

분위수 회귀분석을 이용한 동아시아 지역 극한기온의 장기 추세 분석

김상욱* · 송강현* · 유영은* · 손석우** · 정수종**

*서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부, **서울대학교 환경대학원 환경계획학과

Long-term Trend Analysis of Extreme Temperatures in East Asia Using Quantile Regression

Kim, Sang-Wook*, Song, Kanghyun*, Yoo, Young-Eun*, Son, Seok-Woo**† and Jeong, Su-Jong**

*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

**Department of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

ABSTRACT

This study explores the long-term trends of extreme temperatures of 270 observation stations in East Asia (China, Japan, and Korea) for 1961-2013. The 5th percentile of daily minimum temperatures (TN05%) and 95th percentile of daily maximum temperatures (TX95%), derived from the quantile regression, are particularly examined in term of their linear and nonlinear trends. The warming trends of TN05% are typically stronger than those of TX95% with more significant trends in winter than in summer for most stations. In both seasons, warming trends of TN05% tend to amplify with latitudes. The nonlinear trends, quantified by the 2nd-order polynomial fitting, exhibit different structures with seasons. While summer TN05% and TX95% were accelerated in time, winter TN05% underwent weakening of warming since the 2000s. These results suggest that extreme temperature trends in East Asia are not homogeneous in time and space.

Key words: East Asia, quantile regression, extreme temperatures

1. 서 론

산업혁명 이후 지속된 기후변화에 따라 전 지구적으로 극단적인 기상현상에 의한 피해가 빈번하게 보고되고 있다. 2017년 한 해 동안 이란 지역의 홍수 (4월)를 비롯해 인도 남부지역의 폭염 사례 (7월), 북미 지역을 강타한 허리케인 ‘IRMA’ (9월)와 미 서부 지역의 이상고온 및 가뭄과 이로 인한 산불 피해 (10월) 등 극한 현상에 의한 심각한 재해 사례가 다수 보고되었다. 그 중에서도 폭염과 한파와 같은 극한기온 현상은 많은 인명피해를 야기하는 것으로 알려져 있으며 (Mitchell et al., 2016; Kim et al., 2016; Dixon et al., 2005), 이 때문에 기후변화에 따른 극한기온 현상의 빈도와 강도 변화에 대한 관심이 지속되어 왔다. 여름철 극한고온 사례 빈도의 증가와 겨울철 극한저온의 빈도 감소가 전 지구적으로 발

생하고 있음이 알려졌으며 (Alexander et al., 2006), 다양한 지역에 대한 지역 규모 분석이 이뤄지면서 지역과 계절에 따라 극한기온의 온난화 경향이 서로 다르게 나타나고 있음이 확인됐다 (Grothjahn et al., 2016; Sheikh et al., 2015; Franzke, 2015; Donat et al., 2014; Stephenson et al., 2014; Alexander et al., 2009; Choi et al., 2009). 이보다 작은 규모인 한반도에서도 비슷한 극한기온 현상의 변화가 나타났다 (Kim et al., 2014; Lee et al., 2013).

기온의 장기적인 추세는 단순한 선형적 증가를 보이는 것이 아니라, 온난화 경향이 가속 (Franzke, 2014; Ji et al., 2014; Lee and Kang, 1997) 혹은 약화되는 (Kosaka and Xie, 2013; Stocker et al., 2013) 비선형적인 변화를 보인다는 연구 결과가 보고되었다. 이는 기온의 장기 변동은 선형 추세만으로 설명할 수 없으며, 비선형적인 변동을 고려할 때 제대로

† Corresponding author: seokwooson@snu.ac.kr

Received February 28, 2018 / Revised April 06, 2018 / Accepted April 27, 2018

이해될 수 있음을 의미한다 (Franzke, 2014). 이 같은 맥락에서 Kim et al. (2014)은 한반도 장기 기온 관측자료에서 나타나는 극한기온 현상의 비선형 추세가 계절별로 뚜렷한 특징을 보인다는 것을 확인하였다.

흔히 극한기온의 장기 추세를 분석하기 위해 일정한 기온 값의 기준치를 초과하는 일수 (혹은 빈도수)의 변화를 확인한다. 이때 활용되는 기준치는 통계적으로 산출된 특정 분위수를 기준으로 설정하거나, 인체에 심각한 피해를 입힐 수 있는 온도를 기준으로 한다 (Grotjahn et al., 2016; Sheikh et al., 2015; Donat et al., 2014; Stephenson et al., 2014; Choi et al., 2009). 그러나 특정 기준치 이상일수의 추세를 구하는 방식은 어디까지나 극한기온 현상의 빈도에 대한 추세를 보여주기 때문에, 극한기온 자체의 추세라 하기에는 어려움이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 일부 연구에서는 분위수 회귀 분석을 이용하여 특정 분위수를 기준으로 정의된 극한기온의 추세를 구하고자 하였다 (Franzke, 2015; Kim et al., 2014; Lee et al., 2013). 분위수 회귀분석은 특정 분위수의 선형 및 비선형 추세를 구할 수 있을 뿐만 아니라, 이를 이용해 구한 극한기온의 추세는 기온 값에 대한 시간의 함수로 극한기온의 빈도와 강도에 대한 정보를 모두 포함한다. 또한 자료의 분포에 대한 가정을 필요로 하지 않기 때문에 흔히 사용되는 최소제곱법과 비교할 때 이상치에 대한 민감도가 낮다 (Koenker and Hallock, 2001). 이는 자칫 몇 개의 이상치에 의해 큰 차이를 보일 수 있는 극한기온의 장기 추세를 확인하는데 유리한 장점이 된다.

본 연구에서는 분위수 회귀분석을 한반도에 적용한 선행 연구들의 분석 영역을 동아시아 지역으로 확장하고자 하였다 (Kim et al., 2014; Lee et al., 2013). Franzke (2015)은 유럽 지역의 장기 기온자료에 분위수 회귀분석을 적용한 결과, 같은 유럽 내에서도 계절과 지역에 따라 극한기온의 추세가 매우 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 동아시아 지역 또한 기후적으로 대륙의 특성을 지닌 중국과 해양의 특성을 지닌 일본, 그리고 양쪽의 특성을 모두 가진 한국으로 구분되는 다양한 지역적 특성을 가지며, 온난화 경향도 계절과 지역에 따라 다르게 나타나고 있다 (Choi et al., 2009). 이러한 지역적 다양성을 바탕으로, 분위수 회귀분석을 사용하여 보다 확장된 영역인 동아시아 지역에서 극한기온의 선형적인 장기 변화가 계절과 지역에 따라 어떻게 나타나는지 확인하고자 하였다. 또한 극한기온의 2차 다항 추세를 분석하여 선행연구에서 보고된 온난화 경향의 가속 및 약화, 즉 비선형적인 변화가 동아시아 극한기온 사례에서도 나타나는지를 확인하였다.

2장에서는 본 연구에 이용된 자료와 분석방법에 대해 기술

한다. 특히 극한기온의 추세를 정량적으로 구하기 위한 방법인 분위수 회귀분석과 이에 대한 유의성 검정 방법에 대해 기술한다. 이어지는 3장에서는 동아시아 극한기온의 장기 추세를 분석하여, 각 극한기온 사례에서 계절과 지역에 따라 온난화 경향이 어떤 차이를 보이는지 확인한다. 또한 비선형 추세에 해당하는 2차 다항 추세를 분석하여 동아시아 기온 변화에서 나타나는 비선형성과 계절 및 지역에 따른 온도 추세의 변화 경향에 대해 살펴보고자 한다. 4장에서는 전체 내용을 요약하고 연구의 한계점과 추가 연구 방향에 대해 논의한다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 자료

기온의 장기간 변동을 확인하기 위해 동아시아 지역에 위치한 한국과 중국, 일본 3개 국가에서 관측한 일 최고기온 (TX)과 최저기온 (TN) 자료를 이용하였다. 분석에 사용한 관측기간은 1961년 1월 1일부터 2013년 8월 31일까지 53년간의 자료를 활용하였다. 해당 관측기간 동안 지점의 이동이나 결측이 없는 지점만을 선별하여 총 270개 지점의 관측지점에 대해서만 분석을 수행하였으며, 국가별로 한국 11개, 중국 117개, 일본 142개 지점의 자료를 사용하였다. 계절에 따른 극한기온 사례를 구분하기 위해 전체 기온 시계열 자료를 북반구 겨울철 (12~2월, DJF)과 여름철 (6~8월, JJA)로 나누어 분석하였다.

2.2 분위수 회귀분석

분위수 회귀분석은 전체 자료에서 특정 분위수 (r)의 선형 및 비선형 변동추이를 분석하기 위한 방법으로 극한기온의 추세를 직접 분석할 수 있다. 이는 다음과 같은 수식으로 표현된다 (Koenker and Hallock, 2001).

$$y_r = \min \left\{ \sum_{\{i|y_i < y_r(x_i)\}} (1-r) |y_i - y_r(x_i)| + \sum_{\{i|y_i > y_r(x_i)\}} r |y_i - y_r(x_i)| \right\} \quad (1)$$

n 개의 자료에 대하여 $i = 1, 2, \dots, n$ 이며, y_i 는 n 개의 자료 중 i 번째 값을 의미한다. 위 식에서 확인할 수 있듯이 분위수 회귀분석은 구하고자 하는 분위수 r 의 추세선 y_r 을 기준으로 가중치가 곱해진 오차의 절댓값 합이 최소가 되도록 하는 추세를 구한다. 추세선을 구하는 방법은 일반적으로 사용되는 최소제곱법과 비슷하지만 오차 제곱의 합 대신 절댓값의 합을 이용한다는 점에서 차이를 갖는다. 이렇게 오차 제

곱 대신 절댓값을 이용하면 추세식을 구하는 과정에서 이상치의 효과가 보다 적게 반영되기 때문에 이상치에 의해 추세가 지나치게 커지거나 작아지는 효과를 줄일 수 있다. 이에 더해 분위수 회귀분석은 자료의 분포에 대한 가정이 포함되지 않는다는 이점을 갖는다. 실제 선행연구에서 밝혀진 바와 같이 계절별 일 최저기온과 최고기온의 확률밀도함수는 완벽한 정규분포를 이루지 않는다 (Kim et al., 2014). 그러나 최소제곱법의 경우 추세를 구하는 과정에서 자료의 분포에 대한 가정이 포함되기 때문에, 극한 사례의 빈도가 축소 혹은 과장되게 나타날 수 있다. 분위수 회귀분석을 사용하면 불필요한 자료에 대한 가정을 생략함으로써 이러한 축소나 과장의 가능성을 일부 줄일 수 있다.

본 연구에서는 극한기온의 장기 변동성을 확인하기 위해 특정 분위 r 을 각 계절에 따라 최고기온의 95% 분위 (TX95%)와 최저기온의 5% 분위 (TN05%)로 선정하였다. 이 때 여름철 최고기온의 95% 분위 (JJA TX95%)는 폭염과 연관된 사례를 나타내는 지표이며, 겨울철 최저기온의 5% 분위 (DJF TN05%)는 한파 관련 사례를 나타낸다. 또한 여름철 최저기온의 5% 분위 (JJA TN05%)는 야간 및 오전 시간의 온도와 관계된 지표로서 열대야 현상과 관련성을 가지며, 겨울철 최고기온의 95% 분위 (DJF TX95%)는 난동(暖冬)현상과 관계된 지표로 활용 가능하다.

각 분위수의 추세는 선형 추세인 1차 추세식과 포물선 형태의 2차 추세식으로 계산하였다. 분위수 회귀분석을 통해 얻은 1차 추세식은 계절별 극한기온의 선형적인 증가 혹은 감소를 의미하며, 2차 다항 추세식은 극한기온의 장기변화에서 나타나는 비선형적인 변화를 나타낸다. 비선형성의 크기는 2차 다항 추세식의 이차항 계수의 절댓값으로 정량화할 수 있다. 즉, 시간 t 에 따른 온도 $T(t)$ 의 변화를 $T(t) = a(t-p)^2 + T_0$ 로 표현할 때, a 의 크기가 주어진 온도 추세의 비선형성을 나타내는 지표가 된다. 또한 위의 방정식에서 p 은 온도의 증감이 변화하는 시점을 의미한다. a 와 p 를 알 때 온도 시계열의 2차 다항 추세식을 포물선 형태로 간단하게 결정할 수 있으며, 이에 따라 2차 다항 추세식에 대한 분석을 통해 관측기간에서 나타나는 온도 추세의 변화를 정성적인 수준에서 확인할 수 있다 (Kim et al., 2014).

2.3 유의성 검정

각 분위수의 회귀분석 결과에 대한 유의성 검정 방법으로는 시계열의 자기상관 (autocorrelation)을 고려한 bootstrap 방법을 사용하였다 (Franzke, 2013). 흔히 이용되는 Student's

t-test의 경우 유의성을 검정하고자 하는 추세의 분포에 대한 가정이 포함되며, 이러한 가정에 따라 추세식의 기울기가 어느 이상이 되면 검정 결과를 유의하게 판단해버리는 문제점이 발생할 수 있다. 자기상관을 이용한 유의성 검정은 이 같은 t-test의 약점을 보완할 수 있다. 개략적인 과정은 다음과 같다. 회귀분석에 이용한 관측 자료와 동일한 자기상관과 확률분포를 갖는 가상의 시계열을 1,000개 만든다. 이 1,000개의 가상 시계열로부터 분위수 회귀분석을 통해 얻은 추세식의 계수로 추세의 분포를 구할 수 있다. 추세의 분포를 실제 관측 시계열의 추세식 계수와 비교하여 유의수준 95%에서 통계적으로 유의한지 판단하였다.

3. 결 과

3.1 선형 추세 분석

기온의 시계열에서 분위수 회귀분석을 통해 구한 선형 추세는 시간에 따른 극한기온의 선형적 증감을 나타낸다. 다시 말해 기온 시계열의 선형 증가 추세는 온난화 경향을 나타내며, 추세의 기울기가 클수록 더 강한 온난화 효과가 나타나고 있음을 의미한다 (Kim et al., 2014; Lee et al., 2013). Fig. 1은 동아시아의 대표지점인 베이징, 서울, 도쿄의 여름철과 겨울철 일 최고/최저기온 관측값과 극한기온의 선형 추세를 나타내고 있다. 각 연도별 일 최고 및 최저기온은 여름철에는 빨강색과 주황색, 겨울철에는 초록색과 파란색 점으로 각각 표기하였다. 관측된 기온 자료의 특성은 계절과 지역에 따라 차이를 보인다. 대륙에 위치한 베이징의 관측자료에서는 여름철 15~35°C, 겨울철은 -15~10°C의 온도 범위를 보였으며, 일 최고/최저기온의 차이가 뚜렷하게 구분되는 것으로 나타났다. 반면 해양의 영향을 받는 도쿄의 경우 여름철 온도 범위는 베이징과 비슷하지만, 겨울철에는 -5~20°C로 상대적으로 따뜻한 기온 분포를 보였다. 또한 여름과 겨울 모두 최고기온의 하위값과 최저기온의 상위값이 일부 겹쳐져 나타나, 최고기온과 최저기온의 차이는 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 대륙과 해양 사이에 위치한 서울은 베이징과 유사한 온도의 범위를 갖지만, 최저/최고기온 사이의 차이는 뚜렷하게 나타나지 않는 점은 도쿄와 비슷한 특성을 보였다. 기온 자료의 분포에서 나타나는 지역적 차이는 각 대표지점이 위치한 대륙/해양 간의 비열 차이에 의한 효과로 분석된다. 비열이 작은 대륙에서는 두 계절에서 최고기온과 최저기온 간의 차이가 크고, 겨울철 기온이 더 크게 낮아진다. 반대로 해양의 경우 비열이 크기 때문에 최고/최저기온 간 차이가 작고, 상대적으로 따뜻한 기

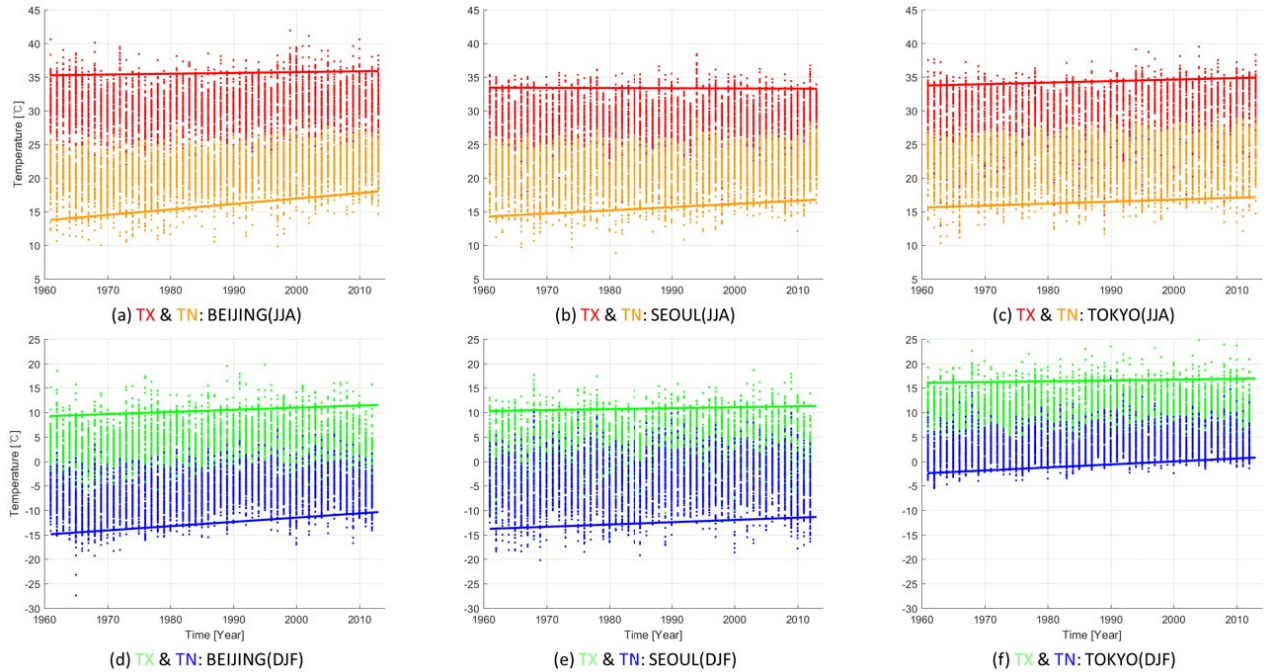


Fig. 1. Time series and linear trends of TX95% and TN05% at Beijing (a, d), Seoul (b, e), and Tokyo (c, f) in JJA (top) and DJF (bottom). Daily TX and TN are indicated by dots with different colors: JJA TX (red), JJA TN (orange), DJF TX (green), and DJF TN (blue). Trends of TX95% and TN05% are indicated by solid line.

후적 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

Fig. 1에서 실선은 색에 따라 각각 JJA TX95% (빨강색), JJA TN05% (주황색), DJF TX95% (초록색), DJF TN05% (파란색)의 선형 추세를 나타낸다. 관측값에 대한 분위수 회귀분석 결과는 관측값과 마찬가지로 계절과 분위, 그리고 지역에 따라 다소 상이한 결과를 보였다. 우선 여름철 열대야 현상과 관련된 JJA TN05%의 경우 (Fig. 1a-c의 주황색 실선) 베이징 $0.81^{\circ}\text{C dec}^{-1}$, 서울 $0.48^{\circ}\text{C dec}^{-1}$, 도쿄 $0.29^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ 로 도쿄를 제외한 나머지 두 지점에서 통계적으로 유의한 증가를 보이는 것으로 확인됐다. 여름철 폭염의 영향을 나타내는 JJA TX95%의 회귀분석 결과 (Figs. 1a-c의 빨강색 실선)는 베이징이 $0.12^{\circ}\text{C dec}^{-1}$, 서울이 $-0.03^{\circ}\text{C dec}^{-1}$, 도쿄에서 $0.22^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ 로 눈에 띄는 증감을 보이지 않았다. 반면 DJF TN05% (Figs. 1d-f의 파란색 실선)는 베이징, 서울, 도쿄에서 각각 $0.87^{\circ}\text{C dec}^{-1}$, $0.47^{\circ}\text{C dec}^{-1}$, $0.61^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ 로 통계적으로 유의한 상승추세를 보였다. 겨울철 TX95% (Figs. 1d-f의 초록색 실선)는 각각 $0.44^{\circ}\text{C dec}^{-1}$, $0.19^{\circ}\text{C dec}^{-1}$, $0.17^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ 로 소폭의 증가 추세를 보였다. 상대적으로 큰 증가 추세를 보인 베이징도 통계적으로는 유의하지 않은 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 동아시아 지역의 기온 상승이 TN05% (주황색

및 파란색 실선)에서 비교적 뚜렷하며, 계절적으로는 겨울철에 더 강한 기온 증가가 나타남을 보여준다. 이와 같은 겨울철과 여름철 극한기온 사례의 비대칭적인 온난화 경향은 선행연구의 결과와 일치한다 (e.g. Alexander et al., 2006).

계절별 극한기온의 증가 경향 차이는 세 지점뿐만 아니라 분석에 사용된 270개 지점에서도 나타난다. Fig. 2는 각 지점의 여름철 (빨강색) 및 겨울철 (파란색)의 TN05%와 TX95%의 추세를 비교한 그림이다. 대부분의 지점이 여름과 겨울 두 계절에서 TN05%의 추세가 TX95%의 추세에 비해 더 큰 값을 보였다. 여름철 TN05%의 평균은 $0.36\pm 0.20^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ 로 전반적인 증가 추세를 보였으며, 여름철 TX95%의 경우 평균 장기 추세가 $0.19\pm 0.17^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ 로 전체적으로 약한 증가 추세를 보였다 (Fig. 2의 빨강색 원 'E'). 통계적으로 유의한 지점의 수는 JJA TN05%는 약 44% (120개 지점) 지점에서 통계적으로 유의한 기온증가 추세를 보였으며, JJA TX95% 또한 약 43% (117개 지점)로 TN05%와 비슷하였다. 겨울철 TN05% 기온 추세의 전 지역 평균은 $0.43\pm 0.24^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ 로 대부분 지역에서 뚜렷한 상승추세를 보였으며, DJF TX95%의 장기 추세는 평균 $0.18\pm 0.19^{\circ}\text{C dec}^{-1}$ 였다 (Fig. 2의 파란색 원 'E'). 겨울철 TN05%의 선형 추세는 전체 270개 지점 중 약

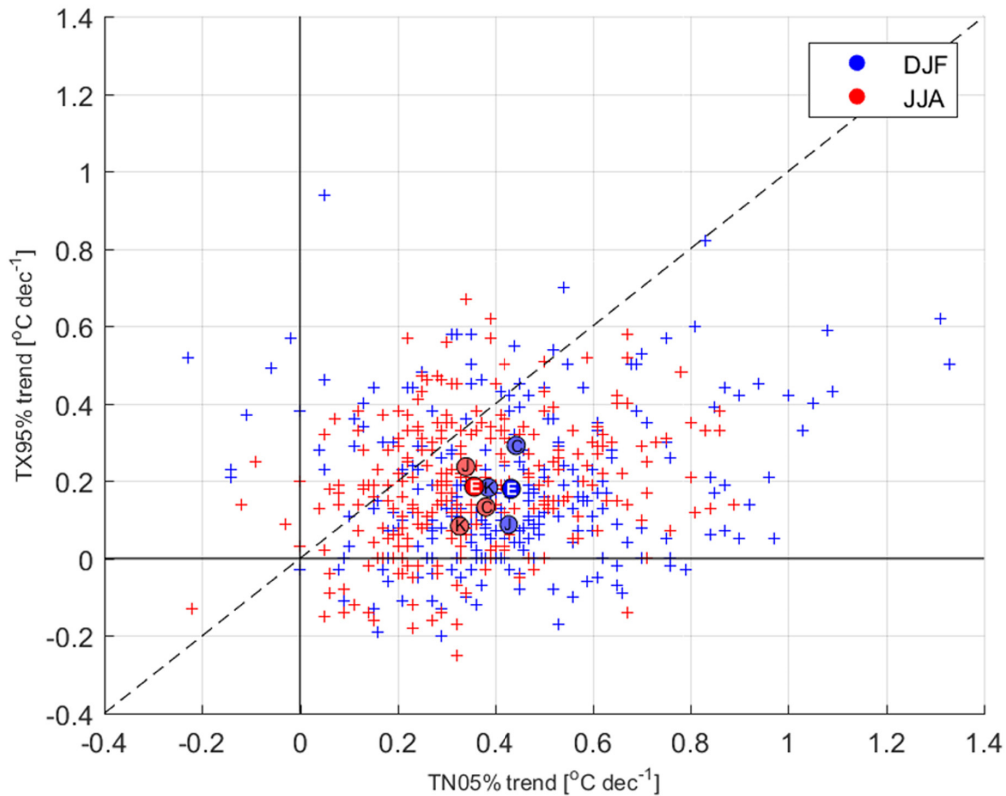


Fig. 2. Comparison between linear trends of TX95% and TN05% at each station in DJF (blue) and JJA (red). Filled circles indicate mean trends of stations in China, South Korea, Japan, and East Asia (all stations) marked with 'C', 'K', 'J', and 'E' respectively.

63% (170개 지점)에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 특히 일본 관측지점 중 80% 이상 (118개 지점)이 유의하게 나타났는데, 이는 DJF TN05%의 선형 변화 추세가 도시화의 영향을 크게 받는다는 선행연구 결과와 관련된 것으로 볼 수 있다 (Lee et al., 2013). 반면 DJF TX95%는 통계적으로 유의한 지점이 전체 중 7%에 해당하는 19개 지점에 그쳐 선형적인 기온변화가 뚜렷하지 않는 것으로 확인되었다. 이 같은 결과는 선행연구를 통해 알려진 겨울철 한파 사례의 발생빈도 감소와 일치하며 (e.g. Alexander et al., 2006), 동아시아 지역에서 겨울철의 기온 증가 경향이 여름철에 비해 크다는 결과와도 일관성을 보이고 있다 (Bailing, 1998; Alexander et al., 2006).

극한기온의 선형 추세가 지역적으로 어떤 특성을 갖는지 살펴보기 위해 Fig. 2에 한국과 중국, 일본의 평균적인 추세를 각각 'K'와 'C', 'J'로 표시하였다. 여름철 TX95%는 일본 내에 위치한 관측지점에서 한국과 중국에 비해 더 강한 온난

화 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 95% 유의수준에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 반대로 겨울철 TX95%에서는 일본 관측지점의 온난화 경향이 다른 두 국가보다 약하게 나타났다. 이러한 결과는 세 지역의 관측지점 수 불균형을 고려하더라도 극한기온의 선형 추세에 뚜렷한 지역적 특성이 존재함을 시사한다. 또한 세 지역에서 TX95%의 추세가 차이를 보인 것과는 반대로 여름과 겨울 두 계절 모두 TN05%의 추세는 95% 유의수준에서 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다.

각 극한기온의 증감 추세에서 나타나는 지역적 특성을 보다 자세히 파악하기 위해, 지점별 선형 추세 공간적인 분포를 Fig. 3과 같이 확인하였다. 여름철 TN05%에서는 중국 북부 내륙지역을 중심으로 증가 경향이 두드러지게 나타났고, 일본 큐슈지역에서도 강한 증가추세를 보였다 (Fig. 3a). 앞서 확인한 바와 같이 JJA TX95%는 통계적으로 유의한 증가 추세를 보이는 지점이 일본 지역을 중심으로 다수 분포하였으

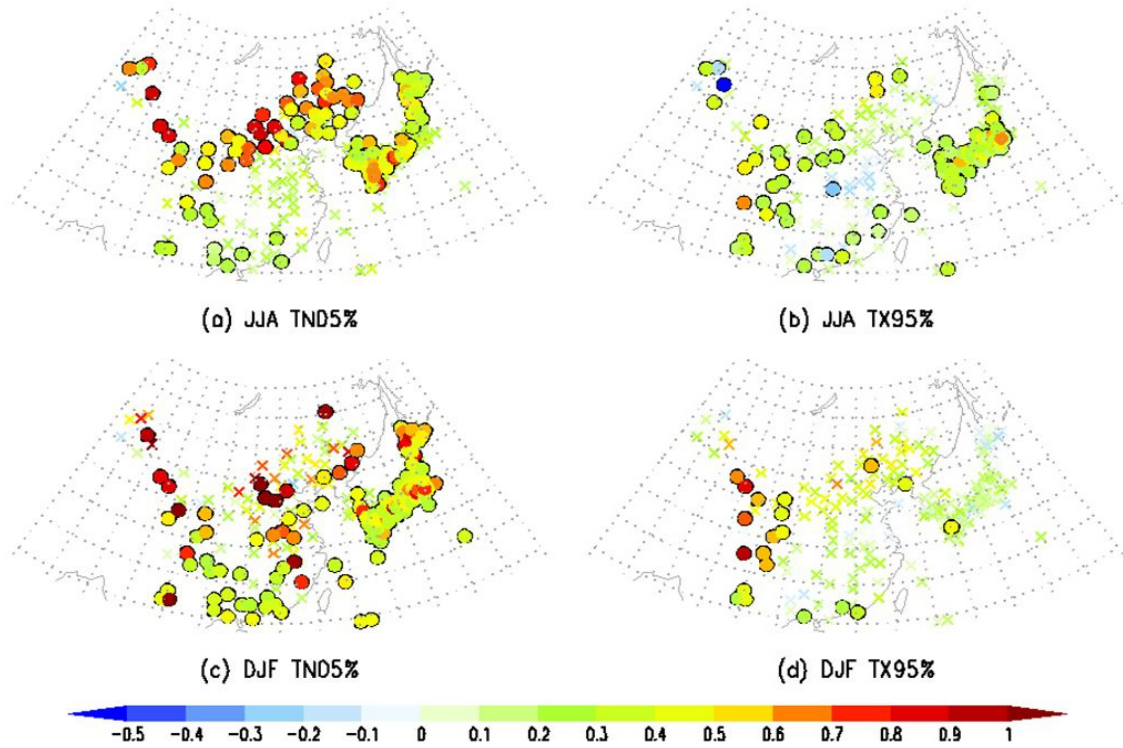


Fig. 3. Linear trends of (a) JJA TN05%, (b) JJA TX95%, (c) DJF TN05%, and (d) DJF TX95% at each station. Unit is $^{\circ}\text{C decade}^{-1}$. The trends that are statistically significant at 95% confidence level are indicated by filled circles and cross marks denote the stations of which the trend is statistically insignificant.

며, 중국 내륙 및 남부해안 지역에서도 약한 증가 추세가 나타났다. 특히 중국 일부지역에서는 통계적으로 유의한 수준의 감소 추세를 보이는 지점 (KARAMAY, URUMQI, GUANGHUA, WUZHOU)도 있었다 (Fig. 3b). 반면 겨울철 TN05% 사례는 대표지역을 통해 확인한 바와 같이 동아시아 대부분 지역에서 뚜렷한 증가 추세를 보였다. 특히 중국 북부의 내몽골 지역부터 만주 지역에서 강한 증가 추세를 보이는 지역이 많았으며, 동중국해 해안과 일본 홋카이도 지역에서도 증가 추세가 두드러지게 나타났다. 중국 화남 지방을 비롯한 남중국해 해안에서는 증가 추세가 비교적 약하지만 통계적으로는 유의한 수준의 기온상승을 보였다 (Fig. 3c). 겨울철 TX95%는 대부분의 지점에서 통계적으로 유의한 기온 증감이 나타나지 않았지만 중국 내륙의 고원지역에서 강한 기온 상승추세가 나타났다 (Fig. 3d).

Fig. 4를 통해 극한기온의 선형 증감 추세가 위도에 따라 어떤 차이를 보이는지 확인할 수 있다. 각 지점별로 위도에 따른 선형 추세의 크기를 도시하였으며, 95% 유의수준에서 통계적으로 유의한 지점은 원으로 표시하였다. 통계적으로

유의한 지점만 고려하였을 때, 여름철과 겨울철의 TN05%에서는 고위도로 갈수록 추세의 크기가 커지는 경향성을 보인다. 위도와 선형 추세 사이의 상관계수는 JJA TN05% (Fig. 4a)에서 0.34, DJF TN05% (Fig. 4c)에서 0.22로 나타났으며, 두 값 모두 유의수준 95%에서 통계적으로 유의하게 나타났다. 그러나 동아시아 지역 관측지점이 특정 위도에 다수 집중되어있는 점을 고려할 때, 상관계수만으로 전반적인 경향성을 설명하기에 어려움이 있다. 이러한 부분을 보완하기 위해 각 위도 구간에서 통계적으로 유의한 지점들의 평균 선형 추세 크기를 확인하였을 때, JJA TN05%의 경우 북위 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 구간과 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 구간 사이에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 이와 유사하게 DJF TN05%에서도 북위 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 과 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 구간 사이에서 유의한 차이가 나타났다. 반면 TX95%의 추세는 통계적으로 유의한 지점만 고려하였을 때 위도와 선형 추세 간의 상관계수가 여름철 (Fig. 4b)에 0.09, 겨울철 (Fig. 4d)에 0.38 이었으며 모두 유의수준 95%에서 유의하지 않은 것으로 확인되었다. 구간별로 살펴보았을 때는 두 계절 모두 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 사이에서 평균적인 추세의 크기가 크

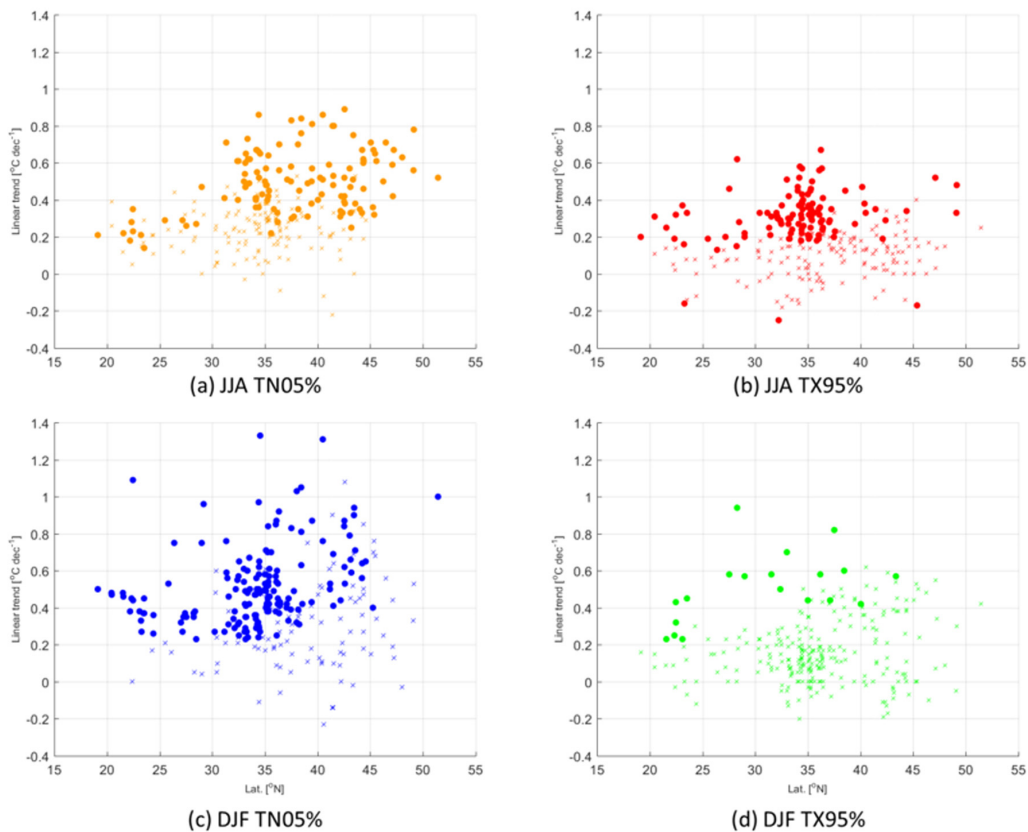


Fig. 4. Linear trends of (a) JJA TN05%, (b) JJA TX95%, (c) DJF TN05%, and (d) DJF TX95% at each station according to latitudes. The trends that are statistically significant at 95% confidence level are indicated by filled circles and cross marks denote the trends which are statistically insignificant.

게 나타났다. 그러나 각 구간 사이의 차이에 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았으며, 앞서 언급하였듯 해당 위도 범위에 관측지점이 다수 집중되어있음을 감안할 때 위 결과가 뚜렷한 경향성을 보인다 말하기 어려운 부분이 있다.

정리하면 극한기온의 장기 변동성은 주로 TN05%에서 통계적으로 유의한 기온 상승이 나타나고 있으며, 계절적으로는 겨울철에 온난화 경향이 강하게 나타나고 있다. 지역적으로는 각 계절 TN05%에서 고위도로 갈수록 더 강한 기온 상승이 나타나는 경향을 보였다.

3.2 비선형 (2차) 추세 분석

극한기온 시계열의 비선형성에 대한 분석은 추세식 $T(t) = a(t-p)^2 + T_0$ 에서 a 와 p 의 크기로 정량화 할 수 있다. 2차항의 계수 a 는 추세가 갖는 비선형성의 크기와 추세식의 형태를 나타내며, p 는 2차 다항식의 극대/극소점을 의

미한다. 따라서 a 값의 부호와 p 의 값의 크기를 통해 추세식의 형태를 결정할 수 있으며, 이를 통해 극한기온 추세의 변화를 정성적인 수준에서 확인하는 것도 가능하다. 이러한 분석에 대한 자세한 내용은 선행연구 (Kim et al., 2014)를 통해 확인할 수 있다.

대표지점인 베이징과 서울, 도쿄의 계절별 극한기온에 대한 2차 다항식 추세는 Fig. 5에 나타나 있다. 여름철 TN05% (Figs. 5a-c의 주황색 실선)는 a 의 크기가 베이징에서는 $0.08^{\circ}\text{C dec}^{-2}$, 서울에서 $0.12^{\circ}\text{C dec}^{-2}$, 도쿄에선 $0.09^{\circ}\text{C dec}^{-2}$ 로 0보다 큰 값을 가지면서 아래로 볼록한 포물선 형태의 추세를 보였다. p 는 각각 1941년, 1967년, 1970년으로 관측기간 초반이나 그보다 이전 시기에 극점이 나타났다. 이는 관측기간 동안 JJA TN05% 기온의 상승이 점점 가속되거나 (베이징), 극점의 위치까지 잠시 감소하다 이후 가속하는 기온상승을 보였음을 의미한다. 여름철 TX95% (Figs. 5a-c의 빨강색

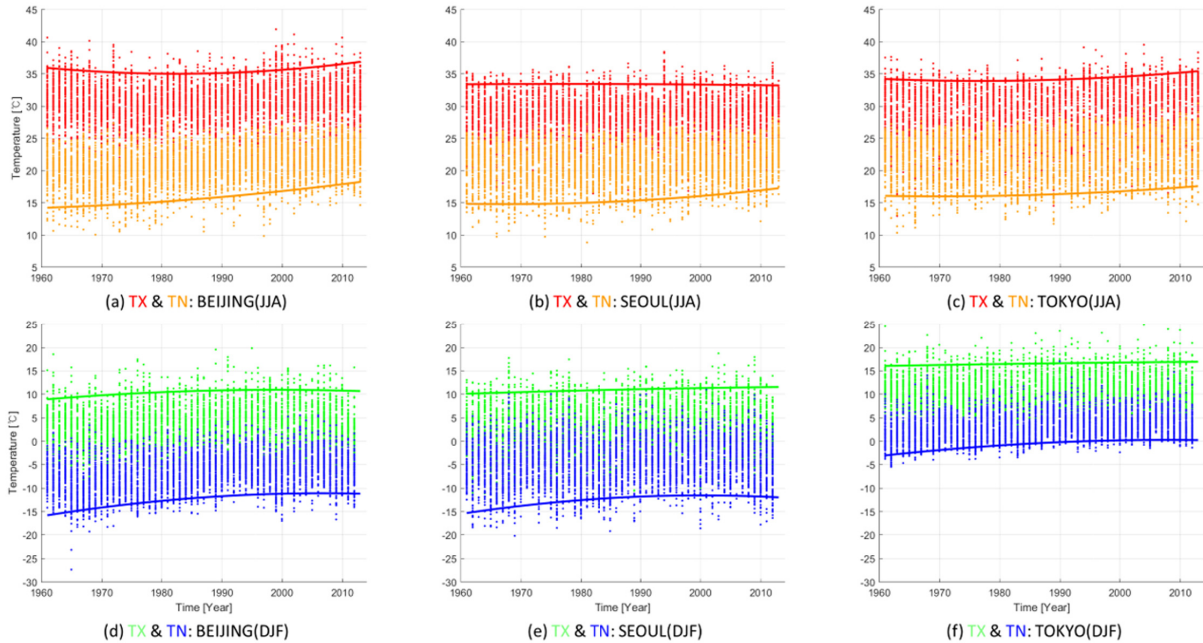


Fig. 5. Same as Fig. 1, but for 2nd order fitting curves of TX95% and TN05%.

실선)는 베이징과 도쿄에서 각각 0.20°C dec⁻²와 0.12°C dec⁻²로 TN05%에서와 같은 아래로 볼록한 추세 형태를 보였으며, 서울의 α 값은 -0.02°C dec⁻²로 매우 작아 비선형적인 온도 변화는 약한 것으로 나타났다. 극점의 위치는 베이징에서 1983년, 서울은 1978년, 도쿄가 1977년으로 JJA TN05%에 비해 늦은 시기에 나타나는 것으로 나타났다.

겨울철 TN05%의 변화추세 (Figs. 5d-f의 파란색 실선)는 세 지역 모두 위로 볼록한 형태를 가지고 있다. 실제 각 지점의 α 값은 베이징이 -0.22°C dec⁻², 서울은 -0.25°C dec⁻², 도쿄가 -0.15°C dec⁻²로 나타났다. 극점의 위치 p 는 세 지점에서 약 2007년 (베이징), 2000년 (서울), 2008년 (도쿄)으로 모두 2000년대에서 극댓값을 갖는 포물선 형태의 추세를 보였다. 겨울철 TX95%의 경우 (Figs. 5d-f의 초록색 실선) 베이징, 서울, 도쿄에서 α 값은 각 -0.14°C dec⁻², -0.03°C dec⁻², -0.01°C dec⁻²로 TN05%에 비해 비선형성의 크기가 작게 나타나는 경향을 보였다. p 값은 각 1999년, 2040년, 2054년으로 서울과 도쿄에서는 관측기간을 벗어난 시점에 극점이 위치하는 것으로 나타났는데, 이는 관측기간 동안 기온이 꾸준히 증가하는 추세를 보이지만 그 증가속도는 점차 줄어들고 있음을 의미한다. 세 대표지점에서 공통적으로 DJF TN05% α 의 절댓값이 가장 크고, 계절에 따라 부호가 반대로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 추세 곡선의 극점 위치 p 는 계절에 따라 여름철에는 관측 전반부 혹은 관측 기간 이전에, 그리고 겨울철에

는 관측 후반부 혹은 관측 기간 이후에 위치하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 선행연구에서 나타난 겨울철 극한기온에서 온난화의 정체가 동아시아 관측자료에서도 나타나고 있으며 (Kosaka and Xie, 2013; Stocker et al., 2013), 반대로 온난화의 가속화는 여름철 최저기온을 중심으로 이뤄지고 있음을 시사한다 (Franzke, 2014; Ji et al., 2014; Lee and Kang, 1997).

그러나 위 대표지점을 포함한 전체 지점의 2차 다항 추세식은 자기상관을 고려한 bootstrap 방식으로 유의성 검정하였을 때 계절 및 분위에 관계없이 α 값이 대부분 유의하지 않게 나타나는 것으로 확인되고 있다. 이 때문에 위에서 이뤄진 2차 다항 추세에 대한 논의에서 정량적인 값에 대해 큰 의미를 부여하기에는 다소 어려움이 있다. 그럼에도 불구하고, 전체 지점의 계절별/분위별 α 와 p 값을 표현한 Fig. 6를 보면 계절과 분위에 따라 2차 다항 추세의 형태가 일련의 경향성을 가짐을 확인할 수 있다. Fig. 6a에서 각 점은 JJA TN05% (주황색), JJA TX95% (빨강색), DJF TN05% (파란색), DJF TX95% (초록색)의 Eq. 1에서 α 와 p 값을 나타내며, 검은색 파선은 관측기간의 시작과 끝을 나타낸다. Fig. 6a는 검은색 파선과 α 가 0이 되는 선에 의해 6개의 영역으로 분할되며, 이 분할된 영역은 Fig. 6b에서 동일한 위치의 하얀색 칸에 대응된다. Fig. 6b의 각 칸은 Fig. 6a 그래프 위 점의 위치에 따라 2차 다항 추세가 어떤 모양을 띄는지 나타내고 있으며, 중앙

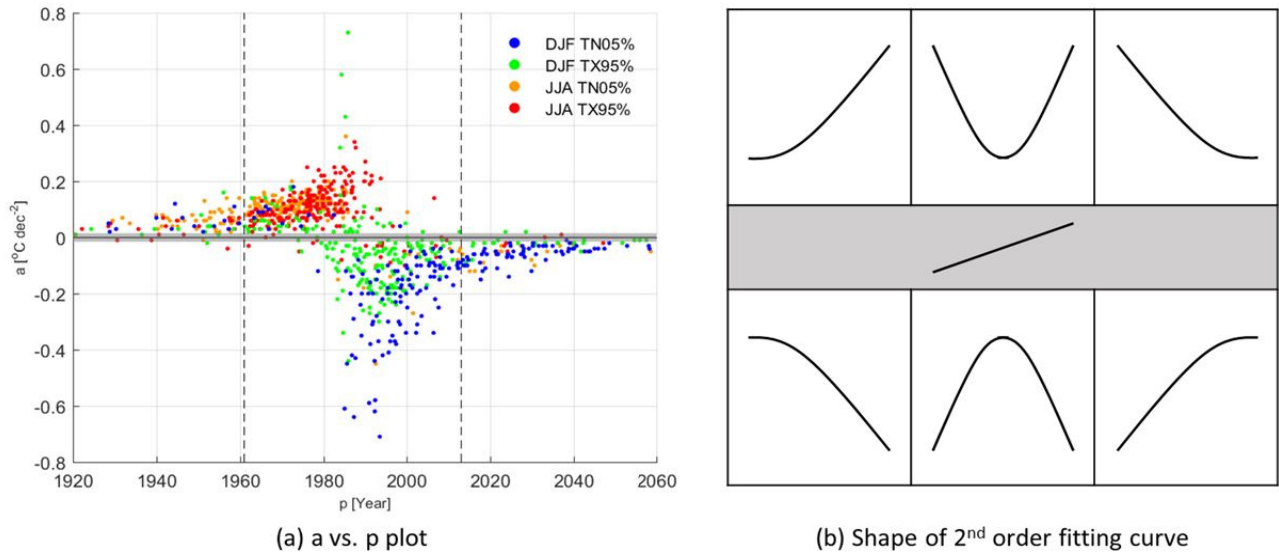


Fig. 6. Scatter plot of “a” and “p” in 2nd order fitting curve (eq. 1) of each station (a) and the shape of curve based on the scatter plot (b). DJF and JJA values are denoted in cold and warm colors, respectively. Vertical dashed lines on Fig. 6a represent the observation period used for analysis. Each unshaded cell of Fig. 6b indicate the points located on corresponding domain divided by x-axis and red dashed lines in Fig. 6a and the shape of the 2nd order fitting curve. The shaded cell in center of Fig. 6b indicates the points located on the x-axis (the stations which of “a” values are equal to zero).

에 위치한 칸은 a 가 0이 되는 선상에 위치한 점으로써 비선형적인 변화가 거의 없음을 의미한다 (회색 음영). Fig. 6에서 나타난 계절과 분위에 따른 경향성은 비록 2차 다항 추세의 유의성이 낮을지라도, 정성적인 수준에선 충분히 의미 있는 결과를 도출할 수 있음을 보여준다.

Fig. 7은 계절과 분위에 따라 각 분면의 지점수를 나타낸다. 여름철 TX95%와 TN05%는 대부분 지점에서 a 값의 부호가 양수로 나타났으며 (Figs. 7a-b), 전반적인 a 의 절댓값의 크기가 작게 나타났다. a 값의 크기가 0이 아닌 지점에 대해 극점의 평균적인 위치는 TX95%에서 1970년, TN05%에서 1976년으로 관측 기간 전반에 위치했다. 이는 여름철 극한기온의 온난화가 관측 초기와 비교할 때 증가 추세가 가속되고 있으며 비선형적인 변화 경향은 적은 것으로 해석할 수 있다. 겨울철 TN05%는 대부분 위로 볼록한 형태로 관측 기간 후반부인 2000년대와 관측 기간 이후에서 극대점을 갖는 추세를 보인다 (Fig. 7c). a 값의 크기가 0인 경우를 제외할 때 극점의 위치는 평균 2009년으로, 이는 앞서 대표지점 세 곳에서의 마찬가지로 동아시아 지역 전반에서 DJF TN05%의 온난화가 관측 기간 동안 악화되는 경향을 보였음을 암시한다. 겨울철 TX95%는 TN05%에 비해 a 값의 크기가 상대적으로 작게 나타났으며, 극점의 평균 위치는 1991년으로 대부분 지점에

서 관측 전반부에는 증가하다 후반부에 감소하는 추세를 보였다 (Fig. 7d).

극한기온의 2차 다항 추세에 공간적인 특성이 있는지 확인

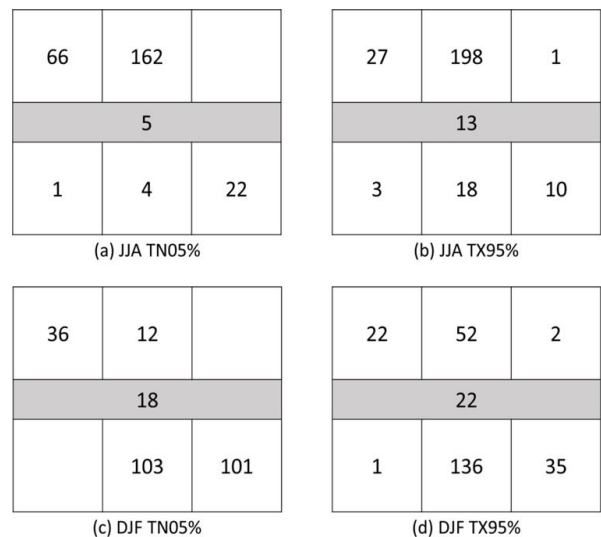


Fig. 7. Same as Fig. 6 (b), but for the number of stations according to the position on Fig. 6a of (a) JJA TN05%, (b) JJA TX95%, (c) DJF TN05%, and (d) DJF TX95%.

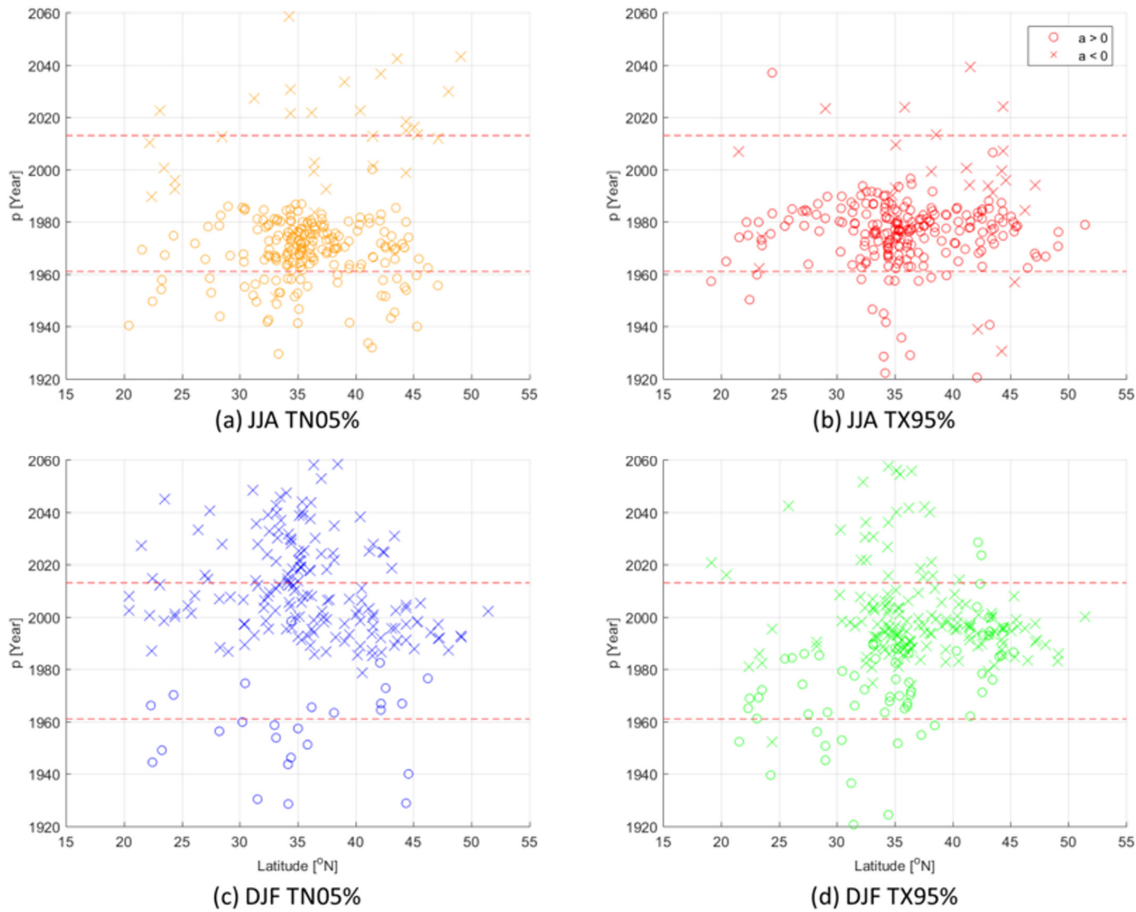


Fig. 8. “p” value in the 2nd order fitting of (a) JJA TN05%, (b) JJA TX95%, (c) DJF TN05%, and (d) DJF TX95% at each station according to latitudes. Open circles denote positive “a” and cross marks indicate that “a” is negative. Red dashed lines indicate the observation period used for analysis.

하기 위해 위도에 따른 a 값의 부호와 p 의 크기를 확인해보았다 (Fig. 8). 여름철 TX95%와 TN05%는 지역적으로 뚜렷한 경향성을 보이지 않았다. 겨울철 TX95%의 경우 중·고위도에 위치한 대부분의 지점에서 a 의 부호는 0보다 작지만, 저위도에서는 a 값이 양수로 나타나 여름철의 추세 곡선과 비슷한 위로 볼록하고 관측 전반부에 극점을 갖는 형태를 보이는 것으로 나타났다 (Fig. 8d). 이는 저위도에 위치한 대부분의 관측지점이 중국에 위치하고 있음을 감안할 때, DJF TX95%에서 지역적인 특성 (온난화의 가속)이 나타나고 있음을 암시한다. 본문에서 보이지 않았지만 경도에 따른 a 와 p 를 확인하였을 때 DJF TN05%의 2차 다항 추세가 일본 지역 (130°E~150°E)에서 a 의 부호가 0보다 작고 절댓값 또한 작게 나타나는 것으로 확인되었다. 또한 같은 지역에서 p 값이 관측기간보다 이후로 나타나, 관측기간동안 온난화 추세가

점차 작아지는 형태를 띠었다. 이는 일본 지역에서 DJF TN05% 추세의 비선형적인 특성이 약하고, 관측기간동안 온난화 경향이 점차 완만해지는 형태로 나타남을 의미한다. 반면 한국과 중국 지역에서는 2000년대를 전후로 기온 증가가 정체되거나 오히려 감소하는 형태를 보이는 지역적 차이가 나타난다. 그러나 DJF TX95%와 TN05% 모두 a 값의 통계적 유의성이 낮고, 절댓값 또한 상당히 작기 때문에 지역적인 특성을 정량적으로 논하기 어려운 부분이 있다. 그럼에도 불구하고 정성적인 수준에서는 DJF TX95%와 TN05%의 온난화 추세에 지역적인 경향성이 나타난다고 볼 수 있으며 이에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요하다.

위를 종합하면 극한기온의 장기 변화에서 나타나는 비선형적 변화를 2차 다항 추세를 통해 살펴보았을 때, DJF TN05%에서 다른 계절과 분위에 비해 강한 비선형성이 나타

나고 있으며, DJF TX95%는 a 값의 크기가 작아 극한기온의 변화 추세가 선형에 가까운 것으로 나타났다. 계절에 따라 2차 다항 추세의 형태에 뚜렷한 경향이 나타나 여름철은 아래로 볼록하고 관측기간 초반에 극점을 갖는 형태의 추세를, 겨울철은 위로 볼록하고 관측기간 후반에 극점을 갖는 형태를 보였다. 또한 DJF TX95%와 TN05%는 각각 위도 및 경도(국가)에 따른 지역적 차이를 보이는 것으로 나타났다.

4. 요약 및 토의

본 연구는 분위수 회귀분석을 이용해 동아시아 270개 관측소의 1961년부터 2013년까지 53년간 극한기온 장기 변동의 선형 및 비선형(2차) 추세를 분석하였다. 분위수 회귀분석은 이상치에 의한 영향을 줄일 수 있고, 자료의 분포에 대한 가정을 필요로 하지 않는다는 점에서 최소제곱법에 비해 상대적인 장점을 갖는다.

극한기온의 선형 추세를 분석한 결과 동아시아 지역 DJF TN05%의 기온은 관측기간 동안 크게 증가하였으며, JJA TN05% 또한 전체적인 증가 추세를 보였다. 반면 계절별 TX95%에서는 대부분 지역이 기온의 증가가 소폭 상승에 그쳤으며 일부지역에서는 감소 추세가 나타났다. 각 분위의 선형 추세는 지역적으로 다소 차이를 보였으며, 특히 계절별 TN05%는 고위도로 갈수록 증가 경향이 강하게 나타났다. 자기상관을 고려한 가상자료를 통해 유의성을 검정했을 때 DJF TX95%를 제외한 모든 지표에서 동아시아 다수 지역이 통계적으로 유의한 장기 기온변화를 보이고 있음을 확인하였다.

비선형 추세에 해당하는 2차 다항 추세는 비록 통계적 유의성이 낮지만, 계절별/분위별로 뚜렷한 경향성을 보이는 것으로 나타났다. 계절에 따라 여름철에는 아래로 볼록한 형태, 겨울철에는 위로 볼록한 포물선 형태의 추세를 보였다. 포물선의 꼭짓점에 해당하는 극점의 위치는 여름철과 겨울철에서 각각 관측기간 초기와 말미에 나타났다. a 값의 절댓값 크기로 정량화 되는 비선형성의 크기는 JJA TX95%와 DJF TN05%에서 상대적으로 높은 값을 보였다. 2차 다항 추세를 통해 확인한 극한기온의 비선형적인 장기 변동은 선행연구에서 나타난 온난화 경향의 가속(Franzke, 2014; Ji et al., 2014; Lee and Kang, 1997)과 정체(Kosaka and Xie, 2013; Stocker et al., 2013)가 각기 다른 계절에 나타나고 있음을 암시하고 있다.

이러한 선형 및 비선형 추세의 경향성은 동아시아 지역에서 계절 및 극한 사례에 따라 기온 증가 경향이 각기 다르게 나타나고 있음을 시사한다. 겨울철 TN05%는 선형 추세에서

급격한 기온 증가를 보이고 있으며, 2차 다항 추세를 고려할 때 이러한 온난화 경향이 최근 수년에 걸쳐 다소 약화되거나 극한 사례의 기온은 오히려 감소하는 경향을 보였다. 반면 DJF TX95%에서는 뚜렷한 1차 및 2차 다항 추세가 나타나지 않았다. 여름철 TX95%와 TN05%의 선형 추세는 DJF TN05%에 비해 크기는 작지만, 통계적으로 유의미한 온난화 경향이 나타났다. 여름철 각 분위에서 2차 다항 추세는 관측기간 전반부인 70년대에 극점을 갖는 포물선 형태의 추세를 가지며, 이를 통해 여름철 각 분위에서 동아시아 지역의 온난화 경향이 가속하고 있음을 알 수 있다. 또한 극한기온의 장기 변동의 지역적인 특성을 살펴보았을 때, 겨울 및 여름의 TN05%에서 고위도로 갈수록 기온의 선형적인 증가가 강해지는 경향을 보였다. 그러나 두 계절의 TX95%는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다. 2차 다항 추세에서는 DJF TX95%에서 위도에 따라 추세 곡선의 형태가 다르게 나타났으며, DJF TN05%는 일본 지역에서 상대적으로 낮은 비선형성을 보이는 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 동아시아 지역 극한기온의 장기 추세 분석을 통해 선행연구에서 보고된 비선형적인 온난화 경향성이 지점관측에서도 유사하게 나타나고 있음을 확인하였다. 뿐만 아니라 이러한 온난화의 경향은 동아시아 내에서도 지역에 따라 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이와 같은 장기 추세의 특성은 자연변동성과 인위적인 온난화에서 원인을 찾을 수 있다. Guan et al. (2015)에 따르면 동아시아 지역의 온난화 경향에 NAO (North Atlantic Oscillation)와 PDO (Pacific Decadal Oscillation), AMO (Atlantic Multi-decadal Oscillation), 대기-지표-빙권 간의 상호작용과 같은 자연변동성이 중요하게 작용할 수 있다. 또한 Sun et al. (2016)과 Lee et al. (2013)에서는 인위적인 요소라 할 수 있는 도시화 효과가 온난화 경향에 영향을 미침을 확인한 바 있다. 두 요소 중 어떠한 요인이 동아시아 지역 극한기온 추세의 비선형성과 지역적 특성에 주된 영향을 미치는지 확인하기 위해서는 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

또한 본 연구에서는 계절별 각 분위의 변동성이 서로 다른 비선형적 특성을 가짐을 2차 다항 추세 분석을 통해 확인하였다. 그러나 이러한 비선형성은 2차 다항 추세 이외에도 다양한 형태의 추세를 가질 수 있다. 특히 2차 다항 추세식이 계절에 따른 극한기온 변화의 비선형적 특성을 잘 설명함에도 불구하고 통계적 유의성이 매우 낮게 나온 것이 2차 다항식이 극한기온의 변화를 표현하기에 적절하지 않았기 때문일 가능성이 있다. 이에 향후 극한기온의 비선형적인 변화를 보다 적절히 묘사할 수 있는 추세식의 형태에 대한 추가적인 논

의가 필요하다. 이에 더해 관측자료를 이용하는 과정에서 자료의 품질 문제가 발생할 수 있으며, 지역적인 분석에 있어 관측지점의 불균일한 분포로 인한 경향성의 왜곡이 나타날 수 있는 한계를 갖고 있다. 또한 이러한 비선형적 특성이 나타나는 이유와 미래 기후 예측에서도 온난화 경향의 비선형성이나 계절적 특성이 제대로 모의되는지에 대한 연구도 필요할 것이다.

사 사

본 연구는 한국기상산업기술원 단위 과제 “동아시아 이동성 저기압의 종관-기후학적 특성 분석 및 예측성 평가 (KMIPA 2015-2100)” 사업과 기상청 “기상·지진See-At기술개발연구사업(KMI2018-01011)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Alexander LV, Zhang X, Peterson TC, Caesar J, Gleason B, Klein Tank AMG, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahimzadeh F, Tagipour A, Rupa Kumar K, Revadekar J, Griffiths G, Vincent L, Stephenson DB, Burn J, Aguilar E, Brunet M, Taylor M, New M, Zhai P, Rusticucci M, Vazquez-Aguirre JL, 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.* 111: D05109.
- Alexander LV, Arblaster JM, 2009. Assessing trends in observed and modelled climate extremes over Australia in relation to future projections. *Int. J. Climatol.* 29: 417-435.
- Bailing RC, Michaels PJ, Knappenberger PC, 1988. Analysis of winter and summer warming rates in gridded temperature time series. *Climate Res.* 9: 178-181.
- Choi G, Collins D, Ren G, Trewin B, Baldi M, Fukuda Y, Afzaal M, Pianmana T, Gomboluudev P, Huong PTT, Lias N, Kwon WT, Boo KO, Cha YM, Zhou Y, 2009. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network region, 1955-2007. *Int. J. Climatol.* 29: 1906-1925.
- Dixon PG, Brommer DM, Hedquist BC, Kalkstein AJ, Goodrich GB, Walter JC, Dickerson IV CC, Penny SJ, Cervent RS, 2005. Heat mortality versus cold mortality: A Study of Conflicting Databases in the United States. *Bull. Ameri. Meteorol. Soc.* 86: 937-943.
- Donat MG, Peterson TC, Brunet M, King AD, Almazroui M, Kolli RK, Boucherf D, Al-Mulla AY, Nour AY, Aly AA, Nada TAA, Semawi MM, Al Dashti HA, Salhab TG, El Fadli KI, Muftah MK, Dah Eida S, Badi W, Driouech F, El Rhaz K, Abubaker MJY, Ghulam AS, Erayah AS, Ben Mansour M, Alabdouli WO, Al Dhanhani JS, Al Shekaili MN, 2014. Changes in extreme temperature and precipitation in the Arab region: long-term trends and variability related to ENSO and NAO. *Int. J. Climatol.* 34: 581-592.
- Franzke CLE, 2013. A novel method to test for significant trends in extreme values in serially dependent time series. *Geophys. Res. Lett.* 40: 1392-1395.
- Franzke CLE, 2014. Warming trends: nonlinear climate change. *Nat. Clim. Chang.* 4: 423-424.
- Franzke CLE, 2015. Local trend disparities of European minimum and maximum temperature extremes. *Geophys. Res. Lett.* 42: 6479-6484.
- Grotjahn R, Black R, Leung R, Wehner MF, Barlow M, Bosilovich M, Gershunov A, Gutowski Jr. WJ, Gyakum JR, Katz RW, Lee YY, Lim YK, Prabhat, 2016. North American extreme temperature events and related large scale meteorological patterns: a review of statistical methods, dynamics, modeling, and trends. *Clim. Dyn.* 46: 1151-1184.
- Guan X, Huang J, Guo R, Yu H, Lin P, Zhang Y, 2015. Role of radiatively forced temperature changes in enhanced semi-arid warming in the cold season over east Asia. *Atmos. Chem. Phys.* 15: 13777-13786.
- Ji F, Wu Z, Huang J, Chassignet EP, 2014. Evolution of land surface air temperature trend. *Nat. Clim. Chang.* 4: 462-466.
- Kim DW, Chung JH, Lee JS, Lee JS, 2014. Characteristics of Heat wave Mortality in Korea. *Atmosphere* 24(2): 225-234(in Korean with English abstract).
- Kim DW, Deo RC, Chung JH, and Lee JS, 2016. Projection of heat wave mortality related to climate change in Korea. *Nat. Hazard* 80: 623-637.
- Kim SW, Song K, Kim SY, Son SW, Franzke CLE, 2014. Linear and nonlinear trends of extreme temperatures in Korea. *Atmosphere* 24(3): 379-390(in Korean with English abstract).

- Koenker R, Hallock KF, 2001. Quantile regression. *J. Econ. Perspect.* 15: 143-156.
- Kosaka Y, Xie SP, 2013. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature* 501: 403-407.
- Lee K, Sung JH, Kim YO, Lee S, 2011. Change-point analysis of mean temperature and extreme temperature in the Republic of Korea. *J. Korean Geogr. Soc.* 46: 583-596(in Korean with English abstract).
- Lee K, Baek HJ, Cho C, 2013. Analysis of changes in extreme temperatures using quantile regression. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.* 49: 313-323.
- Lee MI, Kang IS, 1997. Temperature variability and warming trend in Korea associated with global warming. *J. Korean Meteor. Soc.* 33(3): 429-443(in Korean with English abstract).
- Mitchell D, Heaviside C, Vardoulakis S, Huntingford C, Masato G, Guillod BP, Frumhoff P, Bowery A, Wallom D, Allen M, 2016. Attributing human mortality during extreme heat waves to anthropogenic climate change. *Environ. Res. Lett.* 11: 074006.
- Sheikh MM, Manzoor N, Ashraf J, Adnan M, Collins D, Hameed S, Manton MJ, Ahmed AU, Baidya SK, Borgaonkar HP, Islam N, Jayasinghearachchi D, Kothawale DR, Premalal KHMS, Revadekar JV, Shrestha ML, 2015. Trends in extreme daily rainfall and temperature indices over South Asia. *Int. J. Climatol.* 35: 1625-1637.
- Stephenson TS, Vincent LA, Allen T, Van Meerbeeck CJ, McLean N, Petersone TC, Taylor MA, Aaron-Morrison AP, Auguste T, Bernard D, Boekhoudt JRI, Blenman RC, Braithwaite GC, Brown G, Butler M, Cumberbatch CJM, Etienne-Leblanc S, Lake DE, Martin DE, McDonald JL, Zaruela MO, Porter AO, Ramirez MS, Tamar GA, Roberts BA, Mitro SS, Shaw A, Spence JM, Winter A, Trotman AR, 2014. Changes in extreme temperature and precipitation in the Caribbean region, 1961-2010. *Int. J. Climatol.* 34: 2957-2971.
- Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Alexander LV, Allen SK, Bindoff NL, Bréon FM, Church JA, Cubasch U, Emori S, Forster P, Friedlingstein P, Gillett N, Gregory JM, Hartmann DL, Jansen E, Kirtman B, Knutti R, Krishna Kumar K, Lemke P, Marotzke J, Masson-Delmotte V, Meehl GA, Mokhov II, Piao S, Ramaswamy V, Randall D, Rhein M, Rojas M, Sabine C, Shindell D, Talley LD, Vaughan DG, Xie SP, 2013. Technical Summary. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp 33-115.
- Sun Y, Zhang X, Ren G, Zwiers FW, Hu T, 2016. Contribution of urbanization to warming in China. *Nat. Clim. Change* 6: 706-709.