대규모 도시 재개발에 따른 기상환경변화

김근희 · 김연희* · 구해정 · 김규랑 · 정현숙

국립기상연구소 응용기상연구과

(접수일: 2013년 11월 27일, 수정일: 2014년 2월 13일, 게재확정일: 2014년 2월 27일)

The Changes of Meteorological Environment by Urban Development

Geun-hoi Kim, Yeon-Hee Kim*, Hae-Jung Koo, Kyu-Rang Kim, and Hyun-Sook Jung

Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, Seoul, Korea

(Manuscript received 27 November 2013; accepted 27 February 2014)

Abstract Urbanization affects the local thermal environment due to the large scale land use changes. To investigate the weather environment change of large scale urban redevelopment, 9 surface temperature and humidity observations were accomplished at Eunpyeong new town area. The observation period is from March 2007 to February 2010. In the center of development area, the air temperature has increased and relative humidity has decreased, by the changes of the land cover and building construction. In the area where the green zone is maintained, air temperature and relative humidity were not changed significantly. The air temperature and relative humidity for the other development observation stations is decreased and increased, respectively. The relative temperature difference between study area and a neighboring rural location was increased during observation periods. The difference is the highest during winter. The urban-rural minimum temperature difference was increased at development area, which means that urbanization affects increasing of minimum temperature in study area.

Key words: Urbanization, urban planning, new town, thermal environment

1. 서 론

예전부터 도시환경문제는 도시화가 이루어짐과 동시에 사회문제로 제기되어 왔지만 도시개발은 도시환경을 고려하지 않고 무분별하게 발전되어 왔다. 이에 따른 도시의 환경오염이 인간들의 활동에 미치는 영향이 커짐에 따라 도시환경문제는 한층 더 고조되는 한편 도시기후변화에 대한 관심과 더불어 기상환경영향평가에 대한 관심 또한 점차 높아지고 있는 실정이다. 도시의 지속적인 발달은 도시 인구 집중화 및 도시 지표 및 토지이용 등의 변화를 심각하게 발생시키고 있다. 이러한 인공적인 개발로 인하여 도시의 내

외적 경관변화 뿐만 아니라 지형 및 기온상승, 바람장의 변화 그리고 대기오염 물질의 증가 등 여러 가지 요소가 복합적으로 도시지역의 국지기후 변화를 초래하게 된 것이다.

대규모 토지이용도 변경이 도시 기상환경에 미치는 영향을 분석하는 많은 연구가 있었다. 이러한 도심 지역의 환경변화의 분석을 위해 기온, 상대습도, 풍속, 풍향, 강수량 등의 기상요소를 이용한 많은 연구들이 수행되었다(Landsberg, 1981; Honjo *et al.*, 2002; Ren *et al.*, 2008; Saaroni and Ziv, 2010). 또한 도심하천복원으로 인한 영향으로 순복사량에 대한 현열의 비율이 줄어들고 기온의 저감효과가 있었다(Kim *et al.*, 2008). Lengfeld and Ament(2012)은 토지이용도와 풍속 그리고 여러 환경조건이 기온, 비습, 지표온도에 미치는 영향을 분석하였다.

도시화를 평가하는 방법으로 주로 도시열섬강도(Urban Heat Island Intensity)가 쓰인다. 일반적으로 도

*Corresponding Author: Yeon-Hee Kim, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, 45 Gisaengcheong-gil, Dongjak-gu, Seoul 156-720, Korea.
Phone : +82-70-7850-6804, Fax : +82-2-834-5922
E-mail : yeonheekim@korea.kr

시열섬강도는 도시와 교외 지역의 지표 기온 차이로 정의된다. 도시열섬강도는 도시의 크기, 도시의 에너지 소비량, 지리적 위치, 월, 계절, 종관 기상 조건 등 많은 요소들에 영향을 받는다(e.g., Oke, 1982; Yague *et al.*, 1991; Montavez *et al.*, 2000). Chow and Svoma (2011)는 도시열섬강도에서 교외지역의 정의가 분명하지 않은 문제점을 해결하기 위해 기온의 증가율과 감소율을 이용하여 도시화 효과를 설명하기도 했다. 하지만, 대부분 수십 년간의 기상자료를 바탕으로 장기간의 변화를 살펴보는 연구가 많았다.

대규모 지표 형질의 변화가 있는 도시 지역에서의 기상환경영향평가를 위해서는 우선 정밀한 지표환경 분석이 수행되어야 한다. 그러기 위해서는 도시는 물론 그 주변 지역에 이르기까지 조밀한 기상관측망이 필요하다. 종래에는 지상의 고정기상 관측 자료를 토대로 기상현상을 규명하여왔으나 국내의 경우 기상관측망의 밀도가 도시지역의 기상 특성을 파악하기에 충분한 만큼 조밀하지 못한 실정에 있다. 또한 대부분의 기상관측소 위치가 도심과 산업시설 등으로부터 떨어져 있고 시가지보다 높은 해발고도에 자리 잡고 있음으로 관측지점의 기온이 갖는 지역적 대표성이 문제가 되고 있다. 이에 대규모 개발 지역인 은평구 뉴타운에 조밀한 온습도 관측망을 구축하여 재개발 전·후 기상환경을 관측하였고 이를 통해 도시 재개발이 국지기후에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

2. 은평뉴타운 개발 사업

은평구 뉴타운 개발 지역은 1971년부터 30년 이상 건축 제한으로 개발이 되지 않은 곳이었다. 서울시는 은평구 지역을 신시가지형 시범 뉴타운으로 선정하고, 지역간 격차의 해소, 난 개발 방지, 주택문제 해결, 교육환경의 격차 해소, 일자리 창출 및 경기부양 효과를

를 도모하기 위하여 2002년 10월부터 2011년 10월까지 전체 면적 3,492,421 m²에 대하여 주택건설을 위주로 하는 대규모 개발 사업을 시행하였다. 개발 지역의 위치는 서울특별시 은평구 진관내·외동과 구파발동 일대이며, 북쪽으로는 창능천(약 30 m의 폭)이 동서로 뻗어 흐르고 서쪽에는 남북으로 뻗어 있는 1번 국도가 지나고 있다. 동쪽은 북한산 국립공원이 위치해 있으며 남쪽으로는 서울시 시내가 시작된다. 전체 개발 지역은 다시 3개의 지구로 나뉘어져 있다. 1지구는 진관내동 지역이 해당되는데 창능천을 북쪽 경계로 하고 있어 전체 개발 지역에서 가장 북쪽에 위치하고 있다. 2002년부터 2008년까지가 1지구의 개발 사업기간으로 되어 있다. 2지구는 대부분 진관외동지역에 하며 전체 개발지역에서 남쪽에 위치해 있고 1지구와의 사이에는 진관근린공원을 두고 있다. 2지구의 개발 사업기간은 2004년부터 2009년까지이다. 3지구는 구파발동과 진관외동으로 되어 있는데 서쪽과 동쪽 지역으로 나뉘어져 그 사이에 2지구가 있다. 3지구의 서쪽은 1번 국도가 지나가고, 동쪽은 북한산 자락으로 연결된다. 3지구의 개발 사업기간은 2005년부터 2011년까지이다. Figure 1은 은평뉴타운 지역 개발 전과 개발 후의 항공사진이다.

3. 관 측

2007년 3월부터 은평구 뉴타운 개발 지역 내 9개 지점을 정하고 디지털 온습도계(3641-20, Hioki)를 이용하여 기온 및 상대습도를 관측하였다. 관측기기의 자세한 설명은 Table 1에 나타내었다. 각 지점들의 특징을 살펴보면 P1, P4, P5, P7 지점은 종교지역에 설치되어 상대적으로 다른 지점보다 식생의 비율이 높다. P2, P3 지점은 개발 전에는 여러 동의 비닐하우스로 이루어진 원예단지가 조성되었던 곳이었다가 개발이 진행되면서 도로와 인접하여 가장 큰 변화가 예

Fig. 1. The aerial photograph (a) before (2002) and (b) after the construction (2010).

Table 1. Specifications of 3641-20, Hioki temperature/humidity sensor.

	Temperature	Humidity
Range	-20~70°C	0.0~100.0%
Accuracy	± 0.5°C	± 5%
Response time	100 s	300 s

Table 2. List of observation site information.

Site	Name	Position
P1	관음사	N37°38'28.8" E126°56'5.56"
P2	교각 P34	N37°38'32.2" E126°55'14.9"
P3	교각 P46	N37°38'24.6" E126°55'13.6"
P4	홍창사	N37°38'14.0" E126°55'02.1"
P5	구파발교회	N37°37'57.8" E126°55'25.7"
P6	은평메디텍고등학교	N37°37'55.7" E126°55'54.1"
P7	홍덕사	N37°38'13.1" E126°56'13.6"
P8	은평노인복지회관	N37°37'44.9" E126°55'53.7"
P9	은평구민체육센터	N37°37'40.7" E126°55'31.8"

상되는 지점이다. P6, P8, P9 지점은 주변에 식생보다 높은 건물이 있고, 개발 지역과 10 m 이내에 위치해

있다(Fig. 2). Table 2에 각 지점의 정보를 표시하였다. 자료는 15분 간격으로 관측되었다. 분석에 사용된 자료는 2007년 3월부터 2010년 2월의 자료를 사용하였고 수집율이 90% 미만인 자료는 분석에서 제외시켰다. 각 연도별 계절의 연속성을 고려하기 위해 2007년은 2007년 3월~2008년 2월, 2008년은 2008년 3월~2009년 2월, 2009년은 2009년 3월~2010년 2월로 관측자료를 구분하였다.

4. 결 과

4.1 은평뉴타운 내 기온 및 상대습도 변화

각 지점의 기온과 상대습도의 변화를 살펴보기 위해 2007년에서 2009년의 연평균 기온 및 상대습도를 Table 3과 Table 4에 나타내었다. 2009년과 2007년의 기온차이를 보면 기온이 증가한 지점은 P2, P3, P6, P9 4개 지점이었고, 기온이 감소한 지점은 P1, P4, P5, P7, P8 지점이었다. 기온이 가장 많이 상승한 지점은 P6 지점으로 약 1.37°C 상승하였다. 상대습도의 경우, 기온이 증가한 지점들은 상대습도가 감소하였고, 기온이 감소한 지점들은 상대습도가 증가하였다. 상대습도가 가장 많이 감소한 지점은 P3 지점과 P2 지점

Fig. 2. Distribution of meteorological observation sites in the Eunpyeong experiment area (○: non-development area, □: development area).

Table 3. The annual averaged temperature at 9 sites.

Temp. (°C)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
2007	11.54	11.65	11.38	10.60	11.17	11.58	11.32	12.14	11.46
2008	11.76	12.81	12.75	11.11	11.76	12.47	12.11	12.26	12.27
2009	11.02	11.96	12.23	10.48	11.08	12.95	11.26	11.52	11.68
2009-2007	-0.52	0.31	0.85	-0.12	-0.09	1.37	-0.06	-0.62	0.21

Table 4. The annual averaged relative humidity at 9 sites.

RH (%)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
2007	78.40	76.94	76.42	83.69	80.00	73.53	75.00	76.84	75.81
2008	78.01	71.90	73.44	83.99	80.15	71.94	73.76	75.98	74.21
2009	79.87	70.86	69.62	85.39	81.58	73.16	76.63	78.00	74.92
2009-2007	1.48	-6.07	-6.80	1.69	1.58	-0.37	1.62	1.16	-0.89

으로 원예단지에서 도로로 토지피복의 변화로 인한 결과로 보여진다. 개발중심지인 지점은 기온은 증가하고 상대습도는 감소하고 있었으며, 상대적으로 개발외곽지역에 위치한 지점들은 기온은 감소하고 상대습도는 증가함을 알 수 있다.

2007년과 2009년의 9개 지점 기온편차 공간분포를 비교해보았다(Fig. 3). 주변보다 높은 곳의 등치선은 실선으로 주변보다 낮은 곳의 등치선은 점선으로 나타내었다. 개발중심지역의 기온은 상대적으로 높게 나타나고 그와 반대로 개발외곽지역의 기온은 낮게 나타났다. 2007년과 2009년을 비교해보면 기온 등치선이 점점 조밀해지고 있다. 이는 개발이 진행됨에 따라 기온의 변동폭이 커지는 것을 나타낸다.

각 지점 간의 특징을 자세히 살펴보기 위해 개발중심지역과 개발외곽지역으로 나누고, 개발중심지역은 주변 환경이 도로인 지점과 그렇지 않은 지점으로 나누어 살펴보았다(Fig. 4). 개발외곽지역은 P1과 P7 지점, 개발중심지역이면서 도로의 영향이 큰 지점은 P2와 P3, 개발중심지역이면서 도로의 영향이 적은 P6과 P9 지점으로 2지점씩 선정하였다. P1지점은 지점들 중 녹지의 비율이 높은 곳으로 2007년 -0.19°C , 2008년 -0.33°C , 2009년 -0.36°C 로 기온편차가 주변보다 낮아지는 추세를 보이고 있다. P7 지점의 평균기온편차는 2007년에 0.0°C , 2008년에 $+0.01^{\circ}\text{C}$, 2009년에 -0.12°C 로 관측기간 동안 거의 온도 변화가 나타나지 않았다. P1과 P7 지점 모두 상대습도는 약한 하강 추세를 보이고 있다. P6과 P9는 개발중심지에 위치한 지점으로 기온편차가 점차 증가하여 2007년에 비해 2009년에 각각 0.31°C , 0.15°C 상승하였다. 즉, 기온은 높아지고 상대습도는 낮아지는 추세를 보였다. P2와 P3 주변은 원래 원예 단지였다가 공사가 시작되면서 급격한 토지피복의 변화가 일어난 지역이다. 그로 인

해 $0.3\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 의 기온편차 증가를 보였으며, 주변환경의 변화로 인해 개발 기간 동안 상대습도편차도 약 $5\sim 6\%$ 하강하였다. 즉, 토지이용도에 따라 기상환경에 미치는 영향이 다를 것을 보여주었다.

4.2 교외 지역과의 기온 변화

은평뉴타운 지역 내의 주변환경에 대한 변화 뿐만 아니라 교외지역과 은평뉴타운 지역의 기온차이를 비교하였다. 교외지역은 은평뉴타운 지역에서 약 5 km 떨어진 고양 AWS 지점으로 선정하였다. 도시열섬강도는 일반적으로 도시지역과 교외지역의 기온차이로 나타내어진다. Figure 5는 2007년 3월부터 2010년 2월까지 3년간의 은평뉴타운 9개 지점을 평균한 기온과 고양지점의 기온차이를 월별로 그린 그래프이다. 도시열섬강도는 개발초기인 2007년에 약 0.1°C 로 고양 AWS지점과 큰 차이를 보이지 않다가, 2008년에 0.47°C , 2009년에 0.46°C 로 도시열섬강도가 증가추세에 있음을 확인할 수 있다. 그 증가율은 $0.53^{\circ}\text{C}/\text{year}$ 이다. 도시열섬강도의 계절효과를 보기 위해 월별로 평균을 내어 살펴보았다(Fig. 6). 여름철인 7, 8월에 도시열섬강도는 0.1°C 이하로 가장 약하게 나타나고, 10월에 약 0.5°C 로 가장 강하게 나타났다.

Figure 7은 2007, 2008, 2009년 은평뉴타운 지역의 도시열섬강도 일변화를 나타낸 것이다. 2007, 2008, 2009년 모두 12시에 도시열섬강도가 가장 낮아 교외지역보다 기온이 더 낮게 나타났다. 야간에 주로 도시열섬강도는 강하게 나타났으며 오전 6, 7시에 가장 큰 강도를 보였다. 2007~2009년 동안 도시열섬강도는 모든 시간대에서 증가하였으며 하루 중 최대도시열섬강도는 2007년에 0.87°C , 2008년에 0.94°C , 2009년에 1.52°C 로 나타났다.

앞서 Fig. 4에서 나눈 분류대로 3그룹으로 나누어

Fig. 3. The spatial distribution of hourly mean air temperature for each 6 hours in 2007 and 2009. The contour interval is 0.2°C.

Fig. 4. The time series of air temperature and relative humidity deviation at P1, P7 (left), P6, P9 (middle) and P2, P3 (right).

Fig. 5. The time series of monthly averaged temperature deviation between Eunpyeong and Goyang from Mar 2007 to Feb 2010.

지점별 도시열섬강도를 살펴보았다(Fig. 8). 개발 외곽 지역인 P1과 P7 지점의 기온 증가율은 $0.28^{\circ}\text{C}/3\text{year}$, $0.49^{\circ}\text{C}/3\text{year}$ 로 나타났다. 개발중심지에 위치한 P6, P9, P2, P3 지점의 기온증가율은 $0.90^{\circ}\text{C}/3\text{year}$, $0.70^{\circ}\text{C}/3\text{year}$, $0.81^{\circ}\text{C}/3\text{year}$, $0.78^{\circ}\text{C}/3\text{year}$ 로 개발 외곽 지역에 위치한 지점들보다 증가율이 크게 나타났다. 개발중심지 중에서도 도로의 영향이 큰 P2와 P3 지점은 여름에 도시열섬강도가 크게 나타났고 최대 약 2°C 정도였다. 이는 도로의 강한 복사열의 영향으로 보여진다.

다음으로 9개 지점과 고양 AWS의 최고기온과 최

Fig. 6. The monthly variation of the temperature deviation between Eunpyeong and Goyang.

저기온의 차이를 분석하였다(Fig. 9). 최고기온차는 P2, P3 지점이 증가추세가 뚜렷하며 P6, P9 지점은 거의 변화가 없었다. 최저기온차는 P6, P9 지점의 증가추세가 가장 컸으며 P2, P3 지점 또한 증가 추세에 있다. 이러한 최저기온차이의 증가는 도시화에 의한 결과 중 하나로 보여진다(Martinez *et al.*, 1991; Unger, 1996).

5. 결 론

대규모 재개발 지역인 서울 은평구 뉴타운 개발 지역에 관측망을 구축하고 2007년 3월부터 2010년 2월까지 9개 지점에서 기온 및 상대습도를 관측하였다.

Fig. 7. The hourly averaged urban heat island intensity during 2007~2009.

이 관측자료를 이용하여 도시개발이 기상환경에 미치는 영향을 분석하였다. 연구지역은 대규모 토지이용도의 변화로 분석기간 동안 기온과 상대습도의 변동폭이 점차 커지고 있었다. 뉴타운 지역 내의 기온과 상대습도의 변화는 크게 개발중심지와 외곽지역으로 구분하여 설명할 수 있다. 개발과정으로 인해 토지피복 및 건물의 변화가 생긴 지역은 기온은 높아졌고, 반대로 상대습도는 낮아짐을 확인하였다. 외곽지역에 위치한 지점들은 상대적으로 개발의 영향은 적고, 식생의 영향으로 개발중심지역만큼 기온과 상대습도의 변화가 크지 않았다. 이는 각 지점의 토지이용도에 가장 큰 영향을 받은 것으로 보여진다. 뉴타운 지역 내 지점간의 변화 뿐 아니라 교외지역과의 비교를 위해 고양 AWS지점과 기온 차이를 분석하였다. 교외지역과의 기온 차이는 2007년에 0.1°C에서 2009년에 0.46°C

Fig. 8. The time series of monthly averaged temperature deviation between selected Eunpyeong site and Goyang from Mar 2007 to Feb 2010.

Fig. 9. The time series of monthly averaged temperature deviation between Eunpyeong and Goyang for the maximum (top) and minimum temperatures (bottom) at selected site.

로 시간이 갈수록 점점 커지고 있었고, 여름에 작고 겨울에 크게 나타났다. 지점 간의 차이는 있지만 전체 지점에서 재개발로 인한 기온상승효과를 확인할 수 있었고, 교외 지역과 최대 2°C 이상 차이가 났었다. 은평뉴타운과 교외지역의 최저기온차는 개발중심지에 위치한 지점들이 증가추세를 보여 도시개발이 최저기온의 증가에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

도시재개발에 의한 기상환경변화를 확인하기 위해서는 환경변화 전후의 관측자료와 장기간의 안정적인 자료수집이 중요하다. 향후 조밀한 관측지점과 다양한 기상요소를 이용하여 개발효과에 대한 영향평가가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 “차세대 도시 농림 융합 스마트 기상서비스 개발(NIMR-2012-C-3)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Chow, W. T. L., and B. M. Svoma, 2011: Analyses of nocturnal temperature cooling-rate response to historical local-scale urban land-use/land cover change. *J. Appl. Meteor.*, **50**, 1872-1883.
- Honjo T., H. Sugawara, T. Mikami, K. Narita, K. Kimura, and N. Kuwata, 2002: Observation of thermal effect of Shinjuku Gyeon park. *Fourth Symposium on the Urban Environment*, American Meteorological Society, pp 84-85.
- Kim, Y. H., S. B. Ryoo, J. J. Baik, I. S. Park, H. J. Koo, and J. C. Nam, 2008: Does the restoration of an inner-city stream in Seoul affect local thermal environment. *Theor. Appl. Climatol.*, **92**, 239-248.
- Landsberg, H. E., 1981: *The Urban Climate*. Academic Press, New York, 275 pp.
- Lengfeld, K., and F. Ament, 2012: Observing local-scale variability of near-surface temperature and humidity using a wireless sensor network. *J. Appl. Meteor.*, **51**, 30-41.
- Martinez, A., C. Yague, and E. Zurita, 1991: Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmos. Environ.*, **25**, 327-332.
- Montavez, J. P., A. Rodriguez, and J. I. Jimenez, 2000: A study of the urban heat island of Granada. *Int. J. Climatol.*, **20**, 899-911.
- Oke, T. R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 1-28.
- Ren, G. Y., Y. Zhou, Z. Chu, J. Zhou, A. Zhang, J. Guo, and X. Liu, 2008: Urbanization effects on observed surface air temperature trends in north china. *J. Climate*, **21**, 1333-1348.
- Saaroni, H., and B. Ziv, 2010: Estimating the urban heat island contribution to urban and rural air temperature differences over complex terrain: Application to an Arid city. *J. Appl. Meteor.*, **49**, 2159-2166.
- Unger, J., 1996: Heat island intensity with different meteorological conditions in a medium-sized town: Szeged, Hungary. *Theor. Appl. Climatol.*, **54**, 147-151.
- Yague, C., E. Zurita, and A. Martinez, 1991: Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmos. Environ.*, **25**, 327-332.