국지적 규모의 도시화율과 극한기후지수와의 상관성

박종철¹ · 이지수² · 서애숙³ · 김만규²

¹공주대학교 지리정보과학연구소, ²공주대학교 지리학과, ³대전지방기상청
(2013년 5월 31일 접수, 2013년 7월 23일 수정, 2013년 7월 31일 게재 확정)

Correlation between Urbanization Rate in Local Scale and Extreme Climate Indices

Jongchul Park¹ · Jisu Lee² · Assook Suh³ · Man Kyu Kim²

¹Institute of Geographic Information Science, Kongju National University

²Dept. of Geography, Kongju National University

³Daejeon Regional Meteorological Office, Korea Meteorological Administration

(Received 31 May 2013, Revised 23 July 2013, Accepted 31 July 2013)

Abstract : This study examines the relationship between urbanization rate and extreme climate indices in South Korea for the period 1981-2010. In the analysis five extreme climate indices related to air temperature and four types urbanization rates are used. In particular, this paper adopts frequency of warm nights(TN90p), intra-annual extreme temperature range(ATR), growing season length(GSL), number of frost days(FD) and heat warm spell duration indicator(HWDI) as extreme climate indices. As a measure of urbanization rate, four kinds of urbanization rate are used: (1) three urbanization rates within a radius of 1km, 5km or 10km of weather station and (2) a urbanization rate of sub-watershed where weather station is located. The trend of extreme climate indices is calculated based on Mann-Kendall trend analysis and Sen's slope, and this trend is contrasted with urbanization rates in eleven climatic regions. The results show that TN90p, GSL, and FD have a relatively high correlation with urbanization rate. This study also shows that a urbanization rate within a radius of 1km of weather station affects GSL and FD, while a urbanization rate within 5km buffer zone of weather station affects TN90p. It is Daegwallyeong, Inje, Yangpyeong, and Hongcheon where extreme climate indices responded sensitively despite the low urbanization rates of these areas. Continual attention is needed to these areas because they are relatively sensitive to climate changes of synoptic scale.

Key Words : Urbanization, Local scale, Extreme climate indices, Climatic regions

1. 서론

지난 100여 년 동안 지구 평균기온은 약 $0.74 \pm 0.18^{\circ}\text{C}$ 상승하였다(Trenberth *et al.*, 2007). 많은 연구자들은 지금까지 관측된 지구온난화의 신호에서 도시화의 효과를 파악하기 위해 노력해 오고 있다. 도시화의 영향으로 인한 편이는 지구규모 또는 종관규모에서의 기후변화를 파악하는데 어려움을 주기 때문이다(류상범 외, 1993). 아울러 이와 같은 연구는 도시 개발로 인한 추가적인 기후 변화가 인간과 환경에 어떠한 영향을 줄 수 있는지 예측하는 데 중요한 정보가 되기 때문이다.

도시화의 영향은 기온, 강수, 바람, 습도, 일사량 등 다양한 기후요소의 변화를 유발하는 것으로 알려져 있다. 국내에서 도시화 관련 기후 변동 연구 논문은 1980년부터 현재까지 약 77편(한국학술정보(kiss.kstudy.com), 국가과학기술정보센터(www.ndsl.kr), 구글학술논문(scholar.google.co.kr) 검색 결과) 이었다. 도시화에 의해 기온이 영향을 받았다는 논문은 40편이었고, 바람은 11편이었으며, 강수는 10편이었다. 이와 같이 기존 연구들에서 기온은 도시화의 영향을 뚜렷하게 받는 주요한 기후요소 중 하나로 다루어졌다.

기존 연구들을 살펴보면 도시화가 진행된 지역의 기온이 그렇지 않은 지역에 비해 더 높다는 점에는 국내·외 연구에서 대체로 동의하고 있다. 하지만 도시화가 기온 변화에 미친 영향의 정도에 대해서는 여전히 논쟁이 있다. 특히 중국에서는 지난 50여 년 동안의 기온상승 추세에서 도시화로 인한 영향이 강했다는 의견이 있는(Zhang *et al.*, 2003; He *et al.*, 2007; Ren *et al.*, 2008) 반면, 그 영향이 10% 미만이었다는 의견도 있다(Zhou *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2010). 국내에서는 1950년대 이후 연평균 기온에 상승 추세가 있었는데, 도시지역은 그 주변지역보다

20~30%의 추가적인 기온상승이 있었던 것으로 보는 시각이 지배적이다(김경환 외, 2000; 국립기상연구소, 2009).

국내의 연구에 의하면 연평균기온과 일평균기온이 도시화의 영향을 받고 있으며(조하만 외, 1988; 민경덕·장금희, 1993; 박병익, 1996; 이명인·장인식, 1997; 김맹기 외, 1999; 김경환 외, 2000; 최광용 외, 2000; 하경자 외, 2004; 구해정 외, 2007; 이순환 외, 2008; Lee and Kim, 2008; 최광용, 2010; 김연희 외, 2011; 이종범 외, 2012), 계절평균기온도 도시화의 영향을 많이 받고 있는 것으로 밝혀졌다(박병익, 1996; Choi *et al.*, 2003; 구해정 외, 2007; 이강국·홍원화, 2007). 그리고 최광용·권원태(2005), 이승호·허인혜(2011)는 식생의 성장 및 인간의 생활과 밀접하게 관련되어 있는 극한기후지수의 변화에도 도시화의 영향이 반영되어 있음을 지적하였다.

최광용·권원태(2005)에 의하면 1990년 전보다 그 이후에 서울, 대전, 포항 등 대도시에서 새벽 열대야 발생빈도가 증가하였다. 그리고 이승호·허인혜(2011)에 의하면 남한에서는 열대야와 같은 고정 임계치를 갖는 경우보다 변동 임계치를 갖는 지수의 상승 경향이 더욱 뚜렷하다고 하였다. 변동 임계치를 갖는 지수는 온난일 비율, 온난야율 등이 있다. 도시 규모가 클수록 여름철 지수보다 겨울철 지수의 변화 경향이 더욱 강하다고 하였다. 이와 같이 기존의 연구들은 기온 관련 기후지수의 변화가 도시화의 영향을 크게 받고 있다는 증거들을 제시해 왔다.

기존 연구들은 도시화로 인한 기온 변화를 검출하기 위해 도시와 비도시 지역의 기온 차이를 이용하곤 하였다. 민경덕·장금희(1993), 류상범 외(1993)은 일반적으로 대도시로 불리는 서울, 대구, 대전 등을 도시로 구분하기도 하였으나 많은 연구자들이 도시와 비도시를 구분하기 위해 인구

규모를 채택하였다(e.g., Park *et al.*, 1986; Choi *et al.*, 2003; Ryoo *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2010; 김경환 외, 2000; 이승호·허인혜, 2011; 고명찬·이승호, 2013).

인구 규모는 기후학뿐 아니라 다양한 분야에서 도시화(Choi *et al.*, 2003) 또는 도시 성장의 지표 (김태현, 1996; 김남일·최순, 1998; 구동희, 2007)로 활용되어 왔다. 인구 규모를 기준으로 도시와 비도시를 구분하는 것은 직관적인 분류보다는 명확한 분류 기준이라는 점에서 의의가 있다. 하지만 이 분류 방법은 기상관측지점과 그 관측점이 위치한 행정구역의 인구 집중 지역이 일치하지 않는다는 적용상의 한계를 가지고 있다. 이때문에 인구가 5만명 이하를 비도시로 구분하더라도(Li *et al.*, 2010; 이승호·허인혜, 2011; 고명찬·이승호, 2013) 관측지점이 도심에 위치해 있다면 그 지점은 도시열섬효과가 반영된 도시지역으로 구분(Li *et al.*, 2010)하기도 하였다. Li *et al.*(2010)의 분류 방법은 기상관측지점이 위치한 행정구역 전체의 도시화 정도보다 기상관측지점 인근의 도시화 정도를 더욱 중요하게 고려한 것으로 이해된다.

위와 같은 측면에서 토지피복도를 기반으로 산출한 도시화율은 기후변화에서 기상관측지점 주변의 국지적인 도시화의 영향을 고려하는 한 방

법이 될 수 있다. 도시화율은 단위면적(예를 들어 행정구역, 구역, 또는 연구대상지역)에서 주거지역, 공업지역, 상업지역 등 시가화·건조지역이 차지하는 비율을 의미하며 도시의 확장을 설명하는 지표들 중 하나로 사용되어 왔다(김훈희·이진희, 2001; 신계중 외, 2005; 배선학, 2007; 한미덕 외, 2011). 최근 안지숙 외(2012)는 도시화율이 도시열섬포텐셜과 상관관계가 있음을 밝혔다. 하지만 국내의 기후 변화에서 도시화율을 이용하여 도시화의 영향을 파악하고자 하는 시도는 매우 부족한 실정이었다.

이에 본 연구에서는 기상관측지점 주변의 국지적인 도시화율의 변화를 산정하고, 이것이 기온과 관련된 극한기후지수의 변화에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 아울러 도시화율의 변화가 극한기후지수에 미치는 영향의 지역별 차이를 파악하고자 두 변수 사이의 상관성을 기후지역별로 세분하여 분석하였다.

2. 연구방법

기온과 관련된 극한기후지수는 세계기상기구(WMO, 2009)에서 사용을 권장하는 극한기후지

표 1. 극한기후지수와 정의

번호	지수	정의
1	온난야율	연중 일최저기온이 1973~2000*년의 일최저기온의 90퍼센타일 기온을 초과한 날의 비율
2	연극한기온교차	연중 가장 높았던 일최고기온과 가장 낮았던 일최저기온과의 차이
3	식물성장가능기간	연중 일평균기온이 5℃ 보다 높은 날이 6일 이상 지속되고 그로부터 일평균기온이 5℃ 미만인 날이 6일 이상 지속되었을 때 사이의 일수
4	최대열파지속일수	연중 일최고기온이 1973~2000*년에 일최고기온의 평균보다 5℃ 높은 날이 6일 지속되었을 때의 최장기간
5	일최저기온 0℃ 미만 일수	연중 일최저기온이 0℃ 미만인 날의 수

* WMO의 정의에서 기준기간은 1971~2000년이다. 하지만 본 연구에 사용한 기상관측지점 중 많은 지점의 관측시기가 1973년부터 시작되기 때문에 본 연구에서는 기준기간으로 1973~2000년을 사용하였다.

수(제주지방기상청, 2011)를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 극한기후지수는 온난야율(TN90p), 연극한기온교차(ATR), 식물성장가능기간(GSL), 최대열파지속일수(HWDI), 일최저기온 0°C 미만 일수(FD)이다. 각 지수에 대한 정의는 WMO의 정의를 준용하였으며 그 내용은 표 1과 같다.

본 연구에서 극한기후지수는 1981~2010년(30년)에 대하여 산정하였다. 상대적 임계치를 사용하여 극한기후지수를 추출하는 온난야율과 최대열파지속일수의 계산에서는 1973~2000년을 기준기간으로 사용하였다. 본 연구에 사용한 기상관측지점 중 많은 지점의 관측시기가 1973년부터 시작되기 때문이다.

연구에 사용한 기상자료는 기상청으로부터 획득하였다. 기상자료는 1973년 이후의 자료를 수집할 수 있는 총 59개 기상청 기상관측지점 가

운데 제주도와 울릉도를 제외한 57개 지점 자료를 사용하였다(그림 1(a)). 도시화율 변화 추세와 극한기후지수 변화와의 상관관계는 이승호 외(2005)가 제안한 기후지역별 그룹화하여 살펴보았다. 그들은 식생 분포와 생활양식 등의 유사성을 토대로 남한을 다수의 기후지역으로 구분한 바 있다. 본 연구에서는 이승호 외(2005)가 제안한 기후지역 구분 기준을 준용하되 중부동안과 남부동안 기후지역을 중·남부동안 기후지역으로 통합하여 사용하였다(그림 1(b)). 두 지역 모두 동안 기후지역이고 각각의 기후지역으로 나누어 분석하기에는 지점 수가 충분하지 않았기 때문이다. 제주도와 울릉도는 각 기후지역에서 관측지점이 1개이기 때문에 도시화율과 극한기후지수의 상관성을 분석할 수 없어 연구에서 제외하였다.

도시화율은 GIS 상용 프로그램인 ArcGIS를 활

그림 1. 기상관측지점 현황(a)과 기후지역 구분(b)

용하여 토지이용도로부터 단위 면적당 시가화지역 면적 비율 식 (1)을 계산하여 획득하였다. 연구에는 1980년부터 10년 간격으로 작성된 토지이용도를 이용하였으며, 1980년과 1990년, 2000년 토지이용도는 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, <http://www.wamis.go.kr>)의 자료를 사용하였고, 2010년 토지이용도는 환경부의 토지이용도를 사용하였다. 국가수자원관리종합정보시스템의 자료는 대분류 토지이용도로 시가화지역, 나대지, 산림, 농경지, 습지, 초지, 수역 등의 분류를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 환경부 중분류 토지이용도를 대분류 기준으로 재분류하여 사용하였다. 본 연구에서 1981년 이후의 기상관측 자료를 이용한 이유는 도시화율을 산정하는 데 활용할 토지이용도의 확보 가능 시기를 고려한 것이다.

$$\text{도시화율} = \text{시가화지역 면적} / \text{단위 면적} \quad (1)$$

도시화율 산정 식 (1)에서 단위 면적은 4가지 유형을 이용하였다. 이 연구에서는 기상관측지점으로부터의 1km, 5km, 10km 반경과 기상관측지점이 위치한 표준유역을 도시화율 산정의 단위 면적으로 사용하였다(그림 2). 토지이용도의 대분류에서 나대지는 잠재적으로 시가화될 수 있는 지역이므

로 도시화 지역으로 간주되기도 한다. 하지만 본 연구에 앞서 토지이용도를 검토한 결과 2000년 토지이용도에서는 하도 내의 사력퇴를 나대지로 분류하고 2010년 토지이용도에서는 이를 습지로 구분하고 있었다. 이에 따라 단위 면적에 하천 지형이 포함되는 경우 나대지가 시가화지역과 함께 도시화율 산정에서 분모로 고려되어 도시화율이 과거에 비해 감소하는 현상이 발견되었다. 따라서 나대지가 잠재적으로 시가화될 수 있는 지역이기는 하지만 나대지의 일관성에 문제가 발견되어 본 연구에서는 도시화율 산정에서 제외하였다.

극한기후지수 및 도시화율의 시계열 추세를 비모수 방법인 Mann-Kendall 추세 분석(Mann, 1945; Kendall, 1975)과 Theil-Sen estimator(Theil, 1950; Sen, 1968)를 활용하여 평가하였다. Mann-Kendall 추세 분석은 시계열 변화에 통계적으로 유의한 선형추세를 판단하는데 사용하였고, Theil-Sen estimator(이하 Sen's slope)는 선형추세의 기울기를 산출하는 데 사용하였다. 비모수적 통계 기법은 모집단의 분포로부터 자유로우며 동변량이 아니어도 적용할 수 있다는 장점이 있다. 특히 자료에 이상치(outlier)가 있거나 자료 수가 적을 때 모수적 통계기법보다 신뢰성 있는 선형추세를 탐지할 수 있는 장점이 있다(Cole *et al.*, 1989). 이 연구에서 유의수준은 90%를 사용하였다. 극한기

그림 2. 도시화율 산정에 사용한 4가지 유형의 단위 면적

후지수는 경년변화가 심하므로 10년 이동평균 자료를 이용하여 추세를 파악하였다.

3. 도시화율과 극한기후 지수의 변화경향

남한에서 도시화율은 기상관측지점 1km 반경 내에서 특히 빠르게 증가해 왔다(그림 3). 도시화율은 기상관측지점 1km 반경 내에서 1980년 전국 평균 21% 이었고 2010년에는 46% 이었다. 분석 기간 동안 25% 상승하였으며 10년마다 8%씩 증가하는 추세가 있었다. 기상관측지점 5km 반경 내의 도시화율은 1980년 11%에서 2010년 25%로 14% 증가하였으며, 평균적으로 10년에 5% 씩 증가하였다. 기상관측지점 10km 반경 내의 도시화율은 분석기간인 30년 동안 10년 마다 4% 씩 증가했으며 유역 규모에서 도시화율은 10년에 3% 씩 증가했다.

4가지 유형의 도시화율 중 평균적인 값을 보인 기상관측지점 5km 반경을 이용하여 평균적인 도

그림 3. 도시화율의 전반적인 변화 경향

시화율의 분포를 살펴보았다. 그 결과 1980년부터 2010년 사이에 도시화율이 가장 높았던 곳은 서울이었고 인천, 수원, 대구, 부산, 광주,의 도시화율은 30~50%이었다(그림 4(a)). 춘천, 충주, 대전, 전주, 포항의 도시화율은 20~30%이었다.

그림 4의 (b)에서 (f)는 1980년부터 2010년 사이에 유의수준 90%에서 극한기후지수 추세(Sen's slope)를 보여주고 있다. 많은 지점에서 극한기후지수의 선형추세가 있었는데, 온난야율(그림 4(b))의 경우 보령과 부여의 이북 지역에서 강한 상승 추세가 있었다. 남해안 지역에서는 하강 추세도 많이 관찰되고 있다. 연극한기온교차(그림 4(c))는 대부분의 지역에서 하강하는 추세를 보였다. 이는 연최고기온과 연최저기온사이에 차이가 줄어드는 경향이 뚜렷하였음을 의미한다. 식물성장가능기간(그림 4(d))은 대부분의 지점에서 상승 추세를 보였다. 식물성장가능기간은 5개 지수 중 가장 많은 지점에서 통계적으로 유의한 선형추세를 나타내었다. 최대열파지속일수(그림 4(e))와 일최저기온 0℃ 미만 일수(그림 4(f))는 상승 추세와 하강 추세가 지역에 따라 매우 다르게 나타나고 있었다. 두 지수는 대체로 수원, 인천, 원주에서부터 광주에 이르는 소백산맥 북서쪽 지역에서 상승 추세가 있었고 강화, 서울, 양평을 잇는 한강 주변 지역과 동해의 울진부터 남서해안의 해남에 이르는 해안 지역에서 대체로 하강 추세를 보이고 있었다. 두 기후지수의 하강과 상승 추세는 기후지역에 따라 다르게 나타난 것으로 보인다.

4. 도시화율과 극한기후지수의 상관성

도시화율과 극한기후지수 추세(Sen's slope) 사이의 결정계수를 분석해 본 결과(표 2), 많은 기후

그림 4. 1981~2010년 기상관측지점 5km 반경 내의 평균 도시화율(a)과 유의수준 90%에서 극한기후지수의 Sen's slope((b)~(f))

지역에서 온난야율(TN90p)과 식물성장가능기간(GSL), 일최저기온 0°C 미만 일수(FD)가 다른 극한기후지수에 비해 도시화율과 높은 상관성을 보였다.

온난야율은 경북내륙, 중부와 남부산지, 중부서안, 중·남부동안 기후지역에서 기상관측지점 5km 반경 내의 도시화율과 높은 상관성을 보였다.

일최저기온 0°C 미만 일수는 경북내륙, 경남내륙, 전라내륙, 남부산지, 중부서안에서 기상관측지점 1km 반경 내의 도시화율과 높은 상관성을 보였다. 식물성장가능기간은 경북내륙, 경남내륙, 전라내륙 그리고 남부산지와 중부서안에서 기상관측지점 1km 반경 내의 도시화율과 높은 상관성을 보였다. 연극한기온교차(ATR)와 최대열파지속일수

표 2. 도시화율 산정 환경에 따른 도시화율과 극한기후지수 사이의 결정계수

기후지역	1km 반경					5km 반경				
	TN90p	ATR	GSL	FD	HWDI	TN90p	ATR	GSL	FD	HWDI
중부내륙	0.53	(0.00)	0.17	(0.29)	(0.05)	(0.00)	0.44	0.00	0.19	(0.11)
충청내륙	0.02	(0.06)	0.62	(0.39)	(0.01)	0.01	0.00	0.21	(0.15)	(0.01)
경북내륙	0.92	(0.59)	0.33	(0.65)	0.54	0.68	(0.96)	0.99	(0.94)	0.98
경남내륙	0.16	(0.74)	0.18	(0.69)	0.02	0.41	(0.60)	0.06	(0.56)	0.15
전라내륙	0.31	(0.01)	0.52	(0.89)	0.18	0.09	0.01	0.39	(0.46)	0.08
중부산지	(0.00)	(0.39)	0.09	(0.06)	(0.13)	(0.52)	(0.13)	(0.02)	0.82	(0.09)
남부산지	(0.07)	(0.66)	0.99	(0.87)	(0.99)	1.00	(0.13)	(0.03)	(0.01)	0.12
중부서안	0.46	0.41	0.70	(0.95)	0.17	0.83	0.12	0.60	(0.64)	0.08
중·남부동안	0.58	0.01	(0.17)	0.06	0.72	0.58	0.00	(0.09)	0.13	0.39
남부서안	(0.03)	(0.01)	0.74	0.01	(0.17)	(0.04)	(0.04)	0.22	0.22	(0.78)
남해안	0.36	(0.10)	0.07	(0.18)	(0.06)	0.31	(0.08)	0.17	(0.11)	(0.08)

기후지역	10km 반경					표준유역 단위				
	TN90p	ATR	GSL	FD	HWDI	TN90p	ATR	GSL	FD	HWDI
중부내륙	(0.09)	0.58	0.00	0.42	(0.05)	(0.05)	0.23	0.00	0.21	0.03
충청내륙	0.00	0.01	0.06	(0.07)	(0.01)	(0.06)	0.19	0.01	0.04	(0.10)
경북내륙	0.39	(0.78)	0.95	(0.73)	0.82	(0.20)	0.00	0.04	0.01	(0.00)
경남내륙	0.47	(0.49)	0.03	(0.49)	0.18	0.49	(0.43)	0.02	(0.45)	0.19
전라내륙	0.06	0.02	0.43	(0.42)	0.07	0.22	0.02	0.25	(0.49)	0.21
중부산지	(0.59)	(0.22)	(0.01)	0.82	(0.13)	(0.53)	(0.12)	(0.01)	0.78	(0.06)
남부산지	0.74	0.03	(0.43)	0.18	0.61	0.98	(0.24)	(0.00)	(0.06)	0.04
중부서안	0.68	0.15	0.25	(0.38)	(0.01)	0.73	0.18	0.41	(0.54)	0.01
중·남부동안	0.53	0.02	(0.13)	0.24	0.39	0.79	0.04	(0.11)	0.28	0.67
남부서안	(0.11)	0.31	0.11	0.05	(0.23)	0.00	0.03	0.16	(0.01)	(0.12)
남해안	0.15	(0.05)	0.26	(0.05)	(0.07)	0.26	(0.07)	0.18	(0.09)	(0.10)

TN90p: 온난야율; ATR: 연극한기온교차; GSL: 식물성장가능기간; FD: 일최저기온 0℃ 미만 일수; HWDI: 최대열파지속일수; ()는 음의 상관관계를 의미하며 음영은 두 변수 사이의 결정계수(R²)가 0.5 이상을 의미한다.

(HWDI)는 일부 기후지역에서 1km 반경 내의 도시화율과 상관성이 있었다.

본 연구에서 도시화율과 온난야율의 상관성이 높다는 결과는 여름철 지수 중 온난야율과 같이 변동 임계치 지수가 도시화의 영향을 더욱 많이 받는다는 연구(이승호·허인혜, 2011)와 같은 결과이다. 아울러 도시화율과 일최저기온 0℃ 미만일수의 상관성이 높다는 결과는 일최저기온과 관련된 지수의 변화 경향이 도시화의 영향을 많

이 받는다는 연구(Hua *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2010; 이승호·허인혜, 2011)와 관련이 있다.

한편 이승호·허인혜(2011)는 한국의 도시에서 겨울철과 관련된 극한기온 지수의 감소 경향이 여름철과 관련된 극한기온 지수의 증가 경향보다 뚜렷하다고 하였다. 표 2를 살펴보면 이와 같은 경향은 내륙 기후지역에서 두드러지는 것으로 판단된다. 일최저기온 0℃ 미만 일수와 도시화율 사

이의 결정계수가 온난야율 보다 상대적으로 높은 결정계수를 보인 지점들이 충청내륙과 경남내륙, 전라내륙 기후지역이기 때문이다.

1km 반경의 결과를 보았을 때 충청내륙에서 FD는 0.39, TN90p는 0.02이었고, 경남내륙에서 FD는 0.69, TN90p는 0.16이었다. 전라내륙에서 FD는 0.89, TN90p는 0.31이었다. 이는 내륙 기후지역에서 도시화율이 일최저기온 0℃ 미만 일수의 변화에 미친 영향이 온난야율의 변화에 미친 영향보다 크다는 것을 의미한다.

표 2에서 온난야율과 도시화율은 대부분의 기후지역에서 양의 상관관계가 있었다. 두 변수 사이에 결정계수가 0.5 이상을 보인 기후지역들 중에서 중부산지 기후지역을 제외한 모든 기후지역(경북내륙, 남부산지, 중부서안, 중·남부동안 기후지역)에서 두 변수는 양의 상관관계가 있었다. 이는 지난 30년 동안 도시화율이 높은 지역에서 온난야율의 상승추세가 대체로 강하였고, 이와 같은 경향은 전국에서 일반적이었다는 것을 의미한다. 다만 중부산지(대관령, 인제, 제천, 영주)에서 도시화율과 온난야율 사이에 음의 상관관계가 나타난 것에 대해서는 자세한 관찰이 필요하다.

온난야율과 도시화율 사이에 결정계수가 가장 높았던 기후지역은 남부산지(추풍령, 거창, 산청)이었고, 다음은 중부서안(서울, 인천, 수원, 강화)이었다. 온난야율의 추세 강도는 내륙과 산지, 해안 등 다양한 기후지역에서 도시화율과 상관성이 높았다.

같은 시기에 도시화율이 높은 지역에서는 일최저기온 0℃ 미만 일수가 빠르게 하강하는 경향이 있었다. 기상관측지점 1km 반경 내의 도시화율과 일최저기온 0℃ 미만 일수의 변화 추세 사이의 결정계수는 중부서안에서 0.95로 가장 높았다. 다음으로는 전라내륙이 0.89이었고 남부산지가 0.87순이었다. 중부산지는 온난야율에서 나타난 것과

같이 다른 기후지역들과 반대의 변화 양상이 나타났다. 다른 기후지역들에서 도시화율과 일최저기온 0℃ 사이에 음의 경향이 있었던 것에 반해 중부산지 기후지역에서는 양의 상관관계가 있었다. 일최저기온 0℃ 미만 일수는 대체로 내륙 및 산지 기후지역에서 도시화율과 상관성이 높았다.

앞의 연구 결과를 통해 기후지역 내에서 지난 30년 동안 도시화율이 높은 지역의 온난야율이 주변 지역에 비해 상대적으로 빠르게 상승하였음을 알 수 있었다. 이와 같은 상승 경향은 최근 20년(1991~2010) 동안의 온난야율 상승에 의해 나타난 것으로 이해할 수 있다. 중부서안 기후지역은 이와 같은 경향을 모식적으로 보여주고 있다.

그림 5는 1981년부터 2010년 사이에 중부서안 기후지역의 도시화율과 10년 이동평균 기온의 변화를 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 기상관측 지점별 온난야율의 변화를 보여주고 있으며, 그림 5(b)는 도시화율의 변화를 보여주고 있다. 도시화율은 온난야율과 높은 상관성을 보인 기상관측지점 5km 반경 내의 도시화율을 이용하였다. 두 그림은 도시화율이 높은 지점들(서울, 인천, 수원)에서 10년 이동평균한 온난야율의 변화에 뚜렷한 패턴이 있었음을 보여준다. 도시화율이 높은 지점은 1993년 이후 온난야율의 가파른 상승세를 보였고, 1991년부터 2010년 사이의 값이 1981년부터 2000년 사이의 값보다 매우 높게 나타나는 경향이 있다.

1981년부터 2000년 사이의 서울, 인천, 수원의 10년 이동평균 온난야율은 9.3%이고, 같은 시기에 강화의 값은 9.9%이었다. 반면 1991년부터 2010년 사이의 10년 이동평균 온난야율은 서울, 인천, 수원이 10.7%이고, 강화는 9.6%이었다. 과거에는 강화가 서울, 인천, 수원의 평균보다 0.6% 높았던 반면 최근에는 1.1% 낮았다. 서울, 인천, 수원은 1991년 이후 온난야율의 꾸준한 상승세를

보인 반면 강화는 온난야율이 다소 하강하는 경향을 보였다. 이와 같은 경향은 중부서안 기후지역에 국한되어 있지 않았다. 남한 대부분의 기후지역에서 도시화율이 높은 지역과 그렇지 않은 지역 사이에서 대체로 이와 같은 패턴이 나타난다(부록 그림 1).

도시화율이 높은 지역(그림 5(a)의 서울, 인천, 수원)에서 온난야율이 급격히 상승한 시기는 1993년부터 2013년 사이에 집중되어 있다. 이 시기에 도시화율이 높은 지점의 온난야율은 가파르게 상승하였고, 도시화율이 낮은 지점(강화)의 온난야율을 넘어서기 시작하였다. 그리고 이 시기

는 그림 5(c)의 여름철(6~8월) 평균기온의 상승시기와 유사하다. 이는 남한의 여름 평균기온이 상승하는 시기에 도시화율이 높은 지역이 낮은 지역에 비해 온난야율이 빠르게 상승하였다는 것을 보여주며, 도시화율이 높은 지역에서의 추가적인 온난야율 상승에 도시화가 상당 부분 기여했다는 것을 암시한다.

하지만 도시화율만 증가하였을 때 도시화율이 높은 지역에서 온난야율이 높게 나타나지는 않았다. 그림 5(b)에서 도시화율은 지난 30년 동안 꾸준히 증가하였지만 그림 5(a)에서 온난야율은 오히려 하강하는 시기기도 있었다. 따라서 온난야율

그림 5. 중부서안 기후지역의 온난야율(a)과 도시화율 변화(b), 남한 계절별 평균기온(c)과 연평균 기온의 변화(d)

이 도시화율 증가에 의해서만 상승할 것으로 생각하기는 어렵다.

한편 중부서안의 종관 규모의 여름철 평균기온은 1993년 이후 지속적으로 상승(그림 5(c))하고 있는 반면 온난야율의 상승 추세는 2000년 이후 주춤(그림 5(a))하는 경향을 보이고 있다. 2000년 이후 온난야율은 매우 높은 값에서 성장세가 둔화되었으므로 온난야율이 상승할 수 있는 한계에도 달했을 가능성에 대한 검토 역시 필요할 것으로 생각된다.

위와 같은 관찰 결과를 토대로 어느 규모의 도시화율이 온난야율에 추가적인 상승을 유도하였는지 파악하기 위해 1980~2010년 기상관측지점 5km 반경 내의 평균 도시화율과 1981~2010년 10년 이동평균 온난야율의 Sen's slope를 비교해 보았다. 그림 6을 살펴보면 많은 기후지역에서 도시화율이 10% 미만인 지점들과 그 이상인 지점들 사이에 온난야율의 변화에 차이가 있음을 알 수 있다. 도시화율이 10%를 넘는 지점들의 대부분에서 상대적으로 빠른 온난야율의 상승이 있었다. 특히 도시화율이 10%를 넘는 지점들 중 중부내륙의 두 지점 정도를 제외하고 대부분의 지점에서 온난야율의 증가추세가 뚜렷하였다.

도시화율이 10% 미만임에도 온난야율 상승이 뚜렷하였던 지역으로는 중부내륙 기후지역의 양평과 홍천, 중부산지 기후지역의 대관령과 인제가 있었다. 대관령과 인제는 도시화율이 높지 않음에도 불구하고 온난야율의 빠른 증가추세가 있었다. 이와 같은 경향은 표 2에서 중부산지 기후지역의 온난야율이 도시화율과 음의 상관관계를 보인 것과 연관이 있다.

대관령과 인제와는 반대로 도시화율이 높음에도 불구하고 온난야율의 변화가 작았던 대표적인 지점으로는 전라내륙 기후지역의 광주가 있었다. 광주의 온난야율에 변화추세가 없었던 이유는

2003년 이후에 광주의 온난야율이 급격히 하강했기 때문이다(부록 그림 1). 그러나 광주의 온난야율 하강 요인을 밝혀내기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

5. 토의

본 연구에서 온난야율(TN90p)은 기상관측지점 5km 반경의 도시화율과 상관성이 높았고, 식물성장가능기간(GSL)과 일최저기온 0°C 미만 일수(FD)는 기상관측지점 1km 반경의 도시화율과 상관성이 높았다. 이는 시가화지역이 일정 규모 이상되었을 때 이들 지수에 영향을 주는데 TN90p가 도시화의 영향을 받기 위해서는 GSL과 FD에 비해 더욱 넓은 면적을 필요로 한다는 의미일 수 있다. 다른 한편 시가화지역의 적절한 분산 정책이 도시화로 인한 TN90p의 추가 상승을 억제하는데 효과적일 수 있다는 의미일 수도 있다.

본 연구의 결과는 한국의 기온이 전반적으로 상승하는 시기에 도시화가 진행된 지역에서 추가적인 온난야율과 식물성장가능기간이 증가하였다는 것을 보여주었다. 아울러 일최저기온 0°C 미만 일수 역시 도시화가 진행되지 않은 지역에 비해 도시화가 진행된 지역에서 더욱 빠르게 감소하였다. 이는 기온상승 시기에 도시화 지역의 기후변동성이 다른 지역에 비해 상대적으로 크다는 것을 의미한다.

중부산지의 대관령과 인제, 중부내륙의 양평과 홍천은 도시화율이 매우 낮고 도시화율 증가 추세도 없었음에도 불구하고 1981년부터 2010년 사이에 온난야율이 가파르게 상승하였다. 이 지역들에서 온난야율이 가파르게 상승한 원인에 대해서는 지속적인 연구와 관심이 필요할 것으로 생각된다. 이는 이 지역의 인간과 동·식물들이 도시화

그림 6. 1980~2010년 기상관측지점 5km 반경 내의 평균 도시화율과 1981~2010년 10년 이동평균 온난야율의 Sen's slope 사이의 상관성

의 영향 없이도 광역적인 기후변화에 의한 극한기후지수의 변화를 크게 겪을 수 있다는 것을 의미하기 때문이다. 아울러 이 지역에서 도시화가 진행될 경우 과거에 경험했던 극한기후지수의 변화보다 더욱 심한 변화를 경험할 가능성도 배제할 수 없다는 점에서 지속적인 관심이 필요하다.

한편 이 연구에서 관찰된 바에 의하면, 1993년 이전에 도시화율이 높은 지역의 온난야율은 도시화율이 낮은 지역의 온난야율에 비해 대체로 낮았다(그림 5와 부록 그림 1). 도시화율이 높은 지역의 온난야율이 도시화율이 낮은 지역의 온난야율보다 높아지기 시작한 것은 1993년 이후 한국의 여름철 평균기온이 전반적으로 상승하는 시기에 일어났다. 1993년 이전은 남한의 여름철 평균기온이 하강하던 시기이며, 1993년 이후는 남한의 여름철 평균기온이 가파르게 상승하던 시기이다. 이는 도시화가 온난야율에 미치는 영향이 여름철 평균기온이 상승하는 시기와 하강하는 시기에 다를 가능성을 암시한다.

하지만 이 연구에서는 여름철 평균기온이 하강하는 시기에 도시화율이 높은 지역과 그렇지 않은 지역에서 온난야율의 변화가 어떤 양상을 띠는 것인지에 대해서는 파악하기 어려웠다. 그림 5(c)에서 여름철 평균기온의 10년 이동평균값으로 보았을 때 1990~1993년에 그 값이 하강하는 시기가 있었다. 이 시기에 도시화율이 높은 지역의 온난야율은 도시화율이 높지 않은 지역의 그 값에 비해 낮은 경향을 보였다. 이와 같은 경향은 여러 기후 지역에서 관찰되었다(부록 그림 1). 하지만 기온 하강시기가 4년에 불과하기 때문에 기온 하강시기에 도시화율이 높은 지역의 온난야율이 도시화율이 낮은 지역의 온난야율에 비해 낮을 것이라고 단정하기는 어려웠다. 따라서 남한의 전반적 기온 상승시기와 하강시기에 도시화가 온난야율 변화에 미치는 영향이 다를 가능성에 대해서는 추후

연구가 필요할 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 기온과 관련된 5개 극한기후지수(온난야율, 연극한기온교차, 식물성장가능기간, 최대열파지속일수, 일최저기온 0℃ 미만 일수)의 추세와 4개 유형의 도시화율(기상관측지점 1km와 5km, 10km 반경, 표준유역단위) 사이의 상관성을 분석하였다. 본 연구 결과 극한기후지수 중 도시화율과 높은 상관성을 보인 지수는 온난야율과 식물성장가능기간, 일최저기온 0℃ 미만 일수이었다. 도시화율이 높은 지역에서 온난야율과 식물성장가능기간은 도시화율이 낮은 지역에 비해 추가적으로 증가하였으며 일최저기온 0℃ 미만 일수는 추가적으로 감소하였다.

식물성장가능기간과 일최저기온 0℃ 미만 일수는 기상관측지점 1km 반경 내의 도시화율과 높은 상관성을 보였다. 그리고 온난야율은 5km 반경 내의 도시화율과 높은 상관성을 보였다. 온난야율은 대체로 도시화율이 10% 이상일 때 도시화로 인한 영향을 받고 있었다. 일최저기온 0℃ 미만 일수는 대체로 내륙 기후지역에서 도시화의 영향을 받고 있었다.

극한기후지수의 추세에서 도시화의 영향이 나타나지 않은 지역은 중부산지, 충청내륙, 남부서안과 남해안이었다. 이들 지역은 국지적인 지표의 상태보다 광역적인 기후변화의 영향을 더욱 많이 받는 지역으로 이해된다. 도시화율이 낮음에도 불구하고 온난야율의 가파른 상승을 보인 곳은 대관령과 인제, 양평, 홍천이다. 이들 지역은 광역적인 기후변화에 특히 민감하게 반응하는 지역들로 이해되므로 지속적인 관심이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 도출한 극한기후지수의 변화에 영향을 줄 수 있는 토지이용의 공간적 범위(기상관측지점 1km와 5km 반경 내)는 추후 도시화에 따른 기온 영향을 평가하는 연구에서 도시화율을 산정하는 단위로 활용할 수 있을 것이다. 아울러 본 연구는 기후지역에 따라 도시화의 영향이 매우 상이하게 나타날 수 있다는 것을 보여준 사례로서도 의미가 있다. 따라서 추후 도시화가 기온변화에 미치는 영향에 대한 연구 및 평가는 지역 규모에서 이루어지는 것이 타당할 것으로 판단된다. 본 연구에서 도시화의 영향이 나타나지 않은 지점들은 추후 도시화로 인한 기상 및 기후변동성 연구에서 각 기후지역별 비도시 지역으로 설정하고 연구에 활용함이 가능할 것이다.

사사

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012-2170)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 고명찬 · 이승호, 2012, 한국의 도시 규모별 습도 변화에 관한 연구, 대한지리학회지, 48(1), 19-36.
- 구동회, 2007, 부산권 인구이동의 공간적 패턴에 관한 연구, 대한지리학회지, 42(6), 835-958.
- 구해정 · 김연희 · 최병철, 2007, 서울시 도시 열섬 구조의 변화에 관한 연구, 기후연구, 2(2), 67-78.
- 국가수자원관리종합정보시스템, http://www.wamis.go.kr/WKB/wkb_lcstbb.lst.aspx
- 국립기상연구소, 2009, 기후변화 이해하기2: 한반도 기후변화: 현재와 미래: 국립기상연구소 연구성과를 중심으로.
- 김경환 · 김백조 · 오재호 · 권원태 · 백희정, 2000, 한반도 기온 변화에 나타난 도시화 효과 검출에 관한 연구, 한국기상학회지, 36(5), 519-526.
- 김남일 · 최순, 1998, 인구이동과 지역단위별 농촌인구 분포의 변화, 한국인구학, 21(1), 42-79.
- 김맹기 · 강인식 · 곽종흠, 1999, 최근 40년간 한반도 도시화에 따른 기온 증가량의 추정, 한국기상학회지, 35(1), 118-126.
- 김연희 · 최다영 · 장동언, 2011, 수도권 지역의 도시 기상 특성, 한국기상학회지, 23(3), 257-271.
- 김태현, 1996, 농촌인구의 특성과 그 변화, 1960~1995: 인구구성 및 인구이동, 한국인구학, 19(2), 77-105.
- 김훈희 · 이진희, 2001, 토지이용변화 확률모형 구축 및 적용에 관한 연구, 국토계획, 36(4), 95-111.
- 류상범 · 문승의 · 조병길, 1993, 남한의 도시화에 따른 기온변동, 한국기상학회지, 29(2), 99-116.
- 민경덕 · 장금희, 1993, 한국 주요 도시의 도시화에 의한 기온 변화, 환경과학연구소논문집, 7, 119-138.
- 박병익, 1996, 한국의 기온 경년 변화와 이에 대한 도시화의 영향에 대하여, 한국지리환경교육학회지, 4(1), 109-119.
- 배선학, 2007, 1910년대 지형도를 이용한 근대화 이후의 도시 변화 분석, 한국지리정보학회지, 10(3), 99-103.
- 신계종 · 유영걸 · 황의진, 2005, GIS와 위성영상을 이용한 도시의 변화량 분석, 국지반환경공학회 논문집, 6(4), 73-80.
- 안지숙 · 황재동 · 박명희 · 서영상, 2012, Landsat-7 ETM+ 영상과 AWS 자료를 이용한 부산의 토지피복에 따른 여름철 도시열섬포텐셜 산출, 한국지리정보학회지, 15(4), 65-77.
- 이강국 · 홍원화, 2007, 도시고온화 현상에 따른 열섬 · 냉섬 특성에 관한 연구 - 대구 광역시를 중심으로 -, 대한건축학회논문집, 23(8), 219-228.
- 이명인 · 강인식, 1997, 한반도의 기온변동성과 온난화, 한국기상학회지, 33(3), 429-443.
- 이순환 · 박명희 · 김해동, 2008, 도시화에 의한 야간

- 대기 냉각을 변화에 관한 연구, 24(1), 83-90.
- 이승호 · 허인혜, 2011, 한국의 도시화에 의한 극한기온의 변화, *대한지리학회지*, 46(3), 257-276.
- 이승호 · 허인혜 · 이경미 · 권원태, 2005, 우리나라 상세기후 지역의 구분, *한국기상학회지*, 41(6), 983-995.
- 이종범 · 김재철 · 장운정, 2012, 관측과 기상모델을 이용한 춘천지역의 도시열섬현상 연구, *한국대기환경학회지*, 28(2), 119-130.
- 제주지방기상청, 2011, 지역기후변화보고서(제주도).
- 조하만 · 조천호 · 정귀원, 1988, 서울의 도시화에 따른 기온의 변화, *한국기상학회지*, 24(1), 27-37.
- 최광용, 2010, 지난 100년 동안 서울시에 발생한 강한 열파 패턴과 노인사망에 미치는 영향, *대한지리학회지*, 45(5), 573-591.
- 최광용 · 권원태, 2005, 우리나라 열대야 현상 발생의 시 · 공간적 특징과 최근의 변화, *대한지리학회지*, 40(6), 730-747.
- 최광용 · 최종남 · 김종욱, 2000, 20세기 한반도 중부지방의 여름철 기온 변화, *대한지리학회지*, 35(4), 519-528.
- 하경자 · 하은호 · 류철상 · 전은희, 2004, 1909년 이후의 우리나라 4대 도시의 기온경향과 극한기후, *한국기상학회지*, 40(1), 1-16.
- 한미덕 · 김지찬 · 정옥진, 2011, 장기적 토지피복 분석을 통한 경안천 유역의 토지이용 특성, *한국물환경학회지*, 27(2), 159-166.
- Choi, G., Collins, D., Ren, G., Trewin, B., Baldi, M., Fukuda, Y., Afzaal, M., Pianmana, T., Gomboluudev, P., Huong, T. T. H., Lias, Norlisam., Kwon, W. T., Boo, K. O., Cha, Y. M., and Zhou, Y., 2009, Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network region, 1955-2007, *International Journal of Climatology*, 29, 1906-1925.
- 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.
- Cole, R., Salowe, J. S., Steiger, W. L., and Szemerédi, E., 1989, An optimal-time algorithm for slope selection, *SIAM Journal on Computing*, 18(4), 792-810.
- He, J. F., Liu, J. Y., Zhuang D. F., Zhang, W., and Liu, M. L., 2007, Assessing the effect of land use/land cover change on the change of urban heat island intensity, *Theoretical and Applied Climatology*, 90, 217-226.
- Hua, L. J., Ma, Z. G., Guo, W. D., 2008, The impact of urbanization on air temperature across China, *Theoretical and Applied Climatology*, 93, 179-194.
- Lee, S. H, Kim, H. D., 2008, Effects of Regional Warming due to Urbanization on Daytime Local Circulations in a Complex Basin of the Daegu Metropolitan Area, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 1427-1441.
- Li, Q., Li, W., Si, P., Xizorong, G., Dong, W., Jones, P., Houang, J., and Cao, L., 2010, Assessment of surface air warming in northeast China, with emphasis on the impacts of urbanization, *Theoretical and Applied Climatology*, 99, 469-478.
- Li, Q., Zhang, H., Liu, X., and Huang, J., 2004, Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 79, 165-174.
- Mann, H. B., 1945, Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13, 245-259.
- Park, H. S., 1986, Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities, *Atmospheric Environment*, 20, 1859-1866.
- Ren, G., Zhou, Y., Chu, Z., Zhou, J., Zhang, A., Guo, J., and Liu, X., 2008, Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China, *Journal of Climate*, 21, 1333-1348.
- Ryoo, S. B., Kwon, W. T., and Jhun, J. G., 2004, Characteristics of wintertime daily and extreme

- minimum temperature over South Korea, *International Journal of Climatology*, 24, 145-160.
- Sen, P. K., 1968, Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389.
- Theil, H., 1950, *A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I, II, III*, Netherlands Akad. Wetensch.
- Trenberth, K. E., P. D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J. A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden, and P. Zhai, 2007, *Observations: Surface and Atmospheric 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, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- WMO, 2009, *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*, World Meteorological Organization, Switzerland.
- Zhang, J., Dong, W., Ye, D. and Fu, C., 2003, New evidence for effects of land cover in China on summer climate, *Chinese Science Bulletin*, 48, 401-405.
- Zhou, L. M., Dickinson, R. E., Tian, Y. H., Fang, J. Y., Li, Q. X., and Kaufmann, R. K., 2004, Evidence for a significant urbanization effect on climate in China, in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101, 9540-9544.

부록 그림 1. 기후지역별 온난야율 변화

(남해안 기후지역은 추세 파악의 용이성을 위해 남해안 동부와 서부로 구분하여 도시하였다. 그래프에서 굵은 실선은 많은 변동성(주로 상승 경향)을 가진 지점이고 점선은 변동성이 작았던 지점이다.)