

## 기후는 이산화탄소 증가에 얼마나 민감한가?

최 용 상\*

이화여자대학교 환경공학과, 120-750, 서울특별시 서대문구 대현동 11-1

### How Sensitive is the Earth Climate to a Runaway Carbon Dioxide?

Yong-Sang Choi\*

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University,  
Seoul 120-750, Korea

**Abstract:** The United Nations Framework Convention on Climate Change and the corresponding national low-carbon policy should be grounded on the scientific understanding of climate sensitivity to the increase in CO<sub>2</sub> concentration. This is, however, precluded by the fact that current estimates of the climate sensitivity highly vary. To understand the scientific background, limitations, and prospects of the climate sensitivity study, this paper reviews, as objectively as possible, the most recent results on the sensitivity issue. Theoretically, the climate sensitivity hinges on climate feedbacks from various atmospheric and surface physical processes. Especially cloud and sea-ice processes associated with shortwave radiation are known to have largest uncertainty, resulting in an inaccurate estimation of climate sensitivity. For this reason, recent observational studies using satellite data suggest sensitivity lower than or similar to those estimated by climate models (2-5 K per doubled CO<sub>2</sub>).

**Keywords:** climate sensitivity, climate feedback, carbon dioxide, greenhouse effect, radiative forcing

**요약:** 국제기후변화협약 및 정부의 저탄소 정책은 기본적으로 과학이 제시한 이산화탄소 증가에 대한 기후민감도에 근거해야 한다. 그러나 기후민감도의 추정치는 현재까지 연구 단위별로 차이가 커서, 이에 대한 과학적 배경, 한계, 전망을 고찰할 필요가 있다. 본 연구에서는 지금까지의 기후민감도에 대한 국내외 연구 결과를 객관적으로 종합하여 검토한다. 기후민감도를 결정하는 것은 대기와 지면의 각종 물리과정에 의한 기후피드백 작용이며, 이 중 특히 태양 단파복사량을 조절하는 구름, 해빙과 관련된 물리과정은 불확실성이 가장 커서, 부정확한 민감도 추정을 야기하는 것으로 보인다. 이 때문에, 최근 인공위성 자료를 이용하여 추정된 기후민감도는 기후모델들이 갖는 범위(대기 중 이산화탄소 2배 증가당 지구평균기온 2-5 K 증가)에 들거나, 그보다 훨씬 작은 값을 갖는다.

**주요어:** 기후민감도, 기후피드백, 이산화탄소, 온실효과, 복사강제력

## 서론

지구의 46억년 긴 역사에서 급격한 기후변화는 수차례 일어난 바 있다. 수십 도의 지구온도변화로 생명체의 90% 이상이 멸종된 사례가 수차례 있었으며, 강력한 태양풍, 운석의 충돌, 그리고 화산활동 등 자연 발생적인 내외부의 강제력을 그 원인으로 들 수 있다(Hartmann, 1994). 이들 강제력은 지구의 기후시

스템에 충격을 주어 일정기간 급격한 온도 변화를 유발하며, 기후를 한동안 불평형 상태로 만든다. 이 자연 발생적 강제력은 예측할 수 없이 현재도 임의로 발생한다.

이 때문에 지난 세기동안 온도가 항상 오르지 않았다. 1900년대 초 급속하게 증가하던니, 1940년에서 1970년 사이 주춤하다 이내 다시 올라갔다. 높아진 온도는 1980년대 이미 과거 1000년의 기록을 갱신했다. 유엔 기후변화에 관한 정부간 협의체 4차 보고(IPCC, 2007)에 따르면, 전체적으로 최근 100년간 지구평균기온은 약 0.7 K 상승하였다(일반적으로 북반구 고위도평균 기온 상승은 이보다 높다).

\*Corresponding author: ysc@ewha.ac.kr  
Tel: 82-2-3277-4461  
Fax: 82-2-3277-3275

이러한 갑작스런 온도변화 때문에, 인류의 산업 활동에 의한 인위적 기후변화가 가능하다는 주장이 새롭게 등장했다. 이 핵심에는 비록 대기 중 그 양은 미비하나 온실가스로서 복사적 역할이 큰 ‘이산화탄소’가 있다. 급격히 증가하는 이산화탄소와 급격히 증가하는 지구평균온도는, 온실효과 물리 이론에 의해 뒷받침 되어 그 개연성에 대하여 일반적으로 공감대가 형성되어 있다. 따라서 인위적 기후변화는 가설의 수준을 넘어서 어느 정도 과학적 사실이 되었으며, 최근 저탄소 기술 및 정책의 개발과 석탄·석유에 과도하게 의존하는 현대 산업사회의 패러다임을 바꾸는 원동력이 되었다.

이제 앞으로 우리에게 남은 과제는 기후가 ‘정량적’으로 얼마나 이산화탄소에 민감한가를 규명하는 것이다. 기후가 이산화탄소에 매우 민감하다면 이산화탄소의 저감이 매우 시급하고 강력히 규제되어야 하는 반면, 이산화탄소에 덜 민감하다면 이산화탄소의 감축은 경제 파급효과를 고려해 최소한이 되어야 한다. 저탄소 경제 정책의 근간이 되어야하는 이 기후민감도 문제는 불확실성이 아직 크다. IPCC 4차 보고(IPCC, 2007)는 기후 민감도를 이산화탄소 농도 두 배 증가에 대해 약 2-5도로 추정하였다. 그러나 최근의 인공위성 관측 기반 민감도 추정치는 IPCC의 기후민감도 조차도 과학적 재조명이 필요함을 암시한다. 기후민감도가 우리 경제와 정책에 끼치는 영향이 상당히 크므로, 본 논문에서는 IPCC 4차 보고(IPCC, 2007) 이후, 기후의 이산화탄소 민감도에 대해 현재까지 밝혀진 과학적 성과와 그 한계를 종합하고자 한다. 특히 IPCC가 모델에 기반하여 제시한 기후민감도가 과장되었을 수 있음을 보이는 인공위성의 관측 결과를 보일 것이다.

### 기후민감도 추정의 핵심- 기후피드백 이해

이산화탄소가 주요한 온실가스이며, 이산화탄소가 증가하면서 온실효과로 인해 지구의 평균기온이 상승하는 것은 이제 모든 사람이 알고 있는 상식이 되었다.<sup>1)</sup> 산업화 이전에 대기 중 이산화탄소 농도는 280 ppmv, 현재의 값은 390 ppmv이다(IPCC, 2007). 이

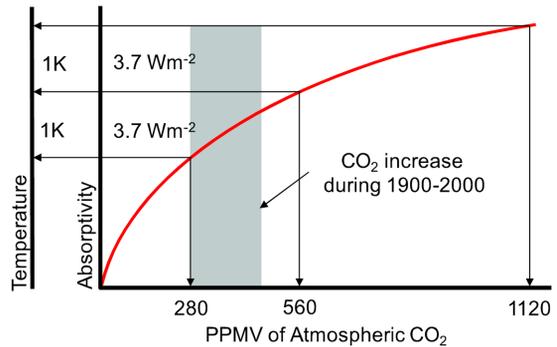


Fig. 1. Schematic relation between atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, absorptivity, surface temperature for zero-feed-back climate system.

농도는 얼음코어(ice core)에 남은 기포를 통해 추정된 결과 적어도 과거 40만년 동안의 이산화탄소 농도보다도 높은 값이다(Hartmann, 1994). 이런 전대미문의 높은 이산화탄소 농도는 지난 100여년간 석탄·석유에 의존한 인류의 산업 활동 때문이라는 데는 과학자간 이견이 없다. 현재의 증가 속도가 유지된다면, 수십 년 안에 이산화탄소가 두 배인 560 ppmv에 도달할 것으로 예측된다.

다행스러운 점은 온실효과는 이산화탄소 농도의 증가에 선형적으로 더해지지는 않고, 고농도에서 사실상 정체된다(Fig. 1). 이산화탄소의 농도가 두 배가 된다면, 약 3.7 Wm<sup>-2</sup>의 강제력을 가진 소위 ‘에너지 담요’가 기후시스템에 추가된다. 다시 560 ppmv의 두 배인 1,120 ppmv가 되어야 똑같은 효과를 가진 담요가 한 장 더 추가된다. 이같이 이산화탄소의 농도와 복사 강제력과는 로그함수 관계이다. 1,000 ppmv가 넘는 초고농도는 온난한 기후에서 자연적 과정(예를 들어, 해수면 온도 상승으로 인한 해수의 용존 이산화탄소의 방출)이 동시에 일어나도 쉽게 도달하기 힘들며, 상당히 오랜 시간이 필요하다. 이런 면에서 우리가 대응할 수 있는 시간은 충분히 있다고 본다.

이제 이 에너지 담요 한 장의 경우(즉 이산화탄소 농도의 두 배 증가)만을 생각해보자. 이로 인한 온도 증가 효과를 계산하면 약 1도이다<sup>2)</sup>(Pierrehumbert, 2009). 사실 이 1도 값은 지구에 대기가 존재하지 않을 경우에 해당한다. 즉 지표 온도와 대기간의 피드백(또는 상호작용)이 없는 경우이다. 현재는 담요가

1) 지구의 평균 기온이란 일반적으로 해수면 온도를 가리킨다. 해수면 온도의 상승은 이론적으로 대기의 복사-대류 평형(radiative-convective equilibrium)에 의해, 성층권 기온의 하강을 유도한다.  
 2) 지구를 흑체(black body)로 가정하여(받아드릴 수 있는 가정이다) 플랑크 함수로 계산한다.

약 70% 덮인 상태이므로 이 값은 산업화 시대 이전과 이후의 온도 차이인 0.7도와 어느 정도 일관성이 있어 보인다. 이를 바꾸어 말하면, 지금까지의 이산화탄소 농도와 지구 온도 상승 관측 자료로는 지구 온난화 과정에서 대기의 역할을 찾기 힘들다.

실제로는, 대기가 가진 지표 온도와 피드백 과정으로 인해, 최초 1도의 민감도를 가속화시키거나 둔화시킬 수 있다. 예를 들어, 어떤 원인에 의해 최초 지표 온도가 1도 증가하는 상황을 가정하자. 그러면, 자연적으로 대기 중 용존 수증기의 양이 많아지고 (Clausius-Clapeyron relation), 이 수증기의 장파 복사 흡수로 인해 온도 상승을 부추긴다. 즉, 결과적인 온도 상승은 최초 1도 보다 높다. 기후가 이산화탄소에 더 민감해지는 셈이다. 이처럼 수증기가 갖는 양의 피드백은 지구의 온도 상승을 1도에서 멈추게 하지 않고 좀 더 가속화 시켜 온도상승을 더 촉진시킨다. 피드백의 강도에 따라 기후민감도가 달라지는 것이다.

이처럼 기후피드백은 기후민감도를 가리키는 열쇠이다. 대재앙의 가능성을 경고한 IPCC는 기후민감도가 2-5도 이상이라고 예측한다(IPCC, 2007). 무엇이 이처럼 높은 기후민감도를 만들었겠는가? 바로 IPCC 보고서의 근간이 된 23개의 기후모델들이 모두 ‘양의 기후피드백’을 갖고 있기 때문이다. 모델에서 이 양의 기후피드백의 주된 원인은 지구상에서 가장 강력한 온실가스인 ‘수증기’의 힘이다(Soden and Held, 2006).

만약 수증기의 힘을 무력화(또는 상쇄) 시키는 다른 물질이나 메커니즘이 존재한다면 IPCC가 보고한 기후민감도 2-5도 추정치는 허상이다. 이런 가능성은 구름, 얼음, 기온감율 등 도처에 있지만, 현재까지 모델의 기후에서 이들의 역할은 그다지 크지 않았다(Soden and Held, 2006). 예를 들어, 만약 구름이 강력한 양의 피드백을 갖는다면 기후는 2-5도보다 훨씬 더 민감한 것이다. 반대로 구름이 강력한 음의 피드백을 갖는다면(예를 들어, 온도 증가에 따른 구름양 증가, 태양빛 반사 증가, 온도 감소의 과정) 수증기의 양의 피드백을 상쇄시키고, 기후피드백이 없을 때의 민감도 1도 보다도 더 낮은 기후민감도를 초래할 것이다. IPCC도 이 중요성을 인식하여 5차 보고서에 별도의 구름 피드백의 이해도에 관한 부분을 할애할 것으로 예상된다.

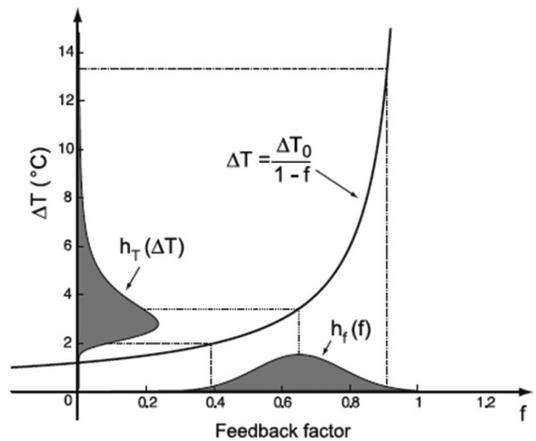


Fig. 2. Theoretical relation between climate feedback and equilibrium climate sensitivity. Gray area indicates probability distributions of the values suggested by current observations and climate models (from Roe and Baker 2007).

### 민감도 추정의 한계

#### 왜 민감도를 추정하기 어려운가?

기후 민감도를 추정하기 어려운 이유는, 사실 자연 그 자체에 있지 우리에게 있는 것은 아니다. 미국 워싱턴 대학의 Roe와 Baker(2007)는 이 문제를 간단히 그래프로 설명하였다(Fig. 2). Fig. 2의 가로축은 피드백, 세로축은 민감도를 의미한다. 기후피드백이 음인 경우는 민감도가 1도보다 작고, 피드백이 양인 경우는 민감도가 급격히 올라간다. 이론적으로 조금만 피드백 측정에 오차가 나도 민감도 추정 결과에는 더 큰 오차가 생긴다. 이 그래프의 종모양의 정규분포는 현재 우리가 이해하는 불확실성을 나타낸다. 이 불확실성이 보여주는 의미는 모델의 물리과정 모수화가 조금만 달라져도 모델이 예측하는 미래 기후는 10도, 20도 상승도 가능하다는 것이다. 피드백이 무한정 커지면 기후는 무한대로 큰 민감도를 갖지만, 이는 물리적으로 정의되지 않는다. 어찌 보면 IPCC가 제시한 민감도 2-5도 사이에서도 정확한 값을 찾지 못하는 것은 당연한 이치이다. 이처럼 자연의 민감도는 양의 기후피드백을 갖는 시스템에서 매우 정밀하고 전지구적인 관측이 아니고서 정확한 추정이 매우 힘들다.

그러나 민감도 추정이 항상 비관적인 것만은 아니

다. Roe와 Baker(2007)이 명시하진 않았지만, 역으로 지구기후 피드백의 총합이 영에 가깝거나 음수를 가지면 얘기가 달라진다(Fig. 2에서 가로축 피드백이 음수일 경우). 일부 인공위성자료의 분석결과 음의 기후피드백도 추정된다(4장 참조). 이 경우에는 피드백 측정값이 조금 부정확해도 민감도 추정에는 큰 문제가 없다.

### 기후 모델은 민감도 문제를 해결하는가?

민감도의 추정은 이미 30여년의 세월동안 이루어졌다. 초창기부터 이를 위한 전지구 관측이 충분치 않던 터라, 주로 간단한 에너지균형모델 또는 기후모델의 결과에 의존하였다. 기후모델을 이용하게 된 배경에는, 과학자들이 간단한 에너지균형 모형만으로는 민감도 추정에 한계가 있다고 판단했기 때문이다(Schresinger 1988). 그러나 기후 모델이 간단한 모형에서 배운 것 이상을 주지는 못하였다. 1979년 Charney 보고서(Charney et al., 1979)부터 최근 IPCC 보고서(2007) 까지 대부분 기후모델은 기후민감도 2-5도를 모의하였다. 여기서 모든 모델의 5도 미만의 민감도는 사실 모델의 신빙성에 큰 의문을 갖게 하는 점이기도 하다. 앞서 Fig. 2에서 보인 바와 같이 기후피드백이 조금만 높아져도 모델은 쉽사리 5도 이상의 민감도를 갖게 된다. 모델의 민감도가 5도가 넘는 모델이 IPCC에 보고되지 않은 이유는 무엇일까? 분명치는 않으나, 모델 민감도를 산출하는 현재의 방법에 문제가 있을 수 있다(Personal Communications with Drs. Susan Solomon, Richard S. Lindzen 2009). 모델의 민감도를 측정하기 위해서는 이산화탄소 농도를 두 배 증가시킨 다음 최소 100여 년간의 모의가 필요하며(가상 기후가 그 기간에 평형상태에 충분히 도달한다고 가정함.), 마지막 수년간의 평균 전구 표면온도를 측정한다. 그러나 기후 민감도에 따라 평형기간이 달라진다(Lindzen and Giannitsis, 1998). 낮은 민감도를 갖는 기후는 외부 자극에 교란된 상태에서도 수개월에서 수년 안에 평형상태에 도달하지만, 높은 민감도를 갖는 기후의 평형기간은 수십 년, 혹은 수백 년에 이른다(Lindzen and Choi, 2009). 그러므로 민감도 5도 이상의 모델에서 100년이라는 기간은 평형상태에 도달하는 데 부족한 기간일 수 있다. 다시 말해 IPCC모델 민감도 측정시, 평형온도에 도달하는 기간(평형기간)을 100년으로 제약함으로써 그 이상의 민감도를 측정할 수

없게 구속한 것이다.

민감도 측정 자체의 문제를 차치해 두고서도, 기후모델의 물리과정에 대한 불완전함, 대기와 해양간 결합(air-sea coupling)의 불충분함 등이 높은 민감도와 관련이 있을 수 있다. 모델에서 구름의 물리과정을 변화시킬 때 민감도의 변화를 쉽게 발견할 수 있다(Webb et al., 2006). 모델의 (구름, 얼음, 식생, 강수와 관련된) 각종 물리과정은 아직 그 과학적 이해도가 매우 낮아(IPCC, 2007), 실제 기후도 모델의 가상 기후와 같이 반응하는가에 대한 의문은 여전히 남아 있다.

모델에서 대기와 해양간의 열교환이 순조롭지 않으면, 급격히 변화하는 대기 현상에 대해 해양이 완충작용을 제대로 하지 못하여, 기후는 실제보다 더욱 민감해진다(Lindzen and Giannitsis, 1998). 최근 대기 해양간 열교환을 현재 모델보다 강력하게 해주었더니 엘니뇨 예측에 상당한 향상이 있다는 보고가 있다(Newman et al., 2009). 지구 온난화에 따른 강수의 증가 속도 또한, 관측과 비교할 때 모델에서 훨씬 크게 나타나는데(Wentz et al., 2007), 그 원인으로 경계층의 바람이 실제보다 세고 그에 따른 증발량과 다 계산을 원인으로 꼽았다(‘원인’이 아니라 민감도의 ‘결과’일 수도 있다). 이것도 역시 기후 모의에 영향을 주는 대기-지면 결합의 문제이다. 이 모든 최근의 보고들이 IPCC에 기여한 2-5도 민감도가 과대 추정된 값일 수도 있다는 것을 암시한다.

불행하게도 현재의 기후모델은 점점 정교해지고 비대해지고 있음에도 불구하고, 아직까지도 잘 알려진 주요 기후변화 현상인 엘니뇨, 극진동, 태평양 10년 진동조차도 제대로 예측하지 못하고 있다. 더 큰 문제는, 이런 불완전한 기후모델을 전적으로 믿고 의지하는 사회적 분위기이다. 그리하여 기후모델만으로는 기후민감도 문제를 풀기엔 불충분하다. 정상적인 과학적 접근법은, 모델의 민감도를 관측 자료로 테스트하는 것이다. 다음 장에서는 이 가능성과 한계를 설명한다.

### 고기후자료로는 민감도 문제를 해결하는가?

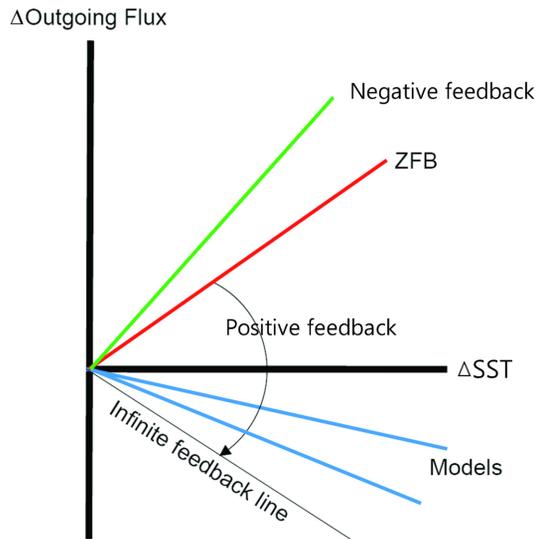
모델 테스트를 위한 관측 자료로써, 혹자는 수십만, 수백만 년 전의 기후관측 자료를 추천한다. 심지어 이런 자료를 통해 기후모델이 이미 충분히 검증되어 있다고 까지 주장한다. 결론부터 얘기하면, 답은 ‘아니다’이다. 미국 NASA의 Rind 박사는 고기후

관측 자료간의 결과 불일치(일반적으로 알려진 얼음 코어에서의 동위원소법 이외에도, 온도의 복원 방법에 수십여 가지가 있다. 또 관측지점도 다양하다.), 관측 자료를 고기후 모델에 적용 했을 때의 결과 불일치 등으로, 민감도 추정에 여전히 한계가 있음을 지적하였다(Rind, 2008).

기후민감도 추정 문제는 원인에 대한 결과의 관계를 규정하는 문제이다. 좀 더 정확히 말하면, 민감도는 지구가 어떤 원인(또는 강제력)에 의해 새로운 ‘평형온도’에 도달했을 때, 그 변화된 온도로 정의한다. 현재의 이슈는 이산화탄소 증가에 대한 평형온도 반응의 관계이다. 그러나 고기후 자료는 근본적으로 무엇이 기후변화의 원인(또는 강제력)인지 알 수 없는데 더 큰 어려움이 있다. 그나마 고기후에서 큰 사건에 대해 알려진 강제력은 소위 밀란코비치 강제력이라고 하는 약 12만년 주기의 천체물리학적 주기 변화(공룡이 멸종한 백악기 말기의)와 운석의 충돌뿐이다. 기후변화 강제력이 어디 그것뿐이겠는가? 때때로 폭발하는 화산, 엘니뇨와 같은 자연 진동, 수시로 발생/소멸하는 구름 등, 기후는 시시각각 발생하는 내·외부 강제력에 의해 변화해왔다. 따라서 고기후 자료의 기온은 ‘평형온도’가 아니다. 또한 강제력이 모호하니, 온도변화량을 알아도 민감도를 알 수 없다. 더구나 과거의 기후변화에서 탄소가스의 증감과 온도 증감과는 대부분 비례 관계에 있지만, 인과관계에 있어서는 온도변화가 원인으로, 탄소가스의 변화가 결과로 해석되는 게 일반적이다. 이는 해수 온도가 변화하면 해수용존 탄소량, 해양생물의 활동과 관련된 대기 중 배출 탄소가스의 변화로 인한 탄소순환의 변화가 진행되기 때문이다. 그래서 민감도를 고기후 자료 그 자체에서 찾는 것은 근본적으로 불가능하다.

### 인공위성 관측을 통한 민감도 추정

기후민감도 이슈에 있어서, 완벽하지는 않으나 현존하는 가장 적절한 자료로 인공위성 관측 자료를 꼽는다. 인공위성은 전구의 기후 상태를 지속적으로 관측하므로 온도의 변화, 지구 에너지 수지를 분석하는데 적절하다. 앞서 설명한대로, 방법적으로는 기후 피드백의 강도나 부호를 조사하여, 기후민감도를 추정한다. 기후피드백 계산은 위성센서에서 측정된 우주로 방출되는 복사량 관측 자료를 이용한다. 기후피



**Fig. 3.** Schematic relation between sea surface temperature change and outgoing total radiative flux change at the top of the atmosphere. The slope represents the sign and magnitude of total climate feedback. ZFB stands for zero-feedback system. Negative slope corresponds to positive climate feedback of current climate models. The slope over that of ZFB corresponds to negative climate feedback.

드백의 강도와 부호는 해수면 온도의 변화에 대한 방출복사량의 반응으로 나타나기 때문이다. 이론적으로 에너지의 수평 방향 수송이 없는 기후시스템을 가정하면, 피드백이 없는 경우 해수면 온도가 증가할 때, 지구 방출 총 복사량(장파복사와 단파복사의 총합)이, 스테판 볼츠만의 법칙에 의해 증가한다. 그 증가량은 지구평균 약  $3.3 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ 이다(Pierrehumbert, 2009). 만약 총 기후피드백이 양수이면, 지구 방출 총 복사량의 증가량은 피드백이 없을 경우보다 작다(예를 들어 해수면 온도와 함께 증가하는 수증기에 의한 흡수로 지구방출복사량이 준다). 반대로 총 기후 피드백이 음수이면, 그 증가량은 피드백이 없을 경우보다 크다(Fig. 3).

최초의 인공위성 이용 민감도 추정은 Forster and Gregory(2006)에 의해 수행되었다. Forster and Gregory (2006)는 연평균 해수면 온도 편차와 지구 방출 총 복사량 편차를 비교하였다. 추정된 민감도는 1도에서 4도였다(Table 1). 이 결과는 그 당시 IPCC 4차 보고서(IPCC, 2007)에 참여한 기후모델들에 대한 신빙성을 주었다. 그러나, Lindzen and Choi(2009)는 최근 기후피드백의 조사는 주요 기후피드백 과정인 수증기

**Table 1.** Summary of climate feedback and sensitivity estimates from satellite data. SW, and LW feedbacks indicate feedbacks associated with shortwave, and longwave radiation, respectively. Net feedback is the sum of SW and LW contributions. For SW, positive feedback corresponds to the value less 0  $\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$ ; for LW, positive feedback corresponds to the value less than Planck response of about 3.3  $\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$

References	SW Feedback $\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$	LW Feedback $\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$	Net Feedback $\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$	Climate sensitivity, K
Forster-Gregory 2006*	-1.1	3.7±0.9	2.3±1.4	1.0 to 4.1 K
Schwartz 2007*	-	-	3.3	1.1±0.5 K
Lindzen-Choi 2009*	0.7±1.7	3.8±0.5	4.6±1.6	0.6 to 1.2 K
Trenberth et al. 2010 <sup>c</sup>	-1.1±0.5	2.7±0.4	1.6±0.5	1.7 to 3.3 K
Murphy et al. 2010 <sup>c</sup>	-	-	2	1.8 K
Chung et al. 2010	-	-	0.5 to 2	1.8 to 6.9 K
Spencer-Braswell 2010	-	-	6.2	0.6 K
				0.7 K
Lindzen-Choi 2011	1.9±2.6	5.3±1.3	6.9±1.8	(0.6-1.0 K, 90%) (0.5-1.1 K, 95%) (0.5-1.3 K, 99%)

\*Papers explicitly mentioned climate sensitivity.

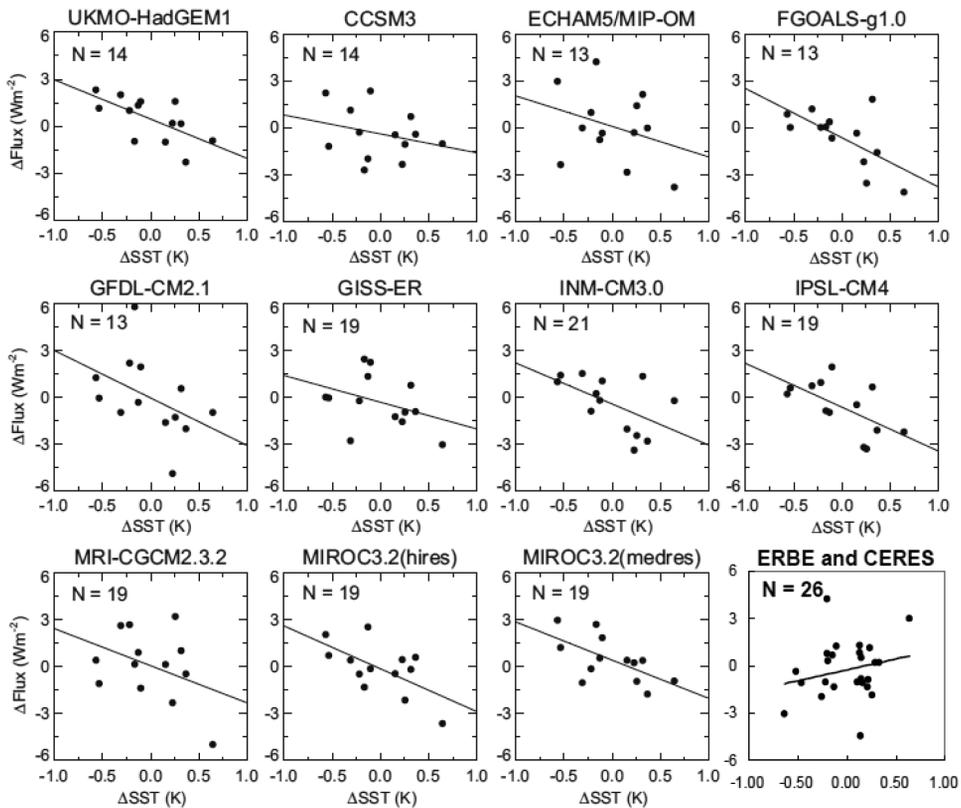
<sup>c</sup>Papers explicitly critical of Lindzen and Choi (2009), and reproduced numbers using the method of Lindzen and Choi (2009).

나 구름의 반응에 상응하는 짧은 시간규모에서 이루어져야 한다고 주장하였다. 이들은 Forster and Gregory (2006)와는 달리, 수시로 변동하는 해수면 온도에 대한 지구 방출 총 복사량의 변동 특성을 보았으며, 그 결과 민감도가 1도 미만이었다. 이후 Spencer and Braswell(2010)은 증가하는 이산화탄소 강제력의 영향으로 Forster and Gregory(2006)의 단순 선형회귀 분석방법이 피드백을 과대 추정케 함을 밝혔다. 개선된 방법으로 계산한 결과 기후민감도가 1도 미만이었어서 Lindzen and Choi(2009)과 일관된 값을 보였다. Schwartz(2007)도 에너지평형모델을 통해, 낮은 민감도를 주장하였다. 이 낮은 민감도는 자연이 모델보다 더 안정적인 기후를 가짐을 의미한다. Fig. 4는 IPCC 보고에 참여한 11개의 대표적인 대기모델 모의 결과(AMIP)와 지구 방출 복사량을 직접적으로 측정하는 ERBE와 CERES라는 인공위성 탑재체 자료의 피드백 조사 결과이다. 11개의 기후모델이 복사량과 해수면 온도 변화간 음의 기울기를 갖는 반면, 인공위성 자료는 양의 기울기를 가지는 것은 관측과 모델간 피드백의 차이가 존재함을 암시한다<sup>3)</sup>.

그러나 Lindzen and Choi(2009)는 최근 고민감도 기후를 주장하는 이들에 의해 다시 비판을 받았다

(Trenberth et al., 2010, Murphy et al., 2010). 비판은 주로 피드백 추정방법의 불안정성에 대한 것이다. 이들이 Lindzen and Choi(2009) 방법으로 재계산한 민감도는 1.7도에서 3.3도이다. 최근 Lindzen and Choi (2011)는 비판을 수용하여 추정방법을 개선한 결과, 저민감도 기후를 재확인하였다. 이들의 민감도 추정치는 99% 신뢰수준에서 0.5-1.3 K 사이이다(Table 1). 또한 민감도 추정의 불확실성이 주로 지면 온도와 관계없이 변화하면서, 태양의 단파복사량 변화를 예측불가능하게 조절하는 구름 때문임을 밝혔다. 이런 소위 ‘구름의 노이즈(noise)’에 가려져, 피드백은 사실 잘 보이지 않는다. 이는 대기-해양 접합 모델 모의(CMIP)의 단파복사에너지에서 확인된다. Lindzen and Choi(2011)은 한 달에서 세 달 정도의 지연시간(즉 온도 변화가 복사량보다 시간적으로 1-3달 앞선 경우)에야 비로소 숨겨진 피드백이 나타날 수 있음을 주장하였다. Lindzen and Choi(2009, 2011)가 노이즈가 적은 적도지방을 통해 전지구 민감도를 추정했다는 점(Dessler, 2010), 장기적으로 일어나는 피드백(Lin et al., 2010)등을 고려하지 않은 점은 추정치에 약간의 불확실성을 더한다. 그러나, 앞서 3.1절에서 설명한 바와 같이, 저민감도 기후에서는 피드백이 조

3) 인공위성 자료 그림에서 상관계수 0.2로 양의 기울기가 통계적으로는 유의하지 않다. 이것은 특히 단파복사에너지의 노이즈(noise) 때문이다. 노이즈의 주원인은 지면온도와 관계없는 자율적인 구름의 변동성이다. 지면온도와 관계있는 대기 변동만이 피드백이다. 이 노이즈를 줄이기 위해 단파복사에너지 필터링을 하면, 양의 관계는 더욱 분명해지며 유의하다. 그러나 이 노이즈는 지표 온도에 대한 대기의 반응만을 모의한 모델 결과에서는 없다.



**Fig. 4.** Relation between sea surface temperature change and outgoing radiative flux change. Data are obtained from the Tropics ( $20^{\circ}\text{S}$ - $20^{\circ}\text{N}$ ) in the 11 atmospheric model simulations (AMIP), and in the ERBE (1985-1999) and CERES (2000-2008) satellite measurements. The 11 IPCC atmospheric models have the negative slopes opposite to what satellite measurements have. This implies that climate models may overestimate climate feedback or climate sensitivity (Modified from Lindzen and Choi, 2009).

금 부정확하게 측정되어도 민감도 추정치에는 큰 영향이 없다.

## 요약 및 제언

앞서 소개한 바와 같이, 과학계에서 이산화탄소에 대한 기후민감도에 대한 논란은 현재 진행형이다. 논란의 쟁점은 ‘기후가 변하지 않는다’는 것도 아니고, ‘온실효과가 없다’는 것도 아니다. 기후는 항상 변했고, 온실효과는 온실가스가 없었다면 일어났을 지구(약 255 K)를 영상의 온도(약 288 K)로 되돌리는 실재하는 물리 과정이다. 논란의 쟁점은 바로 기후민감도의 정량적인 문제였다.

민감도에 관한 논란이 치열한 가운데 이제 민감도에 대하여 알려진 중요한 사실 몇 가지를 소개하는 것으로 이 글을 정리하고자 한다. 첫째, 지금까지 민감도의

지구 대표값을 논의했지만, 지역적으로는 저위도보다 고위도가 일반적으로 훨씬 더 민감하다. 이것을 고위도 증폭현상(high-latitude amplification) 이라고 한다. 온난화의 진행속도는 고위도가 저위도의 1.5-5배이며, 이 높은 고위도 민감도 때문에 북극의 얼음이 빠른 속도로 녹고 있음은 주지할만한 사실이다. 고위도 증폭현상의 주원인은 얼음이다(Rind 2008). 얼음의 강력한 양의 피드백이 온난화를 가속화 하는 것이다. 고위도 증폭현상으로 기존 대기 열역학적 구조가 바뀌는 것은 사실이다. 예를 들어 고위도의 더 빠른 온도 증가는, 저위도와 고위도간의 온도차를 줄이고, 또한 대기의 경압성(baroclinity)을 줄인다. 일부 과학자는 경압성이 줄어들면 폭풍우와 같은 악기상의 발생빈도가 줄어든다고 하지만, 변형된 대기 열역학적 상태는(지역적으로) 중위도 상층 제트류 또는 파동에 영향이 생긴다. 이로 인해 각종 이상 기후를 만들어낼 수 있다.

둘째, 민감도는 기후 상태에 따라 변할 수 있다. 따라서 지구 평균기온이 올라갈수록 기후가 덜 민감해지는 경향이 나타난다. 온난화된 기후에서 양의 피드백을 가진 것으로 생각되는 얼음의 양이 적다. 물론 빙하의 감소 그 자체로도 해수면 상승과 같은 큰 재앙을 일으킬 수 있다. 빙하의 감소로 인한 민감도 감소는 기후모델 모의 결과에서도 잘 나타난다.

셋째, 기후는 외부 자극(예 탄소가스 증가)에 불안정하지만 항상 안정을 찾으려고 한다. 잘 알려진 스테판 볼츠만 복사법칙에 의해 지표온도가 올라가면 지구방출 에너지가 증가하고, 이 반응이 기후시스템에 근본적으로 내재한 일종의 음의 피드백으로 작용한다(일반적으로는 이것을 피드백이라 하지는 않는다). 온도가 증가했을 때 아무리 강력한(예, 수증기의) 양의 피드백이 있더라도 기후는 안정한데, 이는 수증기의 에너지 흡수 효과가 이 스테판 볼츠만 반응에 의해 상쇄되기 때문이다. 만약 이 반응이 없었다면 이산화탄소 증가에 지구 평균온도는 무한대로 증가했을 것이다.

마지막으로 대기의 순환이 자극(또는 강제력) 자체를 진정시킨다. 도시에서 배출된 고농도 이산화탄소는 자유대기의 순환에 의해 지구전체에 골고루 퍼진다. 또 특정지역의 강력한 강제력(예 화산활동)은 대기의 순환으로 에너지가 이동한다. 순환이 없었다면 지역에 따라 기후민감도 편차가 극명히 달랐을 것이다. 지표의 온도증가는 대기 순환에 의해 대류권 전체 연직온도 증가를 유도하여, 우주 밖으로의 수직적 에너지 방출을 가능케 한다. 또 남극의 기후민감도가 북극보다 낮아 남극의 얼음이 덜 녹는 것은 남극을 휘감고 방어하고 있는 대기혜양의 순환 때문이다. 지금까지 민감도에 대해 알려진 사실을 종합해 볼 때, 지구 기후시스템의 물리적, 역학적 성질은 일반적으로 강제력으로부터 유발된 일시적 불안정을 안정화시키는 완충 장치 역할을 하는 것으로 보인다.

1992년 유엔의 기후변화협약은 높은 기후민감도에 대한 IPCC의 경고를 근거로 무서운 속도로 증가하는 이산화탄소 배출을 전 세계가 힘을 합쳐 막아보려는 첫 시도였다. 각국의 탄소 의무 감축량 달성을 위한 노력과, 거대한 탄소배출권 시장은 이미 작동하고 있다. 그렇다면 기후변화협약의 온실가스 감축 노력은 과연 성공할 것인가?

이와 같은 전 지구적 기후문제 해결을 위한 노력으로 1987년 몬트리올협약이 있었다. 이 협약에서 오

존홀 생성의 원인인 CFC사용 절제에 합의해 성층권 오존은 점차 회복되어가고 있다. 몬트리올협약과 기후변화협약의 차이는 국제 사회의 의지도 있지만, 과학적 이해도에도 있다. CFC의 오존 파괴의 메커니즘은 사실 지구온난화보다 훨씬 간단하고 명확했다. 또한 CFC는 이산화탄소처럼 50년, 100년 이상 오래 지속되는 가스도 아닐뿐더러(즉 감축 효과가 빠르게 나타남), 산업계에 끼치는 영향도 훨씬 규모가 작았다. 그러므로 기후변화협약의 중요성과 파급효과를 감안할 때, 기후민감도에 대한 과학적 이해도를 높이는 것이 시급하다.

## 사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2010-0001904). 논문을 검토하신 부산대학교 서경환 교수와 익명의 심사위원께 감사한다. 논문의 교정을 도운 이화여자대학교 김보람 양에게도 감사한다.

## 참고문헌

- Charney, J.G. and Coauthors, 1979, Carbon dioxide and climate: A scientific assessment. National Academy of Sciences, Washington, DC., USA, 22 p.
- Chung, E.-S., Soden, B.J., and Sohn, B.-J., 2010, Revisiting the determination of climate sensitivity from relationships between surface temperature and radiative fluxes. *Geophysical Research Letters*, 37, L10703.
- Dessler, A.E., A determination of the cloud feedback from climate variations over the Past Decade. *Science*, 330, 1523-1527.
- Hartmann, D.L., 1994, *Global physical climatology*. Academic Press, San Diego, USA, 411 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 996 p.
- Lin, B., Chambers, L., Stackhouse Jr., P., Wielicki, B., Hu, Y., Minnis, P., Loeb, N., Sun, W., Potter, G., Min, Q., Schuster, G., and Fan, T.-F., 2010, Estimations of climate sensitivity based on top-of-atmosphere radiation imbalance. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 1923-1930.
- Lindzen, R.S. and Choi, Y.-S., 2009, On the determination of climate feedbacks from ERBE data. *Geophysical*

- Research Letters, 36, L16705.
- Lindzen, R.S. and Choi, Y.-S., 2011, On the observational determination of climate sensitivity and its implications. submitted to Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences.
- Lindzen, R.S. and Giannitsis, C., 1998, On the climatic implications of volcanic cooling. *Journal of Geophysical Research*, 103, 5929-5941.
- Murphy, D.M., Solomon, S., Portmann, R.W., Rosenlof, K.H., Forster, P.M., and Wong, T., 2009, An observationally based energy balance for the Earth since 1950. *Journal of Geophysical Research*, 114, D17107.
- Murphy, D.M., 2010, Constraining climate sensitivity with linear fits to outgoing radiation. *Geophysical Research Letters*, 37, L09704.
- Newman, M., Sardeshmukh, P.D., and Penland, C., 2009, How important is air-sea coupling in ENSO and MJO Evolution? *Journal of Climate*, 22, 2958-2977.
- Pierrehumbert, R.T., 2009, *Principles of planetary climate*. Cambridge University Press, UK, 688 p.
- Rind, D., 2008, The consequences of not knowing low- and high-latitude climate sensitivity. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89, 855-864.
- Roe, G.H. and Baker, M.B., 2007, Why is climate sensitivity so unpredictable? *Science*, 318, 629-632.
- Schlesinger, M., 1988, Quantitative analysis of feedbacks in climate model simulations of CO<sub>2</sub>-induced warming. In Schlesinger, M.E. (ed.), *Physically-Based Modelling and Simulation of Climate and Climatic Change*. NATO Advanced Study Institute Series, Kluwer, Dordrecht, 653-736.
- Schwartz, S.E., 2007, Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system. *Journal of Geophysical Research*, 112, D24S05.
- Soden, B.J. and Held, I.M., 2006, An assessment of climate feedbacks in coupled ocean-atmosphere models. *Journal of Climate*, 19, 3354-3360.
- Trenberth, K.E., Fasullo, J.T., O'Dell, C., and Wong, T., 2010, Relationships between tropical sea surface temperature and top-of-atmosphere radiation. *Geophysical Research Letters*, 37, L03702.
- Webb, M.J., Senior, C.A., Sexton, D.M.H., Ingram, W.J., Williams, K.D., Ringer, M.A., McAvaney, B.J., Colman, R., Soden, B.J., Gudgel, R., Knutson, T., Emori, S., Ogura, T., Tsushima, Y., Andronova, N., Li, B., Musat, I., Bony, S., and Taylor, K., 2006, On the contribution of local feedback mechanisms to the range of climate sensitivity in two GCM ensemble. *Climate Dynamics*, 27, 17-38.
- Wentz, F.J., Ricciardulli, L., Hilburn, K., and Mears, C., 2007, How Much More Rain Will Global Warming Bring? *Science*, 317, 233-235.

---

2010년 12월 7일 접수

2011년 1월 9일 수정원고 접수

2011년 1월 24일 채택