특별기고

地球 온난화와 그 예측

오 재 호
〈연세대교수/천문대기과학과〉

서 론

기후계는 기권(氣圈)뿐만 아니라, 수권(水圈), 빙권(冰圈), 생권(生圈)과 지권(地圈)이 복합적 상호작용에 의하여 유지되고 있다. 이런 기후계는 이를 구성하고 있는 각 영역속의 기후인자들의 자연적 변화에 따라, 시·공간에 걸쳐 지속적인 변화를 거듭하여 왔다. 빙하기에는 빙하와 눈이 지구의 많은 부분을 차지하였고, 간빙기에는 열대우림이 지금보다는 상당히 광범위하게 고위도까지 존재했었다.

우리 인류의 문명도 이와 같은 기후변화의 영향하에서 발달과 쇠퇴를 반복하였다. 세계문명은 수자원이 풍부하여 기후변화의 영향을 상대적으로 적게 받는 큰 강주위에서 시작되었음은 잘 알려진 사실이다. 근래에 와서 전구적인 기상관측은 엘리뇨현상에 의한, 즉 태평양상의 해수면 온도 변화가 적도지방뿐만 아니라 적도에서 먼 상당히 많은 지역의 기온과 강수량에 영향을 미치는 사실도 발견되었다. 특히, 세계경제의 주요 부문인 농업은 적기 적소에 일어나는 기온변화와 강수에 크게 의존한다. 때에 맞지 않거나 과다 또는 과소한 강수는 오히려 해가 된다. 이 엘리뇨현상의 원인은 아직 잘 알려져 있지 않으나, 다행스럽게도 아직까지 이에 따른 기후변화는 우리 인류의 경제적, 산업적 구조가 흡수할 수 있는 비교적 짧은 1~2년 기간에 나타났다가 정상 기후상태로 되돌아간다. 이 짧은 기후변동은 우리 인류의 문명자체에 위협은 되고 있지 않으나, 지역적으로는 많은 경제적 타격을 줄 때도 있다.

최근에 와서 기후문제와 관련하여 세계적 관심사가 되고 있는 것은 온실 기체증가에 의한 지구 온난화문제이다. 지구 온난화는, 긴 기간에 걸쳐서 일어나거나, 또는 주기적으로 일어나는, 앞에서 언급한 것과 같은 자연적 기후변화라기보다는 인위적인 것일지 모른다는 점에서, 그 진행방향이 주기적이 아니란 점에서, 또 그 진행 속도가 과거의 대기중의 온실기체 변화보다 상당히 빠르다는 점에서 우리 모두에게 경각심을 불러일으키고 있다. 17세기 산업혁명이후 급속도로 발전되는 경제구조는 이를 뒷받침할 막대한 에너지를 요구하였고, 이에 따라 화석연료의 사용 증가는 나날이 가속되고 있다. 이 화석연료의 사용 증가는 곧바로 대기중 온실기체 함유량의 급증을 불러왔다. 한편으로는, 산업의 발달과 더불어 급속히 늘어나고 있는 인구는 이미 중위도지방의 경제선진국의 삼림을 잠식했다. 계속되는 이러한 개발은 지구상에 남아 있는 유일한 원시 삼림지역인 적도 우림지역과 시베리아의 처녀림지역으로도 확대되어, 그나마 대기중의 탄소를 고화시킬 수 있는 기회를 줄이고 있으며, 자연적 탄소 순환에 화석연료 사용에 이어 또 다른 제약을 가함으로써 대기중 탄산가스 증가를 더하고 있다.

이런 대기중 온실기체의 급격한 증가는 1990년 세계의 3백여명의 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 악기상(惡氣象)의 발생, 강수대 변화, 해수면 상승 등의 인류 생존 자체에 대한 위험을 경고하게 되었다.

이 지구 온난화 또는 그 가능성을

줄이는 방법은 대기중의 온실기체량을 줄이는 것이다. 화석연료 사용을 줄이고 삼림을 확장시킴으로써 대기중의 온실기체 증가 근원을 축소시키고, 대기중 탄소를 식물체에 의존하여 고착시키는 것이다. 그러나 그 어느 하나도 쉽게 효과적으로 이루어질 수 있는 것은 아니다. 새로운 환경에 깨끗한 에너지의 개발없이 화석연료 사용만을 억제하는 것은 곧 경제의 위축을 유발할 수 있으며, 이미 개발되어 산업에 이용되고 있는 지역을 산림으로 되돌려보내는 것은 나무가 성장하는 데 걸리는 시간과 더불어 쉽게 해결책으로 고려되기는 어렵다. 따라서, 이러한 제약을 극복하기 위해서는 각 산업별로 효과적인 대책이 수립되어야만 한다. 특히 이 대책은 기후변화 예측을 바탕으로 그 영향을 가장 완화시키면서 우리의 사회적, 경제적 환경에 대한 손상을 극소화하는 방향으로 이루어져야 한다.

지구 온난화를 예측하기 위해서는 먼저 기후변화를 유발할 수 있는 원인이 규명되어야 하며, 실제 관측을 통한 과거의 온난화 증거가 그 원인과 결부하여 제시되어야 하며, 기후변화 예측을 위해서는 이러한 원인과 결과를 실험할 수 있는 도구가 마련되어야 한다. 따라서 앞으로의 이야기는 기후변화의 원인, 관측된 증거들과 이런 것들을 실험하고 예측할 수 있는 컴퓨터 모형, 그리고 이 수치모형에 의한 기후변화 예측과 그 신뢰도에 관하여 전개해 나가고자 한다.

변화의 원인

지질학적 고기후연구를 통하여 우리는 과거 수십만년 동안 지구에서는 여러 차례의 빙하기와 간빙기가 연속되어 왔음을 알고 있다. 이러한 지구 기온변화의 원인으로는 천문학적 요인과 온실기체로 인한 요인 두가지로 집약할 수 있다. 1920년 세르비아의 수학자 Milankovitch는 「태양 복사에 의해 생기는 열현상에 관한 수학 이론」을 발표하여 기후변화를 천문학적 요인에서 설명하였다. 이 천문학적 요인은 태양활동의 변화, 두가지 경우의 지축변화, 지구 공전궤도 변화의 네가지로 분류할 수 있다.

천문학적 기후변화 요인중 가장 주기가 짧은 것이 흑점 관찰로 알 수 있는 11년 주기의 태양활동 변화이다. 이 태양활동의 변화는, 그 주기가 비교적 짧기 때문에, 또 이 주기동안 지구로 들어오는 태양에너지량의 변화는 0.07%에 불과하기 때문에, 지금 우리가 우려하고 있는 지구 온난화에는 직접 주 영향을 미친다고 고려되지는 않는다. 그 다음 기후변화와 관련된 천문학적 요인은 지구 자전축의 변화와 관련된 두개의 원인이다. 첫째는, 지축의 머리 흔들기 운동(세차 운동)으로, 지구의 공전축에 대하여 지축이 1만9천~2만3천년 주기로 팽이처럼 원을 그리며 회전하는 것이다. 태양 주위를 타원궤도를 따라 공전하는 지구는 북반구가 여름일 때 태양에서 가장 멀고, 북반구가 겨울일 때 가장 가깝다. 그러나 약 1만1천년 전에는 이와는 반대로 북반구가 여름일 때 가장 가까웠고, 북반구가 겨울일 때 가장 멀었다. 따라서 북반구에서 기후의 계절변화는 지금보다는 훨씬 더 컸고, 이에 따라 아시아 몬순의 강도도 더욱 크게 나타났을 것으로 생각된다. 기후변화의 요인중 지구 자전축에 관련된 두번째 요인은 계절변화의 주 요인인 지구 공전 축에 대한 지축의 기울기가 21.5°에서 24.5°까지 4만1천년 주기로 변하는 것이다. 현재의 지축 기울기가 23.5°인 것을 고려할 때, 지축의 기울기가 더 기울어질수록 계절변화가 지금보다 더 클 것이며, 지축의 기울기가 작을 때는 계절변화가 상대적으로 작을 것이다.

마지막 요인은 지구의 공전궤도 변화이다. 지구의 공전궤도는 약 10만년 주기로 거의 완전한 원에서 타원으로 점차 편평화하였다가 원래대로 돌아간다. 이 사이에 변하는 태양과 지구 사이의 거리는 약 1천8백만km 이상이다. 지구 공전궤도가 원일 때보다 타원일 때 계절적 기후변화는 훨씬 더 크게 일어날 것이다.

빙하기와 간빙기의 기후변화는 어느 하나의 요인에 의하여 일어난다기보다는 이상의 4가지 요인들이 서로 복합적으로 작용하고, 또 이에 따른 지구내부의 변화, 즉 눈 또는 얼음이 덮인 지역의 확장과 수축에 따른 이차적인 기후변화(알베도 효과), 대기중 온실기체 함유량의 변화들이 더불어 함께 일어났으리라 알려지고 있다.

그러면 최근에 와서야 지구 온난화가 세계적 관심사가 되는 이유는 어디에 있는 것인가? 그 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 앞에서 논거한 수천~수만년의 기간에 걸쳐 일어나는 기후변화와는 달리, 현재 우리가 직면하고 있는 사실은 온실기체에 의한 온난화이다. 대기중의 온실기체는 불과 21세기 초에는 그 함유량이 현재의 두배이상 될 것이라는 사실과, 또 그 증가가 나날이 가속되고 있다는 사실이다.

온실효과를 유발하여 지표 온도를 상승시킬 수 있는 온실기체중에는 탄산가스 이외에도 CH_4, N_2O, CFCs

등의 대기미량기체들(atmospheric trace gases)을 꼽을 수 있다. 아직은 이들 대기미량기체들에 의한 지구 온난화는 탄산가스에 의한 온난화보다 심각하지 않다. 그러나 대기중 이들 기체들의 함유량 증가 속도를 볼 때, 이들 대기미량기체들에 의한 온난화는 가까운 장래에 탄산가스에 의한 온난화를 능가할 것으로 보고되고 있다. 그러나 이러한 예측은 모두 일차적 반응에 근거할 뿐이다. 대기중의 수증기와 구름이 가장 큰 온실효과를 나타낼 수 있다는 사실을 고려하면, 이들 대기미량기체에 의한 온난화 정도를 일방적으로 받아들일 수는 없다. 다시 말하여 일차적 온실기체에 의한 온난화의 결과로 달라질 구름의 수직적, 지리적 분포, 구름입자 크기 분포, 구름의 얼음과 물방울의 구성성분 변화, 또 이들 구름들에 의한 대류권 상부의 수증기 분포 변화 등에 따라 지표 기온의 상승 정도는 크게 달라질 수 있으며, 따라서 그 예측은 어렵게 된다. 물론 지구 온난화의 정도를 가감하는 요소중에는 이 구름에 의한 것들 외에도 해양, 해빙의 역할, 생권과의 상호작용, 화산활동의 영향 등을 생각할 수 있다.

온난화 증거

지구의 기후계는 흡수된 태양에너지량과 외계로 방출되는 장파에너지량이 같을 때 평형을 이루게 된다. 그러나 어떤 기후변화 요인에 의하여 이 흡수된 태양에너지량과 방출된 장파복사량이 불균형을 이루면, 기후계는 평형을 잃고 새로운 평형점을 찾아 소위 「기후변화」의 과정을 밟게 된다. 이런 흡수와 방출복사량의 차이를 복사력(Radiative Forcing)이라 하며, 기후변화 요인들의 상대적 중요성을 이 복사력을 기준하여 판단하기도 한다.

17세기 산업혁명 이후 급증되어온 화석연료 사용은 대기중 복사력이 큰 온실기체들의 증가를 유발하였고, 이에 따른 지표면 기온의 상승이 현재 문제가 되고 있는 온실기체에 의한 지구 온난화의 기본논리이다. Kiehl과 Dickinson은 이 온실기체 복사력이 약 1W/㎡ 증가될 때마다 지표 기온의 1℃ 상승을 추측하였다. 그러면 이 시점에서 우리는 가장 중요한 의문점을 제시하지 않을 수 없다. 과연 지난 '1백년동안 지구의 온난화는 온실기체 증가와 더불어 진행되고 있는가? Linzen은 지난 1백년간 관측된 자료 분석으로는 지구 온난화는 인정하기 어렵다고 보고하였다. Hansen 등은 적어도 미국에는 지난 1백년동안 기온이 0.1~0.3℃ 증가하였다고 보고하였다. 그러나 이것은 온실기체에 의한 것이라 하기 어렵다. Bolling과 Idso는 미국 에너지성의 전구 관측자료를 분석한 결과 지난 1백년간 전구 평균기온은 약 0.45℃ 증가 하였다고 보고하였다. 그러나 이들의 분석에 의하면 북반구에서는 대부분의 기온 상승이 대기중 온실기체 함유량의 증가가 급격하지 않은 2차대전 이전에 일어났음을 보여주고, 오히려 비교적 육지면적이 작은 남반구에서 온실기체 복사력 증가와 부응하는 기온상승이 있었다. 특히, 북반구에서는 1940~80년의 기간동안 평균기온이 하강하였고, 이로 인하여, 한때 현재의 지구 온난화에 대한 우려보다는 빙하기가 도래하지 않을까 염려하기도 하였다. Michaels와 Stooksbury는 1950년 이후 남반구의 평균기온은 약 0.2℃ 상승한데 반하여, 북반구에서 기온은 전혀 증가하지 않았다고 보고하였다.

Cook 등은 1천년 수령의 나무나이테로부터 Tasmania 지방에서 여름철 기온은 지난 20세기동안 가장 크게 온난화가 일어났음을 알았다. 그러나 1천년이라는 기간을 통하여 볼 때, 최근의 온난화는 아직 기후의 자연적 변동성 범위를 벗어나지 못하고 있다.

이와 같은 전구 기온변화가 대기중 온실기체 증가와 잘 일치되지 않는 이유중 하나는 온실효과와 반대효과를 나타내는 SO_2 의 증가를 고려하지 않았다는 것이다. SO_2 는 지구장파 복사에 대해서는 그 영향이 적으나, 대기중의 먼지 입자들을 결속하거나 구름의 응결핵 역할을 하여 대기중으로 들어오는 태양광선을 더 많이 외계로 반사시킴으로써 지표면 냉각효과를 유발할 수 있다. 이 SO_2 역시 17세기 산업혁명 이후 대기중 그 배출량이 증가되어 온 것은 사실이다. 이 SO_2 의 역할이 앞의 북반구에서 기온상승이 온실기체 함유량 증가와 일치하지 않는 것을 부분적으로 설명하여 준다.

우리가 기온자료를 분석해야 할 때 고려하여야 할 또 다른 기후인자는 해양의 역할과 화산활동에 의한 성층권의 먼지층 형성이다. 해양은 대기중 수증기의 가장 큰 원천이며, 그 표면 3m 정도의 해수가 대기 전체가 보유하고 있는 열량과 같은 정도를 수용할 수 있다. 따라서 해양이 보유하고 있는 열량은 막대하며, 해양은 어떤 기후변화 요인에 대한 지표면 기온 상승을 변형시키거나, 상당기간 연기시킬 수 있다. 또 화산 폭발은 많은 먼지와 SO_2 를 성층권까지 불어넣게 되고 이 성층권의 먼지층과 SO_2 는

태양광선이 대기 하층에 투과하기 전에 외계로 반사함으로써 대기 하층을 냉각시키는 동시에, 성층권에서 태양광선을 더 많이 흡수하여 성층권 온도를 상승하게 한다. 따라서, 화산활동은 온실효과와는 정반대의 역할을 한다. 그러므로 지난 1백년간 기온자료를 해석할 때, 이 화산활동의 영향이 얼마나 기온을 하강시켰는지, 또 화산폭발 2~3년 후 화산에 의한 먼지층이 성층권에서 대부분 없어졌을 때, 온실기체에 의한 온난화가 얼마나 빨리 지구 온난화의 원래 궤도에 진입하는지 등은 아직 명확하게 해결되지 못한 문제이다.

기후 모형

기후변화 예측을 하는 데는 통계적 방법과 물리적인 방법이 있다. 그러나 통계적인 방법으로는 전구 평균기온의 변화는 추측할 수 있을지 모르지만 우리가 요구하는 지역별 기후, 특히 강수량과 지표면 수분량, 해수면 변화 등을 산출하기는 대단히 어려운 일이다. 또 통계적 방법은 주어진 기록자료에 의존한다. 현재 우리가 갖고 있는 관측자료는 몇몇 지방의 것을 제외하고는 전구적으로 지난 1백여년에 불과하다. 물론, 지질학적 또는 고생물학적 자료는 이보다 훨씬 이전의 자료를 제공할 수 있다. 그러나 이러한 자료들은 우리가 현재 직면한 지구 온난화문제에 직접 이용되기에는 정밀도면에서 부적합하다. 따라서 우리는 컴퓨터를 이용한 물리적 수치모형만을 이야기하고자 한다.

기후변화 예측에 이용되는 수치모형은 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 들어오는 에너지량과 외계로 방출되는 지표면 온도의 4승에 비례하는 지구 장파 에너지를 이용하여 어떤 기후인자의 변화들에 대한-예를 들면 태양 활동의 변화, 흑성 반사율 변화, 또는 온실기체에 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 지역적 특성을 설명하여 주지는 못한다. 물론 미국 텍사스대학의 North박사 등은 이 에너지 평형 모형을 전구면에 확장시키는 연구를 진행하고 있으나 아직 기후변화 인자들에 대한 감응도 실험을 할 수 있는 정도의 미흡한 단계이다.

두번째는 복사-대류 모형이다. 이 복사-대류 모형은 일차원적 모형으로 기후인자들의 변화에 대한 지표면 온도뿐만 아니라 대기의 수직적 온도분포 변화를 예측할 수 있다. 예를 들면, 우리는 흔히 온실기체 증가에 의한 지구 온난화를 지표면 근처의 온도를 기준하여 이야기한다. 그러나 이 복사-대류 모형에 의하면 온실기체 증가는 대류권에서는 기온을 상승시키나 성층권 이상에서는 오히려 기온을 내려가게 한다. 또 화산에 의한 성층권 먼지층은 이와는 반대의 수직적 기온변화를 보여, 지표면에서는 서늘해지고 성층권에서는 온난하게 된다. 이와 같이 복사-대류 모형은 기후변화 요인에 의한 대기의 수직적 평형변화를 값싸게 설명하여 줄 수 있다. 그러나 앞의 에너지 평형 모형과 마찬가지로 전지구 평균기온 또는 특정한 지역에서의 기온변화만 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 대기운동을 고려하고, 대기중에서 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 상당히 인정될 만한 자료들을 생산한다. 이와 같이 일반 대순환 모형(GCM)에는 기권을 비롯한, 수권, 빙권, 생권, 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(위도 4°×경도 5°)로 나누고, 또 대기층도 적당히(2~40개층) 나누어야만 한다. 이에 따라 각 일반 대순환 모형은 제각기 독특한 방법으로 규모가 앞의 격자상자보다 작은 물리적 과정들(예, 구름, 난류, 강수, 복사 등)을 모수화하여 포함하고 있다. 많은 경우 일반 대순환 모형의 성공 여부가 이들 모수화 과정들에 의하여 결정된다.

온난화 예측과 모형

현재 많은 일반 대순환 모형들이

CO_2 배증에 의한 지구 온난화 문제를 예측하는 데 이용되어 왔다. 그 결과로 CO_2 배증에 의한 전지구 지표면 평균기온 상승은 약 2℃에서 5℃ 정도 온난화를 예측하고 있다. 이 온난화 정도는 이 숫자만을 가지고는 CO_2 증가로 인한 기후변화가 심각하게 보여지지 않을 수도 있다. 그러나 지난 수십만년 동안의 빙하기와 간빙기 사이의 전지구 지표면 기온의 차이는 불과 3~4℃에 불과하다는 것을 상기할 때, 이 CO_2 배증에 의한 기온 상승은 엄청난 것이 될 수 있다.

일반 대순환 모형은 전지구 평균값 뿐만 아니라 지역별 기후변화 자료도 제공한다. 탄산가스 배증에 의한 일반 대순환 모형의 온난화는 공통적으로 고위도 지방에서 일어나며 적도 지역에서의 온난화는 별로 크지 않음을 보여준다. 그러나 지역별 또는 계절별로는 일반 대순환 모형들 간에 많은 차이를 보인다. 예를 들면, GFDL 일반 대순환 모형은 여름에 기온 상승이 가장 크고 강수량은 크게 감소함을 보여준 반면에 GISS 일반 대순환 모형은 겨울에 기온 상승이 가장 크고 여름에 강수량이 가장 크게 증가됨을 예측하였다. 이와 같이 일반 대순환 모형속에 포함된 가지가지의 물리적 과정 모수화에 따라 지역별로는 서로 상반된 결과를 보여준다.

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. 예를 들면;

● 일반 대순환 모형들은 CO_2 증가에 의하여 1940년에서 80년 사이에도 계속적인 지표 기온의 상승을 예측하고 있는 반면에, 실제는 북반구에서 기온 상승보다는 오히려 기온 하강이 기록됐다.

● 일반 대순환 모형들은 고위도에서 가장 큰 기온 상승을 예측하고 있는 반면에, 실제는 북반구에서 기온 상승보다는 오히려 하강이 기록됐다.

● 일반 대순환 모형들은 고위도에서 가장 큰 기온 상승을 예측하고 있으나, 실제로는 적도 지방에서 기온이 상승하였다.

● 일반 대순환 모형들은 온난화가 북반구에서 크게 일어남을 예측하는 반면에, 관측된 것은 남반구에서 더 많이 일어났다.

● 일반 대순환 모형의 결과와는 달리, 미국지역에서는 지난 1백년 동안 기온의 상승이 뚜렷하게 나타나지 않았다.

그러면 왜 일반 대순환 모형들은 이상과 같은 지역적 실제 기후변화 예측에 차이점을 보이는 것일까? 우리는 그 원인을 크게 두가지 점에서 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 맴돌고 있다. 이중에서는 주기가 비교적 짧아서 몇십년동안의 관측기간 동안 여러 번 반복하여 쉽게 그 영향을 배제할 수 있는 것 외에도, 그 주기가 매우 길어서 한정된 기간 동안 물리적 기후변화와 서로 상쇄되거나 또는 과장되게 하는 것도 있다. 따라서 CO_2 증가에 의한 기후변화와는 달리, 실제 관측된 기후는 이 기후의 자연적 변동성에 의하여 온실기체들에 의한 온난화가 왜곡되게 나타날 수 있다. Briffa 등은 나무나이테 자료를 이용한 온실기체의 변화가 작은 17세기 산업혁명 이전의 기후변화 연구에서 870~1110년과 1360~1570년 기간 동안은 비교적 온난하였으며, 1570~1750년 사이는 소위 「작은 빙하기」라 할 수 있는 기간이었음을 보여주었다. 이러한 산업혁명 이전의 기후변화는 기후의 자연적 저주파 변동성에 의한다.

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 과정을 충분히 이해하지 못하고 있다. 또는 이해하고 있더라도 컴퓨터 성능의 제약 때문에 이런 물리적 과정들이 무시되거나, 미흡하게 모수화되고 있다. 많은 기후학자들은 실제 관측기후와 모형기후의 차이를 첫번째 원인보다는 두번째 원인에 더 많이 비중을 두고 있으며, 모형 모수화 개선을 통한 기후모형의 신뢰도 향상을 위하여 노력을 하고 있다. 그 대표적 노력은 다음과 같이 열거할 수 있다.

1) 구름과정 모수화 향상

전지구를 반이상 덮고 있는 구름은, 앞에서 언급한 바가 있는 것과 같이, 태양에너지를 반사하는 냉각효과와 지구장파를 흡수하는 온실효과를 동시에 하고 있다. 이들 상반된 두 효과는 구름의 입자의 크기, 분포, 위치, 수분과 얼음량 등에 의하여 크게 변한다. 현재 대부분의 일반 대순환 모형은 이들 구름 요소들을 충분히 묘사하지 못한다. 실제 영국의 UKMO

일반 대순환 모형은 구름 모수화를 향상시킴에 따라 CO_2 배증에 의한 기온 상승이 5.2℃에서 1.9℃로 작아짐을 보고하였다. 현재 미국 에너지성에서 ARM(대기 복사 관측 계획)을 1991년부터 약 10년간 수행하여 기후 모형의 구름 모수화 개선을 위하여 중점적으로 노력하고 있다.

2) 해양 모형 개선

현재 기후변화에 이용되고 있는 해양 모형은 대기 모형에 비하여 비교적 열악하다. 그 이유는 부족한 관측 자료로 인하여 해양의 물리적 과정에 대한 이해가 불충분하다. 해양의 관측은 대기의 관측에 비하여 훨씬 제한적이며, 그 관측 자체가 어느 특정 기간 동안 선박의 항로를 따라 관측될 뿐이다. 최근 인공위성을 통한 관측은 앞의 제약을 다소 극복할 수 있다. 그러나, 많은 중요한 해양의 변수들이 위성에서는 관측되지 못하고 있다. 또 다른 문제점은 해양을 충분히 묘사하기 위해서는 대기의 경우보다 훨씬 더 작은 크기의 격자점 모형이 필요하다.

이는 곧 컴퓨터 계산량의 증가와 맞물려 있다. 모형 격자점을 1/10로 줄이는 데 필요한 계산량은 약 1천배 가량 증가하며, 모형의 출력량은 1백배 정도 증가한다. 따라서 해양이 기후에 미치는 영향의 중요성을 고려할 때, 보다 많은 해양관측과 이 관측에 근거한 해양의 물리적 과정 이해 및 모형을 위한 모수화, 이에 따른 계산량 증가를 소화할 수 있는 컴퓨터 소프트 및 하드웨어 기술 개발이 필수적이다.

3) 식생 모형의 이용

현재 대부분의 일반 대순환 모형에서는 기후와 식생의 상호작용이 배제되어 있거나 미흡하다.

식물은 탄소동화작용을 통하여 대기중 탄산가스를 고착하는 동시에, 증산작용을 통하여 땅속의 수분을 대기중으로 전달하는 역할을 한다. 또 식물의 군집은 대기권과 지권 사이의 완충적인 역할을 변형시킴으로써 지표의 복사 수지 변화를 초래한다. 최근 이런 기후와 식생간 중요한 상호작용이 보다 더 물리적으로 일반 대순환 모형 모수화를 통하여 기후변화에 소개되기 시작했다.

4) 병렬컴퓨터를 이용한 일반 대순환 모형 적분속도 개선

앞에서 열거한 대부분의 모수화 개선은 적절한 컴퓨터의 뒷받침 없이는 가능하지 않다. 현재 많은 기후 모형 연구팀들은 병렬컴퓨터를 이용하여 적분속도를 지금보다 수백~수천배 빨리 계산할 수 있도록 노력하고 있다.

제언

앞에서 우리는 기후변화의 요인들과 관측자료에 나타난 온실기체 증가에 의한 지구 온난화를 검토하여 보았다. 또 이 온난화를 예측하는 데 유일한 도구인 일반 대순환 모형의 기후변화 예측과 그 신뢰도 문제점들도 검토하여 보았다. 현재의 일반 대순환 모형에 의한 기후변화 예측의 신뢰도는 기후계를 구성하고 있는 기권, 수권, 빙권, 생권 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 연구분야는 구름 과정, 기후에 대한 해양과 식생의 역할, 또 컴퓨터의 계산 능력 향상을 꼽을 수 있다. 이상 열거한 모형 개선을 통하여 우리는 보다 더 신빙성이 있고 상세한 기후변화 예측을 산출하리라 믿는다. 그러나 이와 같은 개선은 짧은 시간에 이루어질 수 있는 것은 아니다. 미국 대기과학연구소의 Schneider가 이야기한 바와 같이, 우리는 현재 일반 대순환 모형이 다소 미흡한 점이 있더라도 우리가 요구하는 3차원적 자료들을 제공할 수 있는 유일한 도구이기에 기후변화 예측에 사용하는 한편, 지속적인 모형의 모수화 개선과 검증을 통한 예측의 신뢰도 향상을 위한 노력도 병행하여야 한다.

대기중 온실기체 증가로 인한 지구 온난화에 대한 대비책은 신빙성 높은 기후변화 예측을 토대로 이루어짐에도 불구하고, 현재 우리는 기후변화 관측과 예측에 불확실성을 완전히 배제할 수 없다.

따라서, 지구 온난화에 대한 제반 대응책은 이 기후변화 예측의 불확실성을 포함한 가운데서 수립될 수 밖에 없다. 기후학자들은 이 불확실성을 줄이기 위하여 일반 대순환 모형의 개선-검증-예측의 순환을 반복하여야 하며, 이에 따라 지구 온난화 대응책도 다시 제시된 기후변화 예측에 따라 제시-보완의 순환을 같이 하여야 할 것으로 본다.

특히 우리나라는 동유럽 국가들, 중국과 더불어 가장 급속도로 화석연료 사용이 증가하는 나라들 중의 하나이다. 이러한 상황에서 우리나라가 이 대기중 온실기체 증가에 의한 지구 온난화 문제에 능동적 역할을 하여야만 예상되는 국제 이해관계에서 국익을 유지할 수 있으리라 본다.