

기후변화의 현황과 전망

권원태

기상연구소 기후연구실장

Outlook on Climate Change

Won-Tae Kwon

Climate Research Lab., Meteorological Research Institute, KMA

1. 서론

지금으로부터 15년전, 1988년 기후변화에 대한 과학적 평가를 목적으로 UN 산하에 정부간 기후변화패널(IPCC)이 설립되었다. IPCC는 현재 우리가 직면하고 있는 ‘지구 기후는 변하고 있는가?’, ‘이러한 기후변화의 원인은 인간 활동 때문인가?’라는 두 가지 의문에 대한 답을 구하기 위하여 과학자들을 중심으로 구성된 조직이다. 설립이후 IPCC는 2001년에 이르기까지 모두 세 차례의 보고서를 발간하였으며, 이 보고서는 UN 기후변화협약(FCCC)의 방향을 결정하는데 매우 중요한 역할을 하였다. IPCC는 연구기관은 아니지만 전세계의 학술잡지에 발표된 학술논문을 종합하여 최신 과학기술을 이용한 기후변화를 평가할 뿐만 아니라 과학기술이 가지고 있는 불확실성을 평가하는 역할을 함으로써 기후변화에 관한 가장 과학적이고 권위있는 보고서를 발간하고 있다.

지구온난화 문제에 대해 IPCC는 1990년 발간된 1차보고서에서 ‘관측자료에서 온실가스 증가효과를 정확히 탐지하는 것은 빠른 시일 내에 쉽지 않을 것 같다.’는 매우 보수적인 의견을 제시하였으나 1995년 2차 보고서에서는 ‘인간이 전지구 기후변화에 영향을 끼친 증거가 있다.’라고 진보된 의견을 제시하였다. 2001년 발간된 3차 보고서에서 IPCC의 의견은 보다 강하게 ‘인간의 활동이 과거 50년간 기온 상승을 유발하였다는 새롭고 확실한 증거가 있다.’라고 바뀌었다.

IPCC는 3차 보고서에서 과학적인 증거로 20세기에 전지구 평균기온 0.6도 상승, 빙하지역의 감소, 해수면 상승 등을 제시하였으며, 지속적인 산업화로 인하여 이산화탄소 농도가 30% 증가하였다고 보고하였다. 기후를 변화시키는 다양한 원인들과 기후시스템 내의 복잡한 과정을 이해하기에는 아직도 불확실성이 크기 때문에 이러한 기후변화의 어느 정도까지 인간 활동에 의한 것이라고 결정을 내리기에는 부족하다. 그러므로 과학자들은 이러한 불확실성을 줄이기 위한 연구를 계속하고 있다.

18세기 산업혁명 이후 급속도로 발전되는 경제구조는 이를 뒷받침할 막대한 에너지를 요구하였고, 이에 따른 화석 연료의 사용 증가는 나날이 가속되고 있다. 이 화석 연료의 사용 증가는 곧바로 대기 중 온실기체 함유량의 급증을 불러 왔다. 이런 대기 중 온실기체의 급격한 증가는 1990년 세계의 300여명의 기후학자들로 하여금, 태양으로부터 들어오는 일사는 투과시키고 지구 특히 지표에서 외부로 방출되는 지구 복사를 흡수한 다음 지표로 되돌려 보내는, 온실효과가 강화되어 지구 온난화가 일어날 수 있다는 사실과, 온난화에 따른 빈번한 악기상의 발생, 강수대 변화, 해수면 상승 등의 인류 생존 자체에 대한 위험을 경고하게 되었다.

미래 기후에 대한 인식을 높이기 위해서는 먼저 기후시스템에 대한 구조적 이해, 또 각 부분별 역할 및 상호작용을 이해해야 한다. 이러한 기후시스템에 대한 이해를 바탕으로 기후 변화를 유발할 수 있는 원인이 파악하고, 실제 관측을 통한 과거의 온난화 증거를 검토하고, 그 원인을 분석할 필요가 있다. 이러한 노력을 통해 우리는 미래 기후변화의 방향과 그 신뢰도를 제고할 수 있을 것이다.

2. 기본적 이해

1) 기상과 기후

날씨는 매일매일, 시시각각으로 변한다. 창밖의 하늘을 보면 하늘에 떠있는 구름은 바람을 따라 흘러가면서 그 모양도 계속 변한다. 그뿐만 아니라 기온도 시간에 따라 변하고 또한 지역에 따라 날씨가 다른 것을 알고 있다. 이처럼 날씨 또는 기상은 매일 변하는 특성을 갖고 있다. 기상과 기후는 어떤 차이가 있나? 기상은 시간과 장소에 따라 변하는 특성을 가진 현상을 말하며, 기후는 이러한 기상의 집합이라고 할 수 있다. 세계기상기구(WMO)는 기후는 장기간에 걸친 기상현상의 통계적 특성이라고 정의한다. 통계적 특성은 평균, 변동범위, 이상현상 등을 포함한다. 날씨를 바닷가에서 치는 파도에 비유한다면 기후는 조류(밀물과 썰물)라고 할 수 있다.

2) 기후시스템

최근까지 기후 문제는 대부분 대기권에 국한되어 연구되어 왔다. 그러나 현재 기후학자들은 기후 문제를 대기권 밖으로 확장하고 있다. 기후시스템은 대기권뿐만 아니라, 수권, 설빙권, 생물권과 지권의 복합 상호작용에 의하여 유지되고 있다. 이런 기후시스템은 이를 구성하고 있는 각 영역 속 기후인자들의 자연적 변화에 따라 시·공간에 걸쳐 지속적인 변동을 거듭하여 왔다.

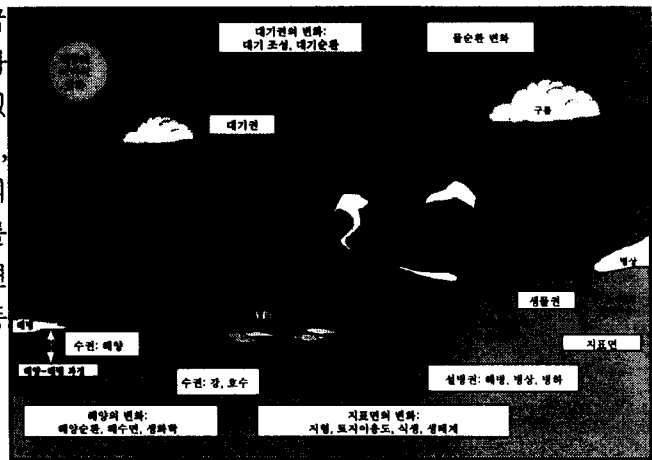


그림 1 기후시스템 모식도 (IPCC 보고서).

가. 대기권 (Atmosphere)

대기권은 지구 크기에 비하여 아주 얇은 막에 불과하다. 대략적인 지구의 반경이 약 6300km인데 반하여 약 99%의 대기가 지상으로부터 30km이하에 존재하고 대부분의 기상현상들은 대류권(Troposphere), 즉 고도 약 15km 이하에서 일어난다. 이상과 같이 대기권은 연직방향으로 지상 수십km에 불과하나 수평면으로는 수만km에 걸쳐있다. 즉 지구를 사과에 비교할 때 대기층은 사과껍질 두께에 불과하다. 그러나 대기권은 현 기후 시스템에서 가장 중요한 영역이다. 대부분 기후 변화는 이 대기권을 통하여 감지되며 지상 생태계에 가장 큰 영향을 미친다.

대기권을 기온, 안정도, 구성 성분 등에 따라 고도별로 구분하면 대류권 (0~10km), 성층권 (10~45km), 중간권 (45~80km), 그리고 열권 (80km이상)으로 나누어지며 각 권역별 대기 질량비는 대략적으로 각각 0.8, 0.2, 0.001, 그리고 0.00001이다. 대기의 구성 성분은 질소(N₂) 78%, 산소(O₂) 21%, 아르곤(Ar) 1%, 수증기(H₂O) ~0.04%, 탄산가스(CO₂) 350ppm(parts per million) 그리고 기타 미량 기체들(네온 Ne, 헬륨 He, 크립톤 Kr, 수소 H, 오존 O₃ 등)로 구성되어 있다. 수증기, 탄산가스, 오존 등 온실기체들은 대기 전체 질량에 비하여 매우 작은 양에 불과하지만 현 기후 유지 및 변화에 있어서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 산소는 생명체를 상징하고 있으며 생물권에 의해 유지되고 있다. 수증기는 대기중의 양은 매우 작지만 해양으로 증발과정을 통하여 해양으로부터 공급받아 강수를 통하여 육지와 해양으로 되돌아간다. 대기 중에 기체로 존재하는 것이 수증기이며, 액체와 고체 상태로 존재하는 것이 구름이다. 이 증발과 강수 과정은 설빙권과 생물권을 유지시키는 중요

한 역할을 하는 것이다.

대기권의 근본 에너지원은 태양이다. 대기 상부에서 대기층을 통하여 내려오는 태양 에너지는 구름, 오존, 수증기 등에 의하여 일부 대기층에서 흡수되나 대부분은 지표에서 흡수된다. 태양복사의 경우와 마찬가지로 지표에서 외계로 방출되는 지구 복사는 대기의 온실기체들(CO₂, CH₄, N₂O, CFCs)에 의하여 일부 흡수되어 지표로 되돌아오지만(온실효과) 대부분은 지표 온도에 의한 장파 복사에 의해 외계로 탈출한다. 지표면에서의 태양 에너지 흡수는 지표면 상태에 따른 반사도 차이에 의하여 판이하게 달라질 수 있다. 그러나 일반적으로 저위도 지표면에서는 흡수되는 태양 에너지량이 방출되는 지구 복사 에너지량보다 많아 가열되며, 고위도에서는 그 반대의 수지가 유지되어 냉각된다.

저위도 지표면 또는 해수면에 흡수된 복사 에너지는 열로 전환되어 대기의 난류과정을 통하여 대기권으로 전달된다. 이때 수증기와 운동량도 함께 전달된다. 이 수증기는 대기의 대류 운동에 의하여 대기 상층부로 전달되며, 응결고도에서 액체로 전환되면서 잠열을 방출하여 대류운동을 강화하게 된다. 이것이 적도에서 상승하고 아열대에서 하강하며, 대기 하층에서 적도 쪽으로 수렴하고 대기 상층에서는 고위도 쪽으로 이동하는 해들리 순환의 근원이 된다. 또 대기권에서 고위도와 저위도 사이의 기온차는 중위도 상층에서 강한 편서풍(제트 기류)을 유발시킨다. 이와 같은 대기권에서의 공기, 물 그리고 에너지의 이동은 계절, 대륙 분포, 대기 구성성분 등(CO₂, O₃, 먼지층 등)에 의하여 변한다.

나. 수권 (Hydrosphere)

물의 존재는 지구를 다른 행성과 구별되게 하는 가장 특징적인 것 중 하나이다. 지구의 표면은 약 70%가 물로 덮여 있는 까닭에 지구는 물의 행성(acqua-planet)으로 불리 운다. 현재 지구상의 물은 암석의 결정수로부터 유래되었다. 화산에 의하여 분출되는 기체는 약 85%가 수증기이며, 10%가 탄산가스, 그리고 질소, 황화합물로 구성되었다. 이와 같이 화산 활동을 통하여 배출된 막대한 수증기는 대기가 포함할 수 있는 양의 한계 때문에 대부분 강수로 지표에 다시 내려오게 됨으로써 현재의 해양을 형성하게 된 것이다.

표 1에서 보는 바와 같이, 수권을 대표하는 대부분의 물은 바다에, 그 다음 2.4%는 고체의 형태로 존재하고 있으며, 대기 중에는 다만 0.001%정도 함유되어 있다. 이상과 같이, 수권의 가장 중요한 구성원은 해양이다. 지표의 많은 부분이 해양으로 되어 있고 많은 열을 함유할 수 있는 까닭에 기후 시스템에 있어서 해양은 일종의 열 저장고 역할을 한다. 해류는 저위도에서의 강한 태양 복사에 의하여 저장된 열을 상대적으로 방출하는 열이 많은 고위도로 수송한다.

표 1. 수권의 구성원에 따른 물의 무게 비율 (%)

구성형태	무게비
해양	97
얼음	2.4
지하수	0.6
호수, 강	0.02
수증기	0.001

또 해양은 지구 표면적의 약 70%에 걸쳐있는 해수면을 통하여 대기와 서로 열, 운동량, 수분을 교환하고 있다. 대기와 해양의 경계층으로 전달된 열은 바람과 해류에 의하여 고위도로 전달된다. 대기와 해양의 운동량 교환의 예로는 적도에 부는 편동풍의 영향에 따른 적도 해양에서의 편동류

를 꼽을 수 있다. 또 아열대 해양에서 증발된 수증기는 대기 중에서 구름과 강수의 근원이 되며 강과 지하수의 공급원이 된다. 이런 물순환을 통하여 수권은 대부분 육지 생물체가 생존할 수 있는 환경을 마련한다.

물순환의 한 부분으로 나타나는 구름은 독특한 광학적 성질에 의하여 현 기후를 유지하는데 있어서, 또 온실기체 증가 등의 요인에 의한 기후 변화에 있어, 매우 중요한 역할을 하고 있다. 구름의 광학적 특성은 구름의 종류, 구성입자 분포, 위치에 따라 매우 달라 기후 시스템에 미치는 그 영향은 매우 다양하다. 대략적으로 구름은 태양복사를 반사하여 지표면을 냉각시키는 동시에 지표로부터 복사되는 지구 장파를 흡수하여 지표로 되돌려 보냄으로써 지표를 가열하는 역할을 한다. 이 구름의 반사 효과는 우리가 쾌청한 여름철 낮에 구름이 우리 위를 지나갈 때 태양광선을 차단함으로써 다소 시원해짐을 느낌으로 알 수 있다. 또 겨울철 구름 낀 밤이 쾌청한 밤보다 덜 추운 것은 구름의 지구 장파복사에 대한 온실효과 때문이다.

다. 설빙권 (Cryosphere)

빙하와 눈으로 구성되어 평균적으로 지표 면적의 5%를 덮고 있는 설빙권의 어원은 그리스어의 Cryo(cold or frost)로부터 유래되었다(표 2 참조). 이 권역은 다른 권역들에 비하여 비교적 늦게 형성되었다. 초기의 지구는 얼음이 형성되기에는 너무 뜨거웠다. 따라서 설빙권은 지구가 충분히 냉각된 선캄브리아기 후반, 즉 약 20억년전에 형성되었다.

표 2. 남, 북반구에서 설빙권이 차지하는 면적비 (단위:10⁶km²)

	북반구			남반구	
	육지	해양		육지	해양
총면적	100	154		49	206
최저	1.5%	2.8%	최고	5.3%	7.2%
최고	18.2%	60%	최저	4.9%	1.4%

얼음은 물의 고체 상태이다. 따라서 이 설빙권은 수권의 한 부분으로 간주될 수 있다. 그러나 이 설빙권 기후 시스템 속에서 수권과 구별되는 독특한 역할을 한다. 눈과 얼음의 반사도는 지표의 다른 부분에 비하여 매우 높다. 바로 내린 신선한 눈은 지표에 도달하는 태양광선의 98%까지도 외계로 반사한다. 먼지 등에 의해 더럽혀진 눈의 경우도 해양보다 3~4배 높은 반사도를 보이고 있다. 이와 같이 눈과 얼음은 외계로부터 들어오는 지구의 기후 시스템의 에너지 근원인 태양 에너지를 외계로 되돌려 보내는 역할을 한다. 이 설빙권이 지표 면적의 어느 정도 이상을 차지할 때 설빙권의 높은 반사도에 의하여 빙하기 초래를 가속한다. 또 대기와 해양의 중간에 위치하여 이들 간의 에너지 및 물 교환을 차단함으로써 대기와 해양의 혼합층뿐만 아니라 대기와 해양의 대순환에도 큰 영향을 준다.

라. 생물권 (Biosphere)

생물권은 기후 시스템에서 절대적으로 다른 계에 의존한다. 즉, 지권, 대기권, 그리고 수권의 적절한 환경 하에서만 존재할 수 있다. 이 생물권이 기후 시스템의 한 부분이 된 것은 약 35억년 전부터이다. 태초의 지구 대기에는 산소와 물이 존재하지 않았다. 그러나 활발한 지각활동을 통하여 많은 결정수가 대기 중으로 분출되었으며, 이는 곧 지각의 낮은 곳으로 모여 바다를 형성하게 되었다. 이 때의 대기는 산소가 거의 없었기 때문에 생명체에 치명적인 태양 자외선을 차단할 수

있는 성층권 오존층이 존재할 수 없었다. 따라서 원시 생명체는 태양의 자외선으로부터 보호될 수 있는 바다 속에서부터 시작되었다. 이들 원시 생명체의 광합성에 의해 배출된 산소는 점차 대기의 주요 성분이 되었고 동시에 성층권에서 오존층을 형성하게 되었다. 이런 과정을 통하여 생명체는 바다에서 육지로 진출할 수 있었다.

생물권은 기후 시스템의 다른 계에 의존만 하는 것이 아니라 생체활동을 통하여 기후 시스템의 구조를 바꿀 수 있는 주요 부분이 되었다. 현재 대기는 생물체들의 작용으로 그 화학적 조성이 크게 달라졌다. 만약 생물권이 기후 시스템의 일원이 아닐 경우 대기 구성성분은 표 3에서 보는 바와 같이 대부분이 탄산가스일 것이며 현재 주요 대기 구성 기체인 질소(N₂)와 산소(O₂)는 단지 몇%에 불과할 것이다.

영국의 병리학자 러브락은 지구 자체가 하나의 거대한 생명체이며 이 지구 속에 포함되어 있는 동·식물을 비롯한 모든 물체는 지구라는 하나의 생명체의 구성원이라고 가정하였다. 또 지구는 생명체이기에 어떤 환경 변화에 대하여 스스로 치유하여 최적의 환경 상태를 유지하고 있다고 생각했다. 즉 지구의 기온, 산화상태(oxidation state), 산도(acidity), 암석과 물의 일부 속성들이 항상 유지되는 것은 생물권의 능동적 되먹임작용에 의한 것이라 생각했다. 그는 이웃인 노벨상 수상작가 윌리엄 골딩의 제안에 따라 이 살아있는 지구를 땅의 여신(Mother Earth)의 이름을 따라 가이아(Gaia)라 이름하였다.

표 3. 대기의 화학적 조성 비교

기체	현재 지구	무생물 지구
CO ₂	0.03%	98.0%
N ₂	79%	1.9%
O ₂	21%	0%
A	1%	0.1%
CH ₄	1.7ppm	0%

러브락은 그의 동료 왓슨과 함께 데이지 세상이라는 가상 세계를 구상하여 생물권의 역할을 설명하고 있다. 이 데이지 세상에는 하얀 데이지와 검은 데이지의 두 종류와 어떤 데이지도 살고 있지 않은 세 가지 영역으로 이루어졌으며, 대기와 구름 등은 존재하지 않는다고 가정하였다. 이들 데이지는 절대적으로 지표면 기온에 의하여 그 성장과 소멸이 결정된다. 즉 검은 데이지는 이 색깔의 특성 때문에 하얀 데이지보다 상대적으로 많은 태양 에너지를 흡수할 수 있다. 따라서 비교적 낮은 온도에서 성장이 잘 되며 온도가 올라가면 성장 조건이 하얀 데이지에 비하여 불리해진다. 한편, 이와는 반대로, 하얀 데이지는 검은 데이지보다 태양복사에 대한 반사도(albedo)가 높으며 비교적 높은 온도에서 잘 성장하며 기온이 내려가면 성장이 불리해진다. 그림 2는 왓슨과 러브락에 의한 데이지 세상에서 태양복사 변화에 따른 기온 및 하얀 데이지와 검은 데이지의 분포 영역을 보여주고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 태양복사가 줄어들면(solar luminosity ≤ 1.0) 검은 데이지 영역은 점차 증가하고 하얀 데이지는 점차 줄어든다. 즉 태양복사 감소에 따라 검은 데이지와 하얀 데이지는 그 영역을 변화시킴으로써 태양복사 변화에도 불구하고 지표면 기온을 유지시키고 있다. 이는 태양복사가 증가할 때에도 마찬가지이다. 태양복사가 줄어들면 검은 데이지는 줄어들고 하얀 데이지가 번창하여 지표면 반사도를 높여 증가되는 태양복사를 다시 외계로 방출시킴으로써 지표면 기온을 유지하고 있다.

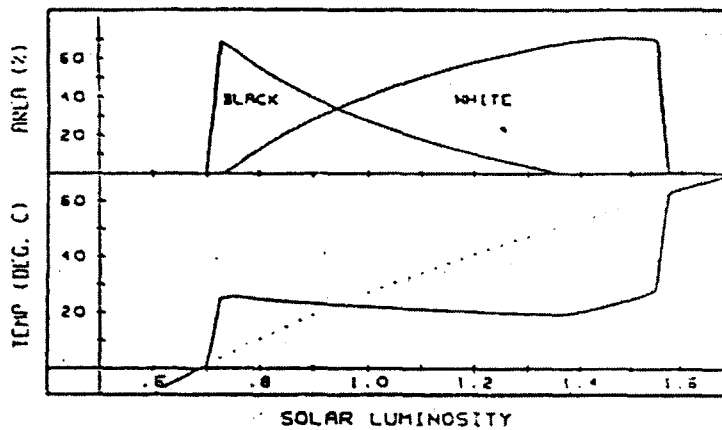


그림 2. 평형 상태의 데이지 세계. 일사량 증가에 따른 흑색과 백색의 데이지 영역(윗그림)과 기온(아래그림)과의 연관성이 보여주고 있다. 점선은 데이지가 없는 경우 일사량 증가에 따른 기온변화를 나타내고 있다.

이 가이아 이론은 지구의 기후 시스템 속에서 생물권의 중요성을 입증하는 기초가 되었다. 즉 생명체와 비생명체간의 상호작용 즉, 기후 시스템의 다른 권역인 대기권, 수권, 설빙권, 지권은 생물권이 존재할 수 있는 여건을 마련해 주고 있다. 동시에 생물권은 광합성을 통하여 대기 구성 성분을 유지하고, 또한 증산작용을 통하여 토양 속의 수분을 대기 중으로 퍼 올리는 펌프 역할을 하고 있다.

마. 지권 (Lithosphere)

지권은 기후 시스템의 근본인 암석과 토양이다. 이 지권은 기후 영역 중에서 가장 느리게 변화하는 영역이다. 따라서 대부분의 기후 시스템 연구에 있어서 불변인 영역으로 고려된다. 대륙은 대기 운동에, 해저 지형은 해수의 이동에 영향을 준다. 지권은 대기와 열, 각운동량을 교환하며 앞에서 언급한 대기와의 물순환에도 일익을 담당한다. 토양 속의 수분은 증발을 통하여 지표면을 냉각시키며 지역 강수의 주요 공급원이 된다. 또한 토양 수분은 토양의 열전도율에도 영향을 준다.

지권이 기후 시스템에 주는 영향 가운데 가장 강력한 것은 화산 활동이다. 화산은 강력한 분화에 의하여 기상 현상들이 주로 일어나는 대류권 상부와 성층권까지 많은 먼지를 뿜어 올리기도 한다. 이 먼지층은 태양복사를 외계로 반사시킴으로써 지표면을 냉각시킨다.

3) 기후변화의 요인

기후 시스템 속에는 대기권, 수권, 설빙권, 생물권 및 지권의 각종 역학적, 물리적, 화학적 과정들이 복잡하게 얽혀있고, 또 각 과정들 간의 반응속도가 크게 다르기 때문에 외부의 특별한 변화 요인 없이도 기상과 기후는 계속적으로 변하고 있다. 이러한 자연적 기후 변동은 인위적 요인들에 의한 기후 시스템의 반응정도를 더하기도 하고 덜기도 한다.

그림 3에서 보는 바와 같이 지질학적 고기후 연구를 통하여 우리는 과거 수십 만년 동안 지구에서 여러 차례의 빙하기와 간빙기가 연속되어 왔음을 알고 있다. 빙하기에는 빙하와 눈이 지구의 많은 부분을 차지하였고, 간빙기에는 열대 우림이 지금보다 상당히 광범위하게 고위도까지 존재했었다.

가. 천문학적 요인으로 인한 기후변화

이러한 지구 기온 변화의 원인으로서는 천문학적 요인과 온실 기체로 인한 요인의 두 가지로 집약할 수 있다. 1920년 세르비아의 수학자 밀란코비치는 “태양복사에 의해 생기는 열현상에 관한 수학 이론”을 발표하여 기후변화를 천문학적 요인에서 설명하였다. 이 천문학적 요인은 태양활동의 변화, 두 가지 경우의 지축 변화, 지구 공전궤도 변화의 네가지로 분류할 수 있다.

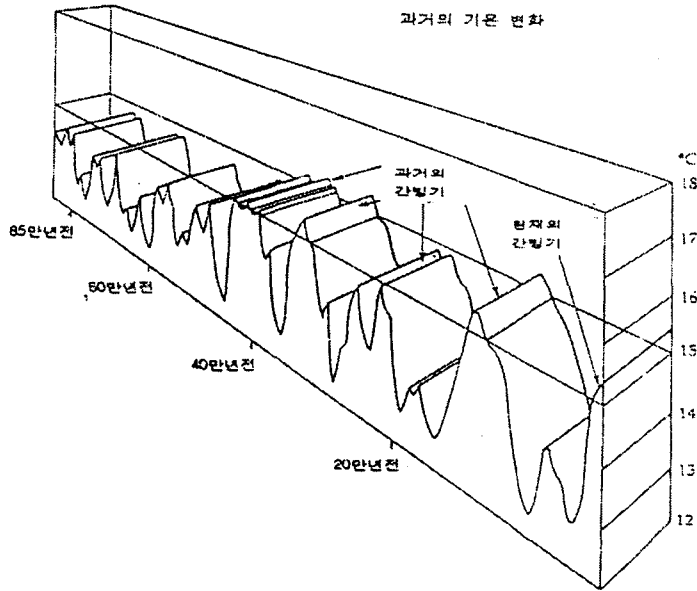


그림 3. 지난 100만년 동안의 지구 평균 기온 변화.

대부분의 과거 기후는 빙하기였으며 몇 번의 온난한 시기가 있었다. 현재도 그 중 하나이다. 그림 4에서 보여주는 바와 같이 천문학적 기후 변화 요인 중 가장 주기가 짧은 것이 흑점 관찰로 알 수 있는 11년 주기의 태양 활동 변화이다. 이 태양 활동의 변화는, 그 주기가 비교적 짧고 이 주기 동안 지구로 들어오는 태양 에너지량의 변화가 0.07%에 불과하기 때문에, 지금 우리가 우려하고 있는 지구 온난화에는 직접적으로 큰 영향을 미친다고는 생각되지 않는다.

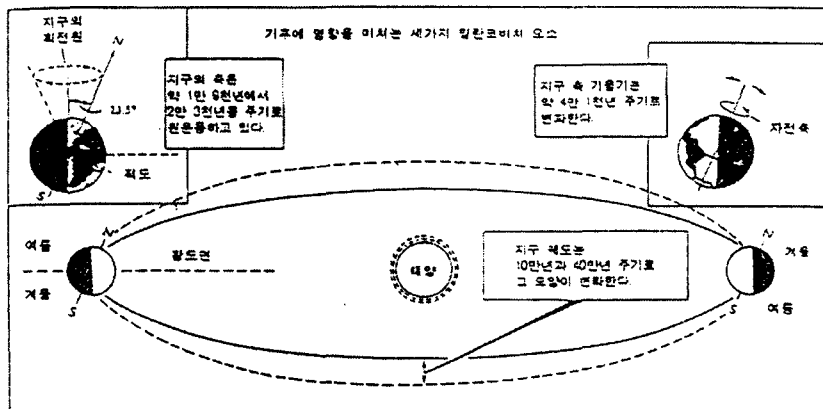


그림 4. 기후 변화를 일으키는 천문학적 요인

다음으로 기후 변화에 관련된 천문학적 요인은 지구 자전축의 변화와 관련된 두개의 원인이다. 첫째는, 지축의 세차 운동으로, 지구의 공전축에 대하여 지축이 19,000~23,000년 주기로 팽이처럼 원을 그리며 회전하는 것이다. 태양 주위를 타원 궤도를 따라 공전하는 지구는 북반구 여름철에 태양에서 가장 멀고, 북반구 겨울철에 가장 가깝다. 그러나 약 11,000년 전에는, 이와는 반대로 북반구 여름철에 가장 가까웠고, 북반구 겨울철에 가장 멀었다.

약 11,000년 전에는 현재와는 반대로 북반구에서 더 많은 태양 에너지가 유입되었다. 따라서 북반구에서 기후의 계절 변화는 지금보다는 훨씬 더 컸고, 이에 따라 아시아 몬순의 강도도 더욱 크게 나타났을 것으로 생각된다.

기후 변화의 요인 중 지구 자전축에 관련된 두 번째 요인은 계절 변화의 주 요인인 지구 공전축에 대한 지축의 기울기가 41,000년 주기로 21.5°에서 24.5°까지 변하는 것이다. 현재의 지축 기울기가 23.5°인 것을 고려할 때, 지축의 기울기가 더 기울어질수록 계절 변화가 지금 보다 더 클 것이며, 지축의 기울기가 작을 때는 계절 변화가 상대적으로 작을 것이다.

마지막 요인은 지구의 공전 궤도 변화이다. 지구의 공전궤도는 약 10만년 주기로 거의 완전한 원에서 타원으로 점차 편평화했다가 원래대로 돌아간다. 이 사이에 변하는 태양과 지구 사이의 거리는 약 1800만km 이상이다. 지구 공전 궤도가 원일 때보다 타원일 때 계절적 기후 변화는 훨씬 더 크게 일어날 것이다.

빙하기와 간빙기의 기후 변화는 어느 하나의 요인에 의하여 일어난다기 보다는 이상의 네 가지 요인들이 서로 복합적으로 작용하고, 또 이에 따른 지구 내부의 변화, 즉 눈 또는 얼음이 덮인 지역의 확장과 수축에 따른 이차적인 기후 변화(알베도 효과), 대기 중 온실기체 함유량의 변화들이 더불어 함께 일어났으리라 알려지고 있다.

나. 온실 기체로 인한 기후변화

그러면 최근에 와서야 지구 온난화가 세계적 관심사가 되고 이유는 어디에 있는 것인가? 그 이유는 온실기체 증가에 의한 지구 온난화가 수천-수만 년의 기간에 걸쳐서 진행되는 변화가 아니라는 점, 인위적인 것일지 모른다는 점, 그 진행방향이 주기적이 아니라는 점, 그리고 그 진행속도가 과거의 대기 중 온실기체

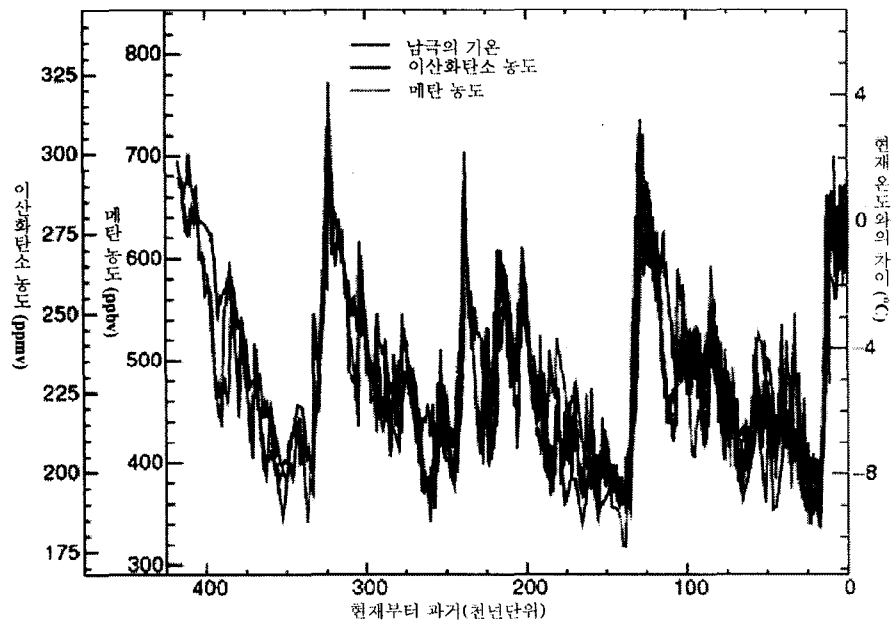


그림 5 과거 40만년간 남극의 기온과 온실기체(CO₂, CH₄) 농도 비교. (IPCC 보고서)

변화보다 상당히 빠르다는 점 등에서(그림 4 참조), 우리 모두에게 경각심을 불러일으키고 있기 때문이다. 대기중의 온실기체는 불과 21세기초에는 그 함유량이 현재의 두 배 이상 될 것이라 추정되고, 또 그 증가가 나날이 가속되고 있는 실정이다.

온실효과를 유발하여 지표 온도를 상승시킬 수 있는 온실기체중에는 탄산가스 이외에도 CH_4 , N_2O , CFCs 등의 대기 미량 기체들(atmospheric trace gases)을 꼽을 수 있다. 이들 대기 미량 기체들에 의한 지구 온난화는 탄산가스에 의한 온난화보다 아직은 심각하지 않다. 그러나 대기중 이들 기체들의 함유량 증가 속도를 볼 때, 이들 대기 미량 기체들에 의한 온난화는 가까운 장래에 탄산가스에 의한 온난화를 능가할 것으로 보고되고 있다.

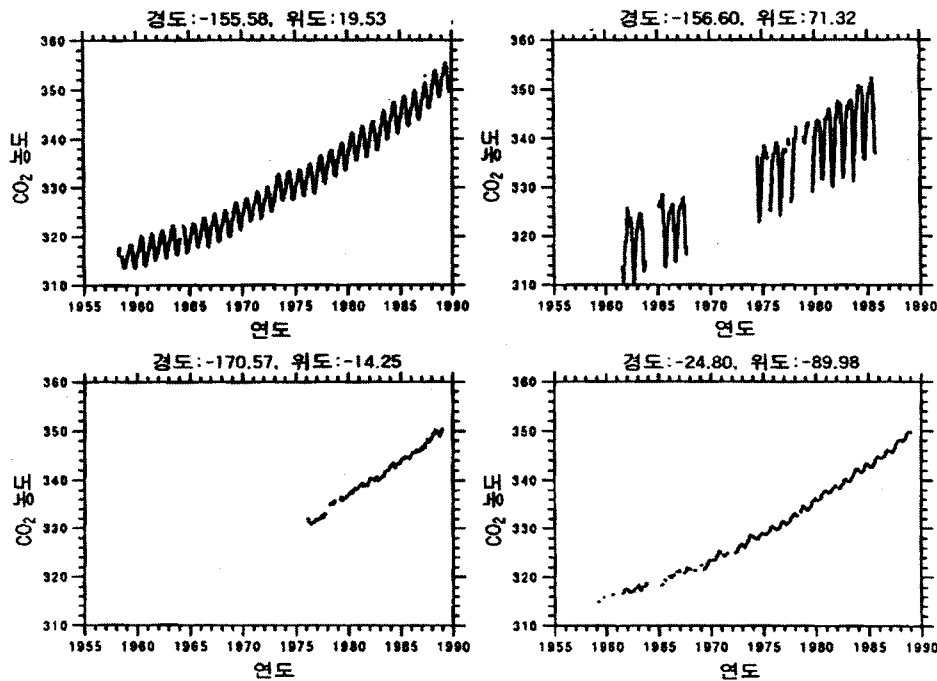


그림 6. 최근 50년간 대기중 이산화탄소 농도 변동

4. 대기 중 CO_2 함유량의 증가 : 그림 6은 북반구와 남반구의 저위도(왼쪽)와 고위도(오른쪽)에서 관측된 값이다. 북반구가 남반구보다 계절 변화가 큰 것은 대부분의 육지가 북반구에 위치하여 식물의 활동의 영향을 많이 받는 반면 남반구는 대부분 바다로 구성되어 식물활동의 계절변화 영향을 적게 받고 있음을 보여준다.

다. 자연 변동성

지구 기후시스템은 외적인 변화요인 이외에도 기후시스템 내적인 요인으로 인한 변화의 범위가 매우 크다. 이러한 자연 변동성 중 가장 널리 알려진 현상으로 엘니뇨-남방진동(ENSO, El Nino-Southern Oscillation)이 있다. 이 ENSO 현상은 기후시스템의 대기와 해양의 상호작용에 의해 발생한다. 적도지방 지표부근에서 부는 편동풍은 적도 태평양에 동쪽으로 흐르는 해류를 발생시킨다. 동쪽으로 흐르는 해류는 장기간에 걸쳐 태양열에 의해 가열되어, 태평양의 동쪽과 서쪽의 해수온도의 차이는 약 $7^{\circ}C$ 가 넘는다. 게다가 태평양의 동쪽 해안에서는 북쪽에서 찬 해류가 흘러 오기 때문에 이러한 온도 차이는 계속 유지된다. 이러한 해수온도의 차이에 의해 상대적으로 온

도가 높은 서태평양에서 강한 대류현상이 발생하고 이 지역은 세계적으로 강수량이 많은 지역에 속한다. 동태평양에서는 해수 온도가 낮으므로 대기가 안정화되어 고기압이 발달하게 되며, 이러한 동고서저 현상은 지표 부근의 편동풍을 강화시키는 역할을 한다. 그러나 만약 적도에서 부는 편동풍이 약해지거나 또는 서풍으로 변하면, 적도 동태평양의 해류가 약해짐에 따라 해수온도가 올라간다. 해수온도가 올라가면, 이에 따라 대류현상이 서태평양에서 중태평양이나 동태평양으로 이동함으로써 계속적으로 편동풍이 약해지는 상태를 유지하게 된다. 엘니뇨현상이 발생하면 전세계적으로 이상기상에 의해 많은 피해가 일어난다. 이와 같이, 기후시스템 내의 복잡한 과정에 의해 기후가 변하고 있다. 그러나 아직까지 이러한 기후변동에 대한 연구는 미흡한 실정이며, 향후 이러한 자연적인 원인에 의한 기후 변동에 대한 불확실성을 줄이는데 노력해야 할 것이다.

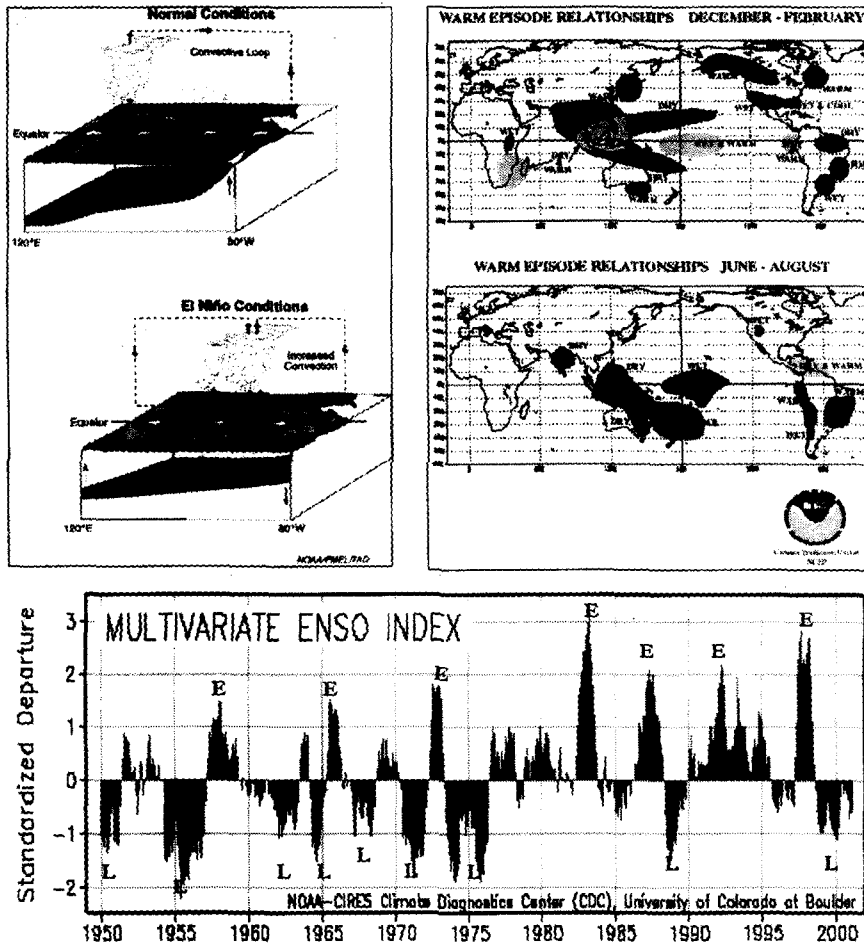


그림 7. 남방진동과 엘니뇨

3. 20세기 기후변화

기후변화는 기온, 강수량, 구름, 바람, 일조량 등 기후요소의 통계적 특성의 변화로 정의할 수 있다. 변화의 특성은 크게 장기변동(추세), 변동, 불연속으로 구분할 수 있으며, 변동은 주기성을 갖거나 반복되는 성질을 가지는 파동과 흔들림으로 구분된다. 기온의 연변화는 주기성을 갖는 파동의 대표적인 예이며, 최근에 나타난 온실기체의 증가경향은 장기경향의 예이다. 기후변화를 객

관적으로 분석하기 위해서 관측자료는 필수적이다. 그러나 근대기상관측은 19세기에 시작되었으며, 전세계를 대표할 수 있는 관측자료는 20세기에나 가능하다. 특히 해양이나 개발되지 않은 지역은 1970년대 위성관측이 본격화되면서 자료가 축적되기 시작하였다. 그러므로, 분석에 사용된 자료는 어느 정도의 관측 및 분석 오차를 포함하고 있다.

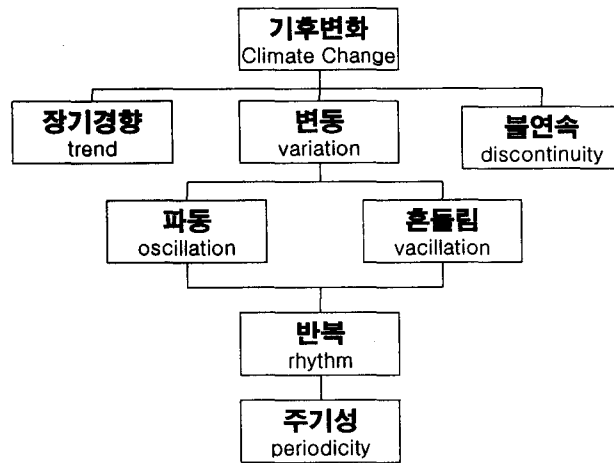


그림 8. 기후변화의 구분.

1) 전지구변화

1861년 이후 지구의 평균기온은 약 0.6°C 상승하였다 (IPCC 3차 보고서). 이러한 기온의 상승은 시간적으로 볼 때 점진적으로 일어난 것이 아니라 두 기간(1910-1945년, 1976년-현재)에 걸쳐 기온 상승이 일어났으며, 다른 기간에는 비교적 비슷한 상태를 유지하였다. 기온의 변화는 시간-공간적으로 변화의 양상이 달라진다. 그러나 대체적으로 북반구, 고위도 육지에서의 상승이 다른 지역에서보다 큰 것으로 나타났다. 이에 따라 지구상에 눈이나 얼음으로 덮인 면적(설빙권)은 줄어들고 있으며, 평균해수면은 약간 상승한 것으로 보고되었다.

강수량의 변화는 기온 변화보다 시간에 따른 변화폭이 큰 특성을 갖는다(그림 10 참조). 아프리카의 사헬지역에서는 강수량이 큰 폭으로 감소하였으며, 기온이 높아진 북반구 고위도 육지에서는 강수량도 증가한 것으로 나타났다. 또한 홍수나 가뭄에 의한 기상재해도 증가하고 있는 것으로 보고되고 있다.

최근 140년간 전구 기온변화

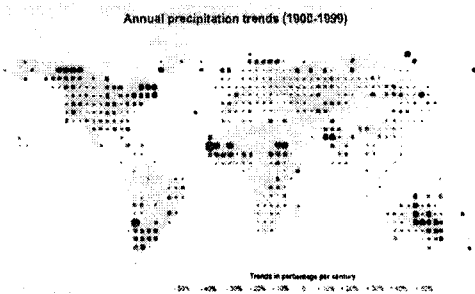
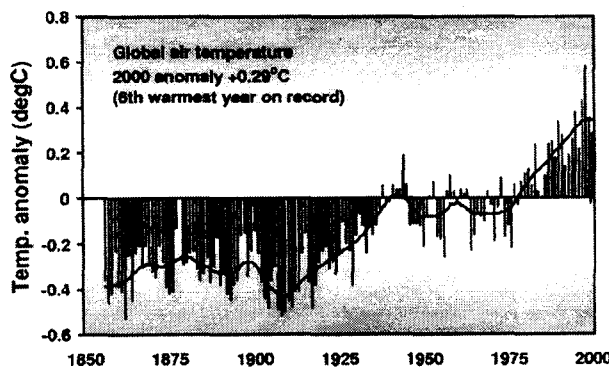


그림 9. 140년간 전지구 연평균기온 변화. 그림 10. 전구 강수량의 변화.

이러한 기후변화의 주요 원인으로 간주되는 온실기체의 농도는 20세기에 증가하고 있다. 이산화탄소는 산업혁명이후(1750년) 최근까지 약 31% 증가하였다. 지난 20년 동안 이산화탄소는 매년 1.5 ppmv/year 비율로 증가하고 있다. 이외에도 메탄, 아산화질소와 같은 미량의 온실기체의 농도도 괄목할만하게 증가하였다. 남극대륙이나 그린란드의 빙하에서 채취한 자료를 보면, 과거의 기온변화와 온실기체 농도변화가 밀접한 관계를 갖는다는 것을 볼 수 있다. 그러므로, 향후 이러한 온실기체 농도 증가가 지구 평균기온의 상승에 영향을 미칠 수 있다는 것을 추론할 수 있다.

2) 우리나라 기후변화의 현황

기후변화에 관한 가장 권위있는 보고서를 발간하고 있는 정부간기후변화패널은 2001년 발간한 3차 보고서에서 전세계 평균 기온이 지난 세기에 0.6℃ 상승하였다고 보고하였다. 산업혁명 이후 석유나 석탄 등 화성연료의 연소로 인한 이산화탄소, 메탄 등 온실기체의 증가에 의한 온실효과가 가장 주요한 원인으로 손꼽히고 있다. 전세계적으로 이산화탄소의 농도는 280 ppm에서 370 ppm으로 약 30% 정도 증가하였다. 우리나라에서는 1990년대부터 이산화탄소의 농도를 측정하고 있는데 이 기간에 매년 1.8 ppm 정도 빠른 속도로 증가하고 있다.

전세계적으로 나타나는 기후변화의 증거는 알프스의 빙하가 녹는 것에서도 찾을 수 있다. 얼마 전에는 아프리카의 킬리만자로의 빙하가 이제는 산꼭대기에서나 볼 수 있으며, 이러한 온난화가 지속된다면 얼마안가 다 녹아버릴 수도 있다는 연구결과가 발표되었다. 킬리만자로의 눈은 아프리카의 물의 저장고로서 중요한 역할을 한다. 겨울에 쌓인 눈이 봄이 되어 녹기 시작하면 물은 계곡을 따라 강물이 되어 흐르고, 이 물은 하류에 사는 사람들과 동식물 모두에게 중요한 자원이 된다. 만약에 킬리만자로의 빙하가 사라진다면, 매우 중대한 위협이 될 것이다.

1904년 이후 우리 나라에서 관측된 기온자료를 분석해보면 평균기온은 1.5℃ 상승하였으며, 최고 기온과 최저 기온의 차인 일교차는 감소하였다. 우리 나라에서 나타나는 온난화 추세는 전지구적인 온난화 추세를 상회하고 있으며, 이러한 현상은 특히 북반구의 온대와 한대 지방에서 가장 크게 나타나서 러시아와 캐나다의 서북부 지방에서 가장 현저하게 나타난다.

20세기에 나타난 기온의 변화를 분석해보자. 우선, 1920년대부터 1990년대까지의 일최저기온과 일최고기온의 특정 임계치의 극값 및 이 기온 극값의 80년 평균 이상 혹은 이하의 기온특이일의 연중 발생빈도를 구하여 그 일차 회귀에 나타난 변화 추세를 분석하였다. 이를 위해, 매년 365일 혹은 366일의 자료를 값을 오름차순 혹은 내림차순으로 배열한 후, 상위 혹은 하위 1st, 5th, 10th percentile에 해당하는 상위 혹은 하위 값(5)의 매년별 기온 극값을 구하고 80년(1920-1999) 평균값을 구하였다. 특히, 5th percentile의 80년 일최고기온의 평균값 이상의 고온 특이일과 일최저기온의 평균값 이하에 해당하는 저온특이일의 발생빈도의 80년간 평균값을 제거한 편차 (anomaly)를 극한 서지수 (Extreme Hot-Cold Index)로 정의하여 각 연대별 여름과 겨울의 기온 특이일 발생의 특징을 비교하였다.

한편, 인간 생활 속의 자연 계절의 변이를 통해서 나타난 생활 기온 지수의 변화 정도를 파악하기 위해 일최고기온과 일최저기온의 특정값을 임계치로 하는 각 생활 기온 지수의 발생빈도의 일차 추세를 분석하였다. 특히, 일최저기온의 특정 임계치를 이용한 서릿날 (Frost Day), 냉방일 (Cooling Day), 열대야 (Tropical Night) 및 일최고기온의 특정 임계치를 이용한 난방일 (Heating Day), 참겨울날 (Ice Day)의 발생빈도를 분석하였다. 냉방일과 난방일은 기존의 냉방도일 (Cooling Degree Day)과 난방도일 (Heating Degree Day)에서 사용되는 일평균기온 18℃를 일최저기온과 일최고기온에 적용하여 새롭게 정의하여 사용하였다.

지난 20세기 동안 우리나라의 중부지방 강릉, 서울, 인천 및 남부지방 대구, 전주, 부산의 연중

상위 혹은 하위 1st, 5th, 10th percentile에 해당하는 일최고기온의 고온 극값의 80년 평균은 32℃ 이상, 30℃ 이상, 28℃ 이상, 일최저기온의 저온 극값은 -7℃ 이하, -4℃ 이하, -1℃ 이하로 나타났다 (표 2). 특히 대구의 1st, 5th, 10th percentile 일최고기온 고온특이값은 각각 35.8℃, 33.5℃, 31.4℃로 6개 지역 중에서 가장 높게 나타났으며, 서울의 1st, 5th, 10th percentile 일최저기온 저온 특이값은 각각 714.6℃, -10.7℃, -7.5℃로 가장 낮게 나타났다. 80년간 (1920-1999)의 우리나라 중부지방 및 남부지방의 일최고기온과 일최저기온 평균 극값은 여름철보다는 겨울철에, 특히 겨울철 주간보다는 겨울철 야간에 그 지역적 편차가 심하게 나타났다. 가령, 부산과 서울의 5th percentile에 해당하는 일최고기온 및 일최저기온의 저온 극값의 지역적 차는 약 6.6℃로 대구와 인천의 일최고기온 고온 극값의 지역차 3.3℃ 및 부산과 강릉의 일최저기온 고온 극값의 지역차 1.3℃에 비하여 높게 나타났다. 이러한 지역적 편차는 서울의 경우 한랭한 북서 계절풍의 영향을 직접 받지만, 부산의 경우에는 태백산맥과 소백산맥 등의 지형에 의한 차가운 기류 확장의 완화 효과 및 남동해안을 따라 흐르는 난류의 영향에 따라 기온이 덜 하강하기 때문이다. 반면에 여름철에는 남서풍 혹은 남풍 계열의 고온 다습한 기단이 한반도 전역에 걸쳐 자리잡기 때문에 한랭다습한 오호츠크 고기압의 영향을 받는 동북해안 지역을 제외하면 지역적 편차가 적게 나타난다.

한편, 지난 20세기 80년동안 (1920-1999) 겨울철 주야간에 나타나는 각 임계치별 일최고기온 및 일최저기온의 저온 극값은 뚜렷한 상승 추세를 나타내었다 (그림 2). 강릉을 비롯한 우리나라 6개 관측소에서 5th percentile 이하의 일최저기온 저온과 일최고기온의 저온 극값 모두 2℃/100year 이상의 상승추세를 보였다. 특징적으로 도시화가 가장 많이 진행된 서울의 경우에는 무려 7℃/100year의 높은 상승률을 나타내었지만, 대도시라 하더라도 해양성 기후의 특성을 보이는 부산의 경우에는 2℃/100year로 작은 상승률을 나타내었다. 반면, 1990년대에 일평균기온은 상승하는 온난화 경향을 보였지만, 20세기 동안의 여름철 일최고기온 고온은 중부 지역과 남부 일부지역에서 오히려 감소하는 추세를 보였다. 일최고기온의 상위 5th percentile에 해당하는 고온 극값은 중부지방의 서울에서는 71.8℃/100year 감소율을, 남부지방의 부산에서는 70.6℃/100year 감소율을 보였다. 일최저기온의 고온 극값은 미약하게 상승하는 경향을 보였으나, 통계적 유의성은 낮게 나타났다. 우리나라의 겨울철 주간 일최고기온 저온 극값의 변화율은 1st percentile > 5th percentile > 10th percentile의 순서로 나타났지만, 겨울철 야간 일최저기온의 저온 변화율은 5th percentile > 1st percentile > 10th percentile의 순서로 차이를 보였다.

20세기 동안 겨울철 주야간 및 여름철 야간의 특이 기온 극값 상승에 의한 온난화 현상은 각 임계치별 80년 평균 이상 혹은 이하 기온특이일 발생빈도에서 더욱 뚜렷하게 나타났다 (표 3). 80년간 1st, 5th, 10th percentile 이상 혹은 이하에 해당하는 기온 특이일 발생빈도의 일차 추세를 살펴 보면, 겨울철 추위와 관련된 일최고기온 저온특이일과 일최저기온의 저온특이일은 현저하게 줄어들었고, 여름철 야간의 일최저기온의 고온특이일의 발생빈도는 증가하였다. 이러한 경향은 1st percentile에서 5th percentile, 10th percentile로 임계치가 변해감에 따라 일최고기온의 고온특이일과 일최저기온의 고온특이일의 일차 추세 변화 경향이 유사하게 나타났지만, 일최고기온의 저온특이일 및 일최저기온의 저온특이일은 더욱 강한 감소율을 나타내었다. 이러한 변화율의 차이는 겨울철 혹한일과 관련하여 매우 강한 혹한일, 강한 혹한일, 약한 혹한일로 구분하면, 주야간 모두 매우 강한 혹한일 보다는 약한 혹한일이 훨씬 더 뚜렷하게 줄어들고 있다는 것을 가리킨다. 이러한 기온 특이일 발생빈도 일차 추세에서도 지역적 차이는 뚜렷하여, 5th percentile 이하의 일최저기온 저온 특이일은 서울에서 -33days/100years로 6개 관측 지점 중 감소율이 가장 크게 나타났고, 부산에서 -11days/100years로 가장 작게 나타났다. 한편, 5th percentile 이상의 일최고기온 고온특이일은 서울이 -18days/100years로 감소하였지만, 대구는 +3days/100years의 상승률을 보이기도 하였다. 특히 중

부지방의 여름철 일최고기온 고온특이일의 감소 경향은 최광용 외 (2000)7) 에서 밝혀진 결과와 일치하고 있다.

구체적으로 5th percentile 평균 극값 이하의 일최고기온 저온특이일과 일최저기온 저온특이일 발생빈도의 시계열을 살펴보면, 개략적으로 1920-1959년, 1960-1984년, 1985-1999년 세 시기에 걸쳐 단계적으로 감소하였음을 알 수 있다 (그림 3) 특히, 연구기간 중 일최고기온과 일최저기온 저온 특이일은 1990년대에 가장 뚜렷하게 감소하여 20세기 후반에 겨울철의 혹한일이 매우 적게 발생하였음을 알 수 있다. 또한 일최고기온의 고온특이일의 경우에는 1930년대 중반부터 1940년대 중반까지 높은 발생빈도를 보이다가 1990년에 초반부터 다시 높은 발생 빈도를 보였으나, 이와는 달리 일최저기온의 고온특이일은 1960년대에 높은 발생빈도를 보이다가 1990년대에 다시 높은 발생빈도를 보이는 차이를 나타내었다.

한편, 5th percentile 이상의 일최고기온의 고온특이일 (혹서일)과 이하의 일최저기온의 저온 특이일 (혹한일)의 80년 평균 발생빈도 편차 (Anomaly)를 극한서지수 (Extreme Cold-Hot Index)로 명명하여 시기별 무덥고, 추운 정도를 분석하였다 (그림 4). 5년 이동평균한 극한서 지수의 시계열도를 분석하여 연평균, 혹은 월평균기온의 분석만으로 찾아 낼 수 없는 여름철 혹서일과 겨울철 혹한일의 발생 특징을 시기별로 비교하였다. 그 결과, 한반도 남부지방에서는 1930년대 중반부터 1940년대 중반 사이에는 극한지수와 극서지수가 모두 높게 나타나 겨울철에도 혹한일의 발생이 많이 발생하였고, 여름철에도 혹서일이 많이 발생하였다. 이와는 대조적으로 1990년대에는 극한지수는 낮았고, 극서지수는 높아져 겨울철에는 혹한일이 덜 발생하였고, 여름철에는 혹서일이 더 많이 발생하는 특징을 나타내었다. 이러한 현상은 남부 지방에만 국한된 것이 아니라 중부지역에서도 동일한 경향을 보여 한반도 전체에 걸쳐 나타난 특이 기온 변화의 보편적인 경향임을 알 수 있다. 특히, 남부 지역은 중부 지역에 비하여 매년별 다소 극한서 지수의 변화 진폭이 다소 크게 나타나고 있다.

한편, 생활 기온 지수와 관련하여 일최저기온 18℃이상의 냉방일 (Cooling day)은 80년 연평균 발생빈도가 강릉이 68일로 가장 낮고, 부산이 92일로 가장 높았다. 반면, 일최고기온 18℃이하의 난방일 (Heating day)은 부산이 8일로 가장 적었고, 서울이 43일로 가장 높았다. 일최저기온 0℃이하의 서릿날 (Frost day)은 전주가 53일로 가장 낮았고, 서울이 108일로 가장 높았으며, 일최고기온 0℃이하의 참겨울날 (Ice day)도 전주가 3일로 가장 낮고, 서울이 29일로 가장 높았다. 한편 일최저기온 25℃이상의 열대야 (Tropical night)는 일반적으로 전국에 걸쳐 3-8일의 발생빈도를 보였다 (표 5).

이러한 생활 기온 지수도 자연계절의 전이와 더불어 겨울철 혹한과 관련된 지수의 발생빈도는 줄어들고, 여름철 혹서와 관련된 지수는 증가하는 경향을 보였다 (그림 6). 일최저기온 18℃이상의 냉방일은 약 20일/100year의 비율로 증가하는 추세를 보였고, 일최고기온 18℃이하의 난방일은 약 15일/100year의 비율로 감소하는 추세를 보였다. 또한 여름철 야간의 열대야 현상도 약 5일/100year의 비율로 미약하게 증가하는 추세를 보인 반면, 일최고기온 0℃미만의 서릿날은 약 30일/100year의 비율로 뚜렷하게 감소하였고, 최저기온 0℃이하의 참겨울날도 전주와 강릉을 제외하면 거의 15일/100year의 비율로 감소하였다.

기온의 상승으로 겨울이 짧아져서 개나리 피는 시기가 빨라지는 것도 관측되었다. 특히 지난 20년간 온난화 경향은 뚜렷하게 나타난다. 온난화의 영향으로 봄꽃의 개화가 빨라졌다는 연구결과는 우리나라 뿐만 아니라 영국, 미국, 일본 등 세계 각지에서 보고되었다. 또한 겨울철 스포츠로 각광을 받았던 아이스스케이팅은 이제는 실내에서나 즐길 수 있는 스포츠가 되었으며, 아이들은 인라인 스케이팅을 즐긴다. 미래에도 온난화가 지속될 것으로 전망하고 있다. 아마도 50년 후에는

제주도에서 나타나는 식물이나 곤충이 우리 주변에서도 볼 수 있을 지도 모른다.

첫째, 20세기 동안 점차 겨울철이 온난화되어 일최고기온의 저온극값 및 일최저기온의 저온극값이 상승하여 일최고기온 저온 특이일 및 일최저기온의 저온특이일이 줄어들었다. 반면, 여름철 일최고기온 고온극값 및 고온 특이일은 모두 감소하는 경향을 나타냈지만 일최저기온 고온 극값 및 고온특이일은 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 기온 온난화 현상으로 인해 자연계절의 전이가 발생한 결과, 생활 기온 지수 중 냉방일은 증가, 난방일은 감소하였으며, 서릿날과 참겨울날은 감소하는 경향을 나타내었다.

이러한 결과는, 의식주 생활과 관련된 보건위생, 생산활동, 에너지 수급 등 다양한 영역에서 기후 변화에 대응하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 차후에는 전 지구적인 규모의 기온 온난화의 패턴과 비교하는 것은 물론, 인구가 많이 밀집한 도시별 소규모 스케일의 인위적인 토지이용 변화, 에너지의 사용 패턴의 변화가 기후 극값의 변화에 어떤 Feedback 효과를 가져오는지에 관한 분석을 해 나가야 할 것이다. 이러한 자연적 기후 변동과 인간 활동의 상호 작용에 의한 기후 변화가 실제 생활에 미치는 영향을 단적으로 보여 줄 수 있는 다양한 생활 기온 지수들을 개발해 나가야 할 필요성이 있다.

20세기 한반도 기후변화는 장기간 관측 기록이 있는 관측지점을 위주로 분석하였다. Figure 1은 가장 관측기간이 긴 서울, 강릉, 인천, 대구, 부산, 목포의 기온을 평균하여 10년 간격으로 평균한 것이다. 지난 90년간 우리 나라에서 평균기온은 지속적으로 상승하였음을 알 수 있다. 특히 1990년대에는 이전과 비교하여 기온 상승폭이 가장 크다. 20세기에 우리 나라에서 기온은 약 1.5°C 상승하였으며, 20-30%는 도시화 효과에 의한 것으로 추정된다 (Choi et al., 2003).

일최고기온과 일최저기온에 나타난 극값을 분석한 결과 겨울 저온일의 발생빈도가 현격하게 줄어들고 있는 반면, 여름 고온일이 증가 경향이다. 강릉을 비롯한 남한 6개 관측소의 겨울철 야간과 주간 특징을 반영하는 5 번째 퍼센타일 이하의 일최저기온 저온과 일최고기온의 저온은 연구기간 동안 2°C/100year이상의 상승추세를 나타내었다. 특히, 도시화가 가장 많이 진행된 서울의 경우에는 무려 7°C/100year의 높은 상승률을 나타내었고, 대도시라 하더라도 해양성 기후의 특성을 보이는 부산의 경우에는 대조적으로 2.1°C/100year로 낮은 상승률을 나타냈다. 특징적으로, 1990년대에는 온난화 경향에 의해 일평균기온은 상승하였지만, 여름철 주간의 각 퍼센타일에 해당하는 일최고기온 고온은 중부 지역과 남부 일부지역에서 오히려 감소하는 추세를 보였다. 이것은 최광용 외 (2000)의 연구에서 밝힌 지난 20세기 동안 한반도 중부 지방의 연평균 일최고기온과 일정 임계치 이상의 고온특이일 발생빈도가 감소하였다는 결과와 일치한다. 일최저기온의 고온은 미약하게 상승하는 경향을 보였으나, 통계적 유의성은 낮게 나타났다.

20세기 후반 중 특히 1990년대에는 20세기 초반에 비하여 여름철 폭서일은 많이 발생하고, 겨울철 폭한일은 뚜렷하게 덜 발생하였다. 20세기 초반을 포함한 80년 (1920-1999)보다 20세기 후반 42년간 (1952-1999)에 모든 기온 극값 및 기온특이일의 발생빈도의 일차선의 변화 추세가 보다 뚜렷하게 가시화 되었다. 이러한 기온 극값 변화에 따라 결과적으로 20세기 후반에 뚜렷한 자연 계절의 전이를 가져와 겨울철 기간은 줄어들고 여름철, 봄철 기간은 늘어났으며, 서리일과 난방일의 감소 및 냉방일 증가 등 다양한 생활 기온 지수의 변화를 초래하였다.

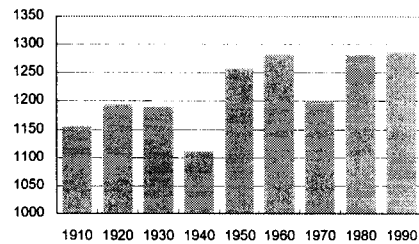


Fig. 12. Time series of 10-year mean precipitation.

20세기 관측자료에 따른 10년 평균강수량의 변화는 Fig. 3과 같다. 10년 평균강수량은 장기간 증가하는 경향이 나타나지만, 1910년대, 1940년대, 1970년대는 강수량이 다른 기간보다 비교적 적은 건조기가 나타난다(Fig. 3).

결측이 없는 한반도 남부지방의 자료를 이용하여 강수일수, 강수량에 나타난 변화를 살펴보았다. Figure 4에서 a는 연강수일수(PD), b는 연강수량(TD)를 나타낸다. 연강수일수는 감소하였으나 연강수량은 증가하여 결과적으로 연강수량을 연강수일수로 나눈 강수강도(PI)가 증가하였다(Fig. 4 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). 특히 일강수량이 50 mm 이상의 호우일수는 과거에 비하여 최근에 22-25% 증가하였다.

이러한 온난화의 원인으로 대기 중 온실기체의 농도 증가가 지적되고 있다(Houghton et al., 2001). 전세계적으로 이산화탄소의 농도는 비교적 균질하며, 산업혁명 전 280 ppmv에서 20세기 말에는 370 ppmv로 약 30% 증가하였다. 우리나라의 대표적 배경대기 지역인 제주도 고산에서 최근 10년간의 대기 중 CO₂ 농도 변화를 분석한 결과 1991년에 357.8 ppmv를 기록한 이후 2000년도에 373.6 ppmv에 이르기까지 매년 약 1.6 ppmv/yr의 증가율을 보이며 지속적으로 증가하는 추세를 보였다.

3. 기후변화 예측

1) 기후 모델

기후 변화 예측을 하는 데는 통계적인 방법과 물리적인 방법이 있다. 그러나 통계적인 방법으로는 지구 평균 기온의 변화는 추측할 수 있을지 모르지만 우리가 요구하는 지역별 기후, 특히 강수량과 지표면 수분량, 해수면 변화 등을 산출하기는 대단히 어려운 일이다. 또 통계적 방법은 주어진 기록 자료에 의존한다. 현재 우리가 갖고 있는 관측 자료는 몇몇 지방의 것을 제외하고는 지구적으로 지난 100여년에 불과하다. 물론, 지질학적 또는 고생물학적 자료는 이보다 훨씬 이전의 자료를 제공할 수 있다. 그러나 이러한 자료들은 우리가 현재 직면한 기후 문제에 직접 이용되기

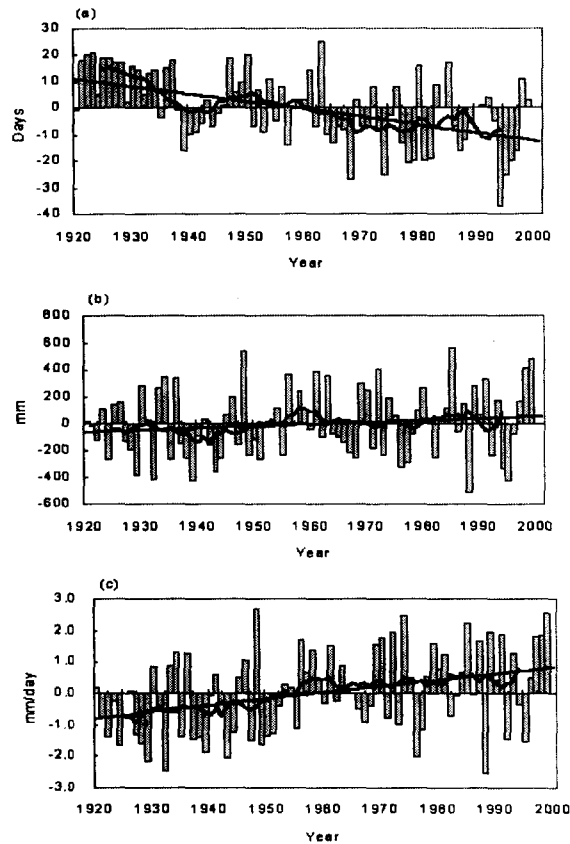


Fig. 13. The time series of annual anomalies for (a) PD, (b) TP and (c) IP in the southern region of Korea, 1920-1999. PD: precipitation days, TP: total precipitation, and IP: precipitation intensity. The anomalies are calculated relative to 1920-1999 mean. Least-square trend lines are overlain and bold curves are 11-year moving average.

에는 정밀도 면에서 부적합하다. 따라서 우리는 컴퓨터를 이용한 물리적 수치 모형만을 이야기하고자 한다.

가. 기후모델의 종류

기후변화 예측에 이용되는 수치 모형은 크게 에너지 평형 모형(EBM, energy balance model), 복사-대류 모형(RCM, radiative-convective model), 그리고 일반 대순환 모형(GCM, general circulation model)의 세 종류로 분류할 수 있다. 먼저 에너지 평형 모형은 태양에서 들어 오는 에너지량과 외계로 방출되는 지표면 온도의 4승에 비례하는 지구 장파 에너지량을 이용하여 어떤 기후인자의 변화에 대한 - 예를 들면 태양 활동의 변화, 흑성 반사율 변화, 온실 기체에 의한 대기의 방출력 변화 등 - 새로운 평형 기후의 지표면 온도를 계산한다. 이 에너지 평형 모형은 비교적 간단하며, 그 계산도 값싸게 할 수 있는 장점을 가지고는 있으나, 오직 전지구 평균 지표면 기온에 대하여만 정보를 제공할 뿐, 중요한 기후 요소인 바람, 강수량, 구름 등의 지역적 특성을 설명하여 주지는 못한다.

두 번째는 복사-대류 모형이다. 이 모형은 일차원적 모형으로 기후 인자들의 변화에 대한 지표면 온도뿐만 아니라 대기의 연직 온도 분포 변화를 예측할 수 있다. 그러나 앞의 에너지 평형 모형과 마찬가지로, 전지구 평균 기온 또는 특정한 지역에서의 기온 변화만 예측될 뿐 구름이나 강수 등의 순환에 대해서는 아무런 정보도 제공할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

마지막으로, 앞에서의 결점들을 보완할 수 있는 것이 일반 대순환 모형(GCM)이다. 일반 대순환 모형에서는 3차원적 대기 운동을 고려하고, 대기 중에서 일어나고 있는 구름, 강수, 복사, 해양, 해빙, 지표면 온도 및 수분변화 과정 등을 모수화하여 포함하고 있다. 따라서, 이 일반 대순환 모형은 앞에서 언급한 에너지 평형 모형 또는 복사-대류 모형보다 상대적으로 인정될 만한 자료들을 생산한다. 이와 같이 일반대순환 모형(GCM)에는 기권을 비롯한, 수권, 설빙권, 생물권, 지권의 많은 기후인자들을 포함하고 있는 까닭에 전구 기후 모형(GCM, global climate model)이라 불리기도 한다. 그러나 일반 대순환 모형은 기후와 관련된 자연계의 모든 물리적 과정을 다 포함할 수는 없다. 현재 컴퓨터 능력으로 소화하기 위해서는 전 지구면을 적당한 크기(예를 들면, 위도 $4^{\circ} \times$ 경도 5°)로 나누고 또 대기층도 적당히(2~40개층) 나누어야만 한다. 이에 따라 각 일반 대순환 모형은 제각기 독특한 방법으로 규모가 그 격자상자보다 작은 물리적 과정들(예, 구름, 난류, 강수, 복사 등)을 모수화를 통하여 포함시키고 있다. 일반 대순환 모형의 성공 여부가 이들 모수화 과정들에 의하여 결정되는 경우가 많다.

나. 기후모델에 의한 미래기후 예측

현재 많은 일반 대순환 모형들이 CO₂ 배증에 의한 지구 온난화 문제를 예측하는 데 이용되어 왔다. 그 결과로 CO₂ 배증에 의한 전 지구 지표면 평균 기온 상승은 약 2°C 에서 5°C 정도의 온난화를 예측되고 있다 (그림 5 참조). 이 정도 수치의 온난화로는 CO₂ 증가로 인한 기후 변화가 심각하게 보이지 않을 수도 있다. 그러나 그림 11에서 제시된 바와 같이 지난 수십만년 동안의 빙하기와 간빙기 사이의 전지구 지표면 기온의 차이가 3~4°C에 불과하다는 것을 상기할 때, 이 CO₂ 배증에 의한 기온 상승은 엄청난 것으로 받아들일 수 있다. 그림 5. 대기 대순환 모형에 의하여 예측된 CO₂ 배증에

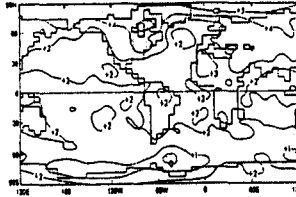
따른 지표면 기온 변화 (IPCC '92에서 인용).

일반 대순환 모형에 의한 지역 기후 예측의 문제점은 앞에서 지적된 바와 같이 일반 대순환

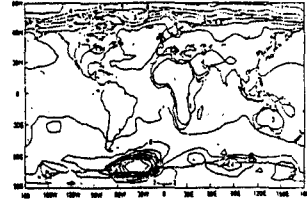
모형들 간의 차이점을 보이는 것 외에도, 실제 관측된 값들과 일치하지 않는 점들도 있다. 우리는 일반 대순환 모형들과 실제 기후와의 차이점을 다음 두 가지 요인에서 찾아 볼 수 있다.

첫째, 실제 기후에서는 물리적인 요소들 외에도 자연적 변동성이 있다. 다시 말하자면 외부적 요건이 변하지 않더라도 기후는 정체되어 있지 않고 불규칙적으로 어떤 평형점 주위를 맴 돌고 있다. 이 중에는 주기가 비교적 짧아서 몇 십년 동안의 관측기간 동안 여러 번 반복하여 쉽게 그 영향을 배제할 수 있는 것 외에도, 그 주기가 매우 길어서 한정된 기간 동안

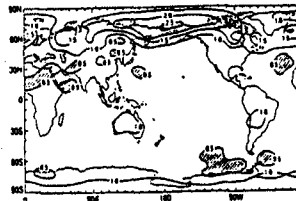
(a) 미국 기상청 지구물리 유체역학 연구소 모형 (GFDL GCM)



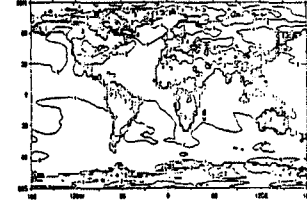
(b) 독일 막스 플랑크 연구소 모형 (MPI GCM)



(c) 미국 대기과학 연구소 모형 (NCAR GCM)



(d) 영국 기상국 모형 (UKMO GCM)



물리적 기후 변화와 서로 상쇄되거나 또는 과장되게 하는 것도 있다. 따라서 CO₂ 증가에 의한 기후 변화와는 달리, 실제 관측된 기후는 이 기후의 자연적 변동성에 의하여 온실 기체들에 의한 온난화를 왜곡되게 나타날 수 있다.

둘째, 일반 대순환 모형의 모수화가 실제 자세한 기후를 묘사하기에 충분하지 못하다. 현재 일반 대순환 모형의 모수화에는 기후에 영향을 미치는 물리적 과정의 중요성과 계산력을 고려하여 선정되었다. 그러나 우리는 아직도 기후에 상당한 영향을 미칠 수 있는 많은 물리적 과정과 다른 과정들 사이의 복합적 상호 작용에 대하여 충분히 이해하지 못하고 있다. 또는 이해하고 있더라도 컴퓨터 성능의 제약 때문에 이런 물리적 과정들이 무시되거나, 미흡하게 모수화되고 있다.

많은 기후 학자들은 실제 관측 기후와 모형 기후의 차이를 첫 번째 원인보다는 두 번째 원인에 더 큰 비중을 두고 있으며, 모형 모수화 개선을 통한 기후 모형의 신뢰도 향상을 위하여 노력하고 있다.

다. 앞으로의 과제

현재의 일반 대순환 모형에 의한 기후 변화 예측의 신뢰도는 기후계를 구성하고 있는 기관, 수권, 설빙권, 생물권 및 지권의 5개 영역 속의 중요한 물리적 과정들을 충분히 반영하지 못한 점과 현재의 컴퓨터 성능 때문에 다소 제한적이다. 기후 모형의 신뢰도를 높이기 위해서는 각 영역들간의 상호작용이 충분히 모형 속에서 반영되어야 한다. 이를 위한 가장 중요한 분야로서 구름 과정, 기후에 대한 해양과 식생의 역할, 그리고 컴퓨터의 계산 능력 향상을 꼽을 수 있다. 이상 열거한 모형 개선을 통하여 우리는 보다 더 신빙성이 있고 상세한 기후 변화 예측을 산출하리라 믿는다.

4. 미래의 기후변화

미래의 기후변화를 전망하기 위해서 대기, 해양, 지표, 설빙, 식생 등 지구기후시스템과 각 요소들 사이의 상호작용을 모의할 수 있는 기후모형이 사용된다. 기상연구소는 독일 막스플랑크 기상연구소에서 개발된 기후변화모형(ECHAM4/HOPE, ECHO-G)을 도입하여 장기간(1860-2100년, 240년) 시나리오 모의실험을 수행하였다. 도입된 ECHO-G 모델로 100년간 규준실험을 수행하여, 기온, 강수량, 해면기압 등의 연평균, 계절변화, 변동성 등이 기존의 1000년 규준실험 결과와 비교하

여, 시나리오 산출시스템이 오류없이 구축되었는지 검증하였다. IPCC 배출시나리오(SRES) 중 A2와 B2 시나리오에 따른 온실기체 농도 시나리오 자료를 수집하고, 이를 ECHO-G에 입력하여 기후변화 장기 시나리오 모의실험을 수행하였다. 온실기체 증가 시나리오에는 주요 온실기체인 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)를 비롯한 총 19종의 온실기체가 포함되었으며, A2 시나리오의 온실기체 급격한 증가를 보이는 반면, B2 시나리오는 완만한 증가를 나타낸다.

A2[B2] 시나리오 모의결과 CO₂ 농도가 820 ppmv[610 ppmv]인 2100년의 지구 기온은 현재보다 4.6°C[3.0°C] 정도 증가할 것으로 나타났으며, 동아시아 지역(80°E-180°, 20°N-60°N)의 경우 지구평균보다 높은 6.5°C[4.5°C]의 증가 경향을 보여주었다(Fig. 5). 2100년의 지구평균 강수량은 약 4.4% [2.8%] 증가할 것으로 모의되었으며, 동아시아의 경우는 10.5% [6.0%]로 매우 높게 나타났다. 또한 외국의 다양한 기후모델을 이용한 다양한 기후변화 시나리오 모의결과를 사용하여 2020년대와 2050년대의 동아시아 지역의 기온, 강수량의 추세변화를 분석한 결과 전지구 평균보다 큰 증가 경향을 보여주었다. 그러나, 모델간 변동성(특히 강수량)은 전지구보다 크게 나타나 불확실성이 증가하였다.

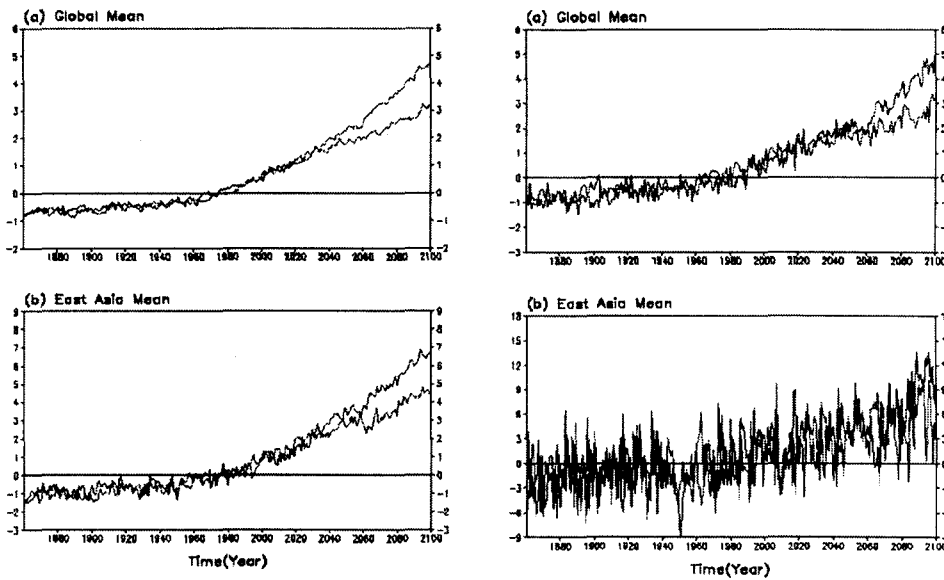


Fig. 15. Projections of long-term climate change based on IPCC SRES A2 (red) and B2 (blue) scenario using ECHO-G model: (a) global temperature change, (b) East Asia temperature change, (c) global precipitation change, and (d) East Asia precipitation change.

4. 결론 및 계획

기상청의 관측자료를 이용하여 20세기 우리나라의 기후변화를 분석하였다. 평균기온은 1.5°C 이상 상승하였으며, 특히 겨울철 최저기온이 가장 크게 상승하였다. 계절별로 볼 때 겨울은 온난화가 가장 큰 폭으로 진행되었다. 이러한 온난화로 인하여 자연 계절의 변화가 나타나서, 1920년대에 비하여 겨울은 1990년대에 한 달 정도 짧아졌으며, 여름과 봄은 길어졌다.

강수량은 장기적으로 증가하는 추세가 나타났으며, 특히 최근 20년은 강수량은 증가하였으나 강수일수가 감소함에 따라 강수강도가 증가하는 경향이 뚜렷하다. 이러한 경향은 여름철에 가장

현저하게 나타났으며, 일강수량 50 mm 이상의 호우의 발생빈도도 증가하였다. 향후 20세기에 나타난 기후변화에 대한 심층적인 분석을 수행할 예정이다.

IPCC의 온실기체 배출 시나리오를 적용한 ECHO-G 모델의 240년간 장기 시나리오 모의실험을 수행한 결과, 온실기체 농도가 급격히 증가하는 A2 시나리오에 의한 기후변화는 완만히 증가하는 B2 시나리오에 비하여 기온과 강수량이 더 크게 증가하였으며, 전구에 비하여 동아시아 지역의 변화가 더 큰 것으로 전망되었다. 동아시아는 북서지역에서 기온이 가장 높게 상승하고, 강수량은 유라시아 대륙 연안에서 변화가 클 것으로 전망되었다.

이러한 전구기후모델 시나리오 자료를 우리 나라와 같이 좁은 지역에 적용하는 것은 여러 가지 문제점이 있다. 우리 나라는 지형이 복잡하고 남북으로 길게 위치하고 있어서 지역에 따라 기후 특성이 달리 나타난다. 그러므로 기후변화 시나리오를 우리 나라에 활용하기 위해서 고해상도 기후변화모델을 이용하거나 제한지역기후모델(RCM)을 이용하여 자료의 해상도를 개선하는 연구가 현재 진행 중이다. RCM에 관해서 Giorgi (1990) 등이 1990년대 초기에 제안하였으며, 다양하게 활용될 수 있다. 현재 이 연구에서 사용한 기후변화모델은 약 400 km 해상도를 가지고 있으나 지역기후모델은 해상도가 약 30 km로 고해상도 자료를 생산할 수 있다. 현재 30년간 고해상도 자료가 산출되었으며, RCM의 bias, 관측기후와 비교분석, 모델의 계통오차 수정기법 등 고해상도 자료에 대한 검증이 수행 중이다(Oh et al., 2002). 미래 기후변화에 의한 영향을 평가하기 위해서 이러한 고해상도의 자료는 필수적이다. 앞으로 이러한 고해상도 자료를 이용하여 우리나라의 사회경제적 경쟁력 및 안정성을 도모하기 위해서 기후변화의 영향 평가가 추진되어야 할 것이다.