

한반도 기후변화의 추세와 원인 고찰

A Review of Recent Climate Trends and Causes over the Korean Peninsula

안순일*† · 하경자** · 서경환** · 예상욱*** · 민승기**** · 허창회*****
An, Soon-Il*†, Ha, Kyung-Ja**, Seo, Kyong-Hwan**, Yeh, Sang-Wook***,
Min, Seung-Ki**** and Ho, Chang-Hoi*****

*연세대학교, 대기과학과, **부산대학교, 대기환경과학과,
한양대학교, 해양환경과학과, *캐나다 환경청 기후연구부, 토론토, 캐나다,
*****서울대학교, 지구환경과학부

*Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea,
**Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Korea,
***Department of Environmental Marine Sciences, Hanyang University, Ansan, Korea
****Climate Research Division, Environment Canada, Toronto, Canada
*****School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

요 지

이 연구에서는 한반도에서 나타난 기후변화 추세를 요약하고 그 원인을 평가하였다. 인간 활동에 기인한 기후 변화는 한반도 지역에 상대적으로 빠른 변화를 유도하였다. 지난 10년간 한반도 지역의 이산화탄소 농도는 전 지구 평균보다 빠르게 상승했으며, 평균기온 역시 지구평균 기온보다 크게 증가하였다. 또한, 혹한기온 발생은 감소하고, 혹서기온 발생은 증가하여 평균 기온의 상승을 유도하였고, 지표면 녹지화(greenness) 역시 상대적으로 빠르게 진행되었다. 한편, 한반도의 1990년 이후의 여름철 평균 강수는 그 이전에 비해 15% 정도 증가하였다. 이는 8월 강수량의 증가에 기인한 것이며, 장마 기간 동안의 평균 강수량은 오히려 약 5% 감소하였다. 집중호우의 경우 1970년대 후반을 기점으로 증가하는 양상을 보이고 있으며, 남부지역을 중심으로 강수가 없던 날의 지속일수 역시 다소 증가하여, 강수의 지속성은 약해지고 집중성이 점차 증가하고 있는 것으로 파악되었다. 또한, 강한 태풍의 발생 빈도가 다소 증가하고 있으며, 최근 10년 동안에는 한반도 남동쪽으로 상륙하는 태풍의 수가 증가 추세를 보이고 있다. 한편, 도시화 효과에 의한 기온 증가는 1950년대 이후 뚜렷한 증가 추세를 보이고 있는데, 한반도 평균기온 증가의 약 28%가 도시화 효과에 의한 것이라 할 수 있다. 엘니뇨 해의 한반도 겨울철 평균 기온은 대체로 평년보다 높았으며, 여름철 평균 기온은 평년보다 낮았다. 여름철 강수의 경우 엘니뇨 해에 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 최근

† Corresponding author : E-mail: sian@yonsei.ac.kr

들어 발생 빈도가 증가하기 시작한 중태평양 엘니뇨의 발달시기에는 한반도에 온난한 여름·가을을 유도하는 것으로 보고되었다. 기후변화 탐지와 원인규명은 미래 기후변화 전망의 신뢰성을 높이는 데 필수적인 요건으로, 앞으로 보다 포괄적인 연구가 요구된다.

키워드 : 한반도 기후 변화, 이산화탄소 증가, 기후 변화 탐지, 동아시아 몬순, 엘니뇨, 태풍, 계절내 진동, 도시화 효과

ABSTRACT

This study presents a review on the recent climate change over the Korean peninsula, which has experienced a significant change due to the human-induced global warming more strongly than other regions. The recent measurement of carbon dioxide concentrations over the Korean peninsula shows a faster rise than the global average, and the increasing trend in surface temperature over this region is much larger than the global mean trend. Recent observational studies reporting the weakened cold extremes and intensified warm extremes over the region support consistently the increase of mean temperature. Surface vegetation greenness in spring has also progressed relatively more quickly. Summer precipitation over the Korean peninsula has increased by about 15% since 1990 compared to the previous period. This was mainly due to an increase in August. On the other hand, a slight decrease in the precipitation (about 5%) during Changma period (rainy season of the East Asian summer monsoon), was observed. The heavy rainfall amounts exhibit an increasing trend particularly since the late 1970s, and a consecutive dry-day has also increased primarily over the southern area. This indicates that the duration of precipitation events has shortened, while their intensity became stronger. During the past decades, there have been more stronger typhoons affecting the Korean peninsula with landing more preferentially over the southeastern area. Meanwhile, the urbanization effect is likely to contribute to the rapid warming, explaining about 28% of total temperature increase during the past 55 years. The impact of El Nino on seasonal climate over the Korean peninsula has been well established - winter [summer] temperatures was generally higher [lower] than normal, and summer rainfall tends to increase during El-Nino years. It is suggested that more frequent occurrence of the 'central-Pacific El-Nino' during recent decades may have induced warmer summer and fall over the Korean peninsula. In short, detection and attribution studies provided fundamental information that needed to construct more reliable projections of future climate changes, and therefore more comprehensive researches are required for better understanding of past climate variations.

Key words : Climate Change over the Korean Peninsula, CO₂ Increase, Climate Change Detection, East Asia Monsoon, El Nino, Typhoon, Intraseasonal Oscillation, Urbanization Effect

1. 서론

지난 19세기 후반부터 현재까지 기록된 지구

평균 기온의 상승 속도는 과거 어떤 시기에서도 찾아보기 힘든 기록적인 것이다. 이러한 변화의 원인을 규명하기 위한 노력의 일환으로 기후 변

화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 기후변화 평가보고서를 작성하고 있으며, 지난 2007년에 발행된 4차 보고서에서는 산업혁명 이후 나타난 급격한 지구온난화는 인간 활동에 의한 온실가스 증가가 주요 원인을 시사했다 (IPCC, 2007; Hegerl *et al.*, 2007). 이러한 결론은 최근까지 축적된 관측과 기후 모형실험 결과를 토대로 최적지문법과 베イズ 방법 등과 같은 통계적 방법을 이용하여 얻어낸 것이다. 1906년부터 2005년까지 관측된 기온을 살펴보면, 전 세계적으로 산업화가 시작된 20세기 중반부터 지구 지표면 온도는 평균 0.7°C 증가하였고 육지 기온은 평균 0.9°C 증가하였다. 또한, 해수면 온도 역시 지난 95년간 0.6°C 증가하여 상승하는 경향을 보이고 있다 (IPCC, 2007). 몬순 지역인 아시아의 온도 상승(약 1.1°C)은 전 지구 대륙 중에 가장 급한 온도 상승을 보였다. 특히 한반도 기후의 변화는 다른 지역보다 그 변화의 폭이 상대적으로 크게 기록되고 있는데, 이는 한반도가 동아시아 몬순지역에 속하면서 대륙과 해양의 경계에 위치하여 여러 지역 기후 변화의 영향권에 놓이기 때문이다. 동아시아 몬순의 변화뿐만 아니라 열대 지역의 계절내 변동인 매든 줄리안 진동과 경년변동인 엘니뇨, 북극지역의 극진동 등은 한반도 계절 강수·기온 변화와 극한 날씨 현상에 영향을 미치고 있다. 이와 더불어 도시의 발달은 온난화를 가중시키는 역할을 하고 있다.

여기서는 기후변화 탐지와 원인 규명을 위한 방법론을 소개하고, 특히 한반도에서 관측된 여러 기후치의 변화 경향에 대한 연구 논문들은 총괄 요약했으며, 이에 대한 몬순과 엘니뇨의 영향을 진단하고, 끝으로 도시화 효과를 정량적으로 평가하였다.

2. 기후변화 탐지 방법론의 평가

본 절에서는 기후변화 탐지와 원인규명의 개

념을 살펴보고 일반적으로 이용되는 통계적인 기법들을 소개하였다. 또한, 탐지와 원인규명 과정에 필요한 요소들과 그와 연관된 불확실성의 요인 및 극복방안을 짚어보고, 동아시아 및 한반도와 같은 작은 공간규모에 적용할 수 있는 연구의 방향과 필요성을 제시하였다.

기후변화 탐지(detection)란 어떤 기간에 걸쳐 관측된 기후변화가 있을 때 그 변화의 크기나 정도가 지구기후시스템 내에서 자연적으로 발생할 수 있는 수준인지 아니면 그를 벗어나는지를 확인하는 과정을 말한다. 원인규명(attribution)은 탐지된 기후변화의 원인을 찾아내는 과정으로 정의되며, 다시 말해 기후시스템의 외부에 있는 어떠한 요인들이 기후에 통계적으로 유의한 영향을 주었는지를 분석하는 과정이다(Hegerl *et al.*, 2007). 기후변화를 일으키는 대표적인 외부 강제력으로는 온실가스와 에어로졸 증가 등의 인위적인 요인과 태양 및 화산활동의 변화 등의 자연적인 요인을 들 수 있다.

탐지와 원인규명을 위해서는 평가하고자 하는 변수에 대한 관측값, 외부강제력에 대한 모델실험 자료, 그리고 내부변동성의 범위가 필요하다. 수십 또는 수백 년의 변동성을 갖는 대기해양시스템의 자연변동성을 고려할 때, 관측자료는 시공간적으로 매우 제한적이며, 따라서 기후모델실험을 통하여(외부강제력 없이 대기와 해양이 상호작용을 하며 만들어내는) 자연변동성의 범위를 추정하게 된다. 이를 관측자료와 비교함으로써 “탐지” 분석을 하게 되며, 또한 원하는 외부강제력을 모델에 입력하고 그 반응결과를 관측패턴과 비교함으로써 “원인규명” 분석을 수행한다. 이러한 관측과 모델 패턴의 비교는 통계적 기법들을 통하여 정량적으로 평가되며, 이를 위해 최적지문법(optimal fingerprinting)과 베イズ 방법(Bayesian methods of inference)이 주로 이용되어 왔다(Hegerl *et al.*, 2007).

최적지문법은 다중선형회귀를 기반으로 하여 관측 패턴과 모델 패턴의 관계를 구하는 방법이

며(Allen and Stott, 2003), 베이즈 방법은 관측에 대한 모델 지문의 가능성을 직접 추정하고 이를 여러 외부 강제력 간에 비교하여 관측을 가장 잘 설명하는 기후변화 요인을 판단하는 기법이다(Min *et al.*, 2004; Schnurr and Hasselmann, 2005). 두 기법은 상대적인 장단점을 갖는데, 최적지문법은 다양한 강제력의 영향을 분리할 수 있게 해주며, 베이즈 방법은 확률적 접근을 통해 보다 포괄적인 정보를 제공한다. 두 기법 모두 “최적화”(optimization) 과정을 포함하고 있는데, 이를 통해 시그널 대 노이즈 비를 최대로 증가시켜 효과적인 탐지가 가능하게 해준다. 이 기법들은 전구 및 대륙규모의 지표기온 분석에 다양하게 적용되어 기후 변화에 관한 정부간 협의체가 지난 4차 평가보고서를 통해 20세기 후반의 급격한 지구온난화가 인간 활동(온실가스 증가)에 의한 것이라고 결론을 내리는데 중요한 기여를 하였다(IPCC, 2007; Hegerl *et al.*, 2007).

탐지와 원인규명에서 주의할 점으로 모든 외부강제력을 고려하는 것은 불가능하기 때문에 몇 가지 중요하다고 판단되는 강제력을 적합하게 선택해야 한다(Min *et al.*, 2004). 또한, 모델이 분석하고자 하는 변수의 내부변동성을 얼마나 잘 모의하는지를 파악해야만 잘못된 탐지 및 원인규명 결과를 방지할 수 있다(Allen and Tett, 1999). 관측오차, 모델오류, 내부변동성의 영향 등 여러 가지 불확실성의 영향을 보다 체계적으로 고려하기 위한 방법들이 개발되어 왔으나, 여전히 많은 제약이 따른다(Hegerl *et al.*, 2007). 특히 보다 효과적인 기후변화 영향 및 적응을 위해서는 작은 지역에 대한 기후정보가 필요한데, 이 규모에서의 기후변화 탐지 연구는 아직까지 극히 제한적이다. 이는 공간규모가 작아질수록 위에서 언급한 불확실성이 더욱 커지기 때문이며, 또한 지역적인 강제력과 그와 연관된 기후피드백의 영향도 중요한 역할을 하게 된다. 현재 이용되는 전구기후모델의 공간해상도는 지역 및 국지 규모의

기후현상을 모의하고 연관된 변화 반응을 살펴보기에는 매우 부족하다. 이와 연관되어 가뭄, 홍수, 집중호우, 태풍 등 기후 극한 현상에 대한 연구와 관측, 이론, 모델링 모든 부분에서 제약을 받고 있다. 최근 들어 극한기후를 다루기 위한 적합한 통계기법들이 개발되고, 이를 모델결과와 비교하는 연구가 시작되었다(예를 들어, Stott *et al.*, 2004; Kharin *et al.*, 2007). 앞으로 동아시아를 포함한 한반도의 지역에 대한 기후변화 탐지 및 기후 극한에 대한 활발한 연구가 요구된다.

3. 대기과 지표의 변화

지구온난화를 유도하는 가장 중요한 원인의 하나로 알려져 있는 온실기체는 대기 중에 오랫동안 체류하고 비교적 잘 혼합되며 복사 강제력은 다른 기후 강제력에 비해 그 크기와 불확실성이 작다. 1990년대 이후 우리나라에서는 대기 중 온실기체 6종과 반응가스인 지표 오존, 일산화탄소 관측을 통해 대기 조성의 변화를 감시하고 있으며, 또한 인간의 활동에 의한 에어로졸 관측도 병행하고 있다. 그러나 지속적인 관측기간이 매우 짧아 한반도에서 화학반응 가스들의 대기 조성 변화를 논의하는 것은 매우 어려운 실정이다.

한반도 배경대기의 CO₂ 농도는 지난 1999~2003년 동안 약 3 ppm yr⁻¹로 증가하고 있으며, 지난 10년간의 전 지구 평균인 1.9 ppm yr⁻¹에 비해 상승 속도가 매우 크다. 한반도의 대표적 배경대기 관측지점인 안면도에서 지난 10년 동안 관측된 월평균 이산화탄소 최댓값은 2008년 4월의 396.6 ppm으로 나타났으며, 월별 최댓값과 최소값의 차이는 평균 11.9 ppm으로 나타났다. 지표 부근에서 대표적 오염물질인 오존의 추세변화 패턴은 서울 및 수도권의 인구변화 패턴과 밀접한 관계를 나타내면서 1992년 서울시의 인구가 정점에 도달한 후 감소 추세를 보이다가 경기도와 인천을 포함한 수도권의 지속적인 인구증가

로 인해 서울 지역의 오존농도는 다시 현저한 증가 추세를 보이고 있다. 한반도에서의 지난 9년간(1999~2007년) CH₄의 증가율은 약 2 ppb yr⁻¹이며, 한반도 배경대기에서의 다른 온실가스인 N₂O와 CFCs의 농도변화는 전 지구 평균 변화율과 상당히 유사한 것으로 나타났다.

19세기 후반 이래 지구평균 지표기온은 0.3~0.6°C 정도 상승한데 비해 동아시아의 평균기온의 증가는 지구 평균보다 크게 증가하였으며, 한반도의 평균기온(약 1~4°C)은 동아시아 평균보다 높게 증가한 것으로 추정되고 있다. 한반도에서 1971년부터 관측 자료가 존재하는 전국 60개 지점의 1973년부터 2008년까지 시계열 변화 경향을 살펴보면 여름철 대기 기온의 주요 변수들(평균, 평균 최고기온, 평균 최저기온) 모두 증가하고 있으며, 일 최저기온 25°C 이상(열대야의 기준) 일수 또한 더 빈번히 발생하고 있다. 1970년대와 2000년대 사이 평균기온이 가장 많이 상승한 지역은 수도권(서울, 수원, 인천), 원주, 청주, 대전, 대구 등이었으며, 경북 남부 및 경남 북부 지방 또한 30년간 평균 기온의 증가가 뚜렷하게 나타났다. 특히 한반도 지역에서 평균기온 상승 경향은 최근 20년 동안 다른 해들에 비해 매우 급격하게 증가한 것으로 나타났다(예, Kim *et al.* 1999).

대기환경 변화의 중요한 기후 요소 중 하나가 습도(specific humidity)이다. 습도는 도시화와 밀접한 연관성이 있는데, 지표 피복 변화가 강우의 빠른 유출과 식생에 의한 증발산량의 감소를 초래해 대기 중 습도 변화에 직접적인 영향을 미치기도 한다. 관측 결과에 의하면 수도권(서울, 수원) 지역에서 지속적으로 대기 중 상대 습도가 감소하고 있음을 확인할 수 있다.

한반도를 포함한 동아시아 지역은 전 세계에서 가장 빠른 경제 성장을 보이고 있는 지역 중의 하나로, 이에 기인한 지표면 특성의 변화는 지역 기후 변동성과 밀접한 상관성을 가지고 있

다. 한반도에서 식생의 계절 변동은 전체적으로 지중온도의 계절변동 패턴과 매우 유사하게 나타나고 있으며, 식생이 기후 변동에 매우 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 위성 관측 결과, 한반도 대부분의 지역은 낙엽활엽수림이 뚜렷하며, 서해안 지역에 경작지가 우세하다. 한반도 지역은 특히 지표면의 녹지화(greenness)가 동아시아에서 매우 빠르게 진행된 지역의 하나로 확인되었으며, 식생변화로 인한 녹지화 차이의 변화가 봄철 및 여름철 기온의 변동성에 영향을 미치는 것으로 분석되었다(Jeong *et al.* 2009).

4. 몬순 및 매든-줄리안 진동(계절내 진동)

동아시아 지역의 평균 기온 상승(약 1.1°C)과 더불어 평균 연강수량의 과거 100년의 변화 경향은 뚜렷한 선형 증가경향은 보이지 않고 십년 또는 수십년 주기로 진동하는 형태를 보였다. 1948~1975년과 1976~2003년의 평균 여름철 몬순 강수량 차이를 살펴보면 한국과 중국의 중부지역은 증가하였지만, 대만 및 일본 남서부, 중국 산둥반도부터 그 북쪽 연안은 강수량이 감소되었다(IPCC, 2007). 실제 한국의 경우 6~8월 여름철에 관측된 강수는 년 21 mm의 상승 추세가 나타났다. 해수면의 상승도 온난화와 같은 경향으로 나타나고 있다. 지난 2000년간 안정적이었던 해수면이 18세기에 들어 2 cm, 19세기에는 6 cm 상승하였고, 20세기에는 19 cm까지 상승하였다. 이는 열팽창과 빙하·빙모 및 극지방의 빙상의 용해에 의한 것이다.

동아시아 몬순 지역은 20°~45°N과 110°~140°E 지역으로 중국 동부, 한국, 일본 그리고 인접한 바다를 포함하고, 열대, 아열대, 중위도의 기상 및 기후에 모두 영향을 받기 때문에 발달과 진행 등의 특징이 매우 복잡하다. 동아시아 여름 몬순의 강수는 중국에서는 메이유, 한국에서는 장마, 일본에서의 바이우라 불린다. 메이유는 남북 열 경도가 작지만 남북 수분의 경도가 큰 반

면 바이우는 중위도 경압성 전선과 비슷하게 남북 온도와 수분의 경도가 크게 나타난다(서경환 등, 2011). 또한, 장마와 바이우는 주로 남지나해 또는 그 남쪽의 해양으로 습윤한 공기 이류에 영향을 많이 받지만, 메이우는 이것과 더불어 인도양으로 부터의 남서 기류의 영향 또한 큰 특징이 있다.

동아시아 여름 몬순의 해마다의 변동인 경년 변동은 상당히 크게 나타나고 있다. 특히 양쯔강에서 한반도 남부지역에 걸쳐 일본 남부지역까지 어떤 해는 홍수가 발생하고, 또 다른 해는 가뭄이 나타난다. 1979년에서 2005년 동안 몬순 강수가 증가 추세가 있음을 알 수 있고, 1991년 이전과 비교하여 그 이후의 기간에 여름철 몬순 강수의 변동이 더 심해졌다는 것을 알 수 있다(기상청, 2011). 동아시아 여름 몬순 또한 인도 몬순처럼 준 2년 주기의 진동을 보여주고 있다. 동아시아 여름 몬순의 경년변동의 원인은 복잡하다. 유라시아 지역의 적설 분포면적은 그 지역의 상층 대기 순환의 변동에 영향을 미칠 수 있는 중요한 인자로 지표를 덮은 눈은 높은 알베도, 작은 거칠기 길이, 낮은 열적 전도율을 가지므로 점진적으로 그 지역의 날씨와 기후변화에 영향을 미치게 된다. 특히, 봄철 유라시아 서쪽(20°~85°E, 45°~65°N) 눈덮이가 평년보다 많고, 동쪽(85°~140°E, 45°~65°N)에는 평년보다 작은 경우, 우리나라 여름철 강수가 증가하며, 반대의 경우 감소하는 경향이 있다 (Yim *et al.* 2010).

태평양 서쪽인 필리핀 해의 따뜻한 해수면에서 발달하는 심층 대류 또한 주요한 경년변화의 원인으로 이곳의 변동성에 의해 이른바 동아시아/북태평양 또는 태평양-일본 원격상관 패턴을 형성한다. 이것은 또한 몬순의 시작 시점에 대한 변동을 야기한다. 우리나라 남쪽 해상에서 한반도로 북서진하는 여름철 계절내 진동 성분의 활동성이 큰 경우 장마의 강도가 강해지게 되는데, 이는 인도양에서 만들어지는 워커 순환에 의해

필리핀 해의 약화된 심층 대류에 의한 것으로 분석되었다. 또한, 엘니뇨는 동아시아 몬순에 직간접적으로 많은 영향을 미치고 있어 몬순의 경년변동의 주요인 중의 하나이다. 약한 몬순은 겨울철 엘니뇨와 높은 상관성을 가지는 것을 알 수 있다.

한반도의 1990년 이후 (1990~2005)의 여름철 평균 강수는 그 이전 (1973~1989)의 평균인 680 mm에 비해 15% 정도 증가하였다. 반면, 이 두 기간 동안 한반도의 장마 기간인 6월말에서 7월말까지의 평균 강수량은 약 5% 감소한 것으로 관측되고 있다. 특히 과거에는 북서태평양 고기압이 한반도를 지배하여 무더위를 가져오는 8월의 강수량 변화가 최근 들어 뚜렷하게 나타났다. 실제 1990년 이후 8월의 강수량이 그 전에 비해 30% 증가하여 7월 강수보다 40~50 mm 더 많이 내리고 있다. 반면, 장마기간인 7월의 평균 강수량은 그 전후로 크게 차이가 나지 않는다. 한편, 2차 우기는 10일 정도 일찍 시작되어 8월 초순에 시작된다.

국립기상연구소의 동아시아 장기미래전망에 의하면 평년(1971~2000년)에 비해 21세기말(2071~2100년) 기온은 3~4°C 상승하고, 강수량은 변동폭이 매우 커지며 여름철 강수량은 10~15% 정도 상승할 것으로 예측하고 있다. 호우와 가뭄의 악기상 발생 가능성 또한 높아지는 것으로 전망하고 있다. 우리나라 여름철 장마 기간이 10일 정도 길어지는 것으로 모의하고 있다. 여름에는 해양에 비해 육지의 기온상승폭이 커짐에 따라 대륙-해양 비열차로 인한 여름철 몬순이 더욱 강화되는 양상으로 변할 것이다. 또한, 온난화에 따른 저기압성 대기 순환, 증가된 대기 중 수증기함량, 열적 저기압의 발달 등도 대기를 더욱 불안정하게 하며, 이러한 모든 요소들도 여름몬순을 강화시키는데 기여할 것으로 예상된다(권윤희, 2005). 반면, 겨울에는 온난화에 따라 대륙-해양 비열차가 작아지면서 겨울 몬순을 약화시키

는 대기 순환의 변화가 유도될 것이다.

적도에서 30일에서 60일 이내로 진동하는 강력한 심층 구름대인 매든-줄리안 진동은 원격상관을 통해 중위도의 기온, 바람, 강수에 영향을 미치고 있는 대기-해양 접합 현상이다. 예를 들면, 매든-줄리안 구름대가 동진할 때 그 중심위치에 따라 한반도 및 동아시아의 대기의 순환 및 강수가 변동된다. 대기 하층에서 천층 대류에 의한 수분과 열 아노말리가 형성되어야 하고 이후 심층 대류 및 층운형 강수과정이 중요한 역할을 한다(Seo and Wang, 2010). 또한, 태풍이나 허리케인과 같은 열대 저기압에 대하여 이 진동은 대기 순환의 배경장으로써 작용하여 열대 저기압의 발달과 이동방향에 영향을 미친다. 또한, 적도에서 강한 심층 구름의 하부에서 생기는 강력한 바람에 의하여 해수면에 강제력을 작용하여 서태

평양에서 동쪽으로 전파하는 해양속의 장파인 적도 켈빈파를 발생시켜 엘니뇨의 시작과 성장 소멸에 큰 영향을 미치고 있다. 특히, 매든-줄리안 진동은 아시아, 호주, 아메리카 몬순 시스템과 상호작용을 하며, 특히 몬순/장마의 시작과 종결을 결정하는 가장 중요한 기후 인자이므로 수치 모형에서 이의 향상된 모의가 필요한 실정이다.

5. 엘니뇨와 한반도 기후

엘니뇨 해의 한반도 겨울철 평균 기온은 대체로 평년보다 높았으며(강인식, 1998), 여름철 평균 기온은 평년보다 낮았다(Fig. 1). 한편, 봄철과 가을철의 경우에는 다른 계절과 비교하여 그 영향이 뚜렷하지 않은 것으로 보고되고 있다(차은정 등, 1999). 여름철 강수의 경우 엘니뇨 해에

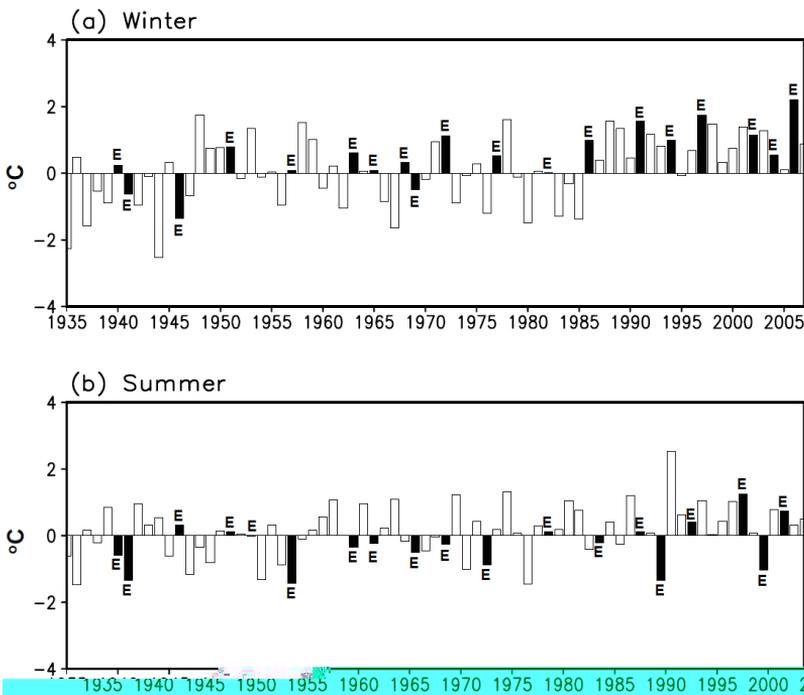


Fig. 1. Histograms of (a) winter-mean and (b) summer-mean temperature. El Niño years are marked by E (reconstructed with the extended data from Kang, 1998).

증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났다(Kang and Jeong, 1996; 강인식, 1998; 차은정 등, 1999). 여름철 강수의 증가는 여름철 기온의 하강과 직접적으로 연관된다. 즉, 강수로 인한 일조량의 감소와 여름철 한반도에 위치한 주요 기단의 영향 등이 기온의 하강을 유도한 것으로 사료된다. 한편, 라니냐 해에는 엘니뇨 해와는 반대의 경향을 보였다(차은정 등, 1999). 즉, 여름철 강수가 감소하여 가뭄이 발생할 확률이 높아진다(변희룡 등, 2001). 엘니뇨 해의 한반도 여름철 강수의 감소는 장마의 변동과 관련이 있는데, 엘니뇨 해에는 장마 기간이 1~2일 정도 길어지고, 라니냐 해에는 반대로 2~3일 정도 짧아지는 것으로 나타났다(차은정 등, 1999). 장마 기간 동안의 총 강수량 역시 엘니뇨 해에는 평년에 비해 30~40 mm 정도 증가하고, 라니냐 해에는 평년보다 30~40 mm 감소하는 것으로 분석되었다(차은정 등, 1999).

태풍의 발생 횟수는 평년과 비교하여 엘니뇨 또는 라니냐 해의 증감이 뚜렷하진 않지만, 평균 최대풍의 경우, 엘니뇨 해에 발생하는 태풍은 다른 해에 비해 강한 경향이 있고, 태풍의 수명 또한 긴 것으로 보고되고 있다(강인식 등, 1995). 한편, 태풍의 주요 발생 지역이 엘니뇨 시기에는 서태평양의 북동쪽으로 이동하고, 라니냐 시기에는 태풍의 주요 발생지역이 서태평양의 북서쪽에 위치한다(Wang *et al.*, 2001). 이와 유사한 결과로 엘니뇨 해에는 북위 10도 근처지역에서, 라니냐 해에는 북위 20도 근처 지역에서 태풍의 발생 빈도가 증가하는 경향을 보였다(강인식 등, 1995).

한편, 최근 연구에 따르면 동태평양에 중심을 둔 전형적인 엘니뇨(동태평양 엘니뇨)의 경우 그 발달 시기인 여름에서 가을철에 걸쳐서 한반도의 한랭한 기후를, 소멸하는 시기인 이듬해 봄철에는 온난한 기후를 유도하는 반면에, 중·서 태평양에 중심이 위치한 중태평양 엘니뇨(Central Pacific El Nino)가 발달하는 여름과 가을철에는

온난한 기후가 나타난다(Kug *et al.*, 2010). 이러한 맥락으로 볼 때 중태평양 엘니뇨의 증가는 한반도의 경년변동에 있어서 보다 많은 온난한 여름-가을을 맞게 될 것으로 전망된다.

6. 극한 날씨 현상

6.1 온도의 극한 현상

지구온난화에 따른 평균기온 상승과 함께 한반도 지역에서는 혹한기온은 감소하고, 혹서기온은 크게 증가하는 형태가 나타났다. 겨울철 평균기온이 1985~1986년을 기준으로 -2.3°C 에서 -1.0°C 로 증가하였으며, -5.5°C 이하의 극한 기온의 날수도 275일에서 123일로 줄어들었다(Ryoo *et al.*, 2004). 이상 저온 현상의 빈도수 역시 한반도 전역에 걸쳐 감소하였고(허인혜와 이승호, 2006), 서리일수 또한 크게 감소하였다(Choi, 2004).

이상 고온 현상의 경우 여름철 이상 고온의 출현 빈도는 물론(허인혜와 이승호, 2006), 여름철 혹서 일수 및 열대야 현상도 유의미한 증가를 보였다(Choi, 2004). 특히 이러한 증가 현상은 서울, 인천, 부산 등과 같이 인구가 많은 대도시에서 더욱 두드러지게 나타났는데, 이는 이산화탄소 증가에 따른 전구 기온의 상승뿐만 아니라 도시 지역 열섬 효과도 극한 날씨 현상의 변화에 영향을 미칠 수 있음을 암시한다.

6.2 강수의 극한 현상

한반도 지역 강수량 분포의 95% 이상에 해당하는 집중호우가 연강수량에서 차지하는 비율은 통계적으로 유의미한 증가를 보였고(Choi, 2004), Fig. 2에서 보는 바와 같이 강수량의 연중 최대 극값 역시 유의미하게 증가하였다(최의수와 문일주, 2008). 특히 이러한 집중호우의 증가는 1970년대 후반과 1997년을 기점으로 급격히 증가하는 양상을 보였다(Kim *et al.*, 2006; Kim *et al.*,

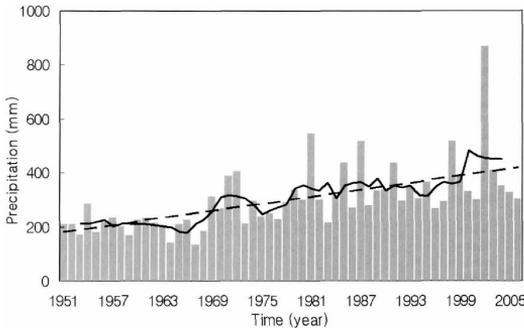


Fig. 2. The annual extreme values of daily precipitation observed over the Korean peninsula during 1951~2006. Linear trend is 230 mm / 56 yr. Heavy line is the 5 years running average and heavy dotted line is the linear regression (최일수 등, 2008).

2009).

한편, 건조 극한 현상을 보여주는 무 강수 지속일수는 다소 증가하고 있는 것으로 보고되었는데, 이는 주로 남부 지역에서 나타났다(Choi, 2004).

6.3 태풍

지구온난화로 인한 해수면 온도의 상승은 태풍에 에너지공급원 역할을 하게 되어 태풍활동의 변화를 가져올 수 있는 중요한 원인이 된다. 한반도의 경우 태풍 발생 지역과 상대적으로 멀리 떨어져 있어 북서태평양 전 지역 태풍 발생 수 변화보다는 태풍 진로 변동에 영향을 많이 받는다. 1970년대 후반 이후 북태평양 고기압의 급격한 확장에 따라 동중국해로 향하는 태풍은 감소하고, 남중국해로 향하는 태풍이 증가한 것이 밝혀졌다(Ho *et al.*, 2004). 한국에 상륙하는 태풍 수는 장기적 증가 혹은 감소 추세를 보이지 않았다. 하지만 최근 10년 동안에는 한반도 남동쪽으로 상륙하는 태풍의 수가 증가하였고(Choi and Kim, 2007), 1980년대 이후에는 중국 동쪽 해안을 거치지 않고 바로 한국으로 상륙하는 태풍의

수가 증가한 것으로 보고된 바 있다(Choi *et al.*, 2009). 그런데, 한반도 남동쪽으로 상륙하는 태풍이 남서쪽에 상륙하는 태풍보다 더 강하다는 결과로부터(박두선 등, 2008) 최근 한반도 태풍의 강도 및 영향력의 증가를 유추할 수 있는데, 실제로 상륙하는 태풍의 중심기압의 경우 유의미한 감소 추세를 보여 한반도에 상륙하는 태풍의 강도가 증가하고 있음이 밝혀진 바 있다(최의수와 문일주, 2008). 한편, 최근까지의 관측 결과에서는 서태평양에서 발생하는 태풍빈도의 변화가 통계적으로 유의미하게 나타나진 않았지만, 여러 기후 모형들은 지구 온난화 환경에서 서태평양의 태풍발생 빈도의 감소를 예측하고 있다(Sugi *et al.*, 2002; McDonald *et al.*, 2005; Oouchi *et al.*, 2006; Bengtsson *et al.*, 2007).

7. 도시화 효과

전 지구 평균 기온의 기후변화에서 가장 뚜렷한 특징은 최근 기간 동안의 온난화율이 점점 더 강해지며 계절적으로는 겨울철 기온의 상승, 일주기로 보면 야간의 최저기온의 증가로 나타난다. 우리나라의 기온에 대한 증가율의 변화와 특성을 살펴보면 도시화의 영향이 어떠한 영향을 미치고 있는가를 살펴보았다. 우리나라의 경우 1950년대 이후 도시화가 급격하게 진행된 시기에 평균기온의 증가 추세가 뚜렷하게 나타났다(윤일희 등, 1994; Chung and Yoon, 1999; Chung *et al.*, 2004). 김경환 등(2000)은 12개 도시의 35년(1954~1998년)간 기온자료 분석을 통하여 평균기온의 증가가 약 0.5~1.4℃의 범위를 가지며, 이 기온 증가 중에서 도시화 효과는 약 32%라고 밝히고 있다. 또한, 연도별 인구자료와의 비교분석을 통하여 12개 도시 중에 대구가 가장 높다고 지적하고 있다. 그러나 이러한 기온 증가와 도시화 효과는 도시의 인문사회학적 발전에 기인되어 시간에 따라 변화된다.

도시규모 현상 혹은 도시화가 지구온난화현상

에서 오차 범위 안에서 불확실성의 크기로 작용하는지 아니면 영향을 주는 중요한 과정의 하나로 이해해야 하는가를 판단하기 위하여 우리나라 대도시의 기온과 주변 비도시 지역의 기온이 다양한 방법으로 비교되어 도시화 효과에 의한 기온상승을 평가한 연구들의 결과를 Table 1에 요약하였다. Table 1에서 알 수 있듯이 자료기간과 자료(일평균기온과 최고, 최저 기온)에 따라 도시화효과가 각각 다르게 나타나며, 대체적으로 10년 평균으로 보면 0.1~0.2°C의 도시화 정도가 나타

나 특별한 사례기간에 대해서는 더 큰 경우도 있다.

도시화는 시계열분석, 주성분분석 및 인구밀도 함수로 도시화의 정도를 나타내는 경우 등 다양한 방법에 의하여 분석되고 있다. 뿐만 아니라 시간적으로 도시화의 정도가 다르기 때문에 어떤 자료 기간을 사용하는가에 따라 차이가 있을 수 있다. 2000년대 이후 최근 기간 동안에 인구증가에 따른 도시화 정도를 정량적(김경환 등, 2000)으로 구하여 각 대도시의 도시화 효과를 살

Table 1. Summary of research articles on the urbanization effect. Mean, Max and Min indicate mean temperature, maximum temperature and minimum temperature, respectively.

논문	기간 및 지역	도시화 정도
Kim <i>et al.</i> (2011)	55년(1954년 ~ 2008년)	평균기온은 0.77°C/55 yr 증가
	12개 관측소	
이순환 등(2008)	40년(1960년 ~ 2000년)	평균기온은 0.5°C/40 yr 증가
	대구	
구교숙 등(2007)	32년(1968년 ~ 1999년)	최고기온(0.35°C/32 yr), 최저기온(0.44°C/32 yr)
	서울, 부산, 대구, 인천	
Oh <i>et al.</i> (2004)	30년(1973년 ~ 2002년)	(0.44 ~ 0.86°C)/30 yr
	서울, 부산, 대구, 대전, 광주	
하경자 등(2004)	90년(1909년 ~ 1998년)	도시화에 따른 가중 증가율 : 서울(44.8%), 대구(31.8%), 부산(18.5%)
	서울, 대구, 부산, 목포	
Choi <i>et al.</i> (2003)	32년(1968년 ~ 1999년)	0.40°C/32 yr
	19개 관측소	
김경환 등(2000)	45년(1954년 ~ 1998년)	(0.02 ~ 0.63°C)/35 yr 범위, 평균 0.32°C/35 yr
	12개 도시 그룹	
김맹기 등(1999)	40년(1954년 ~ 1993년)	0.40°C/40 yr
	12개 관측소	
정용승과 윤마병(1999)	24년(1974년 ~ 1997년)	도시(1.58°C/24 yr), 비도시 및 해안(0.58°C/24 yr)
	10개 관측소	
이명인과 강인식(1997)	20년(1973년 ~ 1992년)	0.32°C/20 yr
	11개 도시그룹	

해보고 장기적으로 우리나라 도시화가 기후변화에 어떠한 영향을 보이는가를 분석하여 Table 2에 제시하였다. 우리나라의 5개 도시들(서울, 인천, 대구, 부산, 목포)의 종관 관측 자료를 이용하여 자료의 초기 10년인 1950년대(1954~1963년)와 자료의 마지막 10년인 2000년대(1999~2008년)의 평균기온 차이를 분석한 것이다. 도시와 주변 비교지역은 (서울, 양평), (인천, 강화), (대구, 영천), (부산, 거제), (목포, 해남)으로 그룹을 만들었다. 그 결과로, 평균기온의 증가량은 약 0.24~1.58℃ (평균 1.1℃)의 범위이며, 지점별로는 대구에서 1.58℃로 가장 높았고, 목포에서 0.24℃로 가장 낮았다. 또한, 도시화 효과에 의한 기온 증가량은 대구 0.56℃, 인천 0.51℃, 서울 0.48℃의 순으로 높았고, 반면 부산과 목포는 각각 0.16℃, 0.04℃로 낮게 나타났다. 도시화 효과에 의한 평균 기온 증가량은 0.35℃였으며, 1998년도까지의 도시화 효과가 평균 기온 증가에 기여하는 비율은 2000년대에 인구가 감소함에 따라 도시열섬효과 증가율이 완만해지거나 줄어들어 도시화 효과도 감소하였지만, 도시 5개 지점에서 평균 27.9%로 한반도 기온 증가의 1/3 이하의 정도를 기여하고 있다.

전체적으로 대도시지역(인구 100만 이상의 대도시)의 경우에 전체 한반도 도시 평균기온 증가율보다 강하다. 최저기온에서 대도시 기온 증가율이 전체 지역 기온 평균 증가율보다 높고, 최고기온은 2000년대 들어와 증가율이 주춤하나, 최저기온에서는 계속 증가 경향이 나타난다. 전반적인 도시화 효과를 분석한 결과, 한반도 전반에 걸쳐 지구온난화 경향은 전 세계의 평균 기온 증가율에 비하여 뚜렷하며, 대도시의 도시영향이 제거되어도 지구온난화 경향은 여전히 강하게 나타난다. 기온외의 다른 변수를 통하여 도시화 영향을 평가하는 방법으로써 열파, 열대야(신임철 등, 2007; Ha and Yun, 2011), 상대습도(Um et al., 2007), 일기도 변화 분석, 도시화에 따른 토지이용도의 변화 등의 분석도 함께 요구된다.

8. 결론 및 토의

19세기 후반 이후부터 현재까지의 기후 변화는 자연적인 요인뿐만 아니라 인위적인 요인이 크게 작용하였고, 특히 급격한 지구 평균 기온 상승은 주로 인위적인 온실가스 증가에 의해 진행된 것으로 보고되고 있다(IPCC, 2007). 자연적인 요인

Table 2. Total mean temperature change ($\Delta\bar{T}$), mean temperature change due to urbanization effect ($\Delta\bar{T}_{urbanization}$), contribution ratio of $\Delta\bar{T}_{urbanization}$ to $\Delta\bar{T}$, and difference between $\Delta\bar{T}$ and $\Delta\bar{T}_{urbanization}$ for each station during recent 55 years

지점 (대도시와 그 주변 도시)	$\Delta\bar{T}$ (℃)	$\Delta\bar{T}_{urbanisation}$ (℃)	$\Delta\bar{T}_{urbanisation} / \Delta\bar{T}$ (%)	$\Delta\bar{T} - \Delta\bar{T}_{urbanisation}$ (℃)
서울-양평	1.4438	0.4808	33.30	0.96
인천-강화	1.4155	0.5102	36.04	0.91
대구-영천	1.5853	0.5614	35.41	1.02
부산-거제	0.8094	0.1584	19.56	0.65
목포-해남	0.2413	0.0363	15.05	0.20
평균	1.10	0.35	27.87	0.75

은 태양과 화산 활동의 변화를 들 수 있으며, 인위적인 요인이라 온실가스의 증가, 먼지, 분진, 오염물질의 방출, 도시화 효과, 그리고 산림의 파괴와 농지개발 등에 따른 식생의 변화 등 인위적으로 기후의 변화를 유도하는 모든 요인을 포함한다. 관측 자료와 기후모형 실험결과와의 비교분석을 통하여 인위적 그리고 자연적 요인에 의한 기후 변화를 탐지하고 있으며, 통계적 분석 방법으로는 최적지문법과 베이스 방법 등이 널리 사용되고 있다. 현재까지는 한반도와 같은 작은 지역의 기후 변화 중에서 인위적으로 유도된 기후 변화를 정량적으로 정확하게 구분해 내기는 어렵기 때문에, 본 연구에서는 이러한 구분 없이 현재까지 나타난 기후 변화 자체에 초점을 맞추었다.

한반도 지역은 다른 지역에 비해 상대적으로 큰 변화를 보였다. 한반도에서 관측된 이산화탄소의 농도는 지난 10년간의 전 지구 평균인 1.9 ppm yr^{-1} 에 비해 상승 속도가 매우 높게 나타났으며, 한반도의 평균기온 역시 지구평균 기온보다 크게 증가한 것으로 추정되고 있다. 또한, 혹한기온은 감소하고, 혹서기온은 증가하여 한반도 평균 기온의 상승을 유도했다. 이상 저온 현상의 빈도수 역시 한반도 전역에 걸쳐 감소하였고, 서리일수 또한 크게 감소하였다. 이와 더불어 한반도 지역의 지표면 녹지화는 동아시아 중에서도 매우 빠르게 진행된 지역의 하나로 확인되었다.

한편, 한반도의 1990년 이후의 여름철 평균 강수는 그 이전에 비해 15% 정도 증가하였다. 이는 8월 강수량의 뚜렷한 증가에 기인한 것이며, 장마 기간인 6월말에서 7월말까지의 평균 강수량은 오히려 약 5% 감소한 것으로 관측되고 있다. 집중호우의 경우 1970년대 후반과 1997년을 기점으로 급격히 증가하는 양상을 보이고 있으며, 남부지역을 중심으로 강수가 없던 날의 지속일수 역시 다소 증가하고 있는 것으로 보고되고 있다. 즉, 강수의 양상이 지속성은 약해지고

집중성이 점차 커지고 있는 것이다. 온난화와 더불어 강한 태풍의 발생 빈도가 다소 증가하고 있으며, 최근 10년 동안에는 한반도 남동쪽으로 상륙하는 태풍의 수가 증가한 것으로 보고되었다.

엘니뇨 해의 한반도 겨울철 평균 기온은 대체로 평년보다 높았으며, 여름철 평균 기온은 평년보다 낮았다. 여름철 강수의 경우 엘니뇨 해에 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 최근 들어 발생 빈도가 증가하기 시작한 중태평양 엘니뇨의 발달시기에는 한반도에 온난한 여름·가을을 유도하는 것으로 보고되었다.

도시화 효과에 의한 평균 기온 증가는 우리나라의 경우 1950년대 이후 뚜렷한 증가 추세가 보이고 있는데, 특히 12개 도시의 35년(1954~1998년)간 기온자료 분석 결과, 평균기온의 증가가 약 $0.5 \sim 1.4^\circ\text{C}$ 의 범위를 가지며, 이 기온 증가 중에서 도시화 효과는 약 28%에 해당한다. 그러나 이러한 도시화 효과를 제거한 경우에도 한반도에서의 기온 상승은 여전히 강하게 나타나고 있는 것으로 보고되고 있다.

기후 변화의 탐지와 원인 규명은 미래 기후를 전망하는데 있어서 필수적인 요건이다. 지금까지의 연구 결과들은 한반도 지역에서 발생한 기후 변화가 지구 평균에 비해 상대적으로 강했음을 보여주고 있다. 이는 한반도가 대륙과 해양의 경계에 면하면서 동아시아 몬순지역에 속한다는 지리적 여건과, 급속한 경제성장이 유도한 도시화 효과가 온난화를 가중시킨 결과라 여겨진다. 그러나 전 지구 기후 변화에 대한 연구에 비해 한반도 지역에서의 기후변화를 탐지하고, 그 원인을 규명한 연구는 부족한 실정으로 한반도 기후 변화에 대한 신뢰도를 높이기 위해서는 보다 많은 연구가 뒷받침되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원(Grant NO. 1600-16-37-303-210-13)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 강인식, 1998, 엘니뇨와 한반도 기후변동의 관련성, 한국기상학회지, 34권 3호, 390-396.
- 강인식, 이양미, 안순일, 1995, 서태평양 지역에서 태풍 활동의 경년변화와 엘니뇨, 한국기상학회지, 31권 1호, 15-26.
- 구교수, 부경운, 권원태, 2007, 최고, 최저기온을 이용한 우리나라 기온변화에서의 도시화효과 분석, 대기, 17권 2호, 185-193.
- 기상청, 2011, 장마백서, 미래미디어, pp 268.
- 김경환, 김백조, 오재호, 권원태, 백희정, 2000, 한반도 기온변화에 나타난 도시화 효과 검출에 관한 연구, 한국기상학회지, 36권 5호, 519-526.
- 김맹기, 강인식, 곽종흠, 1999, 최근 40년간 한반도 도시화에 따른 기온 증가량의 추정, 한국기상학회지, 35권, 118-126.
- 권원태, 2005, 기후변화의 과학적 현황과 전망, 한국기상학회지, 41권, 325-336.
- 박두선, 허창희, 황종국, 2008, 경상북도에서 태풍에 의한 영향과 유형별 진로 특성 분석, 대기, 18권, 525-532.
- 변희룡, 강경아, 김기훈, 2001, Nino-3 아노말리와 아시아 가뭄-홍수의 상관, 한국기상학회지, 37권 5호, 453-464.
- 서경환, 손준혁, 이준이, 2011, 장마의 재조명, 대기, 21권, 109-121.
- 신임철, 김태룡, 이은정, 김은희, 김은숙, 박연옥, 배선희, 이희일, 2007, 한반도의 2007년 8월과 2007년 여름의 기후 특성 및 8월과 여름의 장기 기후변화, 대기, 17권 4호, 471-481.
- 윤일희, 민경덕, 김경익, 1994, 대구 지역의 기상 특성 연구, 한국기상학회지, 30권 2호, 303-312.
- 이명인, 강인식, 1997, 한반도 기온변동성과 온난화, 한국기상학회지, 33권 3호, 429-443.
- 이순환, 박명희, 김해동, 2008, 도시화에 의한 야간 대기 냉각을 변화에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 24권 1호, 83-90.
- 정용승, 윤마병, 1999, 한국의 최근 기후변화와 관련된 요소들, 한국기상학회지, 35권 3호, 309-318.
- 차은정, 전종갑, 정효상, 1999, 엘니뇨/라니냐 해의 우리나라 기후 특성에 관한 연구, 한국기상학회지, 35권 1호, 98-117.
- 최의수, 문일주, 2008, 56년간 한반도 강수 및 풍속의 극값 변화, 한국기상학회지, 18권, 246-538.
- 하경자, 하은호, 류철상, 전은희, 2004, 1909년 이후의 우리나라 4대도시의 기온경향과 극한 기후, 한국기상학회지, 41권 1호, 1-16.
- 허인혜, 이승호, 2006, 한국의 이상기온 출현 빈도의 변화와 그 요인에 관한 연구, 대한지리학회지, 41권, 94-105.
- Allen, M. R., and S. F. B. Tett, 1999, Checking for model consistency in optimal fingerprinting, *Clim. Dyn.*, **15**, 419-434, doi:10.1007/s003820050291.
- Allen, M. R., and P. A. Stott, 2003, Estimating signal amplitudes in optimal fingerprinting, part I: Theory, *Clim. Dyn.*, **21**, 477-491, doi:10.1007/s00382-003-0313-9.
- Bengtsson, L., K. I. Hodges, M. Esch, N. Keenlyside, L. Kornbluh, J. -J. LUO, and T. Yamagata, 2007, How may tropical cyclones change in a warmer climate? *Tellus A*, **59**, 539-561.
- Choi, K. S., and B. J. Kim, 2007, Climatological characteristics of tropical cyclone making landfall over the Korean Peninsula, *J. Korean Meteorol. Soc.*, **43**, 97-109.
- Choi, K. S., B. J. Kim, C. Y. Choi, and J. C. Nam, 2009, Cluster analysis of tropical cy-

- clones making landfall on the Korean Peninsula, **Adv. Atmos. Sci.**, **26**, 202-210, doi: 10.1007/s00376-009-0202-1.
- Choi, Y., 2004, Trends on temperature and precipitation extreme events in Korea, **J. Korean Geograph. Soc.**, **39**, 711-721.
- Choi, Y. E., H. S. Jung, K. Y. Nam, and W. T. Kwon, 2003, Adjusting urban bias in the regional mean surface temperature series of South Korea, 1968~99, **Int. J. Climatol.**, **23**, 577-591, doi:10.1002/joc.881.
- Chung, Y. S., and M. B. Yoon, 1999, Recent climate change and related factors observed in Korea, **J. of Korea Meteorol. Soc.**, **35(3)**, 309-318.
- Chung, Y. S., M. B. Yoon, and H. S. Kim, 2004, On climate variations and changes observed in South Korea, **Clim. Change**, **66**, 151-161, doi:10.1023/B:CLIM.0000043141.54763.f8.
- Ha, K. -J. and K. -S. Yun, 2011, Climate Change Effects on Tropical Night Days in Seoul, Korea, **Theoretical and Applied Climatology**, DOI: 10.1007/s00704-011-0573-y.
- Hegerl, G. C., F. W. Zwiers, P. Braconnot, N. P. Gillett, and Y. Luo, et al., 2007, Understanding and Attributing Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Solomon S, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, *et al.*,(Eds.)], Cambridge, Cambridge University Press, Cambridge, United kingdom and New York, NY, USA, 665 pp.
- Ho, C. H., J. J. Baik, J. H. Kim, D. Y. Gong, and C. H. Sui, 2004, Interdecadal changes in summertime typhoon tracks, **J. Clim.**, **17**, 1767-1776.
- IPCC, 2007, Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jeong, S. -J., C. -H. Ho, K. -Y. Kim, and J. -H. Jeong, 2009, Reduction of spring warming over East Asia associated with vegetation feedback, **Geophys. Res. Lett.**, **36**, L18705, doi:10.1029/2009GL039114.
- Kang, I. S., and Y. K. Jeong, 1996, Association of interannual variations of temperature and precipitation in Seoul with principal modes of Pacific SST, **J. Korean Meteorol. Soc.**, **32(3)**, 339-345.
- Kharin, V. V., F. W. Zwiers, X. Zhang., and G. C. Hegerl, 2007, Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations, **J. Clim.**, **20**, 1419-1444, doi:10.1175/JCLI4066.1.
- Kim, C., M. S. Suh, and K. O. Hong, 2009, Bayesian changepoint analysis of the annual maximum of daily and subdaily precipitation over South Korea, **J. Clim.**, **15**, 6741-6757, doi:10.1175/2009JCLI2800.1.
- Kim, J. H., C. H. Ho, M. H. Lee, J. H. Jeong, and D. Chen, 2006, Large increase in heavy rainfall associated with tropical cyclone land-

- falls in Korea after the late 1970s. **Geophys. Res. Lett.**, **33**, L18706, doi:10.1029/2006GL027430.
- Kim, M. -K., I. -S. Kang, and C. -H. Kwak 1999, Seasonal factors associated with the variability of surface air temperature in urban stations of Korea, **J. Kor. Met. Soc.**, **34(3)**, 466-477.
- Kim, M. -K., and S. Kim, 2011, Quantitative estimates of warming by unbanization in South Korea over the past 55 years (1954~2008), **Atmos. Environ.**, **45**, 5778-5783. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.07.028.
- Kug, J. S., et al., 2010, Statistical relationship between two types of El Nino events and climate variation over the Korean peninsula, **Asia-Pacific J. Atmos. Sci.**, **46(4)**, 467-474.
- McDonald, R. E., D. G. Bleaken, D. R. Cresswell, V. D. Pope, and C. A. Senior, 2005, Tropical storms: Representation and diagnosis in climate models and the impacts of climate change, **Clim. Dyn.**, **25**, 19-36.
- Min, S. K., A. Hense, H. Paeth, and W. T. Kwon, 2004, A Bayesian decision method for climate change signal analysis, **Meteorol. Zeit.**, **13**, 421-436.
- Oh, S. N., Y. H. Kim, and M. S. Hyun, 2004, Impact of urbanization on climate change in Korea, 1973-2002, **J. Korean Meteorol. Soc.**, **40(6)**, 725-740.
- Oouchi K., J. Yoshimura, H. Yoshimura, R. Mizuta, S. Kusunoki and A. Noda, 2006, Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model: frequency and wind intensity analyses, **J. Meteor. Soc. Japan**, **84**, 259-276.
- Ryoo, S. B, W. T. Kwon, and J. G. Jhun, 2004, Characteristics of wintertime daily and extreme minimum temperature over south Korea, **Int. J. Climatol.**, **24**, 145-160.
- Schnurr, R., and K. Hasselman, 2005, Optimal filtering for Bayesian detection and attribution of climate change, **Clim. Dyn.**, **24**, 45-55, doi:10.1007/s00382-004-0456-3.
- Seo, K. H., and W. Wang, 2010, The Madden-Julian oscillation simulated in the NCEP Climate Forecast System model: The importance of stratiform heating, **J. Clim.**, **23**, 4770-4793.
- Stott, P. A., D. A. Stone, and M. R. Allen, 2004, Human contribution to the European heat wave of 2003, **Nature**, **432**, 610-614, doi: 10.1038/nature03089.
- Sugi, M., A. Noda and N. Sato, 2002, Influence of the global warming on tropical cyclone climatology: An experiment with the JMA global model, **J. Meteor. Soc. Japan**, **80**, 249-272.
- Um, Hyang-Hee, Kyung-Ja Ha, and Sun-Seon Lee, 2007, Evaluation of the urban effect of long-term relative humidity and the separation of temperature and water vapor effects, **International Journal of Climatology**, **27(11)**, 1531-1542.
- Wang, B., R. Wu, and X. Fu, 2001, Pacific-east asian teleconnection: How does ENSO affect east asian climate? **J. Clim.**, **13**, 1517-1536.
- Yim, S. -Y., J. -G. Jhun, R. Lu, and B. Wang, 2010, Two distinct patterns of spring Eurasian snow cover anomaly and their impacts on the East Asian summer monsoon, **J. Geophys. Res.**, **115**, D22113, doi:10.1029/2010JD013996.