

A1B 시나리오 자료를 이용한 우리나라 아열대 기후구 전망

권영아* · 권원태** · 부경은*** · 최영은****

Future Projections on Subtropical Climate Regions over South Korea Using SRES A1B Data

Young-Ah Kwon*, Won-Tae Kwon**, Kyung-On Boo***, Youngeun Choi****

요약 : 지구 온난화의 영향으로 임업 뿐 아니라 농업, 수산업, 보건 등 여러 분야에서 피해가 발생하고 있어, 사회·경제 전분야에 걸쳐 기후변화에 대한 적응 대책이 필요하다. 기후변화의 영향을 평가하고 적응 방안을 마련하기 위해서는 미래 기후가 어떻게 변할 것인지 미리 전망하는 일은 필수적이다. 본 연구에서는 트레와다의 기후 지역 구분(최한월 평균기온이 18℃ 이하이면서 월평균기온 10℃ 이상인 달이 8-12개월)을 적용하여 아열대 기후 지역을 정의하고 A1B 시나리오에 근거한 아열대 기후구의 변화를 전망하기 위하여 기온 관측 자료와 모델 시나리오자료를 분석하였다. 아열대 기후에 관한 트레와다의 정의를 적용하여 현재 아열대 기후구와 미래 아열대 기후구의 변화를 전망해 본 결과 현재는 제주도를 포함한 남해안 일부 지역(부산, 통영, 거제, 여수, 완도, 목포)에 해당하던 것이 2100년에는 태백산맥과 소백산맥을 중심으로 한 산지 주변을 제외하고는 대부분 아열대 기후에 포함된다. 즉, 현재의 온난화가 지속된다면 제주도와 울릉도를 포함한 도서지역은 물론, 동해안으로는 속초, 서해안으로는 강화에 이르기까지 해안 지역을 모두 포함하며, 서울, 인천, 수원 등 대도시 지역도 아열대 기후 지역에 포함될 것이다.

주요어 : 지구 온난화, 기후변화, 트레와다 기후 지역 구분, 아열대기후, A1B 시나리오

Abstract : Abstract : As the global warming has been influenced on various sectors including agriculture, fisheries and health, it is essential to project more accurate future climate for an assessment of climate change impact and adaptation strategy. The purpose of this study is to examine the boundary changes in the subtropical climate region in South Korea using observed 30-year(1971-2000) data and projected 100-year data based on the IPCC SRES A1B emission scenario. We have selected Trewartha's climate classification among various climate classification, defining the subtropical climate region as the region with monthly mean temperature 10℃ or higher during 8-12 months. By observed data, the subtropical climate region was only limited in Jeju-do and the farmost southern coastal area(Busan, Tongyeong, Geoje, Yeosu, Wando, Mokpo) of South Korea. The future projected climate region for the period of 2071-2100 included have shown that subtropical climate region extended to most of stations except for the ares of Taebaeksan and Sobaeksan Mountains.

* 기상청 국립기상연구소 기후연구팀 연구원(Researcher, Climate Research Team; National Institute of Meteorological Research, KMA), yakwon71@metri.re.kr

** 기상청 국립기상연구소 기후연구팀장(Director, Climate Research Team; National Institute of Meteorological Research, KMA), wontk@metri.re.kr

*** 기상청 국립기상연구소 기후연구팀 연구관(Senior Researcher, Climate Research Team; National Institute of Meteorological Research, KMA), bko@metri.re.kr

**** 건국대학교 지리학과 조교수(Assistant Professor, Department of Geography, Konkuk University), yechoi@konkuk.ac.kr

Key Words : global warming, climate change impact, Trewartha's climate classification, subtropical climate region, A1B scenario

1. 서론

최근 들어 지구촌 곳곳에서 이상기후 현상이 속출하면서 지구 온난화에 따른 기온 상승은 전 국민의 관심사가 되고 있다. 특히, 2007년 2월에 보고된 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 4차 보고서 SPM(Summary for Policymaker)¹⁾에 따르면 지구 온난화가 인위적인 화석연료에 의해 발생했을 가능성은 90% 이상이며, 21세기에는 지구 표면 온도가 1.8~4.0℃ 상승할 것으로 전망되었다. 또한 지난 100년 동안 지구 평균 기온이 0.7℃ 상승했으나, 1850년대 이후 기록적으로 온도가 높았던 12개 연도(1998, 2005, 2003, 2002, 2004, 2006, 2001, 1997, 1995, 1999, 1990, 2000)는 모두 1990년 이후에 발생하는 등 기온 상승이 현 시점에서 계속 진행되고 있음을 시사했다. IPCC보고서는 기후변화의 과학적 측면 뿐 아니라 농업이나 수자원 등과 같은 다양한 분야에서의 취약성에 대한 부분을 요약하고 인간 활동에 의해 기후변화가 어느 정도 발생할 수 있는지를 다루고 있는 보고서이다(Kalvová *et al.*, 2003).

근대적인 기상관측이 시작된 이래, 1904년부터 2000년까지 우리나라에서 관측된 20세기 기온 자료를 분석해보면 평균기온은 약 1.5℃ 상승하여 우리나라에서 나타나는 온난화 추세는 전 지구적인 온난화 추세를 상회하고 있음을 알 수 있다(기상연구소, 2004). 최근 우리나라의 자연 생태계는 과거에는 경험하지 못했던 극한 기후로 인하여 다양한 형태의 반응을 보인다는 것이 밝혀지고 있다. 꽃이나 잎의 발아시기가 달라지고, 사과와 주산지기가 바뀌고 있으며, 산림의 경우에 예전에는 없었던 병충해로 인한 피해가 속출하고 있다(박용하 외, 2000; 이승범 외, 2003; 이승호 · 이경미, 2003; 서형호, 2003; 기상연구소, 2003, 2004; 서형호 · 김점국, 2005).

특히, 서형호(2003)와 서형호 · 김점국(2005)은 기후

변화가 과수의 생산과 품질에 미치는 영향에 대한 연구에서 사과 재배지역이 지구온난화에 따른 기온 상승으로 점차 북상하고 있으며 재배 면적도 감소하고 있기 때문에 상품성 향상을 위한 새로운 재배 방법의 개발이나 적절한 품종의 선택 등 대책 마련이 필요하다고 하였다. 기온에 민감한 농업 분야에서도 현재 기후변화에 따른 작물의 재배 면적 변화나 생산량의 변화, 품종 개량과 관련한 연구가 진행중이다(윤성호 외, 2001; 심교문 외, 2002, 2004; 하장성 외, 2003; 정재은 외, 2006).

또한 해양 생태계에 있어서도 난류성 어족인 오징어가 서해안과 동해안에서 빈번하게 출현하고 남해안 연안에서는 아열대의 해양에서 볼 수 있는 해파리떼가 출현하고 있다. 수온이 높아지면서 양식하던 김이 녹는 현상들도 발생하는 등 기후변화에 따라 어종이 변화하거나 수산 자원이 달라지고 있다(박종화, 2000).

이처럼 전국적으로 국지적인 이상 고온화현상이 빈번히 나타나고 이로 인한 육상, 해상 생태계의 변화가 감지되기 시작하면서 최근 언론에서는 “아열대화”라는 용어가 자주 등장하고 있다. 그러나 언론 매체는 아열대화라는 용어에 대한 명확한 정의와 근거 등 정확한 정보를 제공하는데 어려움이 있고 각계나 일반인들에게 혼돈을 줄 수 있으므로 기사에 담긴 내용은 물론 그 내용을 전달하는 용어가 어떤 근거에 의한 것인지 명확하게 제시할 필요가 있다.

아열대 기후 지역(Subtropical climate region)을 정의하기 위해서는 아열대 기후에 대한 기준이 필요하다. 아열대 기후를 정의하기 위한 기준은 다양하지만 쾨펜(W.Köppen), 스트랄러(A.H.Strahler), 크루츠버그(N.Creutzburg), 트레와다(G.T.Trewartha) 등의 정의가 기후학적으로 정의된 것 중 계산이 복잡하지 않아서 자주 사용된다.

우리나라의 현행 중·고 교과서에서 다루고 있는 쾨펜의 기후 구분은 1918년에 발표한 것으로 아열대 기

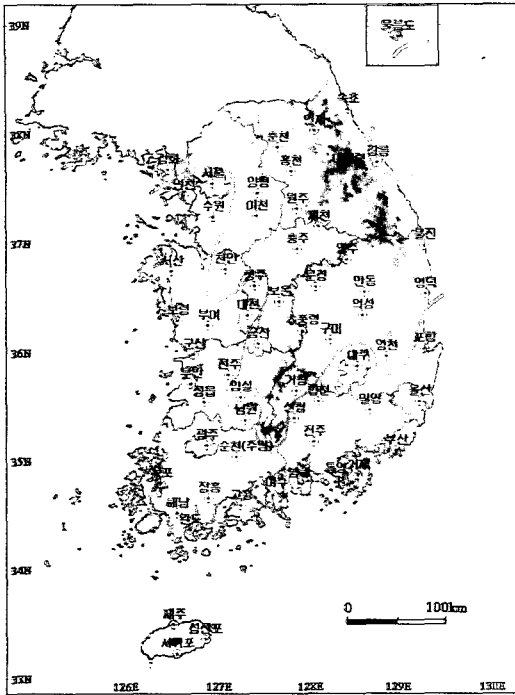


그림 1. 쾨펜 기후 구분 기준에 의한 아열대 기후지역(1971-2000년)

후가 따로 분류되어 있지 않으나, 1884년에 발표된 기후구분에는 열대, 아열대, 온대, 한대, 극대로 구분하여 아열대 기후를 정의한 것이 있다. 쾨펜은 1년 중 4~11개월이 월평균기온 20℃ 이상인 경우를 아열대 기후로 정의하였다(김연옥, 1987). 쾨펜의 기준을 우리나라의 30년 평년값(1971-2000년)에 적용해보면 4개월 동안 월평균 기온이 20℃ 이상 되는 곳은 제주도를 포함하여 남해안과 서해안에 위치한 대부분의 관측지점들과 강릉 지점을 포함하여 넓은 지역이 해당된다(그림 1). 이 기준에 의하면 현재 우리나라는 태백산맥과 소백산맥 및 노령산맥을 중심으로 한 산지 주변 지역을 제외하고는 대부분 지역이 아열대 기후에 해당한다. 동해안보다는 남해안과 서해안쪽으로의 확장이 더 두드러지며, 동해안으로는 포항 지점까지와 강릉 지점이 포함된다.

스트랄러는 아열대 기후를 1월 평균 기온이 5℃ 이상인 것으로 하였으며(Strahler, 1975), 크루츠버그는 월평균기온이 6℃ 이하인 달이 없고 동시에 월평균기

온 20℃ 이상의 달이 적어도 2개월 이상인 것으로 하였다(Creutzburg, 1950). 스트랄러의 아열대 기후 기준에 적용해보면 우리나라에서 아열대 기후 지역은 제주, 서귀포, 성산포 지점만 포함되며, 크루츠버그의 기준을 30년 평년값(1971-2000년)에 적용해보면 서귀포 관측지점만이 아열대 기후에 해당한다. 트레와다는 최한월 평균기온이 18℃이하이면서 월평균기온이 10℃ 이상인 달이 8~12개월 이상인 것으로 아열대를 정의하였다(Trewartha and Horn, 1980). 트레와다의 아열대 기후 기준을 적용하면 제주도 지역의 관측지점들과 남해안의 일부 관측지점들(거제, 마산, 부산, 통영, 목포, 여수, 완도)이 포함된다.

이처럼 기후학적 기준에서만 보더라도 어떤 기준을 이용했느냐에 따라 아열대 기후 지역의 경계선은 현저하게 달라질 수 있다. 더구나, 인간은 기후환경에 적절하게 적응하면서 고유한 문화를 만들어왔으며, 지역별로 나타나는 기후의 특성에 따라서 농작물의 종류, 파종 시기, 재배방식 등은 차이가 나기 때문에 아열대 기후 지역은 기후학적 기준에 의한 것뿐 아니라 식생이나 농업, 수산업 등 여러 분야에 따라 다양하게 정의될 수 있다. 또한 지구 기온이 상승하고 있는 현 시점에서 미래 기후 전망은 기후변화 영향 평가 및 적응 부문에 가장 필수적인 정보이며, 기후 변화에 적응 대책을 세워야 하는 모든 분야에서 유용하게 이용될 수 있다.

따라서 본 연구의 목적은 아열대 기후 지역을 명확히 구분하는 것이 아니라 현실에 부합되는 기후학적 기준을 선정하여 현재의 아열대 기후 지역을 구분하고, 미래 아열대 기후 지역의 변화를 전망하는 것이다. 이에 위에서 언급한 기준 중에서 현재 육상 및 해양 생태계의 분포 특성과 유사한 패턴을 보이고 있는 트레와다의 기준을 이용하여 아열대 기후 지역을 정의하고자 한다. 또한 향후 아열대 기후 지역의 변화 패턴을 전망하기 위하여 SRES(Special Report on Emission Scenarios) A1B 시나리오 자료를 2011년부터 30년 단위로 2100년까지 지도화하여 변화 추세를 전망해 보고자 한다.

2. 연구 자료 및 방법

본 연구에서는 현재 아열대 기후구를 정의하고 기후 지역의 시계열 변화를 파악하기 위하여 1971년부터 2006년까지 기상청의 월평균기온 자료와 30년 평년값(1971-2000년)을 이용하였다. 2011년부터 2100년까지 아열대 기후구를 전망하기 위하여 생산한 지역기후 변화 자료는 한반도를 중심(38°N, 125°E)으로 27km 해상도를 가지며, 125(동서)×105(남북)의 격자점으로 구성되어 있는 MM5(Mesoscale Model Version 5) 모델²⁾에 의해 생산된 1971년부터 2100년까지의 기온 자료이다.

아열대 기후의 기준은 트레와다의 정의를 이용하였는데, 그는 열대기후(서리가 없고 최한월 평균 기온이 18°C 이상)와의 구분을 위해서는 최한월 평균기온이 18°C이하를, 온대기후(4~7개월의 월평균 기온이 10°C 이상)와의 구분을 위해서는 월평균기온 10°C이상인 달이 8~12개월인 지역을 기준으로 사용하였다.

현재까지 아열대 기후지역의 시계열 변화를 파악하기 위하여 1971년부터 2000년까지 10년 단위로 나누어 분석하였다. 2000년부터 2006년까지는 전 기상관측지점이 자동기상관측으로 기상관측 환경이 달라졌으므로 분리하여 분석하였다. 관측지점은 1971년이나 1973년부터 현재까지 연속자료가 있는 61개 관측지점으로 하였다. 또한 대기와의 열 교환으로 기후에 영향을 미치는 해양의 최근 10년간의 해수면 온도 분포와 평년값(1971-2000년)과의 차이를 분석하여 아열대 기후구 작성에 참고 자료로 이용하였다.

미래 아열대 기후 지역을 지도화하기 위해서는, 기후변화에 영향을 미치는 온실가스 및 에어로솔의 농도 변화의 관측(과거)과 전망(미래) 시나리오를 기후모델에 적용하여 장기간(예를 들어 1971-2100년) 기후변화 시나리오를 생산하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 ECHO-G에서 기후변화 시나리오의 산출을 위해 사용된 배출시나리오 중 IPCC 배출 시나리오 특별보고서(Special Report on Emission Scenarios)의 A1B 시나리오를 사용하였다. A1B 시나리오는 현재 이산화탄소의 배출량이 점차 증가하여 2050년경에 정점에 도달한 다음 그 이후 다소 감소하

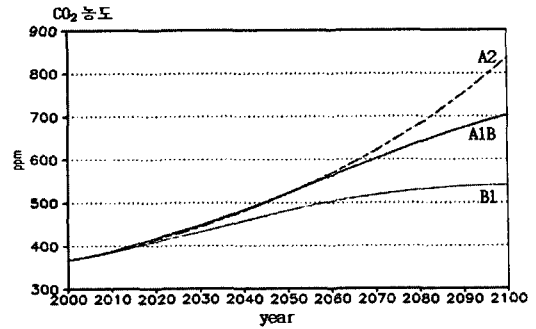


그림 2. SRES 시나리오별 대기중 CO₂ 농도변화

는 시나리오로서 대기 중 이산화탄소 농도는 2100년경에 700ppm에 도달할 것으로 예상되는 시나리오로서 현실에 가장 잘 부합되는 시나리오이다(그림 2).

산업혁명이후부터 수백 년 후 미래에 대한 장기간의 기후변화 예측에는 대부분 수백 km의 해상도를 갖는 모델이 주로 사용되어 왔다. 그러나 이러한 기후 모델에 의해 산출된 기후변화는 모델의 분해능과 물리과정의 한계로 인하여 지역적인 특성을 표현하기에는 많은 어려움이 있었다. 1990년대 초부터 지역적인 상세규모의 기후자료를 생산하기 위해서 지역기후모델을 이용한 역학적 규모축소(dynamic downscaling) 기법이 널리 연구되어 왔는데(Giorgi, 1990; Hirakuchi and Giorgi, 1995 등), 대부분 50km 정도의 수평해상도를 갖고 있다. 최근에는 지형이 매우 복잡한 동아시아 등의 지역 기후 예측을 위하여 27km의 고해상도 지역 기후 모델이 활용되기도 한다(기상연구소, 2003, 2004). 기상연구소에서는 지난 수년간 한반도 및 동아시아 지역의 상세한 기후변화 시나리오 산출을 위해 ECAHM4³⁾/HOPE-G⁴⁾(ECHO-G)에 의해 생산된 400km 해상도의 전지구 저해상도 기후변화 시나리오를 역학적 규모축소 기법을 이용하여 27km의 해상도를 가지는 MM5 모델에 의한 상세 기후변화 시나리오를 생산하였다(기상연구소, 2002a, 2002b, 2003, 2004, 2005, 2006). 본 연구에서는 기상연구소에서 MM5 모델에 의해 생산한 미래 전망 자료를 이용하였다.

기후 모델이 현재 기후를 잘 모사(simulation) 할 수 없다면 미래 기후를 전망한 것에 대해 확신할 수 없기 때문에(Viner and Mayer, 1994), 기후모델의 결과물을 연구에 사용할 때에는 신뢰성을 높이기 위하여 최근

평균값으로 모사된 기후 모델 결과를 현재 기후 조건에서 관측된 자료와 비교하여 확인하는 과정이 필요하다(Carter *et al.*, 1999). 따라서 본 연구에서 이용한 MM5 모델의 모의결과와 기상청 관측 자료를 비교 검증하였는데(기상연구소, 2006), 검증 결과 모델과 관측 자료간의 전반적인 수평분포는 유사하고 전체적으로 산맥의 영향도 잘 반영하였다. 비록 관측값에 비해 모델 적분 기온값이 평균적으로 낮게 모사되기는 하지만 이러한 현상은 MM5뿐만 아니라 RIEMS(regional integrated environmental model system), CCAM(conformal cubic atmospheric model), SNU RCM(regional climate model) 등 다른 모델에서도 유사하게 나타난다(Fu *et al.*, 2005).

A1B 시나리오에 근거한 MM5 모델 예측값을 이용하여 미래 아열대 기후 지역을 지도화 하기 위해서 1971년부터 2000년까지의 지역 기후 예측(27km 격자 규모)자료에서 61개 기상관측지점에 해당하는 위치의 격자값을 추출하였다. 모델에서 예측된 1971-2000년까지의 30년 평균값을 같은 기간의 기상청 관측자료와의 기온 차를 산출하여 그 차이를 2011년부터 30년 단위로 2100년까지 모델로부터 얻은 예측값에 합하여 보정하였다.

현재 기후변화에 의한 기온 상승분에서는 도시화 효과에 의한 부분이 포함되어 있으나 본 연구에서는 도시화에 의한 기온 상승분을 따로 산출하여 보정하지 않았다. 그러나 아열대 기후구의 지도화 과정에서는 우리나라 5대 도시(서울, 부산, 대구, 대전, 광주)를 대상으로 도시화에 의한 기온 상승분을 산출한 Oh *et al.*(2004)의 연구 결과를 참고하여 작성하였다. 또한 1/25,000을 기반으로 작성한 고도 자료와 관측지점의 해발고도 자료를 분석에 참고하였다.

3. 결과 및 토의

1) 관측자료에 의한 시기별 아열대 기후구의 변화

과거 및 현재의 아열대 기후지역을 파악하기 위하여 30년 평년값(1971-2000년)에 트레와다의 기준을 적용

시켜 지도화하였다. 아열대 기후 지역을 구분한 결과, 제주도를 포함하여 부산, 거제, 통영 지점을 중심으로 한 남동해안과 목포, 완도, 여수 지점이 아열대 기후 지역에 해당한다(그림 3). 월평균기온 10°C 이상인 달이 서귀포 지점은 9개월이며, 그 외 지점들은 8개월이다.

이것을 10년 단위로 나누어 공간적으로 분석해 본 결과 1971-1980년에 아열대로 구분되었던 부산, 통영, 여수, 완도, 목포 지점과 제주도 전 지점은 1981-1990년에도 변화 없이 아열대로 분류되었다. 부산이나 목포 지점의 경우 도시화에 의한 기온 상승분을 고려한다면 1980년까지는 남해안에 국한되어 아열대 기후 지역이 분포했다고 볼 수 있다.

1991-2000년으로 가면서 기준에 아열대로 분류되었던 지점들에 남해, 거제, 울산, 포항 등이 추가되면서 남동해안 쪽으로 확대되고 있는 경향을 보였다. 마산 지점의 경우는 1984년부터 관측이 되기 시작하였기 때문에 30년 평년값 분석에서는 제외하였으나, 10년 단위로 분석해 본 결과 아열대 기후에 포함되었다. 2001-2006년의 경우도 1991-2000년에 분류된 아열

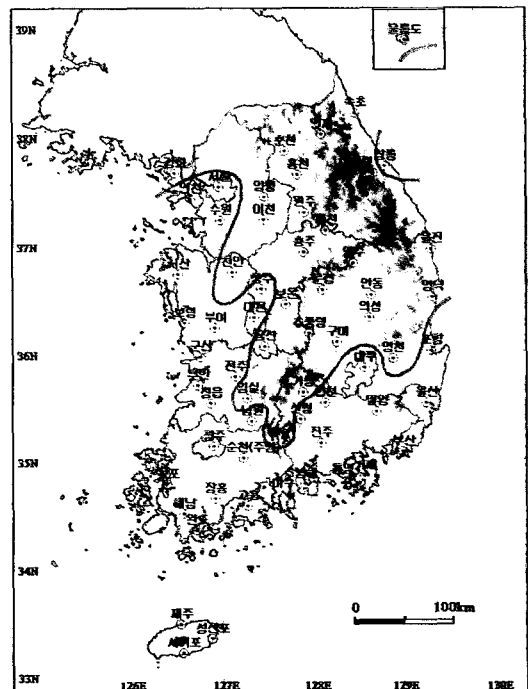


그림 3. 트레와다 기후 구분 기준에 의한 아열대 기후지역(1971-2000년)

대 기후구와 같게 분류되었다. 울릉도 지점은 아열대 기후구에 해당하지 않았다.

10년 단위의 분석 결과 1970년대와 1980년대의 아열대 기후구가 같고 1990년대와 2006년까지의 기후구가 같았으며, 분석에 이용된 61개 지점들 중에서 1973년부터 관측 자료가 있는 경우가 많기 때문에 지도화는 1990년을 기준으로 전후 15년간인 1976-1990년까지(그림 4)와 1991-2005년까지(그림 5)로 나누어 하였다.

이상에서 아열대 기후구의 최근 10년 동안의 변화 경향을 보면, 남해안에서 동해안으로 확장되는 추세인데, 이는 해수면 온도 상승에 의한 영향으로 볼 수 있다. 최근 10년간(1996-2005년) 전구의 평균 해수면 온도의 분포를 보면 평년보다 상승하는 경향이며, 특히 북태평양에서도 중부지역 중 유라시아 대륙의 동안을 중심으로 상승경향이 뚜렷하다. 우리나라 주변으로 해수면 온도⁶⁾의 30년 평년값에 대한 최근 10년간의 편차를 보면 0.6℃ 이상의 상승폭을 보이는데 서해안보다 동해안에서의 상승폭이 더 크게 나타났다(그림 6). 이러한 경향은 다른 연구에서도 유사하게 나타나는데, Minobe(2000)는 1998년 이후로 북태평양 중부 지역에서 해수면 온도가 상승하는 경향이라고 했으며, 일본 기상청(2004)의 연구에서도 1977-1988년의 평균 해수면 온도와 1989-1998년의 평균 해수면 온도의 차이값과 1989-1998년의 평균 해수면 온도와 1999-2004년의 평균 해수면 온도간의 차이값을 비교한 결과, 북태평양 지역의 중부지역에서는 해수면 온도가 상승하는 경향이 뚜렷하다는 결과를 보였다. 지구 기온 상승에 의한 해수면 온도 상승이 계속 진행된다면 아열대 기후구도 해안지역으로의 확대가 더 빨리 진행될 것으로 추정되며, 서해안보다는 동해안에 인접한 지역들로 확대될 것으로 추정된다.

2) A1B 시나리오 자료를 이용한 2100년까지의 시기별 아열대 기후구의 변화

트레와다 기준을 적용하여 모델에 의해 산출된 기온 값을 토대로 2011년부터 30년 평균값으로 2100년까지 분석한 결과 현재 제주도와 남해안 일부 지역에 해당

했던 아열대 기후구가 남해안 전역과 동해안으로 확장되어 가는 추세를 보였다. 2011-2040년까지의 전망에서는 동해안에서 강릉과 울진 지점이 아열대 기후구에 포함되었으며 울릉도 지점도 아열대 기후구에 포함되었다(그림 7). 2021-2050년까지의 아열대 기후구를 전망해보면, 제주도와 울릉도 지점을 포함하여 남해안과 동해안의 모든 지점들이 아열대 기후에 해당한다(그림 8)

2031-2060년까지의 아열대 기후구 전망에서는 대구, 군산, 광주와 같은 대도시 지역들이 포함되는데 이는 지구 온난화와 더불어 기온 상승 원인의 20-30%를 차지하고 있는 도시화 효과(Choi *et al.*, 2003) 때문으로 생각된다(그림 9). 2041-2070년의 아열대 기후구 전망에서는 남부 지역에서 내륙으로의 확장이 두드러지는데, 소백산맥의 끝자락인 지리산 주변의 산청, 거창, 함천 등의 지점을 제외하고는 경남 내륙이 모두 아열대 기후구에 포함되었다. 전라남·북도에서도 지리산 주변의 임실, 남원, 순천 지점을 제외한 관측지점이 해당하며, 대도시에 위치한 전주 지점은 군산과 더불어 아열대 기후구에 해당한다(그림 10).

2051-2080년의 전망을 보면, 서해안으로는 부안을 포함하여 보령 지점까지 아열대 지역이 확대되며, 대도시 해안 지역인 인천 지점이 아열대 기후구에 포함된다. 동해안으로는 2021-2050년부터 속초 지점까지 확대된 것이 유지되면서 산청 지점을 포함한 내륙으로의 삽입이 이루어지고 있다(그림 11). 2061년에서 2090년까지의 전망에서는 우리나라 산지 지형의 특색을 더 잘 보이는데 태백산맥과 소백산맥을 중심으로 해발고도의 영향을 받는 지점들을 제외하고 내륙으로 더욱 확대되어 가는 패턴을 보이고 있다. 서해안으로는 서산 지점까지 확장되었으며, 대도시권에서는 인천과 서울 지점이 포함되었다. 또한 문경, 구미 관측지점을 포함한 경상북도 내륙으로의 확대가 두드러졌다(그림 12).

그림 13은 트레와다 기준에 의한 아열대 기후구를 기상청 관측 자료인 30년 평년값(1971-2000년)을 이용하여 표현한 경계와 A1B 시나리오에 근거한 모델로부터 2071년에서 2100년까지 30년간 평년값을 산출하여 전망한 것을 비교한 것이다.

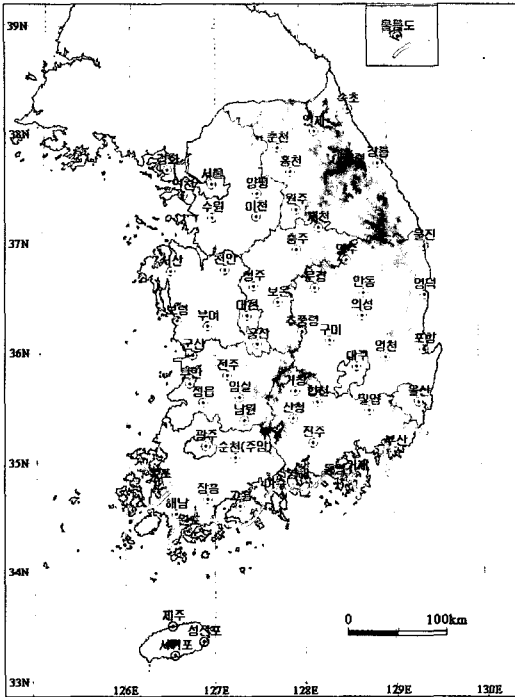


그림 4. 트레와다 기후 구분 기준에 의한 아열대 기후지역(1976-1990년)

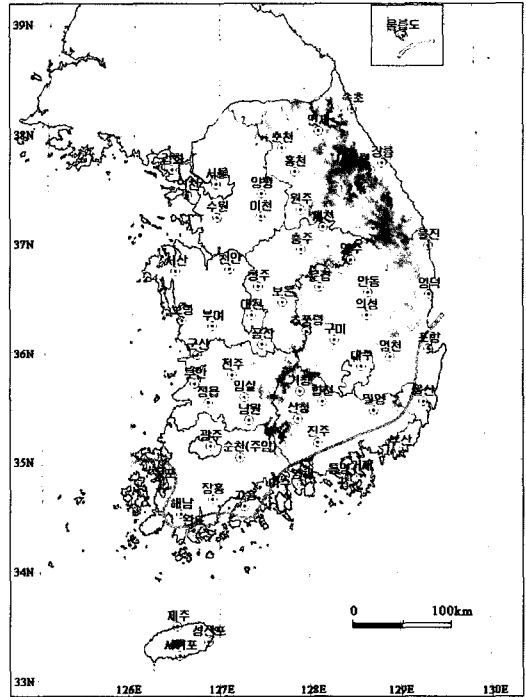


그림 5. 트레와다 기준에 의한 아열대 기후지역(1991-2005년)

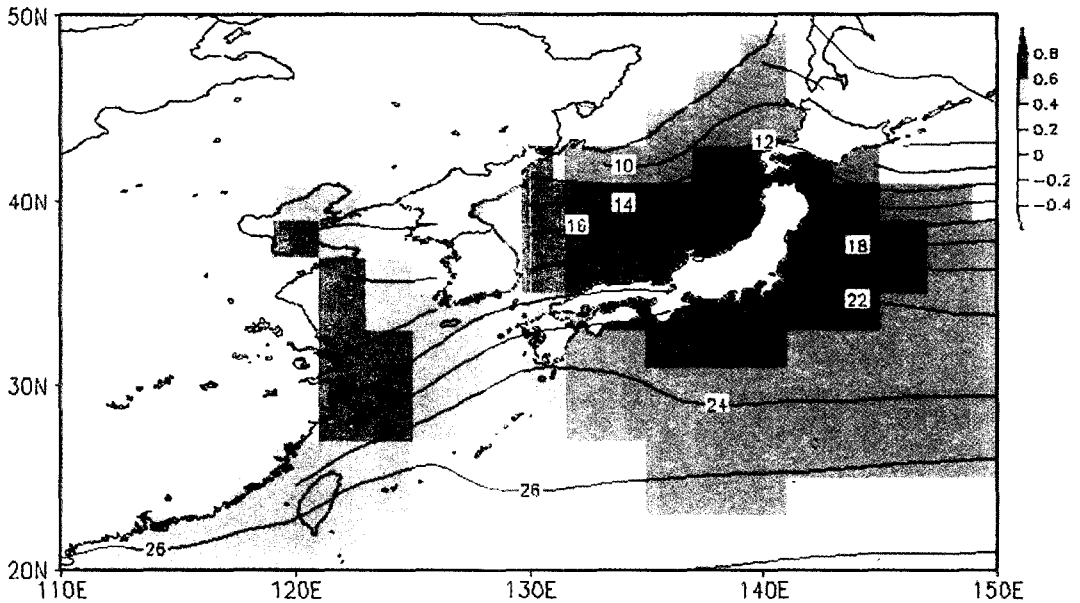


그림 6 우리나라 부근의 해수면온도(SST)와 아노말리
(등치선: 1996-2005년의 평균 SST, 음영: 1971-2000년 평균에 대한 1996-2005년의 평균 SST 아노말리)

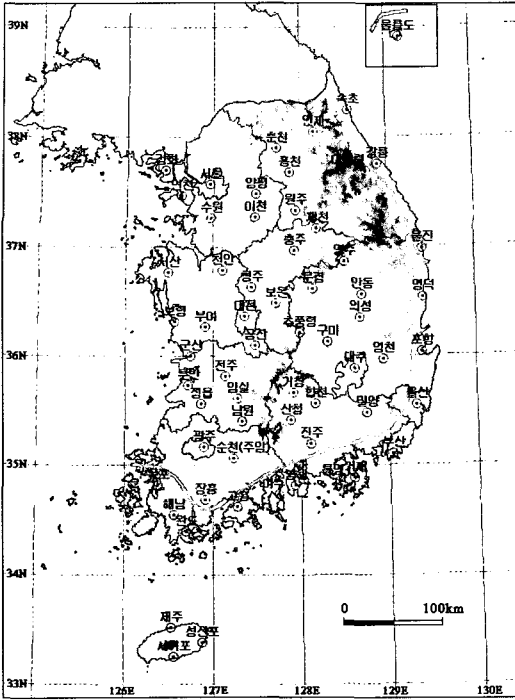


그림 7. A1B 시나리오에 근거한
아열대 기후지역(2011-2040년)

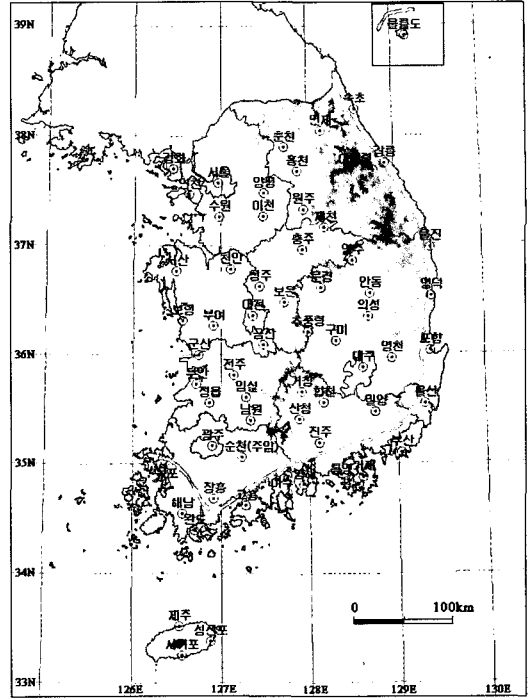


그림 8. A1B 시나리오에 근거한
아열대 기후지역(2021-2050년)

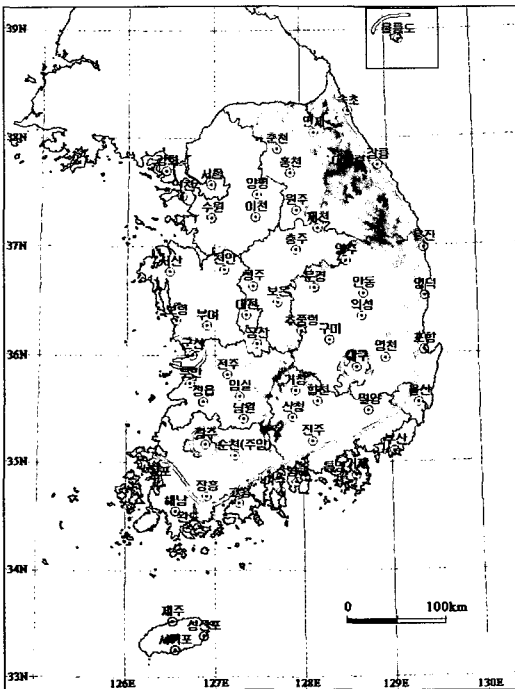


그림 9. A1B 시나리오에 근거한
아열대 기후지역(2031-2060년)

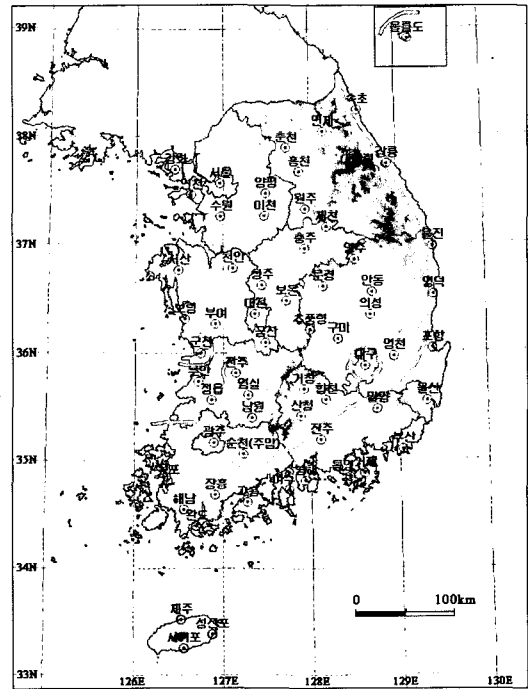


그림 10. A1B 시나리오에 근거한
아열대 기후지역(2041-2070년)

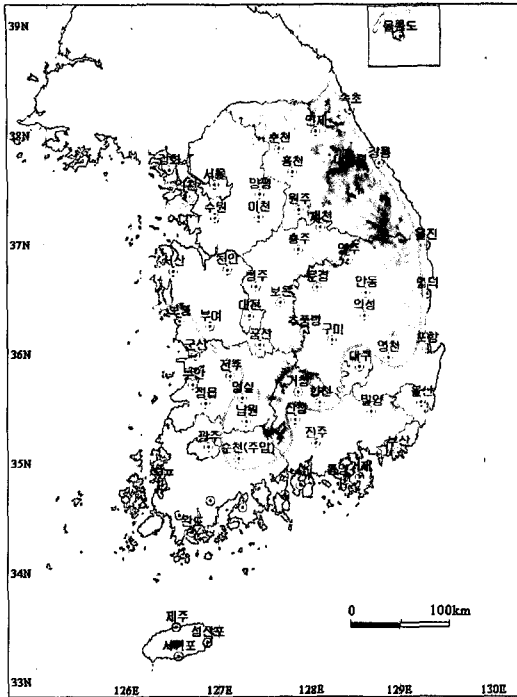


그림 11. A1B 시나리오에 근거한 아열대 기후지역(2051-2080년)

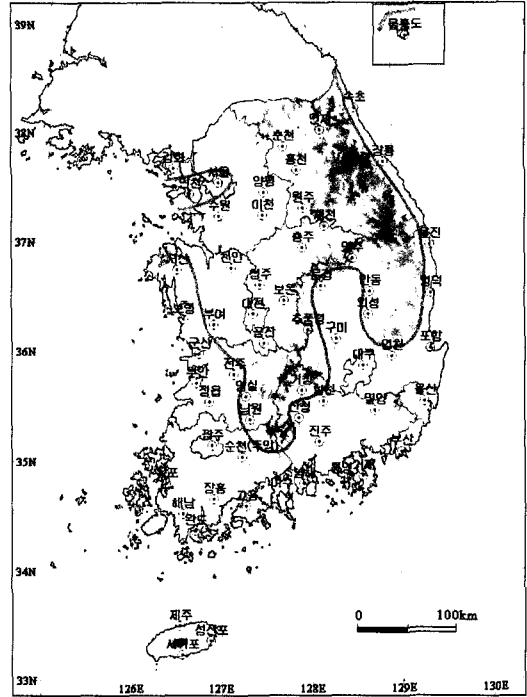


그림 12. A1B 시나리오에 근거한 아열대 기후지역(2061-2090년)

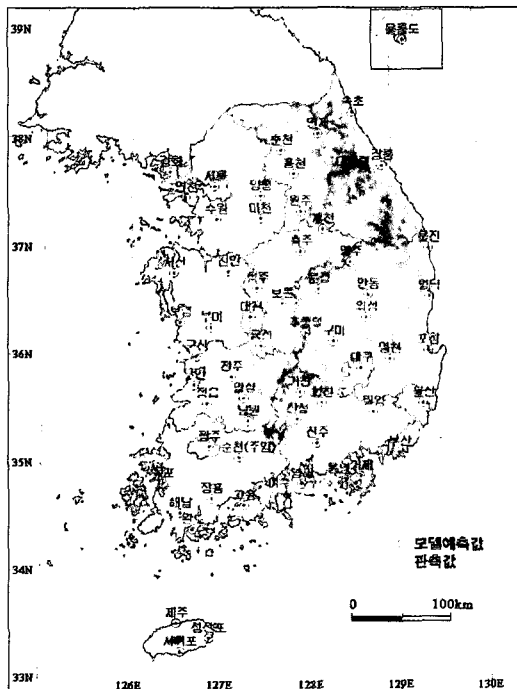


그림 13. 관측값(1971-2000년)과 모델 예측값(2071-2100년)에 근거한 향후 100년 후 아열대 기후구의 변화

2071-2100년 아열대 기후구 전망에서는 해안지역의 경우, 서해안의 강화 지점을 제외하고 동해안과 남해안의 모든 지점이 아열대 기후구에 해당한다. 내륙으로는 임실, 거창, 금산, 보은, 안동, 의성 지점 등과 같이 태백산맥과 소백산맥의 주변에 위치하며, 해발고도가 비교적 높은 일부 지점들을 제외하고는 충청북도까지 아열대 기후구가 확장된다고 볼 수 있다. 또한 위도는 높으나 대도시 지역인 서울, 인천과 수원 지점이 아열대 기후구에 포함된다.

4. 결론

지구 온난화에 따른 기온 상승은 주요 농작물의 재배 적지를 변화시키거나 농업 생산량의 불확실성을 높이는 등 농업 생태계에 큰 영향을 주고 있으며, 임업 및 수산업, 보건 등 여러 분야에서 우리 생활과 밀접한 관련성을 가진다. 농촌진흥청에 따르면 현재 우리나라

도 다양한 농작물 재배 적지가 북상하고, 아열대나 열대 잡초의 침입현상이 발생하고 있는 등 곳곳에서 기후변화 영향을 받고 있다. 한 예로 사과와 여름철 평균 기온이 26℃를 넘지 않고 겨울철 기온이 10.5℃ 이하로 떨어지지 않는 곳에서 재배가 가능하며 연평균 기온 13℃ 이하인 곳에서 좋은 품질이 재배된다. 따라서 대표적인 사과 산지였던 대구(30년 평년값 13.7℃)보다 북쪽에 위치해 있는 경북 의성이나 영주, 청송 등과 같은 지역들로 품질 좋은 사과 재배지역이 옮겨갔으며, 현재는 영월이나 양구와 같은 강원도 산지 지역에서도 사과 재배 면적을 늘리고 있는 실정이다. 또한 기온 상승과 관련하여 여러 가지 질병들이 곳곳에서 발병하고 있다. 이와 같은 지역적인 기후변화로 인한 악영향을 사전 예방하기 위한 적응대책을 수립하는 것은 지속가능한 발전을 위해 매우 시급한 과제이므로 (Easterling *et al.*, 2004), 미래 기후가 어떻게 변할 것인지 미리 전망하는 일은 필수적이다.

이러한 일환으로 아열대 기후 지역에 대한 미래 전망도 우리가 기후 변화 양상에 따른 적응 대안을 마련하기 위한 기본 정보가 될 수 있다. 예를 들어, 향후 아열대 기후에 해당하는 지역에서는 농업 분야의 경우 온난한 기후에 적합한 농작물 품종을 개량함으로써 농업 생산성을 안정화할 수 있을 것이다. 보건 분야에서는 온난화에 따라 말라리아나 황열병, 뎅기열 등과 같은 열대 전염병의 발생 확률이 높은 지역에 대해 사전 방역을 실시하고 예방대책을 세워 사회 부정적인 영향을 줄일 수 있을 것이다. 또한 발생 가능한 열대 전염병 증상에 관한 교육을 의과대학 교육과정에 추가하고 국가 차원의 열대 전염병의 예방약 및 치료약을 확보함으로써 열대 전염병 발생시 신속한 발견 및 조치로 확산을 방지할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 아열대 기후에 관한 트레와다의 정의를 적용하여 현재 아열대 기후구와 미래 아열대 기후구의 변화를 전망해 보았다. 그 결과 현재는 제주도를 포함한 남해안 일부 지역에 해당하던 아열대 기후지역이 2071-2100년에는 태백산맥과 소백산맥을 중심으로 그 주변 지역을 제외하고는 제주도와 울릉도를 포함하여 충청북도 지역까지 확장되었다. 또한 관측값을 이용하여 10년 단위로 분석한 결과, 남해안에서 동해

안으로 점차 확장되어가는 경향을 보였으며, 이는 예측값에서도 그 경향이 잘 나타났다. 이러한 경향은 해수면 온도와 밀접한 관련을 가지는데, 최근 10년간의 해수면온도 변화를 보면 서태평양에서 고온화 현상이 두드러지며, 우리나라 주변에서는 서해안보다 동해안에서의 수온 상승이 더 높게 나타났다. 따라서 향후 2100년까지 전망된 아열대 기후구에서도 남해안에서 동해안으로의 확장이 우선적으로 진행됨에 따라 속초와 울릉도가 먼저 아열대 기후구에 포함된 후 서해안과 내륙지역으로 확대되어가는 경향이다.

현재 관측값에 의해 아열대 기후로 구분되어 지는 통영에서는 다른 지역과의 경관 차별화를 위해 이미 1997년에 식재해 놓은 야자수 나무가 10년 넘게 잘 자라고 있으며, 열대 및 아열대 식생을 꾸준히 늘리고 있는 실정이다. 즉, 이는 기온 상승에 의해 2100년이 되면 위도가 높아도 동해안에 위치한 속초와 같은 해안 지역은 물론 서울, 인천과 같은 대도시지역에서도 아열대 기후 지역에서 생육되는 가로수로 식생의 변화가 있을 수 있다는 것을 의미한다.

이러한 시점에서 생태계 변화의 전환점이 될 수 있는 아열대 기후 지역 경계에 대한 변화 전망은 여러 분야에서 장기적인 적응 대책을 세울 수 있는 기초 자료를 제공할 수 있을 것이다.

謝辭

본 연구는 기상청 국립기상연구소 사업 “metri-2007-B-5”의 지원으로 수행되었으며, 국립기상연구소의 기후변화 시나리오를 사용하였다.

註

- 1) <http://www.ipcc.ch/present/presentations.htm>, 현재 IPCC 4차보고서는 홈페이지를 통해서 SPM(Summary for Policymakers)만 보고가 된 상태이며, 올해안에 정식 보고서를 발간할 예정이다.
- 2) 대기 모델인 ECHAM4 모델은 해상도가 T30으로서 약 400km의 수평해상도를 가지며, 수직으로는 지표에서

- 10hPa까지 19개 층으로 이루어져 있다.
- 3) 해양 모델인 HOPE-G는 해빙모델을 포함하고 있으며, 해상도는 수평적으로 T42 수직적으로 L20이다.
 - 4) 지역기후 모델인 MM5는 미국 국립기상센터(National Center for Atmospheric Research, NCAR)와 펜실베니아 주립대학(Pennsylvania State University, PSU)에서 공동 개발한 것이다.
 - 5) IPCC에서는 4차 평가 보고서(AR4, 2007년 발간예정)를 작성하기 위해서 세계 연구기관에 온실가스 배출에 관한 특별 보고서(IPCC, 2000)에서 제시된 시나리오 중 A1B, A2, B1 시나리오에 따른 시뮬레이션을 수행할 것을 요청하였다. 기상연구소에서는 독일 막스플랑크 기상연구소(MPI, Max Planck Institute for Meteorology)에서 개발한 온실가스 및 에어로솔 효과를 포함할 수 있는 대기-해양 결합 기후 모델(AOGCM, Atmosphere-Ocean General Circulation Model)인 ECHAM4/HOPE-G(ECHO-G) 모델을 도입하여 슈퍼컴퓨터에서 장기간 시나리오 실험을 수행하였다. ECHO-G 모델의 실험 결과 21세기 말에는 전구(동아시아)기온이 A1B 실험에서는 2.7°C(3.8°C), B1 실험에서는 2.0°C(3.2°C) 상승하여 동아시아의 기온상승이 전구 평균보다 클 것으로 전망되었다.
 - 6) 자료출처는 <http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/sst/sst.html>.

文獻

- 권원태, 2005, "기후변화의 과학적 현황과 전망," 한국기상학회지, 41(2), 325-336.
- 기상연구소, 2002a, 기후변화협약대응 지역기후시나리오 산출기술개발(I), 기상연구소.
- 기상연구소, 2002b, 슈퍼컴을 활용한 예보능력 향상연구/ 대기-해양-해빙 결합모델 활용 체계 구축, 기상연구소.
- 기상연구소, 2003, 기후변화협약 대응 지역기후 시나리오 산출기술개발(II), 기상연구소.
- 기상연구소, 2004, 기후변화협약 대응 지역기후 시나리오 산출기술개발(III), 기상연구소.
- 기상연구소, 2005, 기후변화협약대응 지역기후시나리오 활용기술 기발 (I), 기상연구소.
- 기상연구소, 2006, 기후변화협약대응 지역기후시나리오 활용기술 기발 (II), 기상연구소.
- 김연옥, 1987, 기후학개론, 정익사, 191-224.
- 박용하 · 전성우 · 최재용 · 정취철 · 김정원, 2000, 기후변화에 따른 생태계 영향 평가 및 대응방안 I: 산림 생태계 부문을 중심으로, 국립환경정책평가연구원, 44-50.
- 박종화 · 황강석 · 강영실, 2000, "한국 근해 겨울철 온난화와 주요 어종의 어황 변화," 한국수산자원학회지, 3, 77-87.
- 서형호, 2003, "기후변화가 원예작물의 성장과 품질에 미치는 영향(과수를 중심으로)," 한국농림기상학회 춘계 학술발표논문집, 131-137.
- 서형호 · 김점국, 2005, "기후변화가 과수 재배에 미치는 영향," 한국농림기상학회 추계 학술발표논문집, 103-106.
- 심교문 · 윤성호 · 정영상 · 이정택 · 황규홍, 2002, "최근의 기상환경 변화에 따른 가을 보리의 수량 구성요소 및 생육 단계 변화," 한국농림기상학회지, 4(1), 38-48.
- 심교문 · 이정택 · 이양수 · 김진엽, 2004, "최근의 기후변화를 고려한 가을 보리 안전재배시대 구분," 한국농림기상학회지, 6(4), 218-234.
- 윤성호 · 임정남 · 이정택 · 심교문 · 황규홍, 2001, "기후변화와 농업생산의 전망과 대책," 한국농림기상학회지, 3(4), 220-237.
- 이승범 · 신경섭 · 조영순 · 손승희, 2003, "식물계절에 나타난 한반도 기후변화 영향," 대기, 13(1), 468-471.
- 이승호 · 이경미, 2003, "기온 변화에 따른 벚꽃 개화시기의 변화 경향," 환경영향평가학회지, 12(1), 85-99.
- 정재은 · 서희철 · 정유란 · 윤진일, 2006, "겨울기온 상승에 따른 낙엽과수의 휴면상태 변화," 한국농림기상학회지, 8(2), 116-124.
- 하장성 · 이승호 · 권원태, 2006, "우리나라 작물 분포와 기후와의 관계: 벼, 월동배추를 사례로," 한국기상학회지, 39(5), 531-540.
- 日本 気像廳, 2004, 近年における世界の異常気象と氣候變動 -その實態と見通し(VI).
- Boo, K. O., Kwon, W. T., and Kim, J. K., 2004, Vegetation change in the regional surface climate over East Asia due to global warming using BIOME4, *Il Nuovo Cimento*, 27(4), 317-327.
- Boo, K. O., Kwon, W. T., and Baek, H. J., 2006, Change of extreme events of temperature and precipitation over Korea using regional projection of future climate change, *Geophysical*

- Research Letters*, 33, L01701, doi:10.1029/2005GL023378.
- Bright, D. R. and Mullen, S. L., 2002, The sensitivity of the numerical simulation of the southwest monsoon boundary layer to the choice of PBL turbulence parameterization in MM5, *Weather and Forecasting*, 17, 99-114.
- Choi, Y., Jung, H. S., Nam, K. Y., and Kwon, W. T., 2003, Adjusting urban bias in the regional mean surface temperature series of South Korea, 1968-99, *International Journal of Climatology*, 23(5), 577-591.
- Creutzburg, N., 1950, Klima, Klimatypen und Klimakarten, *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 94, 57-69.
- Carter, T. R., Hulme, M., and Lal, M., 1999, *IPCC-TGCLIA Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment*, Version 1, IPCC, Task Group on Scenarios for Impact Assessment.
- Dudhia, J., 1993, A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Monthly Weather Review*, 121, 1493-1513.
- Easterling, W. E., Hurd, B. H., and Smith, J. B., 2004, *Coping with Global Climate Change: The Role of Adaptation in the United States*, Pew Center Report.
- Fu, C., Wang, S., Xiong, Z., Gutowski, W. J., Lee, D. K., McGregor, J. L., Sato, Y., Kato, H., Kim, J. W., and Suh, M. S., 2005, Regional climate model intercomparison project for Asia, *Bulletin American Meteorological Society*, DOI:10.1175/BAMS-86-2-257.
- Giorgi, F., 1990, Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model, *Journal of Climate*, 11, 3204-3229.
- Grell, G. A., Dudhia, J., and Stauffer, D. R., 1994, *A Description of the Fifth-generation Penn State-NCAR Mesoscale Model (MM5)*, NCAR Technical Note NCAR/TN-398 +STR.
- Hirakuchi, H. and Giorgi, F., 1995, Multiyear present-day and 2xCO₂ simulations of monsoon-dominated climate over eastern Asia and Japan with a regional climate model nested in a general circulation model, *Journal of Geophysical Research*, 100, 21105-21125.
- Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noquer, M., Van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., and Johnson, C. A.(eds.), 2001, *Climate Change 2001: The Scientific Basis, IPCC Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- Janjic, J. S., 1994, The step-mountain Eta Coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes, *Monthly Weather Review*, 122, 927-945.
- Kalvová, J., Halenka, T., Bezpalcová, K., and Nemešová, I., 2003, Köppen climate types in observed and simulated climate, *Studia Geophysica et Geodaetica*, 47, 185-202.
- Minobe, S., 2000, Spatio-Temporal structure of the pentadecadal variability over the North Pacific, *Progress in Oceanography*, 47, 381-408.
- Mnchell, M. and Kienholz, J., 1997, A climatological analysis of the Koppen Dfa/Dfb boundary in Eastern North America, 1901-1990, *Ohio Journal of Science*, 97(3), 53-58.
- Oh, S. N., Kim, Y. H., and Hyun, M. S., 2004, Impact of urbanization on climate change in Korea, 1973-2002, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 40(6), 725-740.
- Strahler, A. N., 1975, *Physical Geography*, John Wiley and Sons, New York.
- Smith, T. M. and Reynolds, R. W., 2003, Extended reconstruction of global sea surface temperatures based on COADS data (1854-1997), *Journal of Climate*, 16, 1495-1510.
- Trewartha, G. T. and Horn, L., 1980, *An Introduction to Climate*, 5th Edition, McGraw-Hill, New York.
- Viner, D. and Mayer, L., 1994, *Climate Change Scenarios for Impact Studies in the UK*, Report, Contract

A1B 시나리오 자료를 이용한 우리나라 아열대 기후구 전망

No PECD 7/12/96, CRU, Norwich, University of
East Anglia.

Laboratory, Meteorological Research Institute,
Sindaebang-dong, Dongjak-gu, Seoul, 156-720,
Korea(e-mail: yakwon71@hotmail.com)

교신: 권영아, 156-720, 서울시 동작구 신대방동 460-18번지,
국립기상연구소 기후연구팀(이메일: yakwon71@
hotmail.com)

Correspondence: Young-Ah Kwon, Climate Research

최초투고일 07. 04. 26.

최종접수일 07. 06. 11.