

국제적 기후변화 현황

권 원 태(국립기상연구소 기후연구팀장)

| 요약 |

최근 기후변화에 관한 관심은 증대되고 있으나 기후변화의 발생원인이나 미래 전망에 관한 인식은 미흡한 실정이다. 2007년 IPCC는 기후시스템의 온난화는 명백하며, 인위적인 온실가스 배출이 주요한 원인일 가능성이 매우 높으며, 21세기에는 20세기보다 기후변화가 더 빠르게 진행될 것이라고 경고했다. 산업혁명 이후 에너지 수요를 충족시키기 위한 화석연료의 연소 및 환경개발이 급속히 증가하고 있다. 이에 따라 기온의 상승과 더불어 세계 곳곳에서 홍수, 가뭄, 열파, 태풍 등으로 인한 피해가 증가하는 추세이다. 21세기에는 온실가스 배출량에 따라 평균 1.8~4.0℃가 상승할 전망이다. 이러한 온난화는 자연재해와 생태계에 심각한 피해를 초래할 수 있으며, 지속가능한 발전을 저해할 수 있다.

우리나라도 20세기에 기온이 1.5℃ 상승하고 호우, 열파, 태풍 등으로 인한 피해가 증가 추세이며, 육지 및 해양 생태계에도 변화가 나타나고 있다. 앞으로는 20세기보다 더 빠르게 기후가 변화할 것으로 전망되므로, 자연계와 사회경제에 미치는 영향을 평가하고 이에 대한 적응조치를 취해야 할 것이다. 미래 기후변화에 대응하기 위해서 기후변화 예측, 적응, 완화 등의 대책이 필요하며, 이를 효율적으로 추진하기 위한 체제를 구축하여야 한다.

I. 새로운 기후변화 패러다임

최근에는 세계적으로 홍수, 가뭄, 열파 등 기상재해가 빈발하여 소중한 생명과 막대한 재산피해가 발생하고, 이재민의 이주 및 보건 문제는 사회적인 불안정 요소가 되고 있다. 뿐만 아니라 G8 정상회의, 다보스포럼(2007), 스텐보고서(2006) 등에 의해 기후변화가 사회경제발전에 중요한 영향을 미치고 있다는 것이 계속 지적되고 있다. 유엔은 이미 1992년 리우에서 채택된 유엔기후변화협약(UNFCCC)의 목적을 “... 인간활동으로 인한 기후변화가 식량생산과 지속가능한 발전을 위협하지 않도록 온실가스 농도를 안정화시키는(제2조)” 것이라고 제시하고 있다¹⁾.

기후는 지구가 시작된 이래 계속 변하여 왔다. 지난 백만 년간 지구의 기후는 빙하기와 간빙기가 십만 년마다 반복적으로 나타났으나, 다행히 지금은 기후가 온난한 간빙기에 속한다. 과거의 기후변화는 자연적인 원인에 의해 발생했지만 현재 진행 중인 온난화는 자연적인 원인이 아닌, 인간 활동이 주요 원인이라는 점이 과거와 다르다. 기후변화는 모든 영역에 영향을 미치지만, 특히 자연재해와 생태계에 직접적인 영향을 미친다. 문제는 변화의 속도이다. 변화의 속도가 빠를수록 재해나 생태계의 변화에 따른 부정적인 영향이 커지고, 이러한 빠른 변화에 적응하지 못하는 생물종이나 사회는 멸종되거나 도태될 것이다. 그러므로 변화를 예측하고, 이에 대비하는 것은 사회적 안정을 위하여 필수적이다.

1) UN, “United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, 유엔기후변화협약)” (1992), p. 5, <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>

2007년 UN산하기구인 정부간기후변화협의체(IPCC²⁾)는 총 3000여 쪽에 달하는 제4차 평가보고서를 발간하였다. 이번 보고서에서 가장 중요한 결론은 지구온난화가 일어나고 있는 것은 명백하며, 그 원인은 온실가스 증가로 인한 온실효과일 가능성이 매우 높다는 것이다. 또한 21세기에는 온난화가 20세기에 비하여 더 빠르게 진행될 것으로 예상된다. 기후변화에 관한 평가와 대안을 위한 노력을 인정받아, IPCC는 미국 전 부통령인 앨 고어와 함께 2007년 노벨 평화상을 수여함으로써 기후변화가 안보문제라는 인식이 확산되었다.

또한, 2006년 10월 영국에서 발표된 ‘스턴보고서³⁾’는 기후변화에 지금 대비하지 않으면 미래에 막대한 피해가 발생할 수 있다는 것을 지적하였다. 이 보고서에서 지적한 위험은 홍수, 가뭄 등 극한기후 발생 증가, 빙하의 축소, 해수면 상승, 지역에 따라 식량생산 위협, 생물종의 멸종 증가 등이며, 적절한 조치를 취하지 않을 경우 피해액은 매년 GDP 대비 5%에 이를 것이라고 경고하였다.

이와 같이 막대한 경제적 손실을 일으킬 수 있는 기후변화의 원인은 산업혁명 이후 급속도로 증가한 화석에너지, 각종 온실가스, 인공 화학

2) Intergovernmental Panel on Climate Change, UN 산하기구로 세계기상기구와 유엔환경프로그램(UNEP)에 의해 1988년 설립되어, 1990, 1995, 2001년 세 차례 기후변화에 관한 평가보고서를 작성하여 UN 및 유엔기후변화협약(UNFCCC) 회의에서 보고함. 평가보고서는 과학, 영향 및 취약성 평가와 적응, 완화에 관한 실무그룹 보고서와 종합보고서로 구성되어 있으며, 기후변화(지구온난화)에 관한 세계적인 권위를 갖는 총괄적인 평가를 통해 기후변화에 관한 국제협약의 근거자료로 사용되고 있음.

3) Nicholas Stern, *Stern Review: The Economics of Climate Change* (영국: Cambridge University Press, 2006), http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm

물질의 무절제한 사용 및 산림파괴 등에 기인한다. 지구온난화를 비롯한 지구환경문제는 지구규모로 발생하지만 대응성격은 거주지역을 포함한 국지적, 민족적 및 국가적 규모로 나타난다. 기후변화 문제를 해결하고 지구 환경을 보호할 목적으로 세계적 차원의 유엔기후변화협약, 사막화방지협약, 생물다양성협약, 몬트리올의정서 등이 체결되었다. 그러나 온실가스가 감축된다고 하더라도 향후 수십 년간 기후변화로 인하여, 기온 상승, 홍수, 가뭄 등 재해 발생빈도 증가, 해수면 상승 등이 예상된다. 전세계 국가가 기후변화협약(UNFCCC)을 체결하고, 온실가스의 의무감축에 대하여 논의한다는 사실은 기후변화의 심각성을 대변한다고 사료된다. 새로운 기후변화 패러다임은 미래 기후변화에 대하여 적극적으로 대응하는 전략을 필요로 한다. 그러므로 이 글은 기후변화에 보다 효율적으로 대응하기 위하여 기후변화의 과학적 현황과 그 영향을 파악하는 것을 목적으로 한다.

II. 기후변화의 원인

1. 기후변화과학

많은 과학자들은 실험실에서 단순화된 환경 하에 실험을 하여 주어진 가설을 증명한다. 그러나 기후변화를 연구하는 과학자들은 기후변화가 일어나고 있는 지구를 대상으로 실험을 할 수 없다는 제약이 있다. 천문학자들이 별의 기원을 실험할 수 없는 것과 비슷하다. 그러므로 기후변화를 탐지하고, 원인을 규명하고, 메커니즘을 분석하기 위해

서 지구의 기후시스템에서 일어나는 현상들을 관측하는 것이 첫 번째 단계라고 할 수 있다. 축적된 관측자료는 기후변화과학의 기본적인 가설을 증명하고, 이론을 정립하여, 모델을 개발함으로써 미래를 예측할 수 있는 기반을 구축하기 위해서 이용되고 있다.

지구의 기후시스템은 대기, 육지, 수권(해양, 육지의 물), 빙권(눈, 얼음) 및 생태계로 구성된다. 이들 구성요소들 간의 다양한 상호작용과 에너지, 물 및 물질 순환을 통해 매우 복잡한 시스템을 이루고 있다. 기후시스템 내에서는 육지-대기, 토양-생태계, 대기-생태계, 얼음-해양 결합, 대기-얼음, 열교환, 바람응력, 강수-증발 등과 같은 기후과정들이 발생하고 있으며, 인위적인 영향도 지속적으로 작용하고 있다.

기후변화과학은 이러한 기후시스템에서 일어나는 변화를 이해하고, 예측하고, 기후변화의 영향을 평가하는 학문으로 다학제적인 특성을 가진다. IPCC는 제1 실무그룹에서 과학적 근거, 제2 실무그룹에서는 기후변화의 영향 및 취약성 평가를 통해 기후변화과학을 포괄적으로 다루고 있다.

2. 기후변화의 원인

기후는 일정기간(수개월~수백만 년) 동안 발생한 기온, 강수, 바람의 평균과 변동성으로 정의되며, 기후시스템 내부 역학과 외부인자(강제력)의 변화에 의해 영향을 받는다. 수십억 년 지구의 역사 속에서 기후는 지속적으로 변화하여 왔다. 지구의 기후를 변화시키는 주요원인인 외부 강제력은 태양 에너지의 변화, 화산폭발 및 인위적인 대기 구성성분의 변화를 포함한다. 최근에는 산업혁명 이후 급속하게 증가된 에너

지 수요를 충족시키기 위해서 석탄, 석유와 같은 화석연료가 연소되어 발생한 이산화탄소 등 온실가스와 대기오염물질인 에어러솔의 증가로 인한 대기 구성성분의 변화가 기후변화(지구온난화)의 주요한 원인이 되고 있다.

지구의 기후를 결정하는 가장 중요한 외부요인은 태양의 복사에너지이다. 태양에너지는 흑점과 같은 태양활동의 변화 또는 지구의 공전궤도의 변화에 의해 영향을 받는다. 대기의 상부에서 태양 에너지는 약 $1370\text{W}/\text{m}^2$ 인데 지구 전체에 대하여 평균을 취하면 약 $342\text{W}/\text{m}^2$ 가 된다. 들어온 태양에너지의 약 30%는 우주로 반사되고 나머지(약 $240\text{W}/\text{m}^2$)는 기후시스템에 의해 흡수되어 지구의 기후를 유지한다. 반사율은 지표의 특성, 구름 분포, 식생, 에어러솔 분포 등에 의해 달라질 수 있다. 흡수된 에너지는 장파(주로 적외선 파장)복사의 형태로 우주 공간으로 방출되는데, 방출되는 에너지의 총량은 흡수된 에너지의 총량과 평형을 이룬다.

지표에서 방출되는 적외선 복사는 약 -19°C 의 물체에서 방출하는 에너지와 같다. 그러나 지표의 평균기온은 약 14°C 로 33°C 정도 높은 온도를 유지하고 있다. 지표가 이렇게 따뜻한 이유는 대기의 온실효과 때문이다. 온실효과는 지표에서 방출하는 적외선 복사를 대기 중에서 흡수하여 재방출함으로써 지표 부근에 열이 축적되어 온도가 올라가게 하는 역할을 한다. 가장 중요한 온실가스는 수증기와 이산화탄소이며, 구름도 중요한 온실효과를 발휘한다. 인간은 산업혁명 이후 화석연료의 연소, 삼림 벌목 등을 통하여 대기 중의 이산화탄소 농도가 35% 증가하는데 기여했으며(그림 1 참조), 이는 온실효과의 증가를 초래했다. 온실효과는 1824년 푸리에(Joseph Fourier)에 의해 최초로 발견되었

으며, 1896년 아레니우스(Svante Arrhenius)는 이를 정량적으로 조사하였다⁴⁾.

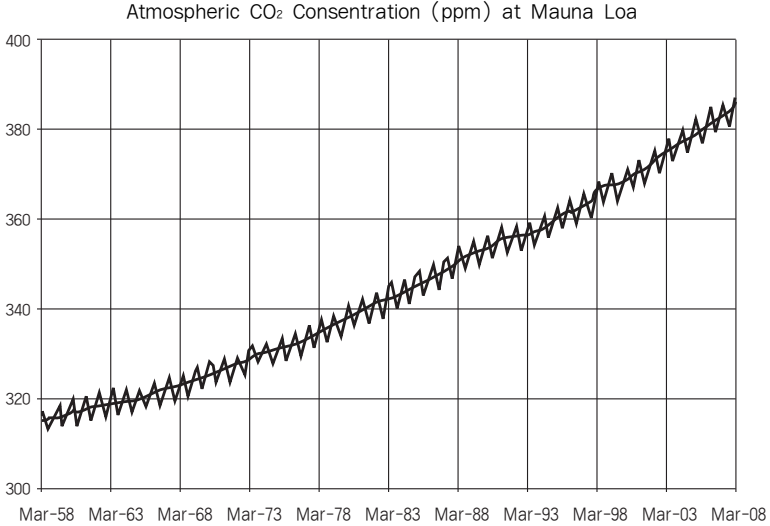
또한 화산활동은 대기 중에 많은 양의 화산재를 분출하여 태양에너지 반사율을 높이는 역할을 한다. 미세한 화산재는 성층권까지 올라가서 2~3년 간 잔류하는데, 이 기간에는 대류권의 기온이 낮아진다. 역사적으로 1815년 인도네시아의 탐보라 화산 폭발로 유럽과 북아메리카에서는 1816년 ‘여름이 없던 해’로 기록되었으며⁵⁾, 최근에는 1991년 필리핀의 피나투보 화산 폭발이후 온난화 추세가 약화된 사례가 있다⁶⁾. 대기 중의 오염물질인 에어러솔은 인간 활동으로 발생하며, 태양 에너지를 반사함으로써 지표의 기온을 냉각화시키는 역할을 한다.

이러한 강제력의 변화는 기후변화를 일으키는 원인이 되지만, 기후 시스템에는 강제력 변화의 효과를 강화(양의 피드백) 또는 약화(음의 피드백) 시킬 수 있는 피드백 메커니즘들이 있다. 예를 들면, 기온이 높아지면 눈과 빙하가 녹으면서 육지와 수면이 넓어지고, 이에 따라 태양에너지가 더 많이 흡수되어 기온이 더 높아지는 얼음-반사율 피드백(Ice-albedo feedback)이 있다. 그러므로 기후시스템 내의 다양한 피드백을 정확하게 이해하는 것은 기후변화를 이해하는데 매우 중요하다.

4) Svante Arrhenius, “On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground”, *Philosophical Magazine and Journal of Science*, Series 5, Volume 41 (April 1896), pp. 237–276.

5) Hebert H. Lamb, *Climate, History and the Modern World* (영국: Routledge, 1982), 김종규 옮김, 『기후와 역사: 기후, 역사, 현대세계』(서울: 한울아카데미, 2004), pp. 288–289.

6) IPCC, *Climate Change 2001: The Scientific Basis* (영국: Cambridge University Press, 2001), pp. 105–129.



[그림 1]

1958년 이후 하와이 마우나로아관측소에서 측정된 이산화탄소 농도. 산업혁명 이전의 280 ppm*에서 2006년 381 ppm으로 35% 증가하였으며, 연간 증가율도 증가 추세임. 이산화탄소 농도를 나타내는 선은 관측을 시작한 킬링 박사를 기념하여 킬링곡선이라고 부름. (자료 출처: 미국 NOAA)

* parts per million, 백만분의 일을 의미하며, 여기서는 대기 중 미량기체의 농도를 나타내는 단위로 쓰임

Ⅲ. 관측된 기후변화의 추세⁷⁾

2007년 2월 2일 파리에서 승인된 IPCC 4차 평가보고서의 가장 중요

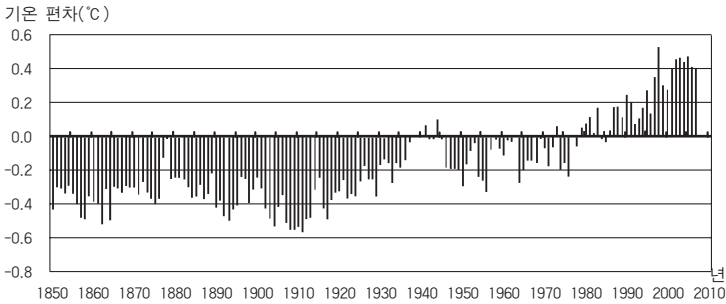
7) Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B.

한 결론은 ‘지구온난화는 논란의 여지가 없을 정도로 명백하며 (unequivocal), 인간 활동으로 인한 온실가스 증가가 20세기 중반 이후의 온난화를 일으켰을 가능성이 매우 높다’는 것이다. 지구평균기온은 지난 100년간(1906-2005년) 0.74℃ 증가하였는데 특히 북반구, 중고위도에서 기온 상승이 크다. 또한 최근에는 온난화 추세가 빨라지고 있어서, 최근 50년간 온난화 추세는 약 0.128℃/10년, 최근 25년 추세는 0.177℃/10년으로 100년간 추세보다 2배 이상 급속히 진행되고 있다. 강수량의 경우 지역별 시간대별 변화가 큰 특징을 보이지만, 대체로 북반구 고위도에서 증가하고 아열대 고기압이 확장하는 지역(사헬, 지중해연안 등)에서 감소하는 추세를 나타낸다.

해양의 온도는 3000 m 깊이까지 상승하고 있으며, 최근 50년간 기후시스템에 의해 축적된 열의 80% 이상을 차지하고 있으며, 특히 상층 700 m에서 광범위한 온난화가 일어나고 있다. 또한 해양은 이산화탄소 배출량의 반 정도를 흡수하여, 해양 표층이 산성화 되었으며, 해수면에서의 증발량이 증가한 지역에서 염도가 상승하였다. 해수면은 최근 40여 년간 매년 1.8 mm/년씩 증가하였으며, 위성 관측에 의하면 서태평양은 다른 지역에 비하여 상승률이 큰 특징을 보인다. 해수면 상

Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt, 2007: Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

승의 원인은 해양의 온난화로 인한 열팽창과 빙하와 만년설이 녹아서 해양으로 유입된 것이 가장 중요하다.



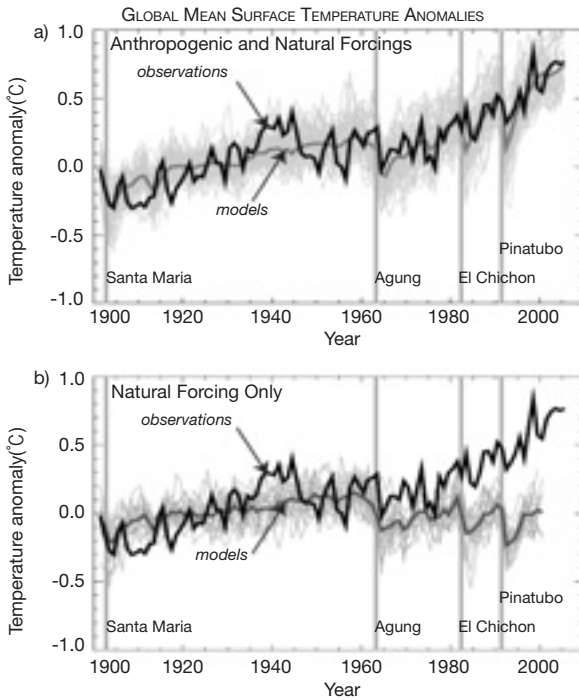
[그림 2] 1850-2007년 지구평균기온의 변화추세(기준: 1961-1990년).

(자료출처: 영국 해들리센터/CRU)

빙권(눈과 얼음)은 고산빙하와 적설면적의 감소가 관측되었으며, 이는 해수면 상승에 기여하였다. 영구동토와 계절동토의 온난화는 캐나다, 시베리아, 티베트 고원, 알래스카, 북부 유럽에서 관측되었다. 빙권의 축소는 태양에너지의 반사율의 감소 등 에너지 및 물순환에 상당한 영향을 미친다. 북극의 해빙은 여름철에 10년당 7.4%씩 감소하고 있으나 남극대륙 빙하의 변화는 아직은 분명하지 않다.

이러한 지구 온난화의 원인을 조사, 분석한 결과 이산화탄소를 비롯한 온실가스의 영향이 가장 크다는 것을 확인했다. 산업혁명 이후 에너지 수요가 급증하면서 석유, 석탄 등 화석연료 연소로 많은 양의 이산화탄소가 공기 중으로 배출되었다. 최근 5년간 이산화탄소는 매년 72억 톤씩 배출되었다. 이로 인해 대기 중 이산화탄소 농도는 산업혁명

이전의 280 ppm(약 0.03%)에서 2005년에는 379 ppm(약 0.04%)으로 약 100 ppm이 증가하였는데, 이 중 약 20%는 최근 10년간 증가한 것이다. 온실가스의 농도 증가로 인한 온실효과로 지구는 약 2.6 W/m^2 의 에너지를 추가적으로 얻게 되었다. 같은 기간 태양에너지의 변화가 약 0.12 W/m^2 라는 것과 비교할 때 매우 크다는 것을 알 수 있다.



[그림 3] 기후모델을 이용한 지구평균기온 모의실험 결과

a) 인위강제력(온실가스 및 에어러솔 변화)과 자연강제력을 모두 포함한 경우, b) 자연강제력(태양에너지 변화와 화산활동)의 변화만을 포함한 경우. 그림에서 관측은 검은 실선으로 표시하였음. (출처: IPCC 4차 평가보고서)

기후변화의 원인을 분석하기 위해서 기후모델을 이용한 모의실험이 수행되었다. [그림 3] b)는 자연강제력인 태양에너지와 화산활동만을 고려한 실험결과이며, a)는 온실가스 및 에어러솔과 같은 인위강제력의 변화와 자연강제력의 변화를 모두 포함한 실험결과이다. 관측(검은 실선)과 비교하여 보면, 인위강제력을 고려하지 않은 실험에서는 최근 50년간 발생한 온난화를 모의하지 못하고 있다. 이 실험의 결과는 20세기 후반의 온난화는 온실가스 증가로 인한 결과일 가능성이 높다는 것을 의미한다.

지구온난화는 기온과 강수량의 평균이 변화하는데 그치지 않는다. 기온과 강수량 패턴이 변함에 따라 홍수, 가뭄, 열파의 발생빈도가 증가하고 있으며, 지역에 따라 태풍이나 허리케인의 세기가 강화되는 추세도 나타난다. 공기의 온도가 1도 상승하면 공기중 수증기 함유량은 7%씩 증가하기 때문에 호우와 가뭄의 발생빈도가 증가한다. 최근에는 세계적으로 열파가 발생하여 2003년 프랑스에서 만 오천 명이 사망하고, 인도에서는 50℃ 이상의 열파가 발생한 예도 있다. 유럽에 나타나는 열파는 사하라 사막 상공에 있는 아열대 고기압이 세력을 확장하면서 나타나는 현상으로 2006년 7월에도 유럽은 고온과 가뭄현상으로 광범위한 지역에서 최고기록을 갱신하고, 2007년 8월 그리이스는 산불로 국토의 절반 이상이 피해를 입었다.

기후변화의 영향은 해수면 상승, 빙하의 감소, 식물의 서식지 복상, 각종 동물 서식환경의 변화, 해양의 온난화, 겨울의 감소, 봄의 시작이 빨라짐, 하천 유출량 변화, 가뭄의 심화 등 다양한 형태로 나타난다. 이러한 영향은 지역적으로 시간적으로 변화하는 특성을 가진다. IPCC 제 2 실무그룹은 4차 평가보고서에서 물리 및 생태계에 나타난 변화의

89% 이상이 온난화와 관련이 있다고 보고하였다.

IV. 미래 기후변화 전망

과학자들은 매우 복잡한 '기후변화모델'을 이용하여 미래의 기후를 전망한다. 이 모델에는 기후시스템을 구성하는 대기, 해양, 육지, 식생, 빙하 등 기후에 영향을 미치는 요소들이 포함되어 있으며, 지구온난화에 가장 중요한 영향을 미치는 온실가스도 포함되어 있다. 앞으로 우리가 얼마나 온실가스를 배출할 것인지는 미래의 사회경제 시나리오에 따라 결정된다. 일단 온실가스의 배출량이 정해지면, 미래의 기후를 예측할 수 있다.

향후 20~30년간 온난화는 온실가스 시나리오 종류에 민감하지 않으며, 현재 고려 중인 온실가스 배출 시나리오 그룹의 경우 0.2℃/10년의 온난화가 예상된다. 기후변화모델들은 2050년까지 20세기 말에 비하여 1.3~1.8℃가 상승할 것으로 전망한다. 21세기 말에는 지구평균기온은 배출량이 많아질수록 상승하는 추세는 더욱 빨라진다. 산업혁명 이전의 농도인 280 ppm의 약 2배가 되는 550 ppm이 되면 21세기말 기온은 약 2℃ 상승할 것으로 예상되며, 약 3.5배인 1000 ppm이 되면 약 4℃ 상승할 것으로 예상된다. 이와 함께 해수면도 18-59 cm 상승할 전망이다(표 1). 기온 상승은 육지와 북반구 고위도에서 가장 현저하고 해안보다 대륙의 내부에서 더 큰 경향을 가진다. 일반적으로 건조한 지역의 온난화가 습윤한 지역보다 더 크다. 남반구의 해양과 북대서양의 일부에서 온난화가 가장 약할 것으로 전망된다. 또한 지리적 분포

패턴은 고려된 온실가스시나리오들에서 거의 유사한 특징을 가진다.

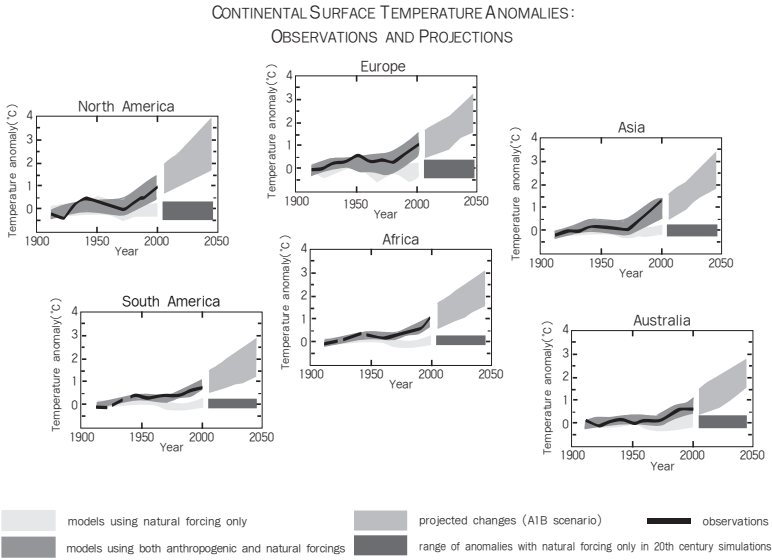
〈표 1〉 온실가스 시나리오에 따른 기온과 해수면 변화추세
(출처: IPCC 4차 평가보고서)

시나리오 (2100년 농도)	2090년대 기온변화	2090년대 해수면 상승
2000년 농도 (370 ppm)	0.6 [0.3-0.9]°C	NA
B1 (550 ppm)	1.8 [1.1-2.9]°C	18-38 cm
A1T (540 ppm)	2.4 [1.4-3.8]°C	20-45 cm
B2 (600 ppm)	2.4 [1.4-3.8]°C	20-43 cm
A1B (720 ppm)	2.8 [1.7-4.4]°C	21-48 cm
A2 (830 ppm)	3.4 [2.0-5.4]°C	23-51 cm
A1FI (970 ppm)	4.0 [2.4-6.4]°C	26-59 cm

이러한 온난화는 20세기에 나타난 바와 같이 홍수, 가뭄, 열파의 빈도가 증가시키고, 태풍이나 허리케인의 세기가 강화될 가능성도 높다. 대부분의 지역에서 한파의 빈도가 50% 이상 감소할 것으로 전망된다. 또한 고산지대의 빙하와 북극의 해빙이 녹는 속도도 더욱 빨라질 것이며, 북극해의 해빙은 21세기말에는 늦여름에 거의 사라질 가능성이 높다. 강우패턴은 고위도에서 증가하고 아열대 육지에서 감소할 가능성이 높다. 대부분의 모델들은 호우 발생이 증가하는 것으로 전망하고 있다. 자연재해의 빈도와 세기가 증가하면서 막대한 피해가 발생할 가능성이 높으며, 이로 인하여 개발도상국의 경우 사회경제적으로 심각한 영향을 받을 수 있다.

우리나라가 속한 동아시아 지역에서는 세계 평균보다 기온의 상승폭이 더 클 것으로 예상된다. 21세기말 이산화탄소 농도가 720 ppm으로 증가하는 A1B 시나리오에 따르면, 지구평균기온이 2.8°C 상승하는데

비하여 동아시아는 약 3.3℃ 상승할 것으로 예상되며, 여름철 강수량의 증가가 예상된다. 이에 따라 호우와 가뭄이 심화될 가능성도 높다. 한편 겨울에 한파의 발생빈도는 감소하고, 열파는 증가할 것으로 예상된다. 우리나라에 영향을 미치는 태풍의 세기가 강화될 가능성도 높다.

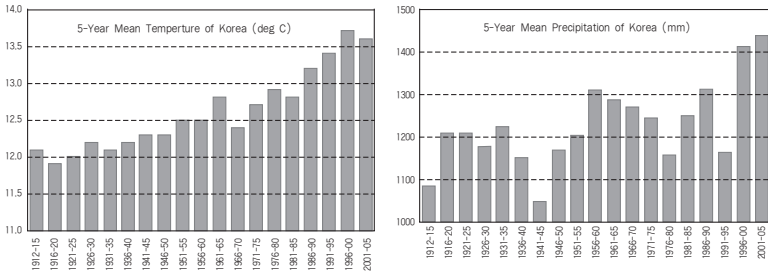


[그림 4] 대륙별 20세기 관측과 모델의 모의 실험과 비교 및 A1B 시나리오 근거한 미래 기온의 변화추세.

그림에서 실선은 20세기 관측, 음영은 모델의 결과를 나타내며, 지역별 온도그래프에서 아래쪽의 음영은 자연강제력을 고려한 실험결과이며, 위쪽은 A1B시나리오 근거한 결과이다. (출처: IPCC 4차 평가보고서)

V. 우리나라 기후변화의 현황과 전망

우리나라는 1904년에 근대관측을 개시하여 기온, 강수량 등 기상관측자료가 축적되어 있다. 이러한 관측자료에 근거한 20세기 평균기온의 추세는 +1.5℃로 전지구적인 온난화 추세를 상회하고 있다[그림 5]. 기온 상승의 원인은 지구온난화와 도시화 등이 있으며 이중 도시화 효과는 약 20-30%로 분석된다. 강수량은 장기적으로 증가하는 추세를 보이나, 자연변동성이 큰 특징을 가진다. 우리나라의 기후는 20세기 초반에 비하여 20세기 후반에는 온난하고 강수가 많은 특성을 보인다⁸⁾.

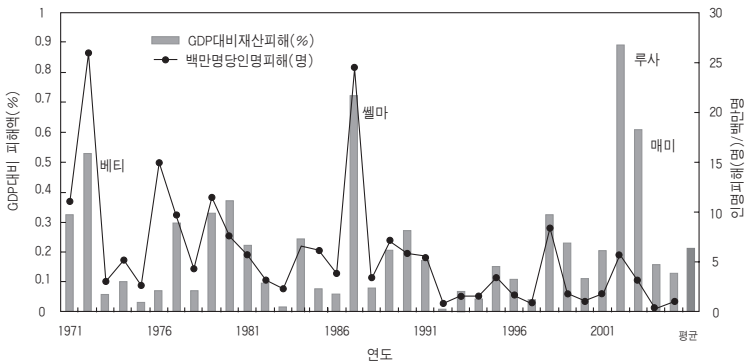


[그림 5] 1912-2005년 우리나라 평균기온과 강수량 변화

최근 50년간(1954-2003) 강수일수(강수량 0.1 mm 이상)는 감소하고, 호우일수(80 mm 이상)는 1954-63년 평균은 1.6일/년인데 비하여 1994-03년은 2.3일/년으로 증가추세이며, 자연재해로 인한 재산피해는 급격히 증가하는 추세이다[그림 6]. 최근 10년간(1996-2005) 15개

8) 권원태, “기후변화의 과학적 현황과 전망”, 『한국기상학회지』, 제41권 2-1호(2005년 3월호), 325-336.

지점 평균 연강수량은 1458.7mm로 평년대비 약 10% 증가하였고 여름은 18%로 증가폭이 가장 크며, 호우일수는 30년 평균이 2일인데 비하여 2.8일로 0.8일 증가하였다. 우리나라에 영향을 미치는 태풍의 수는 크게 변동이 없으나 2002년, 2003년에는 태풍 루사와 매미로 인해 GDP의 0.9%, 0.6%에 달하는 막대한 피해가 발생하였다. 또한 1968년 이후 우리나라 연근해 해수면 온도는 약 0.93도 상승하였는데, 동해가 0.80도, 남해는 1.04도, 서해는 0.97도 상승하였으며, 해수면은 지역에 따라 차이가 크나 최근 30년간 연평균 2~5 mm씩 상승 추세이다.



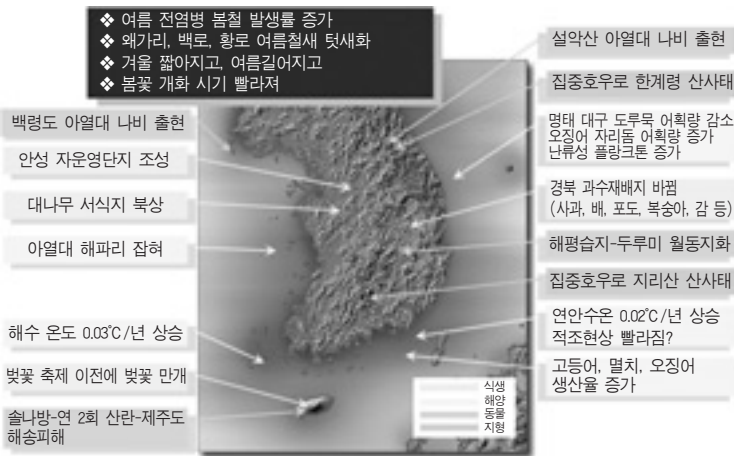
[그림 6] 1971-2005년 자연재해로 인한 인명 및 재산피해 (자료: 재해대책본부).

인명은 백만명 당 사망 및 실종, 재산은 GDP 대비 퍼센트로 나타내었음.

냉방일은 약 20일/100년의 비율로 증가하고 열대야 현상도 약 5일/100년의 비율로 증가한 반면, 난방일은 약 15일/100년의 비율로 감소하고 서리일은 약 30일/100년의 비율로 감소하였다. 또한 겨울(일평균 기온 5℃ 이하)은 1920년대에 비하여 1990년대에 약 한달 정도 짧아졌으며, 여름(일평균기온 20℃ 이상)과 봄은 기간이 길어졌으며, 봄꽃의

개화시기가 빨라지는 것도 관측되었다⁹⁾.

또한 20세기 전반에는 한강의 결빙일수가 약 3개월이었는데, 최근에는 한강이 결빙하지 않는 해도 발생하였다. 결빙일수가 줄어든 원인은 겨울에도 한강의 유출량이 많고, 하천의 직선화와 환경오염도 포함되지만, 1980년대 후반 이후 영하 10℃ 이하인 날의 수가 급격히 줄어든 것이 가장 중요한 원인이라고 할 수 있다. 또한 식생, 해양, 곤충, 동물, 지형 등에 기후변화로 인하여 영향이 나타나고 있다(그림 7).



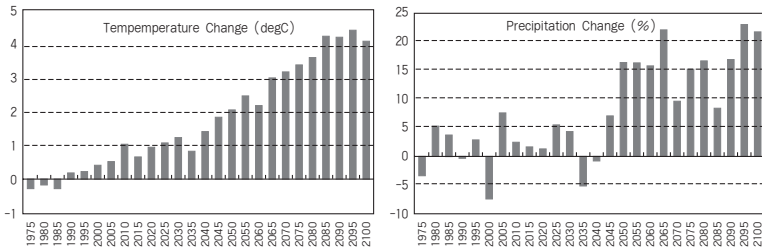
[그림 7] 매크스에 보도된 기후변화의 영향

국립기상연구소의 연구결과¹⁰⁾에 따르면 SRES A1B 시나리오(2100

9) 최광용, 권원태, “20세기 우리나라 자연계절 전이와 생활 기온 지수의 변화” 『지리교 육논문집』, 제45권(2001년 12월), pp. 14-25.

10) 기상연구소, 『기후변화협약대응 지역기후 시나리오 활용기술 개발(III)』(서울: 기상 연구소, 2006)

년 이산화탄소의 농도가 약 720 ppm)에 근거한 우리나라의 21세기 말 기온은 최근 30년(1971-2000년) 평균 대비 4℃ 상승할 것으로 전망된다. 이와 더불어 극한 저온현상의 빈도는 감소하고 극한 고온현상의 빈도는 증가할 것이다.



[그림 8] IPCC A1B 시나리오에 근거한 미래 기후변화 전망(1971-2100)

트레와다의 기준에 의한 아열대 기후구는 20세기 말 제주도와 남해안 일부 지역에서 21세기 말에는 서울-대전-남원-구미-안동-포항을 거쳐 동해안을 잇는 선까지 북상할 것으로 전망되며¹¹⁾, 남부지방 일부에서는 겨울이 사라질 것으로 전망된다[그림 9]. 겨울이 따뜻해지면, 이모작 가능지역이나, 사과와 같은 온대과일의 재배지역은 북상하고 남쪽에서는 바나나, 망고와 같은 아열대 과일의 재배가 가능해질 것이다. 병충해로 농업 및 자연생태계에도 피해가 우려된다. 에너지 수요는 겨울에는 줄고 여름에는 늘어날 것이다¹²⁾. 관광이나 레저에서도 변화가 예상되며 각종 학교의 방학기간도 조정이 불가피할 것이다. 건설부문의 시설기준도 변경되어야 한다.

11) 권영아, 권원태, 부경은, 최영은, “A1B 시나리오 자료를 이용한 우리나라 아열대 기후구 전망” 『대한지리학회지』, 제42권 제1호 (2007), pp. 82-95.



[그림 9] A1B 시나리오에 근거한 21세기 말 아열대 기후구 전망
(출처: 권영아 등, 2007)

강수량은 21세기 말에 15-20% 증가할 것으로 전망되나 변동성이 큰 특성이 나타난다. 강수량의 변동성이 크기 때문에 홍수와 가뭄이 빈발할 가능성이 높은 것으로 판단된다. 전반적으로 21세기에는 호우 빈도가 증가할 것으로 예상된다. 시간당 강수량의 증가로 돌발홍수, 산사태, 도시홍수 등도 증가할 것이다. 그러나 지역에 따라서는 기온의 상승으로 증발량이 증가하여 가뭄이 빈발할 가능성도 크다. 또한 연근해의 해수온도의 상승도 예상되며, 이에 따라 우리나라에 상륙하는 태풍은 세기가 강화될 가능성이 높아질 것이다. 장기적으로는 해수면의 상승으로 연안지역에서 피해가 심화될 것이다.

12) 임한철, 변영화, 권원태, 전종갑, 2008: 지구온난화에 의한 가정용 전력에너지의 소비평가. Atmosphere, 제18권 제1호(2008년 3월), pp. 33-41.

VI. 기후변화 대응 및 향후 과제

IPCC 4차 평가보고서 발간 이후 남아있는 기후변화과학분야의 주요 불확실성은 지역 기후, 특히 강수패턴의 변화 전망, 태풍의 빈도 및 세기에 대한 전망, 남극 빙하의 질량 변화, 수십 년 변동의 크기와 역할, 탄소순환, 에어러솔과 구름과 관련된 기후과정 및 강제력의 크기, 해양 자료의 신뢰도, 해양의 심층순환, 기후민감도의 정량화, 기후모델간의 차이 등이 있다. 영향 및 취약성 평가는 부문별 영향 평가를 위한 자료의 확보가 중요한 문제로 남아 있다. UNFCCC의 목적인 위험한 기후변화 수준 결정을 위하여 기후변화과학의 불확실성을 감소시키는 것은 매우 중요한 문제이다. 그러므로 향후 기후변화 대응을 위해서 기후변화과학 부문에서 불확실성을 줄이기 위한 지속적인 노력이 필요하다. 또한 각 부문별, 지역간의 이해당사자들과의 협력체계 구축도 매우 시급한 실정이다.

기후변화에 대한 대책은 적응과 완화의 두 분야로 크게 구분할 수 있다. [그림 10] 적응은 기후변화에 의한 부정적인 영향을 줄이기 위한 대응정책을 말하며, 기후변화의 원인인 온실가스의 배출을 줄이는 정책은 완화라고 한다. 현재 온실가스 배출량은 계속 증가하는 추세이다. 이러한 온실가스 배출의 지속적인 증가로 인한 온난화를 피할 수는 없다. 온실가스 배출을 즉각적으로 줄이는 극단적인 방법을 취한다고 해도 지구온난화는 당분간 지속될 것이다. 그리고 온난화로 인한 자연재해 발생패턴의 변화, 생태계의 변화 등은 직간접적으로 우리의 사회경제에 막대한 영향을 미칠 것이므로<표 2>, 지역 기후변화에 관한 신뢰성있는 예측자료가 산출되어야 한다. 그러므로 이러한 변화에 대응하

기 위한 적응노력은 앞으로 수십 년간 더욱 중요성이 높아질 것이다.

〈표 2〉 전망된 극한현상으로 인한 부문별 영향의 종류 (출처: IPCC 4차 평가보고서)

기후변화 현상(WGI)	가능성	농업, 산림, 생태계	수자원	보건	산업/거주지/ 사회경제
저온일 감소 고온일 증가	거의 확실	고 위도: 생산성 증대 저 위도: 생산성 감소 병충해 증가	고 산 빙 하 감소로 수 자원 영향 증발산 증가	저 온으로 인한 사망 감소	난방 감소/냉방 증가; 대기질 악화; 겨울수송 양호; 겨울관광 영향
육지에서 열파증가	매우 높음	온난 지역 생산량 감소; 산불 증가	수자원수요 증가 수질악화	노약자 등 열파사망 증가	온난지역 주거환경 악화; 노약자, 빈곤층 영향
호우 증가	매우 높음	곡물 피해; 토양 유실; 경작지 감소	지표/ 지하수질 악화; 수자원부족 감소	재해사망 증가	홍수 피해 증가 재해보험 필요성 증대
가뭄지역 증가	높음	토질 악화; 생산량 감소; 가축 감소; 산불 증가	수자원 스트레스 증가	식량/수자원 부족; 영양상태 악화; 질병	수자원 스트레스; 수력발전 감소; 인구이동 가능성
태풍강도 증가	높음	곡물피해; 산림파괴; 산호피해	전력수급 차질로 인한 수자원 공급위협	재해로 인한 사망/질병 증가	홍수/강풍 피해; 보험기피 증가; 인구 이동
해수면 상승	높음	염수로 인한 피해	담수자원의 감소	홍수피해; 인구이동으로 인한 보건문제	연안방재 및 개발 비용; 인구/사회간접자본 이동; 보험기피 등



[그림 10] 기후변화 대응체제

(여기서 GHG는 온실가스(Greenhouse Gas)를 의미함)

온실가스 농도가 높으면 기후변화로 인한 온도 상승폭은 커지는 경향이 있다. 온실가스의 배출량을 줄인다면 대기 중 농도의 증가추세가 줄어들고 그에 따라 온난화도 줄어들 것이다. 그러므로 장기적으로 심각한 기후변화의 정도와 가능성을 줄이기 위하여 온실가스 배출을 감축하는 완화정책은 기후변화로 인한 인간 사회 및 자연시스템의 충격을 줄이고 사회적 적응력을 보호하기 위해서 적응전략과 함께 추진되어야 한다.

미래 기후변화로 인하여 우리 사회에 다양한 형태의 영향이 나타날 것이다. 특히 자연재해로 인한 피해의 증가와 생태계에 나타나는 생물종의 멸종과 같은 영향은 심각한 사회적 비용을 요구한다. 예를 들면, 해수면 상승으로 태풍으로 인한 연안지역의 피해는 증가할 것이다. 또한 호우와 가뭄이 증가하면, 수자원 관리도 어려워질 것이다. 온도가

올라가면 토양수분은 빠르게 증발하여 농업에도 어려움이 예상되며, 알려지지 않는 병충해와 질병도 증가할 수 있다.

이미 우리나라에서도 자연생태계에 변화가 나타나고 있다. 대나무를 비롯한 식물 서식지의 변화가 나타나고 있으며, 나비 등 곤충들의 서식지도 변화하고 있음이 보고되었다. 또한 겨울에 한파가 감소하면서 소나무, 참나무의 병충해도 증가하는 추세이다. 또한 바닷물의 온도가 올라가면, 해양생태계도 심각한 영향을 받는다. 겨울에 난방을 위한 에너지 소비는 줄어들겠지만, 여름에는 냉방을 위한 에너지 소비가 급증할 것이다. 휴가나 관광 패턴도 바뀔 것이다.

이러한 영향을 미리 예상하고 그에 대한 대응책을 마련하여야 한다. 농업부문의 적응방안으로는 온난한 기후에 적합한 농작물 품종을 개량함으로써 기후변화에 따라 품종을 선택하여 농업생산성 안정화시킬 수 있다. 보건부문에서는 온난화에 따라 발생가능한 열대전염병에 관한 증상 등에 관한 교육을 의대에 추가하고 국가차원의 열대전염병의 예방약 및 치료약 확보함으로써 열대전염병 발생시 신속한 발견 및 조치로 확산 방지할 수 있다. 자연재해부문에서는 온난화로 인하여 집중호우 세기가 증가할 가능성이 높으므로, 향후 댐 및 제방의 건설기준을 강화하고, 저류지 확보 및 위험지역 개발 제한하는 방안을 시도할 수 있다. 2003년 프랑스에서 폭염으로 만오천 명이 사망한 사실은 선진국인 프랑스도 미리 예견하지 못했기 때문일 것이다. 2005년 미국 뉴올리언즈의 허리케인 피해는 개발과 방재에 대한 무관심이 피해를 키웠다.

이러한 모든 변화는 온실가스 감축을 위한 사회경제적 변화와 함께 진행될 것이다. 온실가스 감축을 위한 화석연료 사용의 감소, 신재생에

너지 개발, 에너지 고효율화, 재생자원의 활용, 온실가스처리기술 개발, 새로운 에너지원 개발 등과 더불어 우리의 생활방식의 변화도 필수적이다. 기후변화는 일어나며, 가속화될 것이다. 기후변화로 인한 영향을 가장 크게 받는 것은 그 지역에 사는 사람들이다. 그러나 적응을 위한 준비가 되어 있다면 기후변화로 인한 피해를 최소화시킬 수 있다. 또한 기후변화로 인한 사회경제적 변화 추세를 예상할 수 있다면 위기를 기회로 만들 수 있다. 준비하는 자만이 기회를 잡는다는 것을 잊지 말자. 그리고 이 모든 대비책을 추진하기 위해서 국민적 공감대를 형성하는 것이 가장 중요한 출발점이다.*

〈참고문헌〉

- 권영아, 권원태, 부경은, 최영은, “A1B 시나리오 자료를 이용한 우리나라 아열대 기후구 전망” 『대한지리학회지』, 제42권 제1호.
- 권원태, “기후변화의 과학적 현황과 전망”, 『한국기상학회지』, 제41권 2-1호 (2005년 3월호).
- 기상연구소, 『기후변화협약 대응 지역기후 시나리오 산출기술개발(III)』(서울: 기상연구소, 2004).
- 임한철, 변영화, 권원태, 전종갑, 2008: 지구온난화에 의한 가정용 전력에너지의 소비평가(An Assessment of the Residential Electric Energy Consumption Induced by Global Warming). *Atmosphere*, 18(1).
- 최광용, 권원태, “20세기 우리나라 자연계절 전이와 생활 기온 지수의 변화” 『지리교육논문집』, 제45권(2001년 12월).
- Hebert H. Lamb, *Climate, History and the Modern World* (영국: Routledge, 1982), 김종규 옮김, 『기후와 역사: 기후, 역사, 현대세계』 (서울: 한울아카데미, 2004).
- IPCC, *Climate Change 2001: The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (영국: Cambridge University Press, 2001)
- IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)] (영국: Cambridge University Press, 2007).
- Nicholas Stern, *Stern Review: The Economics of Climate Change* (영국: Cambridge University Press, 2006), http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm

Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt, 2007: Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Svante Arrhenius, “On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground”, *Philosophical Magazine and Journal of Science*, Series 5, Volume 41 (April 1896).

UN, “United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, 유엔기후변화협약)” (1992), <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>

| Abstract |

The Present Scientific Understanding on Global Climate Change

Kwon, Won-tae

(National Institute of Meteorological Research)

Climate change become one of the major issues in the world; however, the level of awareness (understanding) on causes and consequences of climate change is not sufficiently raised. In 2007, IPCC concluded in the Fourth Assessment Report that warming in the climate system is unequivocal and it is very likely the increase of atmospheric concentration levels of greenhouse gases due to human activity have caused the warming during the last 50 years. IPCC also concluded that climate change in the 21st century is projected to be larger than the changes in the last century. The use of fossil fuel and land-use change has been continuously increased since the industrial revolution. Temperature warming is not the only signal of climate change. The frequency of natural disasters associated with extreme events, such as flood, drought, heat wave, and tropical cyclone is also increasing. By the end of the 21st century, the global mean temperature is projected to 1.8~4.0°C depending on the greenhouse gas emission scenario. In the 21st century, adverse impact of global warming is expected to increase for natural physical and biological system and socio-economic system threatening sustainable development.

In Korea, mean temperature has increased by 1.5°C and the losses from extreme events, such as heavy rainfall, heat wave, and Typhoon have also increased. There are significant changes in land

and ocean ecosystems. In the future, temperature is projected to increase more rapidly. It is necessary to develop adaptation measures based on the projection of regional climate change and the impacts on natural and socio-economic systems. To be able to achieve this goal, scientific experts, policymakers, and stakeholders should integrate their efforts together.