농도는 46ppb (17%) 증가하였고, 계속 증가하고 있다. 현재 N₂O 농도는 적어도 지난 천년 동안의 농도를 초과하지 않았다. 현재 N₂O 배출의 약 1/3 정도는 인위적 요인(예, 농업용 거름, 가축 사료, 화학 산업)에 의한 것이다.
- 1995년 이후, 몬트리올 의정서(Montreal Protocol)와 그 개정서들(Amendments)의 규제 아래에서 오존층 파괴물질이면서 동시에 온실가스인 할로젠화탄소(halocarbon) 기체(예, CFC₃, CF₂Cl₂) 배출의 감소로 인하여 이것의 대기 중 농도는 증가가 둔화되거나 감소하였다. 이들의 대체 화합물(예, CHF₂Cl, CF₃CHF₂)과 몇몇 다른 합성 화합물(예, PFCs(perfluorocarbons), SF₆(sulphur hexafluoride) 또한 온실가스이고, 그 농도는 현재 증가하고 있다.

- 1750~2000년까지 잘 혼합된 온실가스의 증가로 인한 복사강제력은 2.43 Wm⁻²로 추정되고 있다. 온실가스별 복사강제력은 이산화탄소 1.46 Wm⁻², 메탄 0.48 Wm⁻², 할로젠화탄소 0.34 Wm⁻², 아산화질소 0.15 Wm⁻²이다(그림 3 참조).
- 1979~2000년까지 관측된 성층권 오존층 감소는 음의 복사강제력(-0.15 Wm⁻²)을 일으킨 것으로 추정된다. 현재의 할로젠화탄소 규제가 완벽히 이행된다고 가정하면 할로젠화탄소의 양의 복사강제력은 21세기 동안 오존층 회복 정도에 따라 성층권 오존 감소 정도에 의한 음의 복사강제력 크기만큼 줄어들 것이다.
- 1750년대 이후에 대류권 오존량은 주로 몇몇 오존 형성 기체의 인위적인 배출로 인해 36% 증가한 것으로 추정된다. 이것은 양의 복사강제력 0.35 Wm⁻² 만큼 해당한다. 오존 강제력은 지역에 따라 상당히 변하고 CO₂와 같이 대기 중 생존 기간이 긴 온실가스보다 배출량의 변화에 대하여 훨씬 빨리 반응한다.

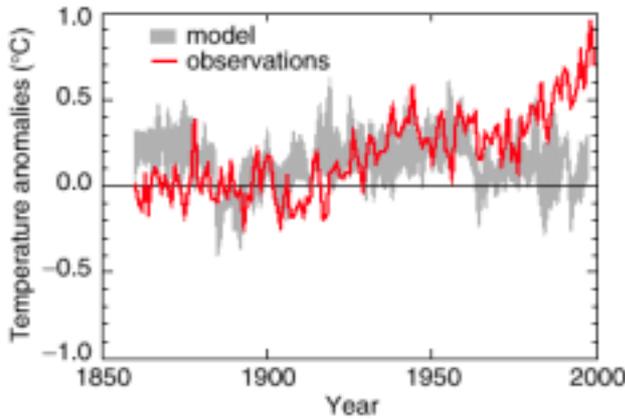
인위적인 에어러솔은 대기 중 생존기간이 짧고 주로 음의 복사강제력을 일으킨다.

- 인위적인 에어러솔의 주요 생성원은 화석연료와 생물체 연소이다. 이러한 생성원은 대기질의 악화 및 산성 침적과 연관된다.
- SAR 이후에 다른 종류의 에어러솔에 대하여 직접적인 복사 역할의 특성을 좀 더 파악한 것은 주목할 만한 발전이었다. 직접적 복사강제력은 황산염 -0.4 Wm⁻², 생물체 연소에 의한 에어러솔 -0.2 Wm⁻², 화석연료 유기탄소 -0.1 Wm⁻², 그리고 화석연료 검댕(black carbon) 에어러솔 +0.2 Wm⁻²로 추정되고 있다. 전체 에어러솔의 직접적인 효과와 시간에 따른 전개 양상은 앞에서 언급된 기체들에 대한 것보다 훨씬 더 불확실하다. 에어러솔은 또한 지역에 따라 매우 다르며 배출량 변화에 대하여 빨리 반응한다.
- 에어러솔은 직접적인 복사강제력뿐만 아니라 구름에 미치는 영향을 통한 간접적인 복사강제력을 가지고 있다. 현재 이 간접적인 영향의 정도가 비록 매우 불확실할지라도 음의 값을 가지고 있다는 것에 대한 많은 증거가 있다.

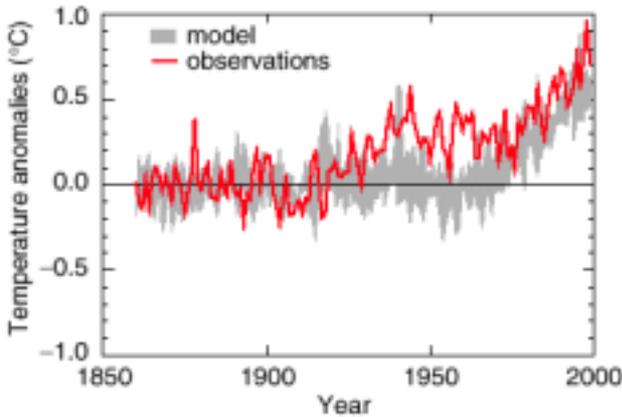
9) ppm (parts per million) 또는 ppb (parts per billion, 1 billion = 1,000 million)은 건조공기 전체 분자 갯수에 대한 온실가스 분자 갯수의 비율이다. 예를 들면, 300 ppm은 건조공기 분자 백만개당 온실가스 분자가 300개임을 의미한다.

지구 표면온도의 연평균 시뮬레이션

(a) 자연적 요인



(b) 인위적 요인



(c) 자연적 및 인위적 요인

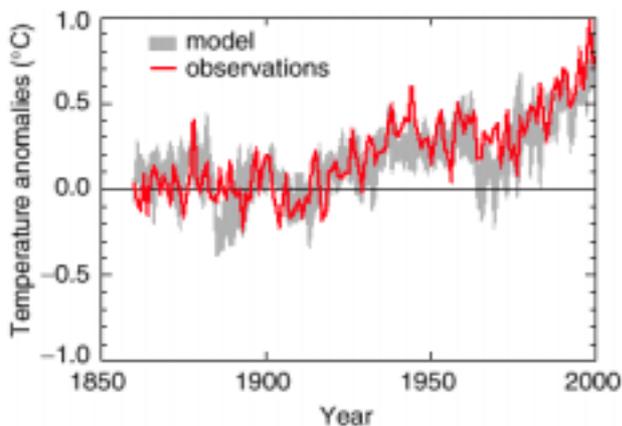


그림 4: 지구의 온도 변화를 모의하고 그 결과를 측정된 변화와 비교하는 것은 주요 변화의 근원적인 원인을 파악할 수 있는 식견을 제공한다.

기후 모델은 자연적인 원인과 인위적인 원인 모두에서 발생하는 온도 변화를 모의하는데 사용되어질 수 있다. 자연적 강제력(태양 변화와 폭발 활동)만을 가지고, (a)에서 밴드 형태로 표시된 모의가 행해졌다. (b)에서 밴드로 둘러싸인 모의들은 인위적인 강제력(온실가스와 황산염 에어러솔의 추정값)을 가지고 수행한 것이다. (c)에서 밴드로 둘러싸인 것들은 자연적이고 인위적인 강제력 모두를 포함한 것이다. (b)에서, 인위적인 강제력을 포함시키는 것은 지난 세기 동안 관측된 온도변화의 상당한 부분에 대한 그럴듯한 설명을 제공해 준다. 그러나 관측과 가장 부합되는 것은 자연적인 요소와 인위적인 요소 모두가 포함되었을 때인 (c)에서 얻을 수 있다. 이런 결과를 통해, 포함된 강제력은 관측된 변화를 설명하기에 충분하지만, 그러나 다른 강제력이 또한 기여할 수 있다는 가능성을 배제하지는 않는다는 것을 알 수 있다. 여기에서 보여주고 있는 모델 결과의 밴드들은 같은 모델로부터 4회 수행한 결과에 대한 것이다. (b)에서의 밴드들과 비슷한 결과는 인위적인 강제력을 가지고 다른 모델들에서 얻어진 것들이다. 그림 12.7에 근거함.

지난 세기 동안 자연적 요인은 복사강제력에 작은 기여를 했다.

- 1750년 이후 기간 동안 태양복사조도(solar irradiance)의 변화로 인한 복사강제력은 약 $+0.3 \text{ Wm}^{-2}$ 로 추정되고 있고, 이것의 대부분은 20세기 전반기 동안에 발생하였다. 1970년대 말부터 인공위성에 탑재된 관측 장비에 의해 11년 태양주기로 인한 작은 진동이 관측되었다. 태양이 기후에 미치는 영향이 커지는 것에 대한 메커니즘이 발표되었으나 현재 이론적으로나 관측상으로 확고한 근거가 부족한 상태이다.
- 강력한 화산 폭발로 인한 성층권 에어러솔은 음의 복사강제력을 일으키고 이것은 수 년간 지속된다. 1880~1920년 그리고 1960~1991년 기간 동안 몇 번의 대규모 화산 폭발이 있었다.
- 2개의 주요 자연적 요인(태양 변화와 화산 폭발로 인한 에어러솔)의 복사강제력에 대한 복합적인 변화는 지난 20년 동안, 그리고 어쩌면 지난 40년 동안 음의 강제력을 나타낸 것으로 추정되고 있다.

미래 기후예측을 위한 모델의 능력에 대한 신뢰도가 증가하였다.

물리학적 기반의 복잡한 기후모델은 되먹임(feedback)과 지역적 특징에 대한 상세한 추정값을 제공하도록 요구되고 있다. 그러한 모델은 아직 기후의 모든 양상을 모의할 수 없고(예, 기후모델은 여전히 1979년 이후의 관측된 지표-대류권 온도 차이의 경향에 대해 완벽히 설명할 수 없다), 특히 구름 그리고 구름-복사와 구름-에어러솔 간의 상호작용과 관련된 불확실성이 남아 있다. 그럼에도 불구하고 시공간 규모의 범위에서 유용한 미래 기후전망을 제공하는 기후모델의 능력에 대한 신뢰도는 모델 검증 수행을 통해 향상되어 왔다.

- 기후과정의 이해와 그것을 기후모델에 결합시키는 방법(수증기, 해양-얼음 역학, 해양 열 수송 포함)이 향상되었다.
- 몇몇의 최근 모델은 이전 모델에서 사용되었던 해양-대기 경계면에서 열과 수증기 플럭스(flux)의 비물리적인 보정 없이 최근 기후에 대하여 만족스런 모의 결과를 생산하고 있다.
- 자연적 및 인위적 강제력의 추정을 포함하는 모의 실험은 20세기 동안 관측된 지구 표면 온도의 대규모의 변화를 재생산한다(그림 4). 그러나, 모델은 몇몇 부가과정과 강제력로부터의 기여를 포함하지 않을 수도 있다. 그럼에도 불구하고 모델값과 관측값 사이의 대규모의 일관성을 이용하여 주어진 배출 시나리오 하에서

향후 수 십년간 예측된 온난화율에 대해 독립적으로 점검을 할 수 있다.

- 선택된 기간의 과거 기후뿐만 아니라 ENSO, 몬순 그리고 북대서양 진동에 대한 모의 실험 결과 중 몇몇 양상들은 개선되었다.

지난 50년 동안 관측된 대부분의 온난화는 인간 활동에 기인한 것이라는 새롭고 유력한 증거가 있다.

SAR은 “증거의 균형(양쪽의 증거가 모두 적절하다고 보이는 경우를 말한다: balance of evidence)을 통해 지구 기후에 미치는 인간의 영향을 식별할 수 있다는 것이 제시되고 있다”고 결론을 내렸다. 또한 SAR은 인위적 신호가 여전히 자연적 기후변동의 배경값으로부터 드러나고 있다고 언급하였다. SAR 이후, 불확실성, 특히 다른 외부 영향에 대한 반응의 크기를 구별하고 정량화하는 것에 대한 불확실성을 줄이는데 진전이 있었다. 비록 SAR에서 확인된 많은 불확실성의 원인은 여전히 어느 정도 남아 있지만, 새로운 증거와 향상된 이해는 새로운 결론을 뒷받침해 주고 있다.

- 더 오래되고 더 세밀히 조사된 온도 기록과 새로운 모델에 의한 변동에 대한 추정값이 있다. 현재 모델에서 추정된 것에 의하면 지난 100년 동안의 온난화는 내부적인 변동만에 의해 기인된 것 같지는 않다(VU)⁷⁾. 지난 1000년 간의 기후 자료(그림 1b)를 새롭게 재구축한 바에 의하면 이 온난화는 특이하고 전적으로 자연적인 요인에 의한 것 같지 않다(U)⁷⁾.
- 자연적인 강제력과 인위적인 강제력에 대한 기후반응에 대하여 새롭게 추정하였고 새로운 탐지 기술이 적용되었다. 탐지와 원인 규명 연구를 통해 최근 35~50년 간의 기후 자료에서 인위적인 신호에 대한 증거를 꾸준히 찾고 있다.
- 자연적인 강제력(예, 태양복사 세기의 변동과 화산 폭발에 대한 반응) 만에 대한 반응의 모의는 20세기 후반기 동안에 일어난 온난화를 설명할 수 없다(그림 4a 참조). 그러나 그것들은 자연적인 강제력이 20세기 전반기 동안 관측된 온난화에 기여했을 수도 있음을 보여주고 있다.
- 인위적인 황산염 에어러솔과 자연적인 요인(화산과 태양복사 세기)으로 인한 강제력의 불확실성에도 불구하고 인위적인 온실가스에 의한 지난 50년 동안의 온난화는 규명되어질 수 있다. 불확실하지만 인위적인 황산염 에어러솔의 강제력은 이 기간에 걸쳐 음으로 나타나므로 온난화를 설명할 수 없다. 이 기간의 대부분 동

Summary for Policymakers

안 자연적 강제력의 변화 또한 음으로 추정되고 있고 온난화를 설명할 수 없을 것 같다.

- 모델에 의해 모의된 변화와 관측 기록을 비교하는 탐지·원인 규명 연구는 현재 외부강제력에 대한 모델의 반응 크기(특히, 기후민감도의 불확실성에서 기인된 반응 크기)에 있어서의 불확실성을 고려할 수 있다.
- 이런 연구들의 대부분이 지난 50년 동안 오직 온실가스 농도의 증가로 인한 온난화의 추정된 비율과 크기는 관측된 온난화와 비슷하거나 더 크다는 것을 알아냈다. 또한 온실가스와 황산염 에어러솔 둘 다 고려해서 추정된 대부분의 모델 값은 이 기간 동안의 관측값과 일치된다.
- 위의 모든 인위적 강제 요인과 자연적인 강제 요인이 합성되었을 때 지난 140년 동안 모델 모의값과 관측값이 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다(그림 4 참조). 이런 결과는 포함된 강제력들이 관측된 변화를 설명하기에 충분하다고 보여주고 있지만 다른 강제력 또한 기여할 수 있는 가능성을 배제하지 못한다.

새로운 증거로 추정하고 여전히 남아 있는 불확실성을 고려할 때 지난 50년 동안 관측된 온난화의 대부분은 온실가스 농도의 증가로 인한 것 같다(L)⁷⁾.

또한 바다 물의 열적 팽창과 육지 얼음의 광범위한 감소를 통해 20세기의 온난화는 관측된 해수면 상승에 상당히 기여를 한 것 같다(VL)⁷⁾. 현재의 불확실성 안에서 관측과 모델 둘 다 20세기 동안 해수면 상승의 현저한 가속이 결여되어 있다는 것과 일치한다.

21세기 동안 인간의 영향에 의해 대기 조성은 계속해서 변화할 것이다.

모델은 배출 시나리오에 대한 IPCC 특별보고서(IPCC Special Report on Emission Scenarios, SRES)의 배출 시나리오에 기초를 두고 대기 중 온실가스와 에어러솔의 농도를 예측하고 궁극적으로 미래의 기후를 예측하는데 활용되어 왔다(그림 5). 이 시나리오는 IS92 시리즈를 새로이 수정하기 위하여 개발되었으며 이것은 SAR에서 사용된 것으로 여기서 몇 가지 사례 비교를 보인 것이다.

온실가스(Greenhouse Gases)

- 화석연료 연소로 인한 CO₂ 배출은 21세기 동안 대기 중 CO₂ 농도 경향에 큰 영향을 줄 것이 거의 확실하다.
- 대기 중 CO₂ 농도가 증가하면, 해양과 육지는

인위적 CO₂ 배출을 감소시키는 부분을 담당할 것이다. 모델에서 나타난 바와 같이 육지와 해양의 기후 되먹임의 순 효과는 해양과 육지에서 CO₂ 흡수가 감소됨으로써 대기 중 CO₂의 예상 농도를 더 증가시킨다는 것이다.

- 2100년까지 탄소순환 모델은 실례가 된 SRES 시나리오에서 대기 중 CO₂ 농도를 540~970 ppm(1750년 280 ppm의 90~250% 상회하는 값)으로 예측한다(그림 5b). 이런 예측들은 육지와 해양의 기후되먹임을 포함한다. 불확실성, 특히 육상의 생물권으로부터 기후 되먹임의 크기에 대한 불확실성은 각 시나리오에서 약 -10~+30%의 변화를 유발한다. 총 범위는 490~1260 ppm(1750년 농도의 75~350% 증가한 값)이다.
- 토지 이용도의 변화는 대기 중 CO₂ 농도에 영향을 줄 수 있다. 가상적으로, 역사적으로 토지 이용도의 변화에 의해 배출된 탄소가 세기에 걸쳐 육상 생물권으로 환원된다면(예, 재조림), CO₂ 농도는 40~70 ppm 줄어들 것이다.
- 2100년까지 CO₂ 이외 온실가스 농도의 모델 계산값은 SRES 시나리오에 의하면 2000년에 비해, CH₄는 -190~+1970 ppb (현재 농도는 1760 ppb), N₂O는 +38~+144 ppb (현재 농도는 316 ppb), 대류권 O₃는 -12~+62% 범위로, 그리고 HFCs, PFCs와 SF₆ 농도는 광범위하게 변하는 것으로 나타난다. 어떤 시나리오에서는 대류권 O₃는 CH₄ 만큼 중요한 복사강제력 인자가 될 수 있고, 북반구 대부분 지역에서 현재의 대기 질 목표를 달성하는데 장애가 될 수 있을 것이다.
- 온실가스 배출을 감소시키는 것과 온실가스 농도를 조절하는 기체들이 복사강제력을 안정시키기 위하여 필요하다. 예를 들면, 가장 중요한 인위적 온실가스에 대하여 탄소 순환 모델은 450, 650 또는 1000 ppm에서 대기 중 CO₂ 농도를 안정화시키기 위해서는 각각 수 십년, 약 100년, 또는 약 200년 내에 전지구적인 인위적 CO₂ 배출량을 1990년 수준 이하로 떨어뜨리는 것이 필요하고 그 이후로도 지속적으로 감소시켜야 한다. 결론적으로 CO₂ 배출량을 현재 배출량의 매우 적은 비율까지 감소시켜야 한다.

에어러솔(Aerosols)

- SRES 시나리오는 화석연료 사용과 오염 배출을 감소시키기 위한 정책의 범위에 따라 인위적인 에어러솔(예, 황산염 에어러솔(그림 5c), 생물체 연소에 의한 에어러솔, 검댕과 유기 탄소 에어러솔)을 증가시킬 것인지 또는 감소시킬 것인가에 대한 가능성을 포함한다. 또한 자

21세기 지구의 기후

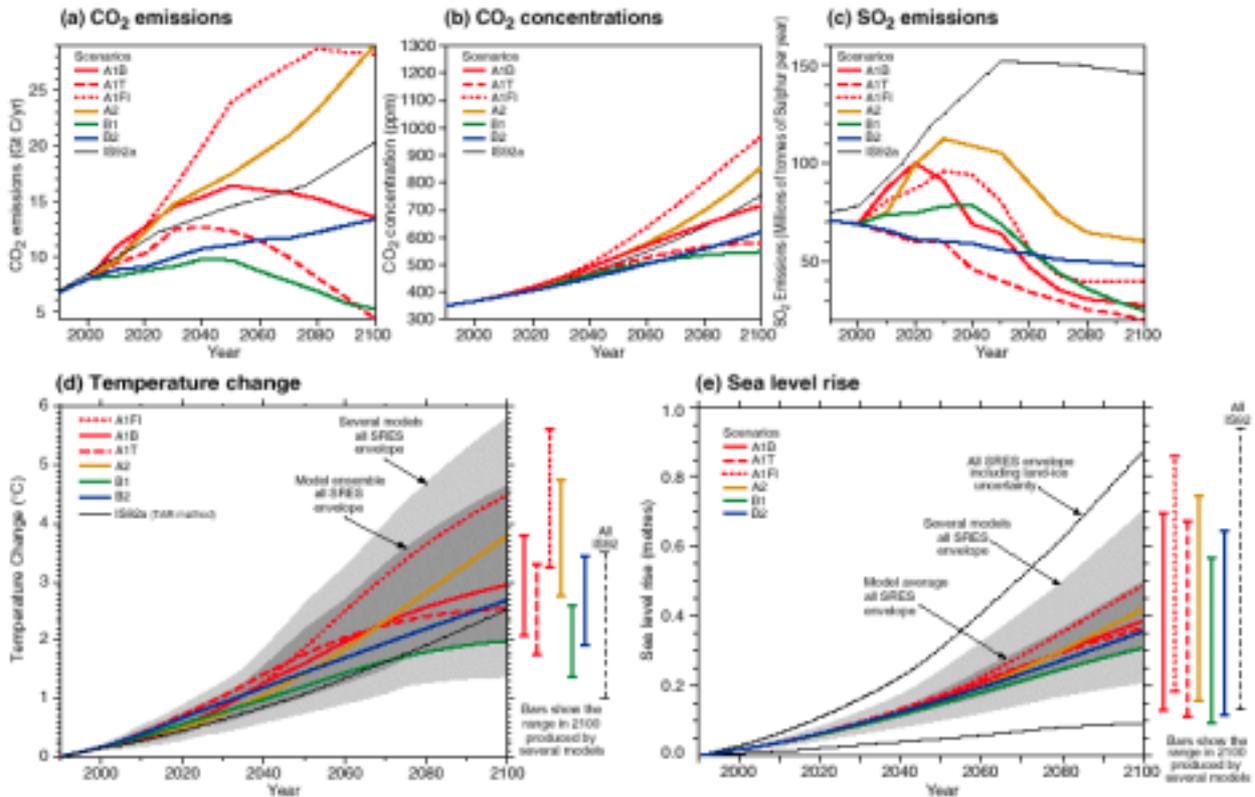


그림 5: 21세기 지구기후는 자연적 요인과 인간 활동에 대한 기후시스템의 반응정도에 따라 다를 것이다. 기후모델은 지구의 기온과 해수면의 상승 등과 같은 많은 기후변수들이 온실가스 및 기타 인간활동에 의한 다양한 배출 시나리오에 어떻게 반응하는가를 예측한다. (a)는 아래에 요약되어 있는 6개의 SRES 시나리오에 의한 CO₂ 배출을, (b)는 CO₂ 농도를, (c)는 인위적인 아황산가스(SO₂)의 배출에 대한 각각의 예측을 보여 주고 있다. 기타 기체 및 에어러솔의 배출은 모델 내에 포함되어 있지만 그림에 보여주지는 않았다. (d)와 (e)는 각각 기온과 해수면에 대한 예측들이다. (d)와 (e)에 있는 “several models All SRES envelopes”는 기후민감도의 범위에서 수많은 복잡한 모델에 맞췄을 때 단순한 모델에 대해 각각 온도와 해수면 상승을 보이고 있다. “all SRES envelopes”는 각 35개 배출시나리오 범위 모두가 포함된 것이며, “model average all SRES envelope”는 시나리오의 범주에 대해 이러한 모델로부터 얻은 평균을 보여주고 있다. 이러한 배출로 인한 온난화와 해수면상승은 2100년 이후에까지 지속될 수 있다는 것을 주목해야 한다. 또한 이런 범위에는 남극 서부의 얼음평상에서 얼음의 역학적 변화와 관련해서 불확실성이 참작되지 않는다는 것 뿐만 아니라 비(非)황산염 에어러솔과 온실가스 농도 예측에 있어서 불확실성을 고려하지 않는다는 것에 대해서도 유의해야 한다.

연적인 에어러솔(예, 바다 염분, 먼지, 그리고 황산염과 탄소 에어러솔을 만들어 내는 배출)은 기후변화의 결과로써 증가되는 것으로 예측된다.

솔 복사강제력의 합계의 변화는 CO₂량의 변화보다 그 크기가 더 작아질 것으로 예측된다.

21세기의 복사강제력(Radiative forcing over the 21st century)

- SRES의 실례(實例)가 되는 시나리오에서 2000년도에 비하여 21세기 동안 온실가스에 의한 전지구 평균 복사강제력은, 1보다 약간 큰 값에서부터 약 4 정도까지 증가할 것으로 예측된 CO₂ 양으로 인한 비율만큼 동반하여 지속적으로 증가한다. 직접적인 것과 간접적인 에어러

전지구 평균온도와 해수면은 모든 IPCC SRES 시나리오에서 상승되는 것으로 예측된다.

미래 기후를 예측하기 위하여 온실가스와 에어러솔의 미래와 과거의 배출량을 함께 모델에 입력한다. 그러므로 모델은 현재까지의 온난화를 추정하고 과거의 배출로부터 미래의 온난화를 예측하는 것을 포함하고 있다.

온도(Temperature)

Summary for Policymakers

- 1990~2100년 기간 동안 전지구 평균 지구 표면 온도는 1.4~5.8℃(그림 5d) 증가할 것으로 예측된다. 이 결과는 35개 SRES 시나리오에서 나온 전체 범위에 대해 많은 기후모델에 기초한 것이다¹⁰⁾¹¹⁾.
- 3.5℃이었다. 온도가 더 높고 넓은 범위로 예측된 것은 일차적으로 IS92 시나리오에 비하여 SRES 시나리오에서는 이산화황(sulphur dioxide)의 배출이 더 낮게 예측되었기 때문이다.
- 예측된 온난화율은 20세기 동안 관측된 변화보

표 1: 이상 기상·기후의 관측·예측된 변화의 확신성에 대한 추정.

관측된 변화의 확신성 (20세기 후반기)	현상의 변화	예측된 변화의 확신성 (21세기)
그럴 것임(L) ⁷⁾	거의 대부분의 육지지역에서 최고기온과 더운 날이 증가함	매우 그럴 것임(VL) ⁷⁾
매우 그럴 것임(VL) ⁷⁾	거의 대부분의 육지지역에서 최저기온이 증가하고, 추운 날과 서리일이 거의 발생하지 않음	매우 그럴 것임(VL) ⁷⁾
매우 그럴 것임(VL) ⁷⁾	대부분의 육지지역에서 기온의 일교차가 줄어듦	매우 그럴 것임(VL) ⁷⁾
많은 지역에 걸쳐 그럴 것임(L) ⁷⁾	육지지역에서 열지수 ⁸⁾ 가 증가함	대부분 지역에 걸쳐 매우 그럴 것임(VL) ⁷⁾
북반구 중·고위도의 많은 지역에 걸쳐 그럴 것임(L) ⁷⁾	폭우 현상이 증가함 ^{b)}	많은 지역에 걸쳐 매우 그럴 것임(VL) ⁷⁾
몇몇 지역에서 그럴 것임(L) ⁷⁾	여름철 대륙의 건조현상과 가뭄이 증가함	대부분 중위도 대륙의 내륙에 걸쳐 그럴 것임(L) ⁷⁾ (다른 지역에서는 일관된 예측이 결여됨)
활용된 몇 개의 분석에서 관측되지 않음	열대 태풍의 최대풍속의 강도가 증가함	몇몇 지역에 걸쳐 그럴 것임(L) ⁷⁾
평가할 자료가 부족함	열대 태풍의 평균 및 최대 강수 강도가 증가함 ^{c)}	몇몇 지역에 걸쳐 그럴 것임(L) ⁷⁾

a 좀더 자세한 정보는 본문의 제2장과 제9장 및 10장 참조¹⁾
 b 다른 지역에서는, 자료가 불충분하거나 상충되는 분석이 있음
 c 열대 저기압의 위치와 주기에 있어서 과거와 미래의 변화는 불확실함
 ※ 주 1) 열파지수 : 인간의 편안함에 관한 효과를 측정하기 위하여 온도와 습도를 조합하여 나타내는 지수

- 온도 증가는 SAR에서의 증가값보다 보다 큰 것으로 예측되었는데, SAR에서의 온도 증가는 6개의 IS92 시나리오를 바탕으로 해서 약 1.0~1.5℃ 정도 더 크고, 고기후 자료에 근거해 보았을 때 적어도 지난 10,000년 동안 전례가 없었던 것 같다(VL)⁷⁾.
 - 2100년까지 주어진 시나리오를 수행한 여러 개의 기후모델에서 얻어진 지구 표면 온도 반응은 또 다른 SRES 시나리오를 수행한 단일 모델에서 얻어진 범위와 비슷하다.
 - 수 십년의 시간규모 상에서 보면, 기후민감도의 불확실성이 존재함에도 불구하고 현재 관측된 온난화율은 주어진 배출 시나리오에 의해 예측된 결과를 속박시키는데 사용될 수 있다. 이러한 접근 방식에 의하면 인위적인 온난화는 IS92a 시나리오 하에서 향후 수 십년 동안 십년에 0.1~0.2℃의 범위에 있을 것 같다(L)⁷⁾고 제시되고 있는데, 이것은 그림 5d에서 사용된
- 10) 물리학적으로 복잡한 기후모델은 미래 기후변화를 예측하는 주요 도구이다. 시나리오들의 전체 범위를 조사하기 위해서는, 온도와 해수면에서 적절한 반응을 산출하기 위하여 복잡한 기후모델에 대하여 보정된 단순한 모델에 의해 이들 모델들이 보완된다. 이런 예측들은 7개의 복잡한 기후모델에 대하여 보정된 기후민감도와 해양 열 흡수를 가진 단순한 기후모델을 사용함으로써 얻어진다. 단순한 모델에 사용된 기후민감도의 범위는 일반적으로 받아들여졌던 1.5~4.5℃와 비슷한 1.7~4.2℃로 나타났다.
- 11) 이 범위는 복사 강제력의 모델링에서의 불확실성(예, 에어러솔 강제력의 불확실성)을 포함하지 않는다. 작은 탄소 순환 기후 되먹임은 포함되었다.

단순한 모델에 의한 예측에 있어서의 해당 범위와 비슷하다.

- 최근 전지구 모델 모의에 근거해 볼 때 거의 모든 육지지역은 전지구적 평균보다 더 빨리 따뜻해질 것 같으며, 특히 추운 계절의 북반구 고위도 지역에서 매우 그러할 것 같다(VL)⁷⁾. 이러한 결과 중 가장 두드러진 것은 북아메리카의 북부 지역과 북부 및 중앙 아시아에서의 온난화인데, 이것은 각 모델에서 전지구 평균 온난화보다 40% 초과하고 있다. 반대로, 여름철 남부 및 남동부 아시아와 겨울철 남아메리카의 남부 지역에서의 온난화는 전지구 평균 변화 보다 작다.
- 최근 열대 태평양 지역에서 좀 더 엘니뇨 쪽으로 치우치는 지구 표면 기온 경향(서부 열대 태평양 보다 동부 열대 태평양이 따뜻해지고, 그에 따라 강수가 동쪽으로 변이됨)이 지속된다 는 것이 많은 모델에서 예측되고 있다.

강수량(Precipitation)

- 전구 모델 모의 결과에 근거하고 광범위한 시나리오에 대하여 전지구 평균 수증기량과 강수량은 21세기 동안 증가할 것으로 예측된다. 21세기의 하반기까지 강수량은 겨울철에 북반구 중·고위도 지역과 남극 지역에서 증가될 것이다. 저위도 지역에서는 육지지역에서 지역적인 증가와 감소 둘 다 있을 것이다. 평균 강수량이 증가할 것으로 예측된 대부분 지역에서 연간 강수량 변화가 더 크게 일어날 것 같다(VL)⁷⁾.

이상기상 현상(Extreme Events)

표 1은 20세기 후반기 동안 관측된 이상 기상과 기후 그리고 21세기 동안 예측된 변화에 있어서 확신성을 평가한 것이다. 이 평가는 공통적으로 사용된 시나리오에 의한 미래 예측의 물리적인 그럴 듯할 뿐만 아니라 관측과 모델링 연구에 기초를 두고 있고, 전문가 판단⁷⁾에 근거하고 있다.

- 몇몇 다른 이상기상 현상의 대부분은 환경과 사회에 중요한 영향을 주었고 최근 경향을 평가하는 데는 현재 자료가 불충한 상태이고, 현재 기후모델들은 확실한 예측을 하기 위한 공간적 상세함이 부족하다. 예를 들면, 뇌우, 토네이도, 우박, 번개와 같은 아주 작은 규모의 현상은 기후모델에서 모의되지 않는다.

엘니뇨(El Niño)

- 열대 태평양에서 엘니뇨 현상의 향후 주기성, 크기와 공간적 형태의 변화를 예측하는데 있어서의 확신성은 엘니뇨가 복잡한 모델에서 잘

모의되도록 몇몇 결점을 감소시키는 것이다. 현재 예측은 향후 100년간 엘니뇨 현상의 크기는 거의 변화가 없거나 조금 증가하는 것으로 나타나고 있다.

- 엘니뇨의 크기가 조금 변하거나 또는 아무런 변화가 없어도 지구 온난화는 가뭄과 호우와 같은 이상기상현상을 더 많이 유발하고, 많은 다른 지역에서 엘니뇨 현상과 함께 발생하는 가뭄과 홍수의 위험성을 증가시킬 것 같다(L)⁷⁾.

몬순(Monsoons)

- 온실가스 농도의 증가와 관련한 온난화는 아시아의 여름 몬순 강수량 변동의 증가를 유발할 것이다(L)⁷⁾. 몬순의 평균 지속 기간과 강도의 변화는 배출 시나리오의 세부 항목에 의존한다. 또한 그러한 예측에 있어서의 확신성은 기후모델이 얼마나 잘 몬순의 계절 변화를 상세하게 모의하느냐에 따라 좌우된다.

열염분순환(Thermohaline circulation)

- 대부분의 모델은 북반구의 고위도 지역으로의 열 수송을 감소시키는 해양 열염분순환의 약화를 나타내고 있다. 그러나, 열염분순환을 약하게 나타내는 모델에서조차도, 증가된 온실가스로 인해 유럽 지역에서는 여전히 온난화를 나타낸다. 기후모델을 활용한 최근의 예측들은 2100년까지 열염분순환의 완벽한 종결을 나타내지 않는다. 만약 복사강제력의 변화가 충분히 크고 충분히 오래 적용이 되었다면 2100년 이후, 열염분순환은 양반구에서 완전하게, 그리고 아무리해도 되돌릴 수 없게 종결될 수 있을 것이다.

눈과 얼음(Snow and Ice)

- 북반구의 눈덮임과 바다 얼음 넓이는 더 감소 될 것으로 예측된다.
- 21세기 동안, 빙하와 얼음모자는 지속적으로 광범위하게 줄어들 것으로 예측된다.
- 남극의 얼음평상은 더 많아지는 강수량 때문에 커질 것 같고(L)⁷⁾, 반면에 그린란드 얼음평상은 강수량의 증가보다 유출량의 증가가 커지기 때문에 작아질 것 같다(L)⁷⁾.
- 남극 서부지역의 얼음평상은 해수면 아래에 위치하기 때문에 이것의 안정성에 대한 우려가 나타나고 있다. 그러나 21세기 동안 특히 더 긴 시간규모의 예측에 있어서 이 요인으로부터 상당한 해수면 상승을 유발하는 지표 얼음의 감소는 비록 그것의 역학이 여전히 부적절하게 이해되어지고 있더라도 그럴 가능성이 상당히 낮을 것(VU)⁷⁾으로 광범위하게 지지를 받고

“배출 시나리오에 대한 IPCC 특별보고서(IPCC Special Report on Emission Scenarios, SRES)의 배출 시나리오

A1. A1 구상 방안(storyline)과 시나리오 군(群, family)은 미래의 세계가 매우 급격한 경제성장, 전 지구 인구는 이번 세기 중반에 최정점에 이르렀다가 그 후 감소하는 추세, 새롭고 좀 더 효율적인 기술의 급격한 도입 등으로 표현된다. 주요한 근본적 주제들은 1인당 소득의 지역별 격차를 근본적으로 줄이면서 지역 간의 수렴, 능력 함양, 문화적·사회적 상호작용의 증대를 들 수 있다. A1 시나리오군은 에너지 체계에 있어서 기술 변화의 대체 방향을 기술하는 방식에 따라 3개의 그룹으로 전개된다. 3개의 A1 그룹은 그들의 공학적 특성에 의해 구분된다: 즉, 화석연료 의존형(A1FI, fossil intensive), 비화석연료 에너지원(A1T), 모든 에너지원간의 균형(A1B) (여기서 균형이란 말은, 유사한 개선 비율이 모든 에너지 공급 및 최종 사용 기술에 적용된다는 가정 위에 하나의 특정 에너지에 너무 편중되게 의존하지 않는다는 것을 말한다).

A2. A2 구상 방안과 시나리오 군은 매우 균질하지 않은 세계로 표현된다. 근본적인 주제는 자기의 존성과 지역적 정체성의 보존이다. 지역 전체의 출생률 양상은 매우 느리게 수렴하고 있으며, 이는 지속적인 인구 증가를 낳게 된다. 경제 성장은 주로 지역적으로 편중되어 있으며 개인당 경제 성장 및 기술 변화는 더욱 깨어지는 양상을 보이며 구상 방안에 비해 느리다.

B1. B1 구상 방안과 시나리오 군은 동일한 세계 인구를 가진 수렴된 세계로 표현되며, A1 구상방안과 마찬가지로 금세기 중반에 최정점을 보이다가 그 이후에 감소하지만 서비스 및 정보 경제로 급격하게 경제 구조가 변화하고 육체적 강도가 감소하고 청정 및 자원 효율적인 기술의 도입이 이루어진다. 부가적인 기후 이니셔티브(initiatives)가 없이 개선된 형평성을 포함하여 경제적·사회적·환경적 지속 가능성에 대한 전지구적 해결에 강조점을 두고 있다.

B2. B2 구상 방안과 시나리오 군은 경제적·사회적·환경적 지속 가능성에 대한 지역적 해결에 강조점을 두고 있는 세계를 표현하고 있다. 이는 A2보다 낮은 비율로 지속적으로 증가하는 인구를 가지고 중간적 수준의 경제 성장, B1 및 A2 방안에서보다 덜 급격하고 훨씬 다양한 기술 변화를 가진 세계이다. 이 시나리오 역시 환경 보전과 사회적 형평성에 편중되어 있기는 하나, 국지적 및 지역적 수준에 초점이 모아져 있다.

실례를 들고 있는 시나리오는 6개의 시나리오 그룹(A1B, A1FI, A1T, A2, B1, B2)의 각각에 대해 뽑은 것이다. 모두가 균등하게 정상적이도록 고려하였다.

SRES 시나리오들은 부가적인 기후 이니셔티브를 포함하지 않고 있는데, 이는 UN 기후변화기본협약이나 교토의정서의 배출 목표를 이행하는 것을 분명하게 가정한 시나리오가 포함되어 있지 않다는 것을 의미한다.

있다.

해수면(Sea Level)

- 전지구 평균 해수면은 SRES 시나리오의 전체 범위에서 1990~2100년 기간 동안 0.09~0.88m 상승할 것으로 예측되고 있다. 이것은 일차적으로 열적 팽창 및 빙하와 얼음모자 크기의 감소로 인한 것이다(그림 5e). SAR에서 언급한 해수면

상승 범위는 IS92 시나리오에 근거해서 0.13~0.94 m 이었다. 이번 평가에서 온도 변화가 더 높게 예측되었음에도 불구하고, 빙하와 얼음평상이 더 작게 기여하도록 개선된 모델을 사용하였기 때문에 해수면 예측은 이전 평가보다 약간 낮게 나타났다.

인위적인 기후변화는 여러 세기 동안 지속될 것이다.

- 대기 중 체류 기간이 온실가스(예, CO₂, N₂O, PFCs, SF₆)의 배출은 대기 조성, 복사강제력과 기후에 지속적으로 영향을 미친다. 예를 들면, CO₂ 배출이 일어난 후 몇 세기까지 이런 배출로 인해 증가한 CO₂ 농도의 약 4은 여전히 대기 중에 존재한다.
 - 온실가스 농도가 안정화된 후에 전지구 평균 표면 온도는 21세기 동안 안정화 없이 예측된 세기당 몇 °C보다는 겨우 세기당 0.2~0.3°C 정도의 비율로 상승할 것이다. 농도가 더 낮은 수준에서 안정화될수록 전체 온도 변화는 작아질 것이다.
 - 해양의 열 확장으로 인한 전지구 평균 표면 온도 상승과 해수면 상승은 온실가스 농도의 안정화(심지어 현재 수준에서의 안정화) 이후에도 몇 백년 동안 지속될 것으로 예측되고 있는데, 이것은 깊은 해양이 기후변화를 조절하는 시간 규모가 길기 때문이다.
 - 얼음평상은 기후 온난화에 계속 반응할 것이고, 기후가 안정화된 이후 수 천년 동안 해수면 상승에 기여할 것이다. 기후모델은 그린란드 지역의 국지적 온난화가 전지구 평균의 1~3배 정도 될 것(L)⁷⁾으로 제시하고 있다. 얼음평상 모델은 3°C 이상의 국지적 온난화가 만약 수 천년간 지속된다면 그린란드 얼음평상이 완전히 녹고, 이것은 해수면을 약 7 m 정도 상승시킬 것으로 예측한다. 5.5°C의 국지적 온난화가 만약 1000년간 지속된다면 그린란드 얼음평상 녹음으로 인하여 해수면 상승이 약 3 m 정도 상승할 것 같다(L)⁷⁾.
 - 현재 얼음 역학 모델은 남극 서부지역의 얼음 평상은 향후 1,000년간 3m의 해수면 상승을 일으킬 것으로 제시하고 있으나 그런 결과들은 기후변화 시나리오, 얼음 역학 및 다른 요인들을 고려하는 모델의 가정에 강하게 의존한다.
- 증대시키는 것
- 종합적인 전지구 관측을 위한 전략의 이행을 포함하는 정확하고 장기적이고 일관성 있는 자료를 제공함으로써 기후연구를 위한 관측 기반을 유지하고 확대하는 것
 - 과거 기후 기간의 재구축 개발을 강화하는 것
 - 온실가스와 에어로솔의 공간적 분포의 관측을 향상시키는 것
- 모델링과 과정 연구
 - 복사강제력의 변화를 유발하는 메커니즘과 요인에 대한 이해를 향상시키는 것
 - 기후시스템에서 물리적 측면과 생지화학적(biogeochemical) 측면 모두에서 중요하지만 아직 해결되지 않은 과정과 되먹임을 이해하고 특징을 파악하는 것
 - 복잡한 모델을 사용한 장기간 앙상블 모의실험을 포함하는 기후예측과 시나리오의 불확실성을 정량화하기 위하여 방법을 개선시키는 것
 - 기후변동, 지역 기후변화와 특이 현상들의 모의에 초점을 둔 전지구 및 지역 기후모델의 통합 체계를 개선시키는 것
 - 물리적 기후와 생지화학적 시스템을 갖춘 모델들을 보다 효율적으로 연계하고 차례로 인간 활동 서술 부분과 접합시키는 기술을 개선시키는 것

이런 초점들에 선행하는 것은 과학 분야, 계산 분야 및 관측 분야의 자원들을 보다 더 활용하기 위하여 국제적인 협력과 조정을 강화하는 것과 관련된 중대한 요구들이다. 또한 이것은 과학자들 간에 자료를 자유롭게 교환할 수 있도록 촉진시켜야 할 것이다. 많은 지역에서, 특히 개발도상국에서 관측 및 연구 능력을 증가시켜 달라는 특별한 요청이 있다. 마지막으로, 이 평가서의 목표대로 정책 결정과 관련하여 연구 개발을 위한 지속적인 요청이 필요하다.

정보와 이해에 있어서 아직도 부족한 부분을 해결하기 위한 향후 행동이 필요하다.

기후변화의 탐지, 기인, 이해하는 능력을 향상시키기 위한, 불확실성을 감소시키기 위한, 그리고 미래 기후예측을 위한 연구가 더 필요하다. 특히, 추가적으로 체계적이고 지속적인 관측, 모델링과 과정 연구가 필요하다. 관측망의 감소는 심각하다. 다음은 행동에 있어서 우선 순위가 높은 분야를 나타낸 것이다.

- 체계적인 관측과 재구축
 - 세계의 많은 지역에서 관측망의 감소를 막고

Summary for Policymakers

Source Information: Summary for Policymakers

This appendix provides the cross-reference of the topics in the Summary for Policymakers (page and bullet point topic) to the sections of the chapters of the full report that contain expanded information about the topic.

An increasing body of observations gives a collective picture of a warming world and other changes in the climate system.

SPM Page	Cross-Reference:	SPM Topic	Chapter	Section
2		<i>The global average surface temperature has increased over the 20th century by about 0.6°C.</i>		
		• Chapter 2.2.2 • Chapter 2.2.2		
		• Chapter 2.3 • Chapter 2.2.2		
3		<i>Temperatures have risen during the past four decades in the lowest 8 kilometres of the atmosphere.</i>		
		• Chapter 2.2.3 and 2.2.4 • Chapter 2.2.3 and 2.2.4 • Chapter 2.2.3, 2.2.4 and Chapter 12.3.2		
4		<i>Snow cover and ice extent have decreased.</i> All three bullet points:		
		Chapter 2.2.5 and 2.2.6		
4		<i>Global average sea level has risen and ocean heat content has increased.</i>		
		• Chapter 11.3.2 • Chapter 2.2.2 and Chapter 11.2.1		
4		<i>Changes have also occurred in other important aspects of climate.</i>		
		• Chapter 2.5.2 • Chapter 2.7.2		
		• Chapter 2.2.2 and 2.5.5 • Chapter 2.7.2 • Chapter 2.6.2 and 2.6.3		
		• Chapter 2.7.3 • Chapter 2.7.3		
4-5		<i>Some important aspects of climate appear not to have changed.</i>		
		• Chapter 2.2.2 • Chapter 2.2.5 • Chapter 2.7.3		
		• Chapter 2.7.3		

Emissions of greenhouse gases and aerosols due to human activities continue to alter the atmosphere in ways that are expected to affect the climate system.

SPM Page	Cross-Reference:	SPM Topic	Chapter	Section
		Chapeau: “Changes in climate occur ...”		
		Chapter 1, Chapter 3.1, Chapter 4.1, Chapter 5.1, Chapter 6.1, 6.2, 6.9, 6.11 and 6.13		
6		<i>Concentrations of atmospheric greenhouse gases and their radiative forcing have continued to increase as a result of human activities.</i>		
		Carbon dioxide:		
		• Chapter 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3 and 3.5.1		
		• Chapter 3.5.1 • Chapter 3.2.2, 3.2.3, 3.5.1 and Table 3.1 • Chapter 3.5.1 and 3.5.2		
6		Methane: • Chapter 4.2.1		
6		Nitrous oxide: • Chapter 4.2.1		
		Halocarbons: • Chapter 4.2.2		
6		Radiative forcing of well-mixed gases: • Chapter 4.2.1 and Chapter 6.3		
6		Stratospheric ozone: • Chapter 4.2.2 and Chapter 6.4		
6		Tropospheric ozone: • Chapter 4.2.4 and Chapter 6.5		
6-7		<i>Anthropogenic aerosols are short-lived and mostly produce negative radiative forcing.</i>		
		• Chapter 5.2 and 5.5.4 • Chapter 5.1, 5.2 and Chapter 6.7 • Chapter 5.3.2, 5.4.3 and Chapter 6.8		
7-9		<i>Natural factors have made small contributions to radiative forcing over the past century.</i>		
		• Chapter 6.11 and 6.15.1 • Chapter 6.9 and 6.15.1 • Chapter 6.15.1		
		<i>Confidence in the ability of models to project future climate has increased.</i>		
SPM Page	Cross-Reference:	SPM Topic	Chapter	Section
9		Chapeau: “Complex physically-based ...”		
		Chapter 8.3.2, 8.5.1, 8.6.1, 8.10.3 and Chapter 12.3.2		
		• Chapter 7.2.1, 7.5.2 and 7.6.1		
		• Chapter 8.4.2 • Chapter 8.6.3 and Chapter 12.3.2 • Chapter 8.5.5, 8.7.1 and 8.7.5		

There is new and stronger evidence that most of the warming observed over the last 50 years is attributable to human activities.

SPM Page	Cross-Reference:	SPM Topic	Chapter	Section
9	Chapeau: “The SAR concluded: The balance of evidence suggests ...”			
			Chapter 12.1.2	and 12.6
			• Chapter 12.2.2,	12.4.3 and 12.6
			• Chapter 12.4.1,	12.4.2, 12.4.3 and 12.6
			• Chapter 12.2.3,	12.4.1, 12.4.2, 12.4.3 and 12.6
			• Chapter 12.4.3	and 12.6.
			• Chapter 12.6	• Chapter 12.4.3
			• Chapter 12.4.3	and 12.6
10	“In the light of new evidence and taking into account the ...”		Chapter 12.4	and 12.6
10	“Furthermore, it is very likely that the 20th century warming has ...”		Chapter 11.4	

Human influences will continue to change atmospheric composition throughout the 21st century.

SPM Page	Cross-Reference:	SPM Topic	Chapter	Section
10	Chapeau: “Models have been used to make projections ...”		Chapter 4.4.5	and Appendix II
10	<i>Greenhouse gases</i>		Chapter 3.7.3	and Appendix II
			• Chapter 3.7.1,	3.7.2, 3.7.3
			and Appendix II	• Chapter 3.7.3 and Appendix II
			• Chapter 3.2.2	and Appendix II
			• Chapter 4.4.5,	4.5, 4.6 and Appendix II
			Chapter 3.7.3	
10	<i>Aerosols</i>		• Chapter 5.5.2,	5.5.3 and Appendix II
10–11	<i>Radiative forcing over the 21st century</i>		• Chapter 6.15.2	and Appendix II

Global average temperature and sea level are projected to rise under all IPCC SRES scenarios.

SPM Page	Cross-Reference:	SPM Topic	Chapter	Section
11–13	<i>Temperature</i>		• Chapter 9.3.3	
			• Chapter 9.3.3	• Chapter 2.2.2, 2.3.2 and 2.4
			• Chapter 9.3.3	and Chapter 10.3.2
			• Chapter 8.6.1,	Chapter 12.4.3, Chapter 13.5.1
			and 13.5.2	• Chapter 10.3.2 and Box 10.1
			• Chapter 9.3.2	
13	<i>Precipitation</i>		• Chapter 9.3.1,	9.3.6,

	Chapter 10.3.2	and Box 10.1
	<i>Extreme events</i>	Table 1: Chapter 2.1, 2.2, 2.5, 2.7.2, 2.7.3, Chapter 9.3.6 and Chapter 10.3.2
	• Chapter 2.7.3	and Chapter 9.3.6
	<i>El Niño</i>	• Chapter 9.3.5
	• Chapter 9.3.5	
	<i>Monsoons</i>	• Chapter 9.3.5
	<i>Thermohaline circulation</i>	• Chapter 9.3.4
	<i>Snow and ice</i>	• Chapter 9.3.2
	• Chapter 11.5.1	• Chapter 11.5.1
	• Chapter 11.5.4	
13–14	<i>Sea level</i>	• Chapter 11.5.1
	<i>Anthropogenic climate change will persist for many centuries.</i>	
14–15	• Chapter 3.2.3,	• Chapter 4.4 and Chapter 6.15
	• Chapter 9.3.3	and 9.3.4
	• Chapter 11.5.4	• Chapter 11.5.4
	• Chapter 11.5.4	
	<i>Further work is required to address remaining gaps in information and understanding.</i>	
15	All bullet points: Chapter 14, Executive Summary	

