

최근 우리나라 도시 인구 변화에 따른 도시화 효과 특성

김진욱*† · 변영화** · 김진원*** · 김연희****

*국립기상과학원 미래기반연구부 연구사, **국립기상과학원 미래기반연구부 연구관, ***국립기상과학원 미래기반연구부 연구위원,
****국립기상과학원 미래기반연구부 부장

Characteristics of Urbanization Effects due to Recent Urban Population Changes in South Korea

Kim, Jin-Uk*† · Byun, Young-Hwa** · Kim, Jin-Won*** · Kim, Yeon-Hee****

*Research Scientist, Innovative Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), Jeju, Korea

**Senior Scientist, Innovative Meteorological Research Department, NIMS, Jeju, Korea

***Scientific Advisor, Innovative Meteorological Research Department, NIMS, Jeju, Korea

****Director, Innovative Meteorological Research Department, NIMS, Jeju, Korea

ABSTRACT

Recently, population growth has been slowing down in metropolitan cities in South Korea. In this study, we analyzed urbanization effects that reflect the characteristics of recent population growth trends using four different methods. In South Korea, the urbanization effect has recently become weaker. The urbanization effect in South Korea was 24 ~ 49% in the last 48 years (1973 ~ 2020). Similarly, for certain spans of 32 years (1973 ~ 2004) and 24 years (1973 ~ 1996), the urbanization effect values were 30 ~ 64% and 42 ~ 73%, respectively. The recent decline in urbanization effect compared to the early 2000s is related to the decreasing urban population growth. The population growths in the second half of the previous 48 years were only about 14% in big cities and about 50% in small cities compared to the first half. As a result, the urbanization effect in small cities has actually been higher than in big cities. Cluster analysis was also conducted to analyze the relationship between population growth and annual-mean temperature increase in 30 different stations. As a result, temperature increase in more than 60% of the stations considered matched the population growth. Some urban stations have smaller temperature increases than population growth, while some rural stations have higher temperature increases than population growth. Therefore, further research on local environmental factors should be carried out to better understand these local temperature changes.

Key words: Urbanization Effect, South Korea, Population Growth

1. 서론

기후변화에 관한 정부 간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)의 5차 기후변화 평가보고서(Fifth Assessment Report; AR5)에 따르면, 전 지구에서 산업화 이후 명백한 온난화가 진행되고 있으며 지난 133년(1880 ~ 2012) 동안 연평균기온이 약 0.85℃ 상승했다

(IPCC, 2013). 또한 세계기상기구(WMO)는 최근 5년(2015 ~ 2019)이 역사상 가장 더운 5년으로 기록될 것이며, 이 기간 동안 평균기온은 산업화 이전 시기(1850 ~ 1900)보다 약 1.1℃ 상승하였다고 밝혔다(WMO, 2019). 전 지구적으로 온난화가 진행되는 상황에서 도시 지역들은 도시 열섬(heat island) 효과로 인하여 전 지구 평균보다 더 높은 기온 상승 추세가 나타나고 있다(Jones et al., 1989; Stone, 2007; Fujibe, 2009). 우리나라의 경우도 지난 109

†Corresponding author : jukim86@korea.kr (33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea. Tel. +82-64-780-6630)

ORCID 김진욱 0000-0001-9892-9915
김진원 0000-0003-3966-7219

변영화 0000-0002-6074-4461
김연희 0000-0002-1157-3838

년(1912~2020)간 매 10년당 연평균기온이 0.2℃ 상승하여 전 지구 보다 온난화가 뚜렷하고(KMA, 2021a), 특히 도시지역의 기온은 가파른 상승세를 보이고 있다(Ryoo et al., 1993; Lee and Kang, 1997; Kim et al., 1999; Choi et al., 2003; Oh et al., 2004; Koo et al., 2007; Kim and Kim 2011).

기온 상승으로 인해 촉발되는 자연 재난 현상은 인류에게 막대한 재산 피해와 인명 피해를 유발한다. 따라서 우리는 기온 상승에 미치는 다양한 환경적 요소에 대해서 정확하게 파악해야 할 필요성이 있다. 기온 상승의 가장 큰 요소는 온실가스 증가로 인한 지구 온난화와 도시화 효과라고 할 수 있으며, 그 중에서 많은 인구가 밀집되어있는 도시 지역과 관련된 도시화 효과는 기후변화 적응 및 대응의 관점에서 아주 중요한 요소이다. 따라서 국내의 많은 연구들은 기온 상승에서 온난화 효과를 제거하고 도시화 효과만 정량적으로 분리하여 분석하고자 노력을 기울여왔다.

도시화 연구의 가장 보편적인 방법은 도시와 인접한 시골의 기온을 비교하는 방법이다. Ryoo et al.(1993)은 과거 40년간 기온 상승폭이 신흥공업단지에서 비교적 크며, 겨울철 내륙에서 크다고 밝혔다. Lee and Kang (1997)에 따르면 지난 20년(1973~1992)간 도시화 효과에 의한 기온 상승은 20년당 0.3℃로 전체 기온 상승의 약 64%임을 밝혔고

Choi et al.(2003)의 결과는 과거 32년(1968~1999)간 도시화 효과가 약 0.41℃로 전체 기온 상승의 약 35%로 나타났다. 도시화 효과 연구에 재분석 자료를 사용한 Oh et al.(2004)는 과거 30년(1973~2002)간 도시화 효과에 의한 기온 상승이 도시에 따라 40~56%라고 하였다. Kim and Kim (2011)의 연구에서는 지난 55년(1954~2008)간의 도시화 효과를 경험적 직교 함수(Empirical Orthogonal Function, EOF)를 이용하여 연구 한 바 있고, 도시화에 의한 평균기온 상승 량이 0.77℃(전체의 56%)로 나타났다. 또한 도시화 효과는 시기별로 다르게 나타나는데, Park et al.(2017)은 도시화 효과가 과거 103년(1912~2014)간은 3~11%, 최근 42년(1973~2014)간은 30~45%로 최근에 도시화 효과가 비교적 뚜렷하다고 밝혔다. 이처럼 국내의 도시화 효과에 대한 연구는 분석 방법과 분석 기간에 따라 결과가 크게 달라졌다. 따라서 도시화 효과를 분석할 때는 방법과 자료에 따른 불확실성에 유의해야 한다.

한편, 우리나라 인구는 지속적으로 증가하고 있으나, 2000년대에 들어서 도시인구의 증가 추세가 정체되고 있으며, 산업 기반이 교외 지역으로 분산되고 있다(Kwon, 2011). 이러한 최근의 우리나라 인구변화 특성을 반영하여 시기에 따른 도시화 효과를 파악해야 할 필요성이 있다. 또

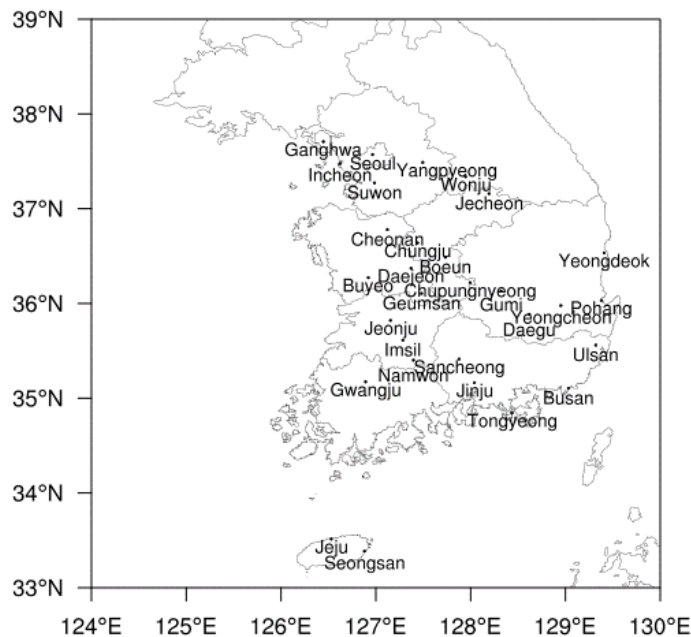


Fig. 1. Spatial distribution of KMA (Korea Meteorological Administration) observation stations in South Korea

한 Ryoo et al.(1993)에서 수행한 바와 같이 기존 대도시와 신흥 공업도시 등 중소도시의 도시화 효과 특성도 나누어서 살펴볼 필요성이 있다. 기존 도시화 효과 분석 결과는 분석 방법, 분석 기간, 도시/비 도시 구분 기준 등에 따라 불확실성이 크므로 이 연구에서는 기존의 다양한 도시화 효과 연구방법 중 4가지 방법을 사용하여 동일한 조건 하에서 우리나라의 최근 48년(1973~2020)간 도시화 효과를 정량적으로 분석하였다. 또한 도시 인구 변화가 활발했던 과거와 인구 변화가 정체된 최근의 도시화 효과 특성을 살펴보았다.

2. 자료 및 연구방법

이 연구에서는 우리나라의 도시화 효과에 따른 기온 상

승을 분석하기 위하여 우리나라에 기상관측망이 전국적으로 확대된 1973년부터 2020년까지 48년간의 기상관측 자료를 사용하였다. 1973년에 기상관측을 수행한 관측소는 60개소 이상이지만, 이 연구에서는 도시 지역과 도시 인근의 시골 지역에 해당되는 총 30개 지역에 위치한 기상관측소의 기상관측 자료를 사용하였다(Fig. 1). 사용 변수는 일 평균기온이며, 이를 기후통계지침(KMA, 2021b)에 따라 48년간 연 평균기온을 산출하였고 각 기상관측소의 기온 변화 추세를 산출하여 분석에 사용하였다(Fig. 2a).

도시화 효과에 의한 지역별 기온 상승을 검증하기 위하여 통계청 인구 총 조사의 인구 자료를 사용하였다. 통계청 국가통계포털의 인구 자료는 5년 단위로 제공되므로 1975년부터 가장 최신 자료인 2019년까지 수집하였다

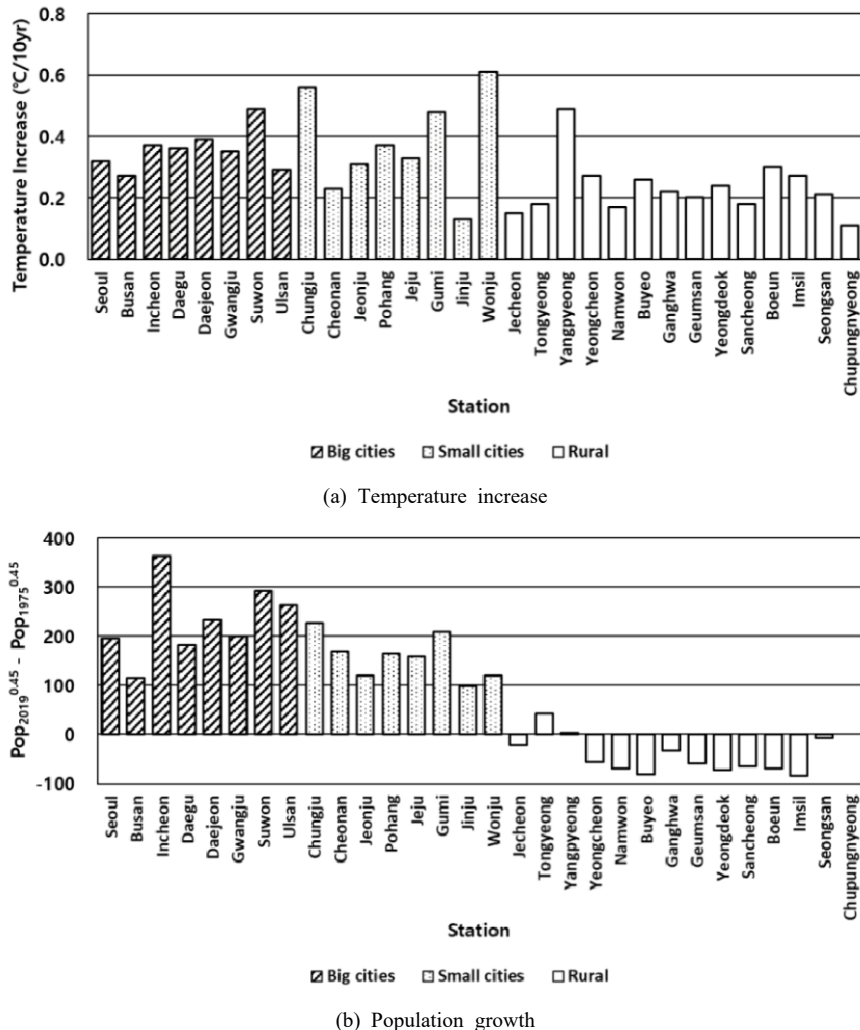


Fig. 2. (a) The trends of annual-mean temperature increase and (b) population growth in 30 stations in South Korea

(<https://kosis.kr>). 기온 자료와(1973~2020, 매년)와 인구 자료(1975~2019, 5년마다 수집) 사이에 시간적 불일치성이 있으므로, 인구 자료는 기온 자료에 가장 근접한 해의 자료를 사용하였다. 도시화에 의한 기온 상승은 현재의 도시 인구 뿐 아니라 인구 증가량과 밀접한 관련이 있다고 알려져 있다(Kim et al., 1999). 따라서 이 연구에서는 2019년의 인구 자료를 사용하여 도시와 시골(비 도시)을 구분하였고, 인구 변화 자료를 사용하여 도시화 효과에 의한 지역별 기온 상승을 검증하였다. Karl et al.(1988)에서는 도시화에 의한 기온 상승은 도시 인구 변화의 0.45승에 비례한다고 하였으므로, 이 연구에서는 인구 변화를 [인구2019년^{0.45} - 인구1975년^{0.45}]로 정의하였다(Fig. 2b).

인구를 기반으로 도시화 효과를 분석한 연구들 중 도시와 시골(비 도시)의 구분 기준은 연구방법에 따라 상이하다. Lee and Kang (1997)은 인구 10만 명 이상인 지역을 도시로 구분하였으며, Choi et al.(2003)은 인구밀도가 1000명/㎢ 이상이며 인구 100만 명 이상이면 대도시, 100만 명 미만이면 소도시로 구분하였다. Kug and Ahn (2013)은 인구 100만, 30만, 10만 명 이상인 지역을 각각 대·중·소도시로 구분하였고 인구 10만 명 미만인 지역을 시골로 구분하였다. 이 연구에서는 Kug and Ahn (2013) 방법에 기초하여 2019년 인구를 기준으로 인구 100만 명 이상인 지역을 “대도시”, 30만 명 이상 지역을 “중소도시”로 정의하였다. “시골”은 도시 인구의 인구 10만 명 미만인 지역으로 정의하였으나, 도시 인근에 인구 10만 명 미만인 지역이 없는 경우, 인구가 10만 명 이상이지만 비교

적 인구가 적은 지역도 시골로 정의하였다. 이러한 정의에 따라 최소한 1973년부터 기상관측을 시작한 60여개 지역 중에서 총 8개 대도시(서울, 부산, 인천, 대구, 대전, 광주, 수원, 울산)와 8개 중소도시(청주, 천안, 전주, 포항, 제주, 구미, 진주, 원주), 14개 시골(제천, 통영, 양평, 영천, 남원, 부여, 강화, 금산, 영덕, 산청, 보은, 임실, 서산, 추풍령) 지역이 구분되었으며 이를 도시화 효과 분석에 사용하였다(Fig. 1 and Fig. 2). 분석에 사용된 30개 지역 중 ‘강화’는 행정구역 상 ‘인천광역시’에 포함되지만, 인천의 중심지와 떨어져있고 강화기상관측소와 인천기상대의 직선거리가 약 30 km로 충분한 거리가 있으므로 ‘강화’를 시골 지역에 포함하여 분석하였다.

이 연구에서 도시화 효과 분석을 위해 사용한 방법은 총 4가지이다. 첫 번째는 도시 지역 평균기온과 시골 지역 평균기온 사이의 기온 차이를 사용하여 도시화 효과에 의한 기온 상승폭을 추정하는 방법이다. 도시화 효과에 의한 기온 상승폭이 제거된 때 해의 기온 값(T_i')은 식 (1)과 같이 정의된다(Choi et al., 2003). 즉, 식 (1)의 우측 항에서 T_i 다음에 나오는 항들이 도시화 효과라고 할 수 있다. 아래 식에서 T_i 는 1973년부터 2020년까지 매 해의 평균기온 값이며, i 는 1973년부터 2020년까지의 기간이다. $\overline{T_{u-r}}$ 은 분석기간 동안 매년 도시 지역 기온과 시골 지역 기온의 차를 평균한 값이며, ΔT_{u-r} 은 분석기간의 전반기 24년(1973~1996)과 후반기 24년(1997~2020) 평균기온의 차이를 두 배로 곱한 값이다. Fig. 3은 도시 평균기온(실선, T_i)과 식 (1)을 통해 산출된 도시화 효과가 제거된 도시 평

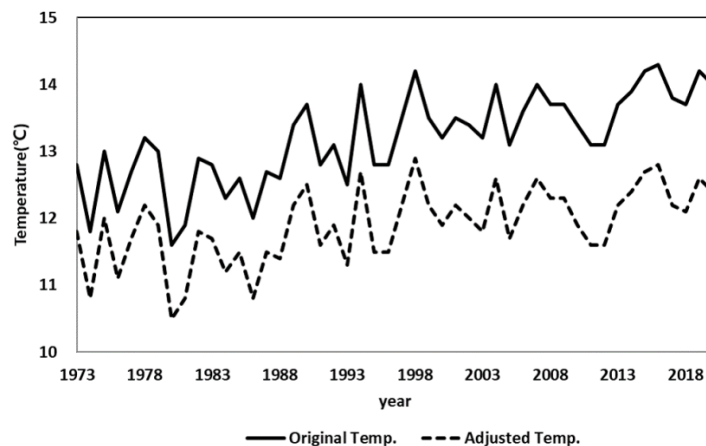


Fig. 3. Annual-mean temperature of 16 stations in South Korea before (Original) and after (Adjusted) the correction (1973~2020)

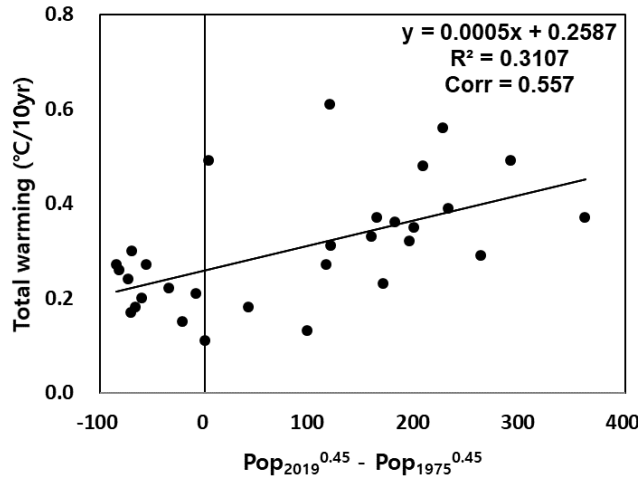


Fig. 4. Relation between the population growth and annual-mean temperature trend (1973~2020), Black line denote linear regression for the 30 stations

균기온(점선, T_i')의 변화를 나타낸다. T_i' 는 T_i 에 비해 평균기온이 낮고, 기온 상승폭도 작은 것을 확인할 수 있다.

$$T_i' = T_i - \overline{T_{u-r}} + [(\Delta T_{u-r}/48)(i - 1973)] \quad (1)$$

두 번째는 기온 변화와 인구 변화 사이의 상관관계를 기반으로 도시화 효과를 추정하는 방법이며, 식 (2)와 같이 정의된다(Kug and Ahn, 2013). 식 (2)에서 기온 상승(T_w)은 총 세 가지 항으로 나누어진다. G_w 는 온난화에 의한 기온 상승, αP_j 는 도시화 효과에 의한 기온 상승(U_w), R_j 는 국지적인 요소에 의한 기온 상승이다. 아래 식에서 α 는 인구 변화와 기온 변화 간의 회귀식에서 기울기에 해당하고 P 는 인구 변화를 의미하며 j 는 각 지점을 의미한다(Fig. 4). R_j 는 잔차이며, 국지적 요소를 의미하므로 모든 지역을 평균하면 0에 수렴하게 된다. Kug and Ahn (2013)은 인구 변화 값을 실제 인구 자료의 변화를 기반으로 사용하였으나, 이 연구에서는 앞서 정의한 바와 같이 [인구_{2019년}^{0.45} - 인구_{1975년}^{0.45}]를 인구 변화 값으로 사용하였다. 30개 지역의 기온 변화와 인구 변화 사이의 상관 계수는 약 0.557이며, 회귀식의 기울기(α)는 0.0005로 나타났다(Fig. 4).

$$T_w = G_w - \alpha P_j + R_j \quad (2)$$

세 번째는 경험적 직교 함수(Empirical Orthogonal Function, EOF)를 사용하여 우리나라의 공통적인 온난화 모드를 추출한 후, 각 지역별 도시화 효과를 추정하는 방법이며(Kim and Kim, 2011), 다음과 같은 순서로 수행된다.

- 1) 전체 기온 상승(T_w)은 온난화에 의한 기온 상승(G_w)과 도시화에 의한 기온 상승(U_w)으로 나누어짐
- 2) 30개 지점, 48년에 대하여 EOF분석을 수행하며, 첫 번째 모드를 우리나라의 공통적인 온난화 모드로 가정 (Fig. 5)
- 3) 온난화 모드의 고유 벡터와 시간 계수를 선형 결합하여 온난화 모드가 설명하는 기온 시계열을 계산, 이 시계열에서 나타나는 기온 상승량은 온난화에 의한 기온 상승량으로 가정
- 4) 추풍령은 도시화 효과가 없고 온난화에 의한 기온 상승만 있다고 가정하여, 추풍령의 기온 상승량으로 다른 지점들의 온난화 기온 상승량을 보정
- 5) 전체 기온 상승량에서 온난화 상승량을 뺀 나머지를 도시화에 의한 기온 상승량으로 추정

네 번째는 관측 자료는 도시화 효과가 포함되고 재분석 자료는 도시화 효과가 포함되지 않았다는 가정 하에, 관측 자료의 기온 변화량에서 재분석 자료의 기온 변화량을 뺀 값을 도시화 효과로 정의하는 방법이다(Oh et al., 2004; Park et al., 2017). 이 연구에서는 식 (3)과 같이 ERA5 (Fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis) 0.25° × 0.25° 수평해상도 재분석 자료의 연 평균기온을

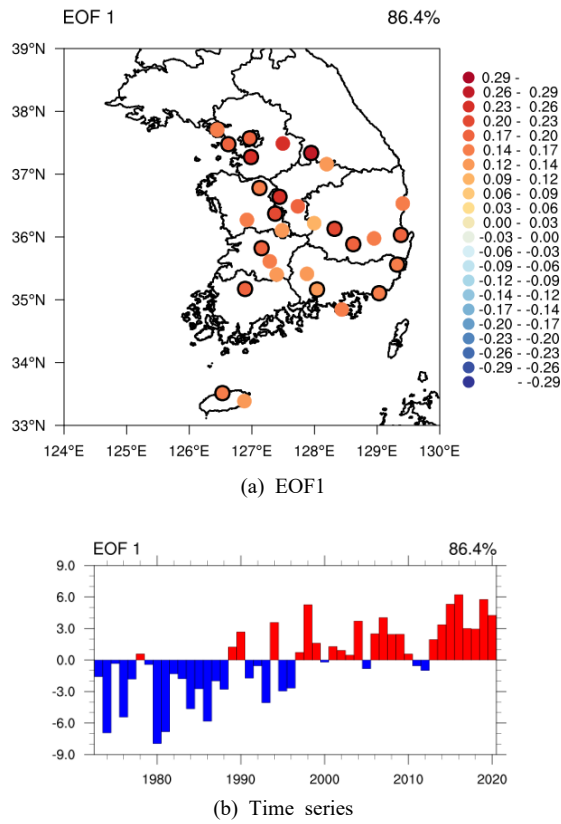


Fig. 5. (a) Spatial distribution of the first EOF eigenvector of 30 stations annual-mean temperature (1973~2020) in South Korea, and (b) the time series associated with the first EOF mode

30개 기상관측소 위치에 맞게 내삽 하여 사용하였다. 식 (3)에서 U_w 는 도시화에 의한 기온 상승 량, T_E 는 ERA5 재분석 자료의 기온 상승 량을 나타낸다.

$$U_w = T_w - T_E \quad (3)$$

이 연구에서는 편의상 네 가지 분석 방법을 순서대로 C03, K13, K11, O04로 명명하였다. 각 방법의 의해 계산된 도시화 기여율(U_r)은 식 (4)와 같이 계산하였다.

$$U_r = (U_w / T_w) \times 100 \quad (4)$$

3. 결과

3.1. 도시화 효과

최근 48년(1973~2020)에 대하여 총 4가지 방법을 사

용하여 우리나라의 도시화 효과를 계산하였다(Table 1). 16개 도시에서 분석기간 동안 기온 상승폭(T_w)은 매 10년 당 0.37°C 이며, 도시화 효과에 의한 기온 상승폭(U_w)은 매 10년당 $0.09 \sim 0.18^\circ\text{C}$ 로 나타났다. 도시화 기여율(U_r)은 분석 방법에 따라 24~49%로 변동성이 크다. 분석 방법 중 EOF를 사용하는 K11에서 도시화 기여율이 49%로 가장 높았다. 관측 자료와 재분석 자료의 차이를 통해 도시화 효과를 계산하는 O04는 도시화 기여율이 24%로 가장 작았으며, K11의 절반 수준에 그쳤다. O04방법은 사용하는 재분석 자료의 종류에 따라 값이 크게 달라지는데, 기존 연구와 같이 NCEP/NCAR Reanalysis 1 project를 사용한 경우에는 도시화 기여율이 49%로 K11과 같이 높은 도시화 효과를 보였다. 이는 도시화 효과는 분석방법과 도시 선정뿐만 아니라 자료 선정에도 크게 영향을 받는다는 것을 의미한다. 기온 상승과 인구 변화의 관계를 통해 도시화 효과를 계산하는 K13의 도시화 기여율은 27%로 나타났다. K13 또한 어떤 인구 자료를 사용하느냐에 따라서

Table 1. The warming trends of urbanization effect in South Korea

	C03 (Choi et al., 2003)			K13 (Kug and Ahn, 2013)			K11 (Kim and Kim, 2011)			O04 (Oh et al., 2004)		
	City	Big City	Small City	City	Big City	Small City	City	Big City	Small City	City	Big City	Small City
	T_w ($^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$)	0.37	0.36	0.38	0.37	0.36	0.38	0.37	0.36	0.38	0.37	0.36
U_w ($^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$)	0.14	0.12	0.15	0.10	0.12	0.08	0.18	0.17	0.19	0.09	0.08	0.11
U_r (%)	38	33	39	27	33	21	49	47	50	24	22	29

결과가 크게 달라졌다. 기존 연구(Kug and Ahn, 2013)와 같이 인구에 0.45승을 하지 않고 일반적인 인구 값을 사용하는 경우에는 도시화 기여율이 약 15%로 매우 낮게 나타났다.

Table 1은 8개 대도시와 8개 중소도시에 대한 도시화 기여율도 제시하였다. 대도시의 도시화 기여율은 22 ~ 47%이고 중소도시의 도시화 기여율은 21 ~ 50%로 중소도시에서 변동성이 다소 크게 나타났다. C03, O04, K11의 경우 중소도시에서 대도시보다 도시화 효과가 더 컸는데, 최근 48년간 중소도시의 기온 상승폭(0.38 $^{\circ}\text{C}/10\text{년}$)이 대도시의 기온 상승폭(0.36 $^{\circ}\text{C}/10\text{년}$) 보다 더 큰 것과 관련 있다. 반면에 K13은 대도시의 도시화 기여율이 중소도시보다 약 1.6배 높은 것으로 나타났다. K13의 경우 기온 변화와 인구 변화의 선형 관계를 고려하여 도시화 효과를 추정하기 때문에, 인구 변화가 클수록 도시화 효과가 비교적 크게 나타나는 특성이 있다. 같은 이유로, 4가지 방법 중 K13에서 중소도시의 도시화 효과가 가장 작게 나타났다.

도시화 효과는 분석 방법뿐만 아니라 분석 기간에 따라 결과가 달라질 수 있으므로(Park et al., 2017), 분석 기간을 달리하여 도시화 효과의 변화를 추정하였다. 도시화 효과 분석의 시작 시기는 1973년으로 고정하였고 분석 기

간을 전체 기간인 48년(1973 ~ 2020), 전체의 2/3에 해당하는 32년(1973 ~ 2004), 전체의 1/2에 해당하는 24년(1973 ~ 1996)으로 구분하여 비교하였다. 분석 결과, 도시화 기여율은 전반적으로 분석 기간이 짧을수록 크게 나타났다. 분석 기간이 24년인 경우, 우리나라의 도시화 기여율은 42 ~ 73%로 모든 기간 중에서 가장 컸다. 32년간 도시화 기여율을 계산한 경우, 30 ~ 64%로 24년의 결과보다는 작았으나 48년의 결과(24 ~ 49%) 보다는 높은 값을 보였다. 이는 최근 들어서 도시화 효과가 1900년대 후반 ~ 2000년대 초반에 비해 감소했다는 것을 뜻하며, 도시 인구 증가의 정체 등과 관련이 있을 것으로 사료된다. 이를 더 자세하게 확인하기 위하여 3.2절에는 도시 인구 변화와 기온 변화의 관계에 대해서 살펴보았다.

3.2. 인구 변화와 기온 변화의 관계

이 절에서는 2000년대 초반에 비해 최근 도시화 효과가 약해진 원인을 파악하기 위하여 우리나라의 기온 변화와 인구 변화의 관계에 대해서 분석하였다. 우리나라 전체 도시 및 시골 인구 변화를 분석하기 위하여 국가통계포털에서 제공하는 World Bank 인구 자료를 사용하였다.

Table 2. The warming trends of urbanization effect in South Korea by analysis period

	C03 (Choi et al., 2003)			K13 (Kug and Ahn, 2013)			K11 (Kim and Kim, 2011)			O04 (Oh et al., 2004)		
	24yr	32yr	48yr	24yr	32yr	48yr	24yr	32yr	48yr	24yr	32yr	48yr
	(73-96)	(73-04)	(73-20)	(73-96)	(73-04)	(73-20)	(73-96)	(73-04)	(73-20)	(73-96)	(73-04)	(73-20)
T_w ($^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$)	0.33	0.44	0.37	0.33	0.44	0.37	0.33	0.44	0.37	0.33	0.44	0.37
U_w ($^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$)	0.20	0.28	0.14	0.22	0.20	0.10	0.24	0.24	0.18	0.14	0.13	0.09
U_r (%)	61	64	38	67	46	27	73	55	49	42	30	24

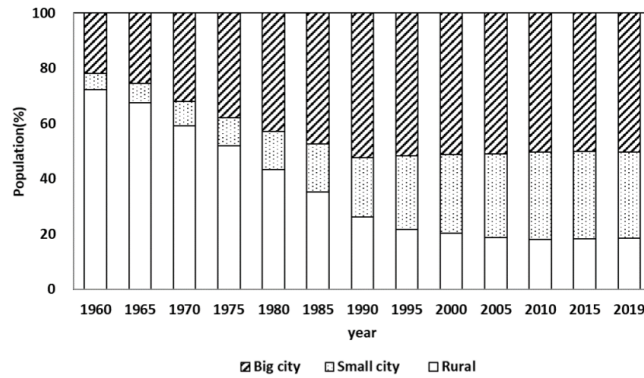


Fig. 6. Changes in the population ratio of big city, small city and rural in South Korea over the past 60 years

이 자료에서 도시인구는 국가 통계청 정의에 따른 도시 지역에 거주하는 사람들을 의미하며, World Bank 인구 추정치와 UN세계 도시화 전망의 도시 비율을 사용하여 산출되었다. 이 자료에 따르면, 우리나라 인구는 꾸준히 증가하고 있으며, 도시 인구는 증가하고 시골 인구는 감소하는 추세이다. 전체 인구 중 인구 100만 명 이상 대도시의 인구 비율은 지난 60년(1960~2019) 중에 1990년에 약 52%로 최고점을 기록한 이후 다소 하락하였다(Fig. 6). 중소도시 인구 비율은 최근(2015~2019)에 약 31%로 최고점을 기록하였다. 이는 도시 전체 인구가 증가하는 추세이나, 대도시의 인구와 산업 기반이 교외 지역으로 분산되고 있다는 Kwon (2011)의 연구 결과와 유사한 결과이다. 즉, 인구 변화와 관련하여 1990년대 후반~2000년

대 초반까지는 대도시의 도시화 기여율이 뚜렷하나, 최근에는 대도시보다 중소도시에서 도시화 효과가 더 클 수 있다는 것을 의미한다.

분석 시기별 도시화 효과를 자세하게 살펴보기 위하여 Fig. 7에 지난 48년(1973~2020)간 연도별 8개 대도시 평균기온과 8개 중소도시 평균기온, 그리고 14개 시골의 평균기온의 편차를 나타내었다. +표식은 연도별 대도시와 시골의 기온 편차이고 O표식은 연도별 중소도시와 시골의 기온 편차이다. 전체 기간(48년)을 전반기 24년(1973~1996)과 후반기 24년(1997~2020)으로 나누어서 시기별 대도시(중소도시)의 기온 변화의 추세를 실선(점선)으로 표시하였다. 시기에 상관없이 도시는 시골보다 기온이 높으며, 대도시-시골 기온 편차가 중소도시-시골 기온 편차보

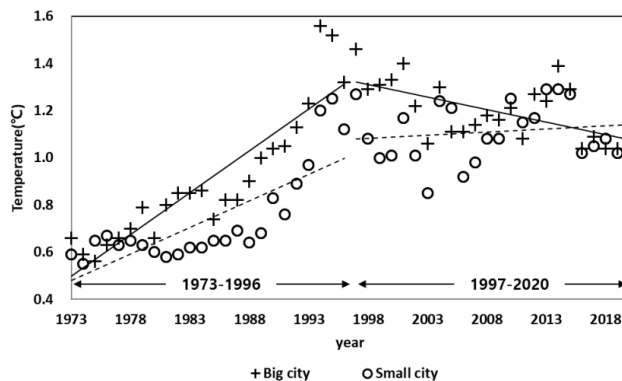


Fig. 7. Estimated yearly urban bias of annual-mean temperature series for the group of big city (+) and small city (O). Solid and dashed lines denote linear trends in big city and small city, respectively

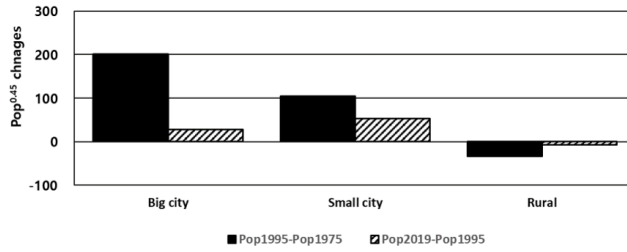


Fig. 8. Population changes in big city, small city and rural on first half (black bar) and second half (hatched bar)

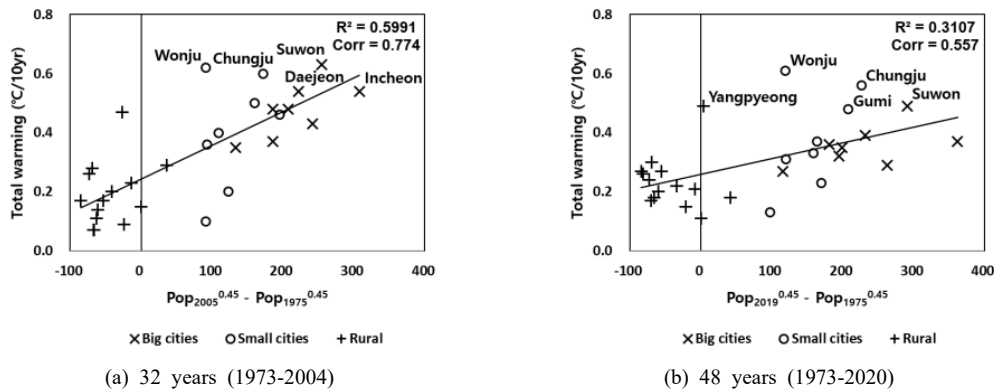


Fig. 9. Relation between the population growth and annual-mean temperature trend. Black line denote linear regression for the 30 stations in (a) past 32 years and (b) current 48 years

다 크다. 그러나 기온 편차의 변화 경향은 전반기와 후반기에 서로 다른 양상을 보인다. 전반기에는 대도시-시골 기온 편차가 증가하는 추세는 중소도시-시골 기온 편차의 증가 추세보다 크다. 후반기에는 중소도시-시골의 기온 편차가 다소 증가하는 반면, 대도시-시골의 기온 편차는 오히려 감소하는 추세를 보인다. 이는 최근 중소도시 인구 비율이 증가하는 것과 관련이 있다고 생각되며, Fig. 8을 통해 실제 30개 지역의 인구 변화를 전반기와 후반기로 나누어 살펴보았다. 5년 단위로 제공되는 인구 자료의 특성상, 전반기의 인구 변화는 [인구1995년^{0.45} - 인구1975년^{0.45}](검정색 막대), 후반기는 [인구2019년^{0.45} - 인구1995년^{0.45}](빛금 막대)로 구분하였다. 전반기는 후반기에 비해 모든 지역에서 인구 증감이 뚜렷하였다. 대도시의 경우 후반기 인구 증가 경향은 전반기의 약 14% 수준에 그쳤다. 중소도시도 후반기 인구 증가량이 전반기에 비해 50% 수준에 그쳤으나, 대도시와 비교하면 후반기 인구 증가폭이 약 두 배 크게 나타났다. 최근 도시화 효과 약화는 이러한 대도시 인구 변화 특징의 영향이 큰 것으로 보이며, 이는 이미 성장을 마친

인구 100만 명 이상의 대도시(Metropolitan city)의 경우, 최근 들어서 도시화 효과가 약해지고 인구 변화와 기온 변화 간 상관성이 떨어진다는 Kug and Ahn (2013)의 결과와도 유사하다.

Fig. 9는 도시화 분석 기간에 따라 기온 변화와 인구 변화 간에 어떠한 상관관계가 있는지 제시하였다. 세로축은 매 10년당 기온 변화율을 나타내며, Fig. 9a의 가로축은 지난 32년(1973 ~ 2004)의 기온 변화에 대응하는 인구 변화[인구2005년^{0.45} - 인구1975년^{0.45}]를 의미하고, Fig. 9b의 가로축은 최근 48년간(1973 ~ 2020)의 기온 변화에 대응하는 인구 변화[인구2019년^{0.45} - 인구1975년^{0.45}]를 의미한다. Fig. 9b의 경우 Fig. 4와 동일한 자료이나 도시 규모별(대도시, 중소도시, 시골)로 구분하여 표출하였다. +표식은 시골, O표식은 중소도시, X표식은 대도시를 의미한다. 지난 32년간 기온 변화와 인구 변화 사이의 상관관계는 0.774로 매우 높은 상관성을 보인다(Fig. 9a). 도시 규모에 따른 기온 상승폭을 살펴보면, 지난 32년간 매 10년당 기온 상승폭은 대도시, 중소도시, 시골에서 각각 0.48℃,

0.41℃, 0.19℃로 대도시에서 가장 큰 상승폭을 보였다. 각 지역별로 살펴보면 대도시 중 수원, 대전, 인천과 중소도시 중 원주, 청주에서 기온이 가장 크게 상승했다. 최근 48년간 기온 변화와 인구 변화 사이의 상관관계는 0.557로 유의미한 상관관계를 보이나, 지난 32년에 비해서 낮게 나타났다(Fig. 9b). 10년당 기온 상승폭은 대도시, 중소도시, 시골에서 각각 0.36℃, 0.38℃, 0.23℃로 중소도시에서 가장 컸으며, 최근 48년에 비해 도시는 낮게, 시골은 높게 나타났다. 중소도시 중에서 원주, 청주, 구미와 대도시 중 수원이 기온 상승폭이 컸고 양평은 시골지역임에도 불구하고 기온이 크게 상승했다.

3.3. 지역 별 인구 변화와 기온 변화의 관계(군집분석)

앞서 제시한 결과에서 인구 변화와 기온 변화 간에는 상관성이 크며, 특히 과거 32년 간 상관성이 더 크다고 밝혔다. 즉, 분석 기간에 따라 차이가 있지만 인구 증가가

뚜렷하면 뚜렷한 기온 상승을 기대할 수 있다는 의미이다. 그러나 우리나라 30개 지역 중 인구 변화 추세와 기온 상승의 추세가 일치하지 않은 지역이 존재한다. 이 절에서는 지역 별로 인구 변화에 따른 기온 상승의 기대치를 얼마나 충족하는지 정량적으로 분석하기 위하여 30개 지역에 대하여 군집분석(k-means clustering)을 사용하여 인구 변화와 기온 변화를 분류하였다(Fig. 10). k-means clustering 방법은 주어진 데이터를 k개의 클러스터로 묶는 알고리즘으로, 각 클러스터와 거리 차이의 분산을 최소화하는 방식으로 계산되며, 이 연구에서는 도시 규모를 3가지로 나누었으므로 클러스터를 3개로 지정하여 분석하였다.

Fig. 10(a),(b)는 과거 32년에 대하여 인구 변화와 기온 변화에 대한 군집분석 수행 결과이다. 우리나라 30개 지역을 인구 변화와 기온 변화량을 기준으로 총 세 등급으로 구분하였으며, 1등급은 인구와 기온의 증가가 가장

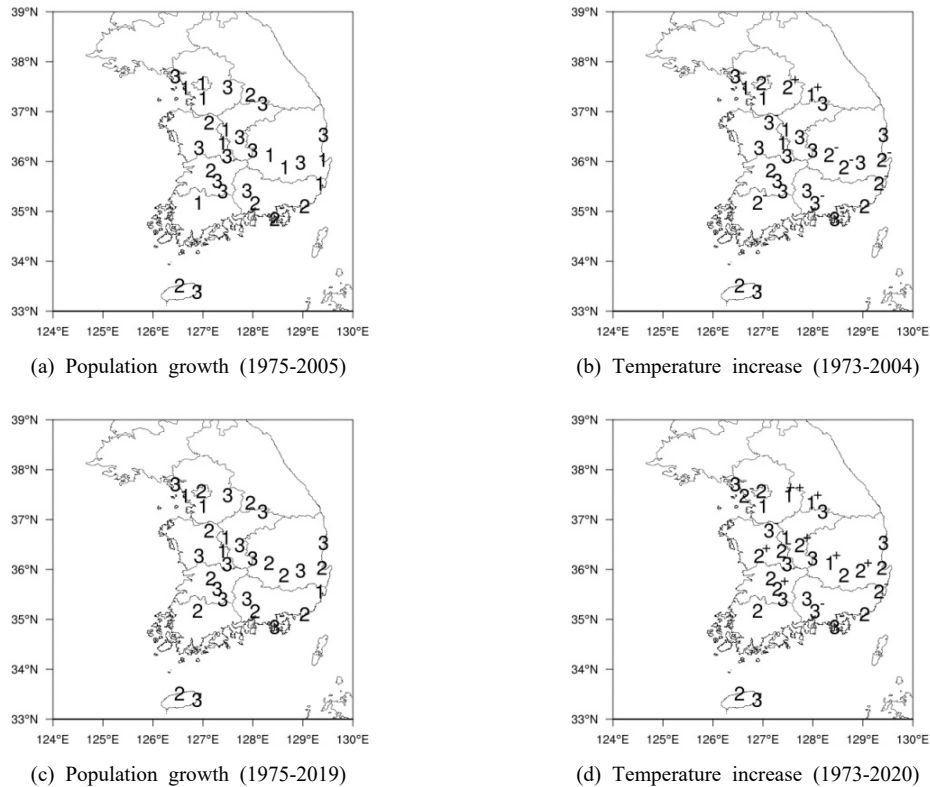


Fig. 10. Regional division of Population growth (a, c) and annual-mean temperature increase (b, d) in South Korea. The numbers are cluster number. The (+) and (-) signs denote the difference in cluster grades between population growth and temperature increase

큰 지역(높은 등급)이고 3등급은 증가가 가장 작은 지역(낮은 등급)을 의미한다. 인구 변화와 기온 상승은 양의 상관관계 이므로 인구 변화보다 기온 변화의 등급이 낮다면 기온이 기대치보다 낮게 상승했다고 해석할 수 있다. 기온 변화 등급이 인구 변화 등급보다 한 단계 높을 경우 +부호를, 한 단계 낮을 경우에는 -부호를 표시하였다(Figs. 10b, d). 지난 32년 동안 30개 지역 중 총 19개 지역에서 인구 변화와 기온 변화가 같은 등급으로 분류되었고 2개 지역(원주와 양평)은 기대치(인구 변화 등급)보다 기온이 크게 상승하였다. 나머지 9개 지역은 기대치보다 기온이 조금 상승했으며, 통영을 제외하면 모두 도시에 해당하는 지역(서울, 대구, 광주, 울산, 천안, 포항, 구미, 진주)이다. 이는 도시가 급성장 하는 시기에 실제 기온 상승폭이 기온 상승 기대치에 미치지 못하였다고 해석된다.

최근 48년 동안의 결과는 총 18개 지점에서 인구 변화와 기온 변화가 같은 등급으로 분류되었다(Fig. 10(c),(d)). 5개 지역은 기대치보다 기온이 조금 상승했으며, 모두 도시 지역(인천, 대전, 울산, 천안, 진주)에 해당된다. 나머지 7개 지역(구미, 원주, 양평, 영천, 부여, 보은, 임실)에서 기대치보다 기온이 크게 상승하였으며, 구미와 원주를 제외하면 대체로 시골에 해당하는 지역이다. 정리하면, 분석 기간에 상관없이 60% 이상의 지역에서 기온 상승이 기대치(인구 증가)를 충족하므로, 지역별로 나누어 살펴봐도 인구 변화가 도시화 효과에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 그러나 일부 도시 지역은 기대치보다 기온 상승폭이 다소 작았고 특히 지난 32년간 이러한 특성이 두드러졌으며, 최근 48년 동안 일부 시골 지역에서 기온 상승폭이 기대치보다 크게 나타났다. 양평은 인구 변화 등급에 비해 기온 변화 등급이 2단계 높아서, 기온이 기대치보다 매우 크게 상승했다고 할 수 있다. Yu et al.(2020)은 이에 대하여 팔당호의 수온 변화가 인근에 위치한 양평의 기온 상승에 영향을 준다고 하였다. 이는 지역 별 기온 상승에 온난화와 도시화 효과 외에 다른 환경적 요인이 크게 작용할 수 있음을 시사한다. 본 연구의 결과는 우리나라의 기온 상승과 도시화 효과에 대한 과학적 이해에 기여할 수 있을 것으로 기대되며, 기온 변화를 두 가지 요소(온난화와 도시화)로만 구분한 점은 보완해야 할 과제로 사료된다. 향후, 온난화와 도시화 외에 국지적인 기온 변화에 대한 이해를 위해서는 다른 환경적 요소에 대한 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

4. 요약 및 결론

우리나라 인구는 지속적으로 증가하고 있으나, 최근 들어서 대도시 인구 증가가 정체되고 산업 기반이 교외로 분산되고 있다. 이 연구에서는 이러한 최근 도시 성장의 특성이 반영된 도시화 효과를 분석하였다. 도시화 효과 분석은 분석 방법, 분석 기간, 도시 선정 기준에 따라 결과가 크게 달라지므로, 4가지 방법을 기반으로 여러 분석 기간에 대하여 분석을 수행하였다. 또한 도시화 효과와 인구 변화의 관계에 대해서 분석하였다. 분석에 사용된 기온 자료는 우리나라 30개 기상관측소의 연 평균기온이며, 분석 기간은 최근 48년(1973~2020)이다. 인구 자료는 5년 단위로 제공되는 통계청 국가통계포털의 인구 총조사 자료를 사용하였으며, 1975년부터 가장 최신 자료인 2019년까지 수집하였다. 분석 방법은 총 4가지이며, 도시와 시골의 평균기온 편차를 활용한 방법(C03), 기온 상승과 인구 변화의 상관관계를 이용한 방법(K13), 기온의 EOF를 이용한 방법(K11), 관측 자료와 재분석 자료의 차이를 이용한 방법(O04)이다.

최근 48년(1973~2020)간 우리나라의 도시화 기여율은 24~49%로 사용 방법에 따라 변동성이 크다. EOF를 사용하는 K11에서 가장 컸고 재분석 자료를 사용하는 O04에서 가장 작았다. 도시 규모별로 비교하면 중소도시에서 대도시에 비해 다소 높은 도시화 효과가 나타났다. 도시화 효과는 자료 선정에 따라 불확실성이 매우 큰데, O04은 사용한 재분석 자료에 따라서 도시화 기여율이 약 두 배 가까이 차이가 있으며, K13은 인구 자료 사용 방법에 따라서도 60%에 가까운 차이가 나타났다. 도시화 효과는 분석 기간이 짧을수록 컸으며, 도시화 기여율은 지난 24년(1973~1996)간 42~73%이고 지난 32년(1973~2004)간 30~64%로 나타났다.

2000년대 초에 비해 최근 도시화 기여율이 작아지는 것은 도시 인구 증가의 정체와 관련 있다. World Bank의 인구 자료에 따르면, 우리나라 전체 인구는 꾸준히 증가하며, 도시 인구는 증가하고 시골 인구는 감소하는 추세이다. 대도시의 인구 비율은 1960년 이후 1990년에 최고점을 기록한 이후 다소 하락하였고 중소도시 인구 비율은 최근에 가장 높았다. 분석 기간을 전반기와 후반기로 나누어서 도시 규모별 인구 변화를 살펴보면, 대도시의 후반기 인구 증가 추세는 전반기에 비해 대도시는 14%로 감소했다. 중소도시는 후반기 인구 증가 추세가 약 절반으로 감소하였으나, 대도시에 비해서 약 두 배 가량 높았다. 또한 도시와 시골

의 기온 편차를 살펴보면 전반기에는 대도시에서 기온 편차가 증가 추세가 뚜렷하나, 후반기에는 중소도시에서 기온 편차가 더 뚜렷하게 증가한다. 이는 최근 대도시의 도시화 효과가 주춤하고 중소도시의 도시화 효과가 더 클 수 있다는 것을 의미한다. 지난 32년(1973~2004)간 기온과 인구 변화의 상관관계는 0.774로 매우 높았으나, 최근 48년(1973~2020)간의 상관관계는 0.557로 다소 낮아졌다.

우리나라 30개 지역에서 인구 변화와 기온 변화 간 상관관계의 지역적 특성을 살펴보기 위하여 군집분석을 사용하여 인구 변화와 기온 변화를 각각 3등급으로 분류하였다. 지난 32년 및 최근 48년 동안 60% 이상 지역에서 기온 상승폭이 기대치를 충족하지만 일부 도시는 기대치보다 작은 기온 상승폭을 보이고, 시골은 기대치보다 큰 기온 상승폭을 보인다. 특히, 양평은 기대치보다 매우 큰 기온 상승 추세가 나타나며, 이는 온난화와 도시화 효과 외에 다른 환경적 요소가 국지적으로 작용한 것으로 사료된다. 이 연구의 결과는 우리나라 기온 변화와 도시화 효과에 대한 과학적 이해에 기여할 것으로 기대되며, 기온 변화를 두 가지 요소(온난화와 도시화)로만 구분한 점은 보완해야 할 과제로 생각된다. 향후 국지적인 기온 변화의 이해를 위해서 지역적인 환경적 요소에 대한 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

사사

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발 연구」 “AR6 기후변화 시나리오 개발·평가(KMA2018-00321)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Choi Y, Jung HS, Nam KY, 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: 577-591.
- Fujibe F. 2009. Detection of urban warming in recent temperature trends in Japan. *International Journal of Climatology* 29: 1811-1822.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change*. T. F. Stocker et al. Eds. Cambridge University Press: 1535 pp.
- Jones PD, Kelly PM, Goodess CM, and Karl T. 1989. The effect of urban warming on the Northern Hemisphere temperature average. *Journal of Climate* 2: 285-290.
- Karl TR, Diaz HF, and Kukula G, 1988. Urbanization: Its detection and effect in the United States climate record. *Journal of Climate* 1: 1099-1123.
- Kim MK, Kang IS, and Kwak CH, 1999. The Estimation of Urban Warming Amount due to Urbanization in Korea for the Recent 40 Years. *J. Korean Meteor. Soc.* 35(1): 118-126.
- Kim MK, and Kim S. 2011. Quantitative estimates of warming by urbanization in South Korea over the past 55 years (1954-2008). *Atmospheric Environment* 45(32): 5778-5783.
- KMA. 2021a. Climate change in Korea over the recent 109 years. 68 pp. (in Korean)
- KMA. 2021b. *Climatological Statistics Guide*. 82 pp. (in Korean)
- Koo G-S, Boo K-O, Kwon W-T. 2007. The Estimation of Urbanization Effect in Global Warming over Korea using Daily Maximum and Minimum Temperatures. *Atmosphere* 17(2): 185-193.
- Kug JS, and Ahn MS. 2013. Impact of urbanization on recent temperature and precipitation trends in the Korean peninsula. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 49(2): 151-159.
- Kwon S. 2011. Urbanization of large cities in Korea: Assessing development stages using migration and commuting data. *Journal of The Korean Association of Regional Geographers* 17(5): 536-553.
- Lee MI, and Kang IS. 1997. Temperature variability and warming trend in Korea associated with global warming. *Journal of the Korean Meteorological Society* 33(3): 429-444 (in Korean).
- Oh SN, Kim YJ, and Hyun MS. 2004. Impact of urbanization on climate change in Korea, 1973-2002. *J. Korean Meteor. Soc.* 40(6): 725-740.

- Park B-J, Kim Y-H, Min S-K, Kim M-K, Choi Y, Boo K-O, and Shim S. 2017. Long-Term Warming Trends in Korea and Contribution of Urbanization: An Updated Assessment. *Journal of Geophysical Research, Atmospheres* 122: 10637-10654.
- Ryoo SB, Moon SE, and Cho BG. 1993. Air Temperature Change Due to Urbanization in South Korea. *J. Korean Meteor. Soc.* 29(2): 99-116.
- Stone B. 2007. Urban and rural temperature trends in proximity to large US cities: 1951-2000. *International Journal of Climatology* 27: 1801-1807.
- WMO. 2019. The global climate in 2015-2019. World Meteorological Organization: 21 pp.
- Yu S-J, Im J-K, and Lee B-M. 2020. Effect of air temperature changes on water temperature and hysteresis phenomenon in lake Paldang. *J. Environ. Impact Assess* 29(5): 323-337.