경기북부 지역에서 도시화에 의한 대기 냉각 특성에 관한 연구

김만규¹ · 이지수¹ · 박종철²

¹공주대학교 지리학과 · ²공주대학교 지리정보과학연구소

(2014년 4월 21일 접수, 2014년 5월 19일 수정, 2014년 5월 21일 게재 확정)

A Study on Characteristics of the Air Cooling by Urbanization in the Northern Area of Gyeonggi Province, South Korea

Man-Kyu Kim¹ · Jisu Lee¹ · Jongchul Park²

¹Department of Geography, Kongju National University

²Institute of Geographic Information Science, Kongju National University

(Received 21 April 2014, Revised 19 May 2014, Accepted 21 May 2014)

Abstract : The urban areas are dramatically expanding in the northern area of Gyeonggi Province. As a result, there has been a growing interest in identifying effect of the urbanization on temperature changes. The object of this study is to find some areas where temperature changes are strongly influenced by the urbanization in the areas. For this, characteristics of air cooling of 18 sites in the northern area of Gyeonggi Province are compared with those of a rural site (Ganghwa). The nighttime cooling and cooling rate were used as characteristics of air cooling. Ten years of historical weather records from 2003 to 2012 were used in this study. In the results, the air temperature at nighttime of Neungnok and Uijeongbu was higher than that of Ganghwa. In addition, the maximum average cooling rate that occurs at sunset in the two sites was smaller than that of Ganghwa. It means that anthropogenic heat flux caused by urbanization affects characteristics of air cooling in the two sites. Future research on the relationship between urbanization and temperature changes in the two sites will be helpful to developing the proactive strategies to mitigate the effect of temperature changes by urbanization in the northern area of Gyeonggi Province.

Key Words : air cooling, cooling rate, urbanization, temperature changes, Gyeonggi Province

주요어 : 대기냉각, 냉각률, 도시화, 기온 변화, 경기도

1. 서론

경기북부 지역에 위치한 시·군의 대부분은 접경지역에 포함된다. 접경지역의 공간적 범위는

접경지역 지원 특별법에 의해 비무장지대 또는 해상의 북방한계선과 잇닿아 있는 시·군과 대통령령으로 정하는 시·군으로 한다(<http://law.go.kr>). 경기북부 지역에서 의정부시를 제외한 김포시,

파주시, 연천군, 고양시, 양주시, 동두천시, 포천시
시가 이에 해당한다.

접경지역은 6.25 전쟁에 따른 정전협정 이후, 오랜 기간 동안 군사적인 목적을 위하여 민간인의 출입, 개발, 인위적 활동이 다른 지역에 비해 제한되어 왔다. 이러한 이유로 경기북부 지역에는 다양한 생물종이 서식하고 있으며 논으로 이용되다가 경작을 하지 않아 습지처럼 변한 묵논습지도 다수 분포해 있다. 이 지역에는 두루미, 검독수리 등 9종 이상의 멸종위기 야생동물 1급 조류가 서식하고 있으며(KME, 2005; CHA, 2007), 20여 개 이상의 습지가 분포해 있어(Kim, 2001) 자연 생태적 가치가 높게 평가되고 있다. 하지만 1995년 지방자치 이후 지방정부들이 접경지역 개발계획을 경쟁적으로 추진하면서(Sa, 2000) 경기북부 지역에서는 시가화·건조지역으로 대변되는 도시화 지역이 빠르게 증가하고 있다.

이와 같은 도시화는 도시열섬과 강우 발생의 패턴에 변화를 일으킬 수 있으며(Shepherd, 2005; Koo *et al.*, 2007) 생물 종 다양성과 분포 패턴에 변화를 초래할 수 있다(Moreno-Rueda *et al.*, 2009). 특히 생물에게 섭식처를 제공하는 습지 환경에 영향을 주어 생태계의 연속적 변화를 일으키는 요인이 될 수 있다(Kwon and Choi, 2009). 따라서 자연 생태적 가치가 높게 평가되고 있는 경기북부 지역에서 도시화로 인한 기상변동이 있는지 파악하고 그 영향을 모니터링 할 필요가 대두되고 있다.

한편 Park *et al.* (2013)에 의하면 지금까지 국내에서 수행된 도시화로 인한 기상변동에 관한 연구들 중에는 도시화가 다양한 기후요소 중 기온의 변화에 영향을 주고 있다는 증거가 가장 많은 것으로 나타났다. 국내에서는 1950년대 이후 연평균 기온이 상승 추세에 있으며, 특히 도시지역에서는 그 주변지역보다 20~30%의 추가적인 기

온상승이 있었던 것으로 보는 시각이 지배적이다(Kim *et al.*, 2000; NIMR, 2009). 아울러 많은 연구자들이 연평균기온, 계절평균기온, 월평균기온 등이 도시화에 의해 영향을 받고 있음을 증명하였다(Lee and Hong, 2007; Lee and Kim, 2008; Choi, 2010; Kim *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2012). Lee *et al.* (2008)은 도시화가 진행된 곳에서 인공열로 인해 야간이 되어도 비도시화 지역에 비해 기온이 하강하지 않는 특징이 있다고 하였다. 이와 함께 기온과 관련이 있는 여름일수, 온난야율 등의 기후지수도 도시화의 영향을 받고 있음이 몇몇 연구자들에 의해 밝혀졌다(Choi and Kwon, 2005; Lee and Heo, 2011; Park *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2013).

위의 연구 동향을 종합하면, 경기북부의 기상변동에서 도시화의 영향을 검출하고 도시화로 인해 영향을 받고 있는 지역을 식별하기 위해서는 기온의 변화에 주목할 필요가 있다. 이러한 기온의 변화를 분석할 수 있는 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 도시화의 효과를 검출하기 위해 장기간의 관측 자료에서 기온의 변화 추세를 분석하는 방법이다. Kim *et al.* (1999)은 도시화의 효과를 검출하기 위해 가능한 한 장기간의 관측 자료를 이용할 필요가 있다고 지적한 바 있다. 대부분의 기존 연구들은 30년 이상의 장기간 자료를 이용하였으며, 기온의 변화 추세를 분석하여 도시화에 의한 기온 상승의 가능성이 있음을 밝혔다(Choi, 2010; Lee and Heo, 2011; Park *et al.*, 2013). 그러나 경기북부 지역의 기상관측장비는 대부분 2000년 전·후에 설치되었기 때문에 이 지역에 장기간의 관측 자료를 활용한 추세 분석을 적용하기는 어려움이 있다. 두 번째는 토지피복도 및 위성영상 열센서 자료 등을 활용하여 기온의 공간적 분포 특성을 분석함으로써 도시화의 영향을 분석하는 방법이다(Koo *et al.*, 2007; Yoon *et*

al., 2007; Ahn *et al.*, 2012). 그러나 경기북부 지역은 군사보안으로 인해 토지피복도와 위성영상 등의 활용에도 제약이 있다.

이런 가운데 Lee *et al.*(2008)은 1년 동안의 시간별 기온 자료를 활용하여 도시와 비도시 지역의 대기 냉각 특성을 비교함으로써 도시화가 대기 냉각 특성에 영향을 주고 있음을 밝혀내었다. 따라서 비교적 짧은 자료를 활용하여 분석할 수 있는 대기 냉각 특성은 경기북부 지역의 기온 변화에서 도시화의 영향을 받는 지역을 식별하는 데 유용한 방법으로 주목된다. 본 연구에서 Lee *et al.*(2008)이 밝힌 ‘도시화 지역의 대기 냉각 특성’은 ‘도시화로 인한 기온변화의 지리공간적인 차이’를 파악하기 위해 사용되었다.

본 연구의 목적은 최근 도시화가 급격하게 진행되고 있는 경기북부 지역에서 도시화로 인한 기온 변화의 공간적인 차이를 밝혀내고 이를 바탕으로 도시화와 기상변동의 관계를 지속적으로 모니터링 할 필요가 있는 지역을 식별하는 것이다. 이를 위해 본 연구는 경기북부 지역의 시간별 대기 냉각 특성을 분석하고, Lee *et al.*(2008)이 파악한 도시화 지역의 시간별 대기 냉각 특성에 대한 이해를 토대로, 경기북부 지역에서 도시화의 영향으로 기온변화가 나타나는 지역을 분석하였다.

2. 연구 방법 및 자료

1) 연구진행 절차 및 방법

본 연구에서는 경기북부 지역에서 대기 냉각 특성을 강화도의 대기 냉각 특성과 비교·분석하여 경기북부 지역에서 도시화에 의해 기온변화의 영향을 받고 있는 지역을 식별하였다. 지금까지 기상변동에서 도시화의 영향을 검출한 많은 연구들이 도시와 비도시의 차이를 이용하곤 하였다(Kim

et al., 1999; Ko and Lee, 2012). 이에 본 연구에서도 강화도의 관측 지점을 비도시 지역으로 선정하고 연구지역과의 비교지역으로 선정하였다. Park *et al.*(2013)에 의하면 강화도의 장기 기온 변화는 경기북부의 일부를 포함하는 중부서안 기후지역에서 비도시 지역의 특성을 보였기 때문이다¹⁾.

대기 냉각 특성은 야간 대기 냉각과 대기 냉각률을 사용하였다. 야간 대기 냉각은 10년 동안의 시간별 평균기온을 평균한 후 야간 시간의 시간별 기온 하강 특성을 분석한 결과이다. 본 연구에서 야간은 일몰 1시간 이후부터 자정까지로 정의하였다. 일몰 계산기(<http://www.weatheri.co.kr>)에 의하면 강화와 경기북부에서 일몰이 나타나는 시각은 여름철에 평균 19시이며, 겨울철에는 평균 17시이었다. 따라서 여름철의 야간 대기 냉각은 20시부터 24시까지의 변화를 분석하였으며, 겨울철에는 18시부터 24시의 변화를 분석하였다.

대기 냉각률(Cooling rate, CR)은 시간당 평균적인 기온 하강 정도를 나타내며(단위는 $^{\circ}\text{C/hr}$), 식(1)을 토대로 계산하였다. 여기에서 T_i 는 시간별 평균기온이며 n 은 앞 시간에 비해 기온이 냉각되기 시작하여 시간별 일 최저기온에 도달하기까지 걸리는 시간이다. 대기 냉각률은 이 시간 동안 앞 시간과의 기온 차이($T_i - T_{i-1}$)의 합계를 n 으로 나눈 결과이다.

$$CR = \frac{\sum_{i=1}^n T_i - T_{i-1}}{n}, \text{ where } T_i < T_{i-1} \quad (1)$$

본 연구에서 기온 자료는 고기압이 지배적으로 작용하고, 종관적인 영향이 작은 날의 자료만을 사용하였으며, 이를 위해 일 최고기온과 다음 날 일 최저기온의 차이가 10°C 이상인 날의 자료만을 사용하였다. Lee *et al.*(2008)은 이와 같은 기온 차이 외에도 운량이 30% 미만인 날을 종관적인 영향이 작은 날로 선정한 바 있다. 하지만 본

연구에서는 운량을 측정하지 않는 자동기상관측망(Automatic Weather System, AWS)의 기온 자료도 사용하기 때문에, 기온 차이만을 이용하여 연구에 사용할 자료를 선정하였다.

본 연구에서는 대기 냉각 특성을 여름과 겨울철로 나누어 분석하였다. 도시화의 영향은 계절에 따라 그 강도가 다르기 때문이다(Koo *et al.*, 2007; Lee and Heo, 2011; Park *et al.*, 2013). 본 연구에서 여름철은 6~8월이고 겨울철은 12~2월로 하였다.

한편 본 연구에서는 경기북부에 위치한 지점들과 강화 지점의 대기 냉각 특성을 비교한 후, 그 결과를 각 시·군의 도시화 현황과 비교하여 고찰하였다. 도시화 현황은 통계연보의 지목 중 시가화·건조지역으로 분류할 수 있는 있는 지목으로부터 획득하였다. 시가화·건조지역에 해당하는 지목은 대지, 광천지, 주유소용지, 공장용지, 창

고용지, 주차장, 도로, 철도용지, 제방, 종교용지, 사적지, 수도용지, 잡종지로 간주하였다(Park and Kim, 2014a; Park and Kim, 2014b).

2) 연구지역 및 기상자료

본 연구의 연구지역은 경기북부에 위치한 총 7개 시·군이며²⁾ 고양시, 동두천시, 양주시, 연천군, 의정부시, 파주시, 포천시가 해당된다. 본 연구에서 대기 냉각 특성을 분석하기 위해 사용한 기온 자료는 기상청에서 운영하는 기상관측지점으로부터 획득하였으며, 경기북부에 위치한 18개 지점³⁾과 강화도에 위치하는 한 개의 지점으로부터 획득하였다(Figure 1). 이 중 16개 지점이 AWS이고 3개 지점이 종관기상관측장비(Automated Synoptic Observing System, ASOS)이다. 연구에 사용한 기상자료는 2003년 1월부터 2012년 12월(10년)에 관측한 시간별 평균기온이다.

Figure 1. Study area and 19 weather stations used in this study.

Table 1. 19 weather stations used in this study.

Administration area	Weather Station	Latitude (N)	Longitude (E)	Elevation (m)	Observation start	Station number
Ganghwa-gun	Ganghwa	37°42′	126°26′	46.2	1992	201
Goyang-si	Goyang	37°38′	126°53′	100.0	1993	540
	Neunggok	37°37′	126°47′	11.5	1995	589
Dongducheon-si	Dongducheon	37°54′	127°03′	112.5	1998	098
Yangju-si	Yangju	37°49′	126°59′	85.2	1998	598
Yeoncheon-gun	Baekhak	38°01′	126°55′	38.0	2003	692
	Sinseo	38°10′	127°06′	82.2	2000	538
	Jungmyeon	38°08′	127°01′	54.7	2001	499
	Cheongsan	38°01′	127°04′	51.9	1998	652
Uijeongbu-si	Uijeongbu	37°44′	127°04′	72.0	1998	532
Paju-si	Geumchon	37°45′	126°47′	56.0	2002	506
	Dorasan	37°54′	126°42′	17.3	2002	503
	Munsan	37°53′	126°45′	29.4	2000	099
	Jeokseong	37°57′	126°55′	70.3	2002	567
Pocheon-si	Gwangneung	37°45′	127°10′	101.5	1998	599
	Idong	38°01′	127°22′	143.8	2001	539
	Ildong	37°57′	127°19′	171.7	2004	568
	Changsu	38°01′	127°08′	80.0	1998	507
	Pocheon	37°45′	126°47′	56.0	1998	504

Source: KMA, 2010

연구지역의 남서쪽은 서해안에서 가까운 지역과 한강과 임진강, 그 지류를 따라 발달한 평야지역으로 이루어져 있다. 이에 비해 연구지역의 북동쪽은 광주산맥의 서쪽지역에 해당하며 북동~남서방향의 변성암 산지와 화강암 침식곡이 나타나고 있다. 따라서 연구지역의 지형고도는 북동쪽에서 남서쪽으로 오면서 대체로 낮아지고 있다. 아울러 남서쪽은 서해안에 가까워 해양의 영향을 상대적으로 많이 받고 있다. 본 연구에서 사용한 기상관측지점은 대부분 해발고도 100m 내에 위치해 있으며 일동(171.7m), 이동(143.8m), 동두천(112.5m)이 상대적으로 높은 지대에 위치해 있다(Table 1).

3. 야간 대기 냉각 특성

경기북부의 18개 지점과 강화의 야간 대기 냉각 특성을 비교한 결과 연구지역의 야간 대기 냉각 특성은 세 가지 유형으로 분류할 수 있었다(Table 2). 첫 번째(A)는 여름철과 겨울철 야간 기온이 비도시 지역인 강화보다 낮게 나타나는 유형이다. 이 유형에 해당하는 지점으로는 광릉, 신서, 이동이 있었다. 두 번째(B)는 여름철에는 강화에 비해 야간 기온이 높게 나타났으나, 겨울철에는 강화에 비해 낮게 나타나는 유형이다. 이 유형에 해당하는 지점은 고양, 금촌, 도라산, 동두천, 문산, 백학, 양주, 일동, 적성, 중면, 창수, 청산, 포천이었다. 세 번째(C)는 여름철과 겨울철에 모두 비

Table 2. Night air cooling characteristic classification in the northern area of Gyeonggi Province by comparing air cooling of the Ganghwa weather station.

Class	Description	Weather station
A	The night air temperature is lower than that of Ganghwa in both summer and winter.	Gwangneung, Sinseo, Idong
B	The night air temperature is higher than that of Ganghwa in summer, while it is lower than that of Ganghwa in winter.	Goyang, Geumchon, Dorasan, Dongducheon, Munsan, Baekhak, Yangju, Ildong, Jeokseong, Jungmyeon, Changsu, Cheongsan, Pocheon
C	The night air temperature is higher than that of Ganghwa in both summer and winter.	Neunggok, Uijeongbu

도시 지역인 강화보다 야간 기온이 높게 나타나는 유형이며, 능곡과 의정부가 이에 해당하였다.

위와 같은 특성은 각 지점에 대한 기온의 일변화를 그래프로 작성하고 야간 시간대의 기온 변화 양상을 관찰하여 확인할 수 있었다. 19개 지점에 대한 여름철과 겨울철 기온의 일변화 그래프는 Appendix figure 1과 2에서 확인할 수 있다. Figure 2는 A 유형의 광릉, B 유형의 포천, C 유형의 의정부 지점에 대한 기온의 일변화 그래프이다. 이 지점들은 각 유형의 대기 냉각 특성이 뚜렷하게 나타난 대표지점들이다.

광릉의 여름철 기온의 일변화를 살펴보면, LST(Local Standard Time) 5시에 강화보다 낮은 기온을 보이다가 6시 이후부터 15시까지 강화보다 급격한 기온 상승을 보인다. 강화가 14시에 25.8℃로 일평균기온의 최고값을 나타낼 때, 광릉은 이보다 한 시간 뒤인 15시에 최고값을 나타내며, 27.3℃로 강화에 비해 높은 값을 나타냈다. 15시 이후에는 광릉이 강화보다 급격한 기온 하강을 보이며 야간에는 강화보다 낮은 기온을 유지하였다. 겨울철에도 기온의 일변화 특성은 여름철과 유사한 패턴을 보였다. 오전 8시 이후에 광릉의 기온은 빠른 상승을 보이며 최고값을 보이는 15시에 도달했을 때에 광릉의 기온은 강화에 비해 높은 기온을 보였다. 광릉과 강화의 기온이 최

고값을 보였을 때인 15시에 강화는 2.0℃, 광릉은 2.5℃를 나타냈다. 그 이후에는 광릉이 강화보다 급격한 기온 하강을 보이며 야간에는 강화보다 낮은 기온을 유지한다.

포천과 강화의 여름철 기온은 8시까지 비슷한 상승세를 보이다가 9시부터 포천의 기온이 강화의 기온에 비해 빠른 상승을 나타낸다. 야간에도 역시 포천의 기온이 강화의 기온보다 높게 나타나 도시화의 영향이 있는 것으로 의심된다. 그러나 겨울철에 포천의 기온은 18시 이후에 급격히 하강하여 야간에는 강화에 비해 낮게 나타났다.

의정부와 강화는 여름철에 10시까지 비슷한 기온 상승률을 유지하다가 11시부터는 의정부의 기온상승률이 강화를 앞서기 시작한다. 의정부의 일최고기온은 강화에 비해 한 시간 뒤인 15시에 나타나며 27.6℃를 보였다. 15시 이후부터 의정부의 기온은 하강하기 시작하지만 야간에도 강화보다 높은 값을 유지하고 있다. 겨울철에는 13시까지 의정부와 강화의 기온 변화 양상이 매우 유사하다. 의정부와 강화의 일최고기온은 15시에 동일하게 나타나며, 이때 의정부는 2.6℃로 강화보다 높은 값을 보인다. 겨울철 의정부의 기온은 15시 이후부터 하강하기 시작하며, 야간에도 강화에 비해 높은 값을 유지하고 있다. 의정부의 기온은 여름철과 겨울철에 모두 일최저에 도달했을 때

Figure 2. Comparison of average of hourly mean air temperatures (2003~2012).

에도 강화에 비해 높은 값을 나타내고 있다.

Koo *et al.* (2007)과 Lee and Heo (2011)에 의하면, 도시화의 영향은 여름에 비해 겨울철에 높게 나타난다. Lee *et al.* (2008)은 그 이유에 대하여 여름철에는 도시의 인공열 에너지가 태양복사에너지에 비해 작기 때문에 인공열의 의미가 축소되지만 겨울철에는 상대적으로 태양복사에너지의 강

도가 감소되기 때문에 인공열 에너지의 강도가 강화되기 때문이라고 하였다. 이에 비추어 광릉은 계절에 상관없이 여름철과 겨울철에 모두 강화보다 낮은 야간기온을 보였으므로 인공열에 의한 도시화의 영향이 없는 지역이라고 판단된다.

이에 비해 포천은 여름철 야간 대기 냉각 특성에서 도시화의 영향이 관찰되지만 겨울철에는 관

찰되지 않았다. 따라서 도시화가 기온에 뚜렷한 영향을 줄 만큼 진행되지 않았을 가능성이 있다. 다만, 포천과 강화의 겨울철 기온은 도시화에 의한 인공열의 차이보다 내륙과 해양의 비열로 인한 영향의 차이가 더욱 크게 반영된 결과일 수 있다.

강화는 해양의 영향을 많이 받아 기온의 일변화가 작는데 반해 포천 등은 내륙의 영향을 많이 받아 일변화가 크게 나타난 것일 수 있기 때문이다. 아울러 포천에서 발생하는 도시화의 영향이 겨울철에 비열 차이로 인해 발생하는 영향보다 작은 것으로도 생각할 수 있다. 따라서 포천이 포함되는 B 유형의 지점들에서 도시화의 영향이 상대적으로 강하게 나타나는 지역을 확인하기 위해서는 내륙에 위치한 지점을 비교 지점으로 선정하여 추가 연구를 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다. 다만 본 연구는 경기북부 지역에서 기온이 도시화의 영향을 상대적으로 강하게 받는 지역을 식별하는데 있으므로 이에 대한 추가 분석을 수행하지 않았다.

한편 광릉, 포천, 의정부에서 오전의 기온 상승이 강화에 비해 빠르게 나타난 것은 도시화에 의

한 인공열 방출 보다는 해양과 내륙의 비열 차이로 판단된다. Lee *et al.* (2008)에 의하면 도시화에 의한 인공열 방출은 오전에 비하여 오후에 상대적으로 크게 나타났으며, 도시지역과 비도시지역의 오전 기온 차이는 태양복사에너지의 차이에 의해 발생하는 것으로 보였다. 본 연구에서 역시 오전의 빠른 기온 상승은 인공열에 의한 방출 보다는 해양과 내륙의 비열 차이로 발생했을 것으로 판단된다.

하지만 C 유형인 의정부에서 야간의 기온이 강화에 비해 높았던 것은 도시화에 의한 인공열 방출 때문인 것으로 이해된다. 의 정부는 강화에 비해 내륙에 위치해 있어 비열이 상대적으로 작다. 그럼에도 불구하고 의정부에서는 강화에 비해 야간의 기온이 더디게 하강하였다. 이는 도시화로 인한 인공열 방출이 기온 하강에 영향을 주었기 때문으로 판단된다. 이와 같은 경향은 의정부와 같은 C 유형에 속한 능곡에서도 관찰할 수 있다 (Appendix figure 1과 2).

Figure 3. Average air cooling rate in the northern area of Gyeonggi Province (Northern G.) and Ganghwa weather station (2003~2012).

4. 대기 냉각률의 특성

경기북부의 여름철 평균 대기 냉각률은 모든 지점에서 강화에 비해 큰 것으로 나타났다(Figure 3). 경기북부에서 여름철 평균 대기 냉각률이 가장 작은 지점은 도라산으로 0.44°C 이었으며, 가장 높은 지점은 광릉으로 0.61°C 이었다. 강화의 여름철 평균 대기 냉각률은 0.37°C 로 경기북부의 모든 지점보다 작았다.

경기북부의 겨울철 평균 대기 냉각률 역시 모든 지점이 강화에 비해 큰 값을 보였다. 겨울철 평균 대기 냉각률이 가장 작은 지점은 능곡과 도라산으로 0.48°C 를 보였다. 그 값이 가장 큰 지점은 백학으로 0.73°C 를 나타냈다. 강화의 겨울철 평균 대기 냉각률은 0.45°C 이었다.

이와 같이 강화의 평균 대기 냉각률은 계절에 상관없이 경기북부의 모든 지점보다 작게 나타났다. 이는 내륙에 위치한 경기북부의 지점들이 해양의 영향을 상대적으로 많이 받는 강화에 비해 일최고기온이 높았기 때문인 것으로 판단된다. 능곡과 의정부에서 야간에 기온이 강화에 비해 높은 것으로 나타났지만 일최고기온이 강화에 비해 높기 때문에 평균 대기 냉각률 역시 큰 것으로 판단된다. 이에 따라 경기북부의 평균 대기 냉각률을 강화와 비교했을 때 도시화의 영향을 받은 지역을 식별하기 쉽지 않았다.

한편 Upmanis *et al.* (1998)와 Kwon and Lee (2001)의 연구결과에 의하면 토지피복에 따른 대기 냉각률의 차이는 일몰 전과 후 3시간 사이에 가장 크다. 이에 경기북부의 18개 지점과 강화의 일몰 전·후 3시간 동안의 평균 대기 냉각률을 비교·분석하였다(Figure 4). 그 결과 평균 대기 냉각률의 특성은 계절에 따라 다르게 나타났다.

여름철은 평균 대기 냉각률의 최대 값이 나타나는 시각이 일정하지 않다. 강화는 일몰시각인 19

시에 평균 대기 냉각률의 최대 값을 보였지만, 경기북부 지역은 도라산을 제외한 모든 지점에서 일몰 후 1시간 뒤인 20시에 평균 대기 냉각률의 최대 값을 보였다. 강화의 여름철에 평균 대기 냉각률의 최대 값은 1.05°C/hr 이었으며, 그 값이 강화보다 작은 지점은 능곡(1.04°C/hr), 동두천(1.04°C/hr), 의정부(1.02°C/hr)로 나타났다.

이에 비해 겨울철에는 평균 대기 냉각률의 최대 값이 모든 지점에서 일몰 후 1시간 뒤인 18시에 일정하게 나타났다. 강화에서 평균 대기 냉각률의 최대 값은 1.42°C/hr 이었으며, 그 값이 강화보다 작은 지점은 금촌(1.17°C/hr), 능곡(1.27°C/hr), 도라산(1.25°C/hr), 동두천(1.31°C/hr), 의정부(1.08°C/hr), 일동(1.41°C/hr), 포천(1.40°C/hr)으로 나타났다. 겨울철에 경기북부 지역에서 시간에 따른 냉각률의 차이가 상대적으로 큰 지점으로는 광릉, 백학, 신서, 이동, 적성이 있었다. 이 지점들에서 평균 대기 냉각률의 최대 값은 광릉(2.36°C/hr), 백학(2.03°C/hr), 신서(2.12°C/hr), 이동(1.88°C/hr), 적성(1.61°C/hr) 순으로 나타났다. 이들 지점에서 그 값이 상대적으로 크게 나타난 것은 앞서 언급한 것과 같이 내륙의 영향을 많이 받았기 때문인 것으로 이해된다.

본 연구에서 경기북부의 18개 지점 중 강화의 평균 대기 냉각률과의 차이가 다른 지점은 관찰되지 않았다. 그러나 일몰 전·후에 나타나는 경기북부의 평균 대기 냉각률의 최대 값을 강화의 그 값과 비교했을 때 능곡, 동두천, 의정부에서는 다른 지점들과 다른 양상이 관찰되었다. 이 세 지점만 평균 대기 냉각률의 최대 값이 여름철과 겨울철에 모두 강화보다 작게 나타나고 있었다. 이 지역에서는 도시화의 영향으로 발생한 인공열에너지가 지구복사 냉각을 저해하고 있는 것으로 판단된다.

Figure 4. Average air cooling rate before and after sunset (2003~2012).

5. 대기 냉각 특성의 고찰

경기북부와 강화의 야간 대기 냉각 특성과 대기 냉각률의 특성을 비교하였을 때 여름철과 겨울철

대기 냉각 특성에서 도시화의 영향을 받고 있을 것으로 의심되는 지역은 능곡과 의정부이었다. 이에 따라 두 지역의 도시화 특성을 다른 지역과 비교해 보았다.

Figure 5는 2003~2012년 사이에 연구지역의 행정구역 평균 면적과 그 면적에 대한 시가화·건조지역의 비율을 보여주고 있다. 이를 보면 포천시의 행정구역 면적이 826.5km²로 가장 넓고 연천군이 689.6km², 파주시가 672.6km² 순으로 뒤를 이었다. 의정부시는 행정구역 면적이 81.6km²로 가장 작았다(Figure 5a). 시가화·건조지역의 비율을 살펴보면 의정부시, 고양시, 동두천시, 양주시 순으로 그 비율이 높게 나타났다. 의정부시에서 그 면적은 21.3%이었고, 고양시에서는 21.1%이었다. 포천시에서는 그 비율이 7.7%로 연구지역 중 가장 낮았다(Figure 5b).

이를 통해 알 수 있는 사실은 고양시(능곡 지점이 위치)와 의정부시(의정부 지점이 위치)의 행정구역 면적은 다른 시·군에 비해 작지만 시가화·

건조지역의 비율이 매우 높다는 점이다. 특히 의정부시의 행정구역 면적은 연구지역 중에서 가장 작지만 시가화·건조지역의 비율은 가장 높은 것으로 나타나 시가화·건조지역이 좁은 지역에 상대적으로 밀집해 있음을 알 수 있다. 고양시 역시 행정구역 면적은 연구지역에서 다섯 번째에 해당하였지만 시가화·건조지역의 비율은 두 번째로 높았다. 따라서 시가화·건조지역이 상대적으로 높은 능곡과 의정부에서 도시화의 영향이 나타났다는 것을 알 수 있다.

대기 냉각 특성에서 도시화의 영향을 받고 있는 것으로 판단되는 능곡 관측지점은 고양시에 위치해 있으며, 고양시에는 고양 관측지점도 위치해 있다. 하지만 본 연구에서는 고양 관측지점에서 능곡과 같은 도시화의 영향이 관찰되지 않았다.

Figure 5. Average area of administrations (a) and the ratio of developed area (b) between 2003 to 2012.

Figure 6. Land-cover ratio within 1 and 5km from Neunggok and Goyang weather stations.

이는 고양과 능곡 관측지점 주변의 국지적인 토지 피복의 차이에 의해 발생한 것으로 판단된다.

Park *et al.* (2013)은 온난야율과 일최저기온 0℃ 미만 일수 등의 극한기후지수가 기상관측지점 주변 1~5km 반경 내의 국지적인 도시화와 높은 상관성을 보인다고 지적한 바 있다. 이에 능곡과 고양의 1과 5km 반경의 토지피복 현황을 비교하였다 (Figure 6). 시가화·건조지역의 비율은 능곡의 1km 반경에서 약 26%이었고, 고양의 1km 반경에서는 약 15%이었다. 능곡 관측지점의 1km 반경에서 나타나는 시가화·건조지역의 비율이 고양 관측지점의 주변에 비해 약 10% 높았다. 반면 능곡 관측지점의 1km 반경에서 나타나는 산림의 비율은 고양 관측지점 주변에 비해 약 30% 낮았다. 5km 반경에서 나타나는 시가화·건조지역의 비율은 능곡 관측지점이 고양 관측지점에 비해 약 5% 높았다. 산림의 비율은 능곡 관측지점이 고양 관측지점에 비해 약 5% 낮았다. 능곡 관측지점의 주변에서 고양 관측지점의 주변에 비해 시가화·건조지역의 비율이 높고, 산림의 비율이 낮게 나타난 것은 능곡의 대기 냉각 특성에서는 도시화의 영향이 나타나는 반면 고양에서는 나타나지 않은 원인이었을 것으로 판단된다.

한편 연구지역에서는 2003년 이후 시가화·건조지역이 꾸준히 증가하고 있었다. Figure 7은 2003년부터 2012년 사이에 연구지역의 시가화·건조지역 증가 속도를 보여주고 있다. 파주시는 시가화·건조지역이 연간 3.38km²/yr 증가하는 경향을 보여 연구지역에서 시가화·건조지역이 가장 빠르게 확산되고 있는 것으로 나타났다. 다음으로는 포천시가 1.73km²/yr를 보였다. 포천시의 시가화·건조지역은 행정구역 면적에 비해 크지 않지만 지난 10년간 빠르게 증가하고 있음을 알 수 있다. 다음으로는 양주시가 1.53km²/yr, 고양시

Figure 7. The change of the developed area from 2003 to 2012.

가 $1.42\text{km}^2/\text{yr}$ 의 증가 경향을 보이고 있었다.

고양시와 파주시는 한강과 임진강 그리고 그 지류를 따라 발달한 평야에 위치해 있으며, 이 지역의 산지는 해발 100m 내외의 구릉지로 되어 있다. 평야와 구릉지는 개발이 용이한 지역으로 인식되기 때문에 언제나 개발의 압력을 받는 지역이다(Park and Kim, 2010). 이에 따라 접경지역 개발계획이 추진된 이후 이 지역에서 시가화·건조지역의 빠른 증가 추세를 보이는 것으로 판단된다. 포천시와 양주시는 내륙 산지에 위치함에도 불구하고 시가화·건조지역이 빠르게 증가하고 있다. 이는 이 지역에 북동~남서방향의 구조선을 따라 넓게 분포한 화강암 분지와 구릉성 산지 때문인 것으로 판단된다.

이와 같이 연구지역에는 큰 강과 그 지류에 발달한 평야, 낮은 구릉성 산지가 넓게 분포하고 있으며, 접경지역에 대한 개발행위의 인위적 제한을 완화함에 따라 이 지역을 중심으로 시가화·건조지역이 빠르게 증가하고 있다. 따라서 향후에는 시가화·건조지역이 빠르게 증가하고 있는 파주시와 포천시에서 역시 도시화에 의한 기온변동이 나타날 가능성이 높을 것으로 판단되므로, 이들 지역에 대한 지속적인 관심을 기울일 필요가 있을 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 경기북부 18개 지점과 강화의 대기 냉각 특성을 비교하여 경기북부에서 도시화에 의해 기상변동이 나타나고 있는 곳을 식별하였다. 본 연구에서 야간 대기 냉각 특성과 대기 냉각률에서 도시화의 영향이 상대적으로 강하게 검출된 지역은 능곡과 의정부 관측지점이었다.

경기북부 대부분의 지점에서 여름과 겨울철 대

기는 모두 강화에 비해 오전에 더 빨리 가열되고 오후에 더 빨리 냉각되는 특성을 보였다. 이에 따라 야간 대기가 강화에 비해 낮았으며, 일몰시간 전·후로 나타나는 평균 대기 냉각률의 최대 값도 강화에 비해 컸다. 이와 같은 특성은 경기북부의 관측지점들이 강화에 비해 내륙에 위치해 있으므로, 그 비열 차이에 의해 나타난 것으로 판단된다. 하지만 능곡과 의정부는 강화에 비해 내륙에 위치해 있음에도 불구하고 야간의 기온이 강화에 비해 더 높은 값을 유지하고 있었다. 아울러 능곡과 의정부에서는 일몰시간 전·후에 나타나는 평균 대기 냉각률의 최대 값도 강화에 비해 작았다. 따라서 두 지역의 대기 냉각 특성에는 내륙과 해양의 비열 차이를 극복할 만큼 도시화로 인한 인공열의 영향이 포함되어 있음을 알 수 있었다.

한편 고양시와 의정부시에서는 다른 시·군에 비해 시가화·건조지역 비율이 매우 높게 나타나고 있었다. 이는 능곡과 의정부 관측지점에서 보인 대기 냉각 특성이 도시화와 연관되어 있다는 것을 뒷받침하고 있었다. 하지만 고양시에 위치한 고양 관측지점의 대기 냉각 특성에서는 도시화의 영향이 나타나지 않았다. 이는 Park *et al.* (2013)이 제기한 도시화의 영향이 국지적인 토지피복에 의해 나타나고 있다는 것과 연관되어 있는 것으로 판단된다. 즉 동일한 행정구역 내에 있지만 능곡과 고양 관측지점 주변의 국지적인 토지피복이 상이하여 나타난 결과인 것으로 판단된다.

본 연구의 결과는 경기북부 지역에서 능곡과 의정부 관측지점 주변이 기상변동에 영향을 줄 만큼 도시화되어 있을 가능성을 시사한다. 동시에 이는 향후 도시화의 효과를 검출하는 연구에서 능곡과 의정부 관측지점을 비도시 지역으로 선정함에 있어 신중할 필요가 있다는 점도 시사한다. 두 지점을 도시화 지역으로 선정하는 것에 대한 신뢰도를 높이기 위해서는 본 연구 외에도 두 지점에서

도시화의 영향을 식별하기 위한 다양한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 두 지점에 대한 지속적인 모니터링과 기상변동 과정에 대한 연구는 경기북부에서 도시화로 인한 기상변동과 생태환경 변화를 이해하는데 시발점이 될 것으로 기대된다.

최근 경기북부에서는 파주시와 포천시에서 급격한 시가화·건조지역의 확장이 있는 것으로 파악되었다. 능곡과 의정부 관측지점 주변의 국지적인 시가화·건조지역 분포 특성을 이해하는 것은 향후 파주시와 포천시와 같이 도시화가 빠르게 진행되고 있는 지역에서 도시화로 인한 기상변동을 최소화할 수 있는 도시계획을 수립하는 데에도 도움이 될 것으로 기대된다.

사사

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

주

- 1) Park *et al.* (2013)에 의하면 1993년부터 2013년 사이에 남한의 다양한 기후지역에서 나타난 온난야율의 선형 추세와 강도는 도시화율과 높은 상관관계를 보였다. 도시화율이 높은 지점에서는 이 시기에 통계적으로 유의한 온난야율의 선형 상승추세가 있었으나 도시화율이 낮은 지점에서는 뚜렷한 추세가 없었다. 이 연구의 중부서안 기후지역에서는 서울, 인천, 수원 지역의 온난야율에서 선형 상승추세가 있었던 반면, 강화의 온난야율에서는 통계적으로 유의한 추세가 없었다. 따라서 본 연구에서는 강화 지점을 비도시 지역으로 선정하였다.
- 2) 경기북부 지역에는 김포시도 포함되며 이 지역은 접경지역이기도 하다. 하지만 본 연구에서는 김포시의 기온 자료를 획득할 수 없어 연구지역에서 제외하였다. 기상청의 2003~2012년 방재기상관측월보에 있는 전국 기상관측망의 좌표를 지도화했을 때 금곡(570번) 지점이 김포시에 위치했다. 금곡의 좌표는 위도 37°11'N, 경도 126°49'E이다.

그러나 방재기상관측월보의 주소지는 인천광역시 서구 금곡동으로 좌표와 차이를 보였다. 이에 본 연구에서는 금곡 지점이 인천에 소재했을 것으로 판단하고 연구에서는 제외하였다.

- 3) 연구지역에는 기상청에서 운영하는 기상관측망 외에도 경기도에서 운영하는 시설이 있다. 하지만 본 연구에서는 자료의 일관성을 유지하기 위해 기상청 자료만을 사용하였다.

References

- Ahn, J. -S., Hwang, J. -D., Park, M. -H. and Suh, Y. -S., 2012, Estimation of Urban Heat Island Potential Based on Land Cover Type in Busan Using Landsat-7 ETM+ and AWS Data, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 15(4), 65-77 (in Korean).
- CHA (Cultural Heritage Administration), 2007, *A basic survey report on natural heritage resources in the South-North Korea border region*, CHA (문화재청, 2007, 군사접경지역 자연유산 기초자원조사보고서) (in Korean).
- Choi, G. and Kwon, W. -T., 2005, Spatial-Temporal Patterns and Recent Changes of Tropical Night Phenomenon in South Korea, *Journal of the Korea Geographical Society*, 40(6), 730-747 (in Korean).
- Choi, G., 2010, Patterns of Strong Heat Waves within the Seoul Metropolitan Area and Its Impacts on Elderly Mortality Based on the Last 100 Year Observations, *Journal of the Korea Geographical Society*, 45(5), 573-591 (in Korean).
- Kim, K. -G., 2001, A research of evaluation and management method of inland wetland class, *Annual Report of Research in Agriculture and Life Sciences*, 5, 273-275 (in Korean).
- Kim, K. -H., Kim, B. -J., Oh, J. -H., Kwon, W. -T., and Baek, H. -J., 2000, Detection of Urbanization Effect in the Air Temperature Change of Korea,

- Journal of Korean Meteorological Society*, 36(5), 519-526 (in Korean).
- Kim, M. -K., Kang, I. -S., and Kwak, C. -H., 1999, The Estimation of Urban Warming Amounts due to Urbanization in Korea for the Recent 40 Years, *Journal of Korean Meteorological Society*, 35(1), 118-126 (in Korean).
- Kim, Y. -H., Choi, D. -Y., and Chang, D. -E., 2011, Characteristics of Urban Meteorology in Seoul Metropolitan Area of Korea, *Journal of Korean Meteorological Society*, 23(3), 257-271 (in Korean).
- KMA, 2010, Annual Climatological Report, KMA (in Korean).
- KME (Korea Ministry of Environment), 2005, *The 2nd Korean nationwide survey on natural environments* (환경부, 2005, 제2차 전국자연환경조사 (1997-2005)) (in Korean).
- Ko, M. and Lee, S., 2013, A study on the Change of Humidity by City Size in South Korea, *Journal of the Korea Geographical Society*, 48(1), 19-36 (in Korean).
- Koo, H. -J., Kim, Y. -H. and Choi, B. -C., 2007, A Study on the Change of the Urban Heat Island Structure in Seoul, *Journal of Climate Research*, 2(2), 67-78 (in Korean).
- Kwon, Y. -A. and Lee, H. -Y., 2001, Spatial Distribution of Temperature in and around Urban Parks A Case Study of around Changgyeong Palace, Changdeok Palace and Jongmyo in Seoul, *Journal of Korea Geographical Society*, 36(2), 126-140 (in Korean).
- Kwon, Y. -H. and Choi, H. -G., 2009, *The Investigating of impact of climate change on ecosystem-Focused on wetland flora*, Korea Environment Institute (권영한 · 최홍근, 2009, 기후변화가 생태계에 미치는 영향 고찰-습지식물상을 중심으로, 한국환경정책 · 평가연구원) (in Korean).
- Lee, C. -B., Kim, J. -C., and Jang, Y., 2012, A study of Urban Heat Island in Chuncheon Using WRF Model and Field Measurements, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(2), 119-130 (in Korean).
- Lee, K. -G. and Hong, W. -H., 2007, The Study on the Heat Island and Cool Island According to Trend toward Higher Temperature in Urban – Case Study of Taegu Metropolitan, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 23(8), 219-228 (in Korean).
- Lee, S. -H. and Heo, I. -H., 2011, The Impacts of Urbanization on Changes of Extreme Events of Air Temperature in South Korea, *Journal of the Korea Geographical Society*, 46(3), 257-276 (in Korean).
- Lee, S. -H. and Kim, H. -D., 2008, Effects of Regional Warming due to Urbanization on Daytime Local Circulations in a Complex Basin of the Daegu Metropolitan Area, Korea. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 1427-1441.
- Lee, S. -H., Park, M. -H., and Kim, H. -D., 2008, Study on the Variation of Nighttime Cooling Rate Associated with Urbanization, *Journal of Korean Society for atmospheric Environment* 24(1), 83-90 (in Korean).
- Moreno-Rueda, G. and Pizarro, M., 2009, Relative influence of habitat heterogeneity, climate, human disturbance, and spatial structure on vertebrate species richness in Spain, *Ecological Research*, 24(2), 335-344.
- NIMR (National Institute of Meteorological Research), 2009, *Understanding climate change 2, Climate change in the Korean peninsula: the Present and future: Focused on research performance by National Institute of Meteorological Research*, NIMR, Seoul (국립기상연구소, 2009, 기후변화 이해하기 2: 한반도 기후변화: 현재와 미래: 국립기상연구소 연구 성과를 중심으로, 국

- 립기상연구소, 서울) (in Korean).
- Park, J. -C. and Kim, J. -S., 2014a, Application and limitation of national land-cover map in land-cover change detection: A case study on Chungcheongnam-do, *Journal of the Association of Korean Photo-Geographers*, 24(1), 19-34 (in Korean).
- Park, J. -C. and Kim, J. -S., 2014b, Assessment of land-cover change accuracy with multi-temporal national land-cover maps: A case study on the Guryang-cheon watershed, South Korea, *Journal of the Korean Cartographic Association*, 14(1), 61-75 (in Korean).
- Park, J. -C. and Kim, M. -K., 2010, Analysis of Changes in Land Use of Hills Using Time Series Data, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 13(3), 102-118 (in Korean).
- Park, J., Jung, I. -W., Chang, H. and Jang, D. -H., 2012, Relationship between Population and Changes in Warmth and Coldness Indices in South Korea, *Journal of Climate Research*, 7(3), 210-225 (in Korean).
- Park, J., Lee, J., Suh, A. and Kim, M. -K., 2013, Correlation between Urbanization Rate in Local Scale and Extreme Climate Indices, *Journal of Climate Research*, 8(3), 185-201 (in Korean).
- Sa, D. -W., 2000, Protection and Management of the Korean Border Region, *Journal of Korea Environmental Policy and Administration Society*, 8(2), 35-54 (in Korean).
- Shepherd, J. M., 2005, A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future, *Earth Interactions*, 9(12), 1-27.
- Upmains, H., Eliasson, I., and Lindqvist, S., 1998, The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city(Goteborg, Sweden), *International Journal of Climatology*, 8, 681-700.
- Yoon, Y. -H., Bae, B. -H., Kim, W. -T., Park, B. -J., Cho, S. -M., and Cho, H. -S., 2007, Effects of Land Use Pattern on Urban Heat Island in Chungju City, *Journal of Environmental Sciences*, 16(7), 1063-1069 (in Korean).

<http://law.go.kr>

<http://www.weatheri.co.kr>

책임 편집: 허인혜

영문 교열: 조창현

Appendix figure 1. Comparison of average of hourly mean air temperatures in summer (2003~2012)

Appendix figure 2. Comparison of average of hourly mean air temperatures in winter (2003~2012)