

研究 노트

지구온난화의 불확실 요소들에 대한 평가

강인식

서울대학교 대기과학과
(1994년 12월 21일 접수)

Examination of the Uncertainties of Global Warming

In-Sik Kang

Department of Atmospheric Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea
(Manuscript received 21 December 1994)

Abstract

This study examines several items which produce uncertainty in determining the global warming trend with existing observation data. The items considered are temporal and spatial inhomogeneity of past observing network, urbanization effect, and the long-term natural variability of the global climate system. The examination indicates that those uncertainties may not produce any error larger than 10% of the global warming trend.

1. 서론

19세기 이후 산업화와 함께 지구의 평균기온이 0.5°C 정도 상승하였으며, 앞으로 이러한 지구온난화는 가속될 것으로 예상되고 있다 (IPCC, 1990). 그러나, 현재까지 지구기후시스템의 장주기 변동에 대한 이해가 충분하지 못하여 지구온난화를 정확히 산출하는데 많은 어려움이 있는 것도 사실이다. 이 연구에서는 지구온난화를 산출하는데 있어서의 불확실성을 유도하는 몇가지 문제점들을 대기-해양접합 GCM의 장기간 모의자료와 19세기 부터 현재까지의 기온 관측자료를 사용하여 평가하고자 한다. 특히 여기서는 미래의 지구온난화 예측보다는 과거에서 현재까지 일어난 온난화에 초점을 맞추어 토의하였다.

2. 지구온난화의 불확실성 조사

이 장에서는 19세기 중반에서 현재까지 진행

된 지구온난화 경향을 추출하는데 있어 불확실성을 유도하는 주요 요소들을 조사하고, 이를 토대로 현재 추정되고 있는 지구온난화 경향 (0.5°C/100년 정도)의 적정성을 토의한다. 지구온난화 경향을 추출하는데 있어 불확실성을 유도하는 주요한 3가지 요인은 다음과 같다.

- 1) 기온관측자료의 시·공간적 비균질성.
- 2) 도시화에 따른 기온상승.
- 3) 100년 이상의 장주기 자연변동(natural variability)의 존재 가능성.

지구평균 기온의 시계열로부터 온난화 경향을 추출하기에 앞서 지구평균 기온이 과거의 관측자료로부터 적정하게 구해질 수 있는가를 조사하여야 할 것이다. 이 문제는 기온 관측지점이 지구전체에 분포되어 있지 못하고 대부분 대륙에 편중되어 있기 때문에 발생하는 것이다. 즉, 특정시간의 지구평균 기온이 그 시기에 존재하는 자료를 평균하여 얻은 값과 어느 정도 잘 일치하는 가이다. 또 한가지 고려하여야 할 사항은 관측소의 수가 매년 다르다는 것이다. 즉, 18세기 중반 이후 관측소의 수는 꾸준히 증가하여 왔다(Kang, 1995). 이러한 관측값의 갯수의 차이는 지구평균을 구하는데 사

Table 1. 20 year mean error of the sampled global mean temperature from the global total mean (°C).

yr interval	1-20	21-40	41-60	61-80	81-100	101-120	121-139
mean error	0.031	-0.050	-0.014	-0.038	-0.001	-0.013	0.015

용되는 표본의 갯수가 매년 다를 수 있음을 의미한다. 따라서, 지구평균의 변동이 시간에 따른 표본 갯수의 차이에 의하여 나타날 수도 있다.

위에 지적한 기온 관측자료의 시·공간적 비균질성이 지구평균 기온의 시계열 산출에 어느 정도 영향을 끼치고 있는지를 GFDL의 대기-해양 접합모델로 생산한 139년 기온 자료를 사용하여 조사하였다. 그런데, 모델자료를 사용하기에 앞서 고려하여야 할 사항은 이 모델이 어느 정도 지구기후를 잘 재현하고 있는가이다. Manabe *et al.*(1991)은 GFDL 대기-해양 접합모델이 현재의 지구기후상태를 잘 재현하고 있음을 보였고, Kang(1995)은 이 모델이 과거 139년 간의 관측자료에 나타나는 지구평균 경년변화와 수십년 주기의 변화를 비교적 잘 나타내고 있음을 보였다. 이들의 연구결과는 GFDL 대기-해양 접합모델은 특정한 지역이 아닌 지구대기 전체를 평균한 기후변화에 대한 연구에는 적절하게 사용될 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 1a에는 139년 동안의 지구평균 연평균 기온의 시계열을 나타내었고, Fig. 1b는 모델 자료 중 1884년에서 1992년 까지의 139년 동안 실제 관측지점의 자료만을 사용하여 구한 지구평균 기온이다. 다시 말해서, 모델의 첫번째 해를 1884년으로 가정하고 각 해에서 관측값이 존재하지 않는 지점에서는 모델값이 없는 (missing) 것으로 가정하고 지구평균을 구한 것이다. 이렇게 구한 지구평균을 표본 (sampled) 지구평균으로 부르기로 한다. Fig. 1a와 Fig. 1b를 비교하면, 각 해의 값은 다소 다르지만 전반적인 변화 경향은 매우 비슷함을 알 수 있다. Table 1에는 표본 지구평균온도와 지구전체 평균온도의 차이를 20년 단위로 평균하여 나타내었다. Table에서 보는 바와 같이, 표본 지구평균온도의 20년 평균 오차는 0.05°C 이하이며 이 20년 단위의 오차는

어떠한 경향(trend)도 나타나지 않는다. 따라서, 기온 관측자료의 비균질성은 온난화경향 산출에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 최근의 Madden and Meehl(1993)의 결과(자료의 비균질성은 지구평균 온난화에 2% 정도의 오차만을 발생)와 잘 일치하고 있다. Madden and Meehl은 1950년 이후 40년 간의 자료에 대하여 조사한 반면 이 연구에서는 1884년 이후의 139년 자료 전체에 대하여 조사하였다.

두 번째 불확실 요소인 도시화에 따른 기온 상승을 각 관측소의 기온값에서 제거하는 것은 실질적으로 매우 어려운 문제이다. 그러나, Jones *et al.*(1986)은 모든 도시의 기온값을 주변 전원의 기온값과 비교하여 도시화에 의한 효과를 제거하였고, 도시화의 효과를 산정하기 곤란한 지역의 기온값은 지구평균 기온을 산출하는데 사용하지 않았다. IPCC에서는 이러한 Jones 자료를 사용하여 지구온난화 경향을 산출하였다. 한편, Karl and Jones(1989)은 미국 전역의 기온관측값에서 도시화에 의한 상

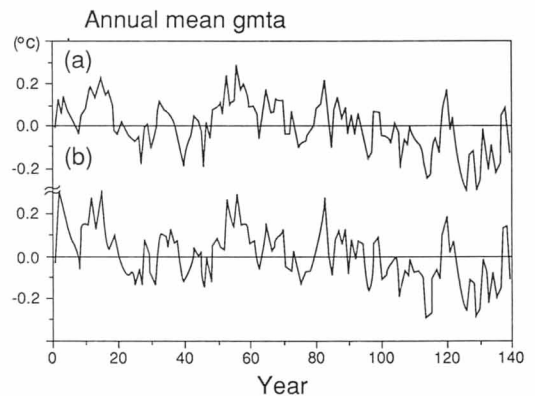


Fig. 1. (a) Annual-mean time series of the global-mean surface air temperature anomaly calculated with the GFDL coupled ocean-atmosphere model data. (b) As in (a) except for the global mean of the model averaged over available observation data points at each year from 1884 to 1992.

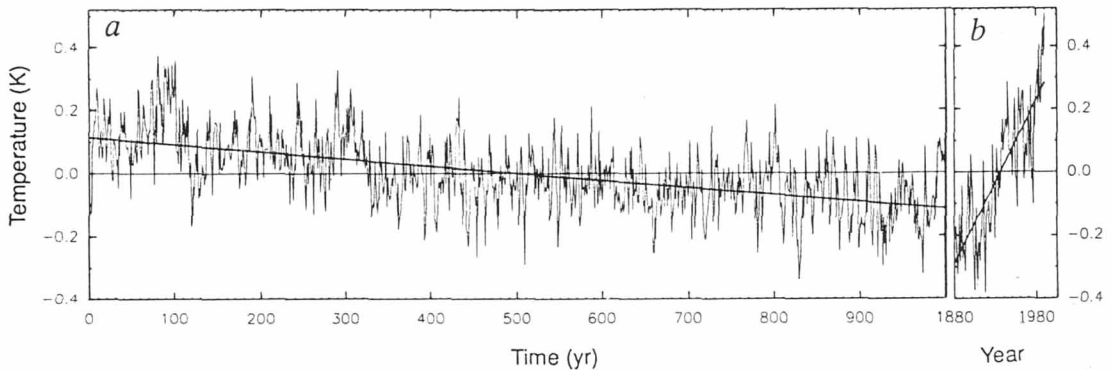


Fig. 2. Time series of globally averaged, annual mean surface temperature anomaly from a long-term mean. a. 1000-year time series from the coupled ocean-atmosphere model. b. 110-year (AD 1881-1990) time series of observed, globally averaged temperature (From Stouffer *et al.*, 1994).

승분을 좀 더 자세히 보정하여 미국평균 기온을 산출하였고 이를 Jones 자료로 구한 미국 평균값과 비교하였다. 이들 구한 미국평균 기온변화 경향은 Jones의 자료로 구한 경향보다 100년에 0.15°C 정도 작게 나타났다. Karl and Jones가 도시화의 효과를 완전하게 고려하였다고 볼 수는 없으나, 이 연구는 Jones 자료에 도시화에 대한 보정이 완전하지 않음을 보여주고 있다. 그런데, Jones의 미국평균값에 대한 오차를 100% 받아들인다고 하여도 이 오차는 0.15°C/100년 이하일 것이고, 더욱이 도시화된 지역은 지구전체 면적의 10%도 되지 않으므로 Jones 자료로 구한 지구온난화 경향에는 도시화에 의한 오차(지구평균에 대하여 0.02°C/100년 이하)가 크지 않을 것으로 사료된다. 이러한 오차는 지구온난화 경향의 약 4% 정도로 추정된다.

세번째 문제는 현재의 온난화 경향이 100년 이상의 주기를 갖는 지구기후시스템의 자연변동(natural variability)에 일부분일 수도 있다는 것이다. Stouffer *et al.*(1994)는 최근 이 문제를 GFDL 대기-해양 결합모델로 생산한 1000년 동안의 지구 기온자료를 사용하여 조사하였다. Fig. 2에는 모델로 생산한 지구평균기온의 1000년 시계열을 나타내었다. 이 모델실험은 온실기체의 양을 현재의 값으로 고정시키고 수행한 것이므로 여기서는 자연 변동만이 나타난다. 또한 그림의 옆에는 1880년에서

1990년 까지의 실제 관측 자료로 구한 지구평균 기온값의 시계열을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 모델로 구한 1000년 동안의 기온변동 중에는 실제 관측자료에서 보이는 약 100년 동안의 급격한 기온 상승의 모습이 나타나고 있지 않다. 모델 자료의 모든 시간구간에 대하여 선형회귀분석을 한 결과를 살펴보면, 100년 동안 0.5°C의 기온상승을 갖는 기간은 나타나지 않으며, 0.25°C/100년의 상승 경향을 갖는 기간이 100년 동안 나타날 확률도 없는 것으로 나타났다(Stouffer *et al.* 1994). 이러한 결과는 과거 100년 동안의 온난화가 장주기 자연변동의 일부분이기 보다는 온실기체의 증가로 유도된다는 것을 뒷받침한다.

3. 결론

이 연구에서는 지구온난화의 산출에 있어 불확실성을 유도하는 몇가지 요인을 조사하였다. 조사한 요인들은 지난 100 여년 간의 기온관측 자료에 나타나는 시·공간적 비균질성, 도시화에 따른 기온상승, 지난 100년 간의 기온상승이 지구기후시스템의 자연변동일 가능성 등이다. 조사결과, 위에 지적한 3 가지 불확실 요소는 19세기 중반부터 현재까지 진행된 지구온난화를 산출하는데 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 특히, 첫번째와 두번째가 지구온

난화 산출에 끼치는 오차는 10% 이하일 것으로 추정되며, GFDL GCM의 1000년 실험에서는 과거 100년 동안 나타난 기온상승이 장주기 자연변동의 일부분이기 보다는 온실기체의 증가로 유도되는 것으로 나타났다.

이 연구에서는 앞에서 제시한 첫번째와 세번째의 불확실성을 GFDL 대기-해양 접합모델을 사용하여 평가하였다. 그런데, 사용한 모델이 실제 지구기후 시스템의 장주기 변동성을 잘 나타내지 못할 수도 있다. 특히 100년 이상의 주기를 갖는 지구기후 변동은 해양-빙하-대륙-대기의 상호연계에 의하여 지배될 것이나, 이에 대한 모수화가 이 모델에 완벽히 기술되어 있다고는 할 수 없다. 또한, 이 모델의 수평수직 해상도는 지역기후를 재현하는데 크게 부족하다. 그러나, 현재의 컴퓨터 능력 하에서는 수 백년의 GCM 실험을 할 수 있는 모델의 해상도는 매우 제약될 수 밖에 없으며, 현실적으로 이 연구에서 사용한 모델의 해상도를 넘어설 수는 없는 실정이다. 또한, 최근의 여러 연구들은 이 모델이 여러가지 제약 요인에도 불구하고 지구기후의 평균 상태와 장기 변동성을 비교적 잘 재현하고 있음을 보였다(Manabe *et al.* 1991; Kang 1995). 따라서, 이 연구의 결과는 현재에 가능한 최선의 도구를 사용하여 구한 것이라고 할 수 있다.

감사의 글

두 분의 논문 심사위원에게 감사한다. 심사

위원들의 적절한 지적은 논문의 질을 향상시키는데 기여하였다. 이 연구는 과기처가 지원하고 환경부가 주관하는 선도 연구사업인 “지구온난화 감시”의 지원으로 이루어졌다.

참고문헌

- 강인식, 1994: 한반도 기온변화 시나리오 연구(1). 한국기상학회지, **30**, 247-260.
- 기상연구소, 1990: 한반도 기후변화 감시 및 이상기상에 관한 연구(1). 과학기술처 연구보고서, 421 pp.
- IPCC, 1990: The IPCC Scientific Assessment of Climate Change, WMO-UNEP, 360 pp.
- Jones, P.D., S.C.B. Raper, R.S. Bradley, H.F. Diaz, P.M. Kelly, and T.M. Wigley, 1986: Northern Hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984. *J. Climate Appl. Meteor.*, **25**, 161-179.
- Kang, I.-S., 1995: Association of interannual and interdecadal variations of global mean temperature with tropical Pacific SST appearing in a model and observation. Submitted to *J. Climate*.
- Karl, T.R. and P.D. Jones, 1989: Urban bias in area-average surface temperature trends. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **70**, 265-270.
- Madden, R.A. and G.A. Meehl, 1993: Bias in the global mean temperature estimated from sampling a greenhouse warming pattern with the current surface observing network. *J. Climate*, **6**, 2486-2489.
- Manabe, S., R.J. Stouffer, M.J. Spelman, and K. Bryan, 1991: Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO₂. Part 1: Annual mean response. *J. Climate*, **4**, 785-818.
- Stouffer, R.J., S. Manabe, and K.Ya. Vinnikov, 1994: Model assessment of the role of natural variability in recent global warming. *Nature*, **367**, 634-636.