

ORIGINAL ARTICLE

부산지역의 도시열섬 구조 변화에 관한 연구

김현수, 석현배¹⁾, 김유근*

부산대학교 대기환경과학과, 부산대학교 지구환경시스템학부¹⁾

A Study on the Change of the Urban Heat Island Structure in Busan Metropolitan Area, Korea

Hyunsu Kim, Hyun-Bae Seok¹⁾, Yoo-Keun Kim*

Department of Atmospheric Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

¹⁾Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Abstract

The spatial and temporal changes of the annual mean urban heat island(UHI) intensity were investigated using near surface temperature data measured at 16 automatic weather systems(AWS) in Busan metropolitan area(BMA) during the 11-yr period, from 2000 to 2010. For nighttime, the annual mean UHI intensity at Dongnae(U1) in 2000 was weaker than it in 2010. However the change of the annual mean UHI intensity at Daeyeon(U2) during 11 years was different from it at U1. The annual frequency of the UHI intensity over 5°C considerably increased at U2 and decreased at U1 during 11 years. The center of the UHI also spatially shifted southward with Daeyeon and Haeundae in BMA. It would be caused by the increase of urban area, population-density and transportation near U2 and by the decrease of them near U1. We found that the spatial and temporal differences of the UHI intensity have coincided with changes of land-use, population density and transportation in BMA.

Key words : Urban heat island, Urban heat island intensity, Urban climate changes, Busan metropolitan area, Urban changes

1. 서론

현대인의 주 생활영역이 도시로 집약됨에 따라 도시 환경에 대한 관심은 지속적으로 증가하고 있다. 특히, 도시 내 오염물질의 확산과 축적, 강수와 바람 같은 기후 특성에 영향을 주는 도시열섬 혹은 도시 열환경에 대한 중요성이 크게 부각되고 있는 실정이다. 최근에는 급변하는 기후로 인하여 폭염, 열파, 열대야 등의 발생 빈도가 급증하고 있어 이에 대한 중요성은 더욱 커질 것

로 전망되고 있다.

열섬은 도시에서 주로 발생하는 주요 기상현상의 하나로서 도시를 연구하는 다양한 학문에서 학제간 연구 주제로 다뤄져 왔다. Kolokotroni 등(2006)은 동절기와 하절기의 잦은 냉·난방 수요에 따른 건물의 에너지 유출입이 도시 내부의 열섬현상에 영향을 준다고 하였으며 Miao 등(2013) 등은 이러한 이론적 근거를 바탕으로 WRF 기상모델과 건물 주변대기에 대한 전산유체해석이 가능한 CFD 모델을 접합하여 베이징에서의 공기의

Received 14 July, 2014; Revised 1 September, 2014;

Accepted 11 November, 2014

*Corresponding author: Yoo-Keun Kim, Department of Atmospheric Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-510-2282
E-mail: kimyk@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

순환과 확산을 열적인 관점에서 예측하였다. 이 밖에도 Golden(2004)은 건물군 조건이 도시 열환경에 미치는 영향을 정량적으로 계산하는 연구를 수행하였다. 도시 녹화 및 도시 내부 수변환경 조성을 통해 도시열섬 저감을 정량적으로 평가함으로써 쾌적한 도시환경을 조성하는 방안에 관한 연구도 있었으며(Masayuki 등, 2006; Akbari와 Konopacki, 2005; Konopacki와 Akbari, 2002) 최근에는 도시열섬 현상의 상세한 분석을 위해 원격탐사 및 GIS 기법을 도입함으로써 도시를 구성하고 있는 상세 토지피복과 다양한 구조물 및 포장 등의 재질에 따른 열환경의 변화를 알고자 하는 연구도 진행되었다(Hu와 Jia, 2010; Jiang과 Tian, 2010; Yokobori와 Ohta, 2009).

도시열섬은 앞서 언급되었던 연구들에서 밝혀진 것처럼 도시 내부 미세규모의 다양한 열적 상호작용이 밀바탕이 되지만 실제로는 미세규모보다 더 큰 도시규모 혹은 국지규모에서 쉽게 인지할 수 있으며 대기경계층 내부를 구성하고 있는 다양한 요인에 따라 기온 및 바람 등의 기상요소에 변화를 일으키는 광역단위의 기상현상이라 할 수 있다. 따라서 기상학에서는 기상관측자료를 바탕으로 다양한 시·공간에 따라 분석해 왔으며 도시열섬을 발생시키는 다양한 인자들에 대한 연구도 지속적으로 수행되었다(Jusuf 등, 2007; Kusaka와 Kimura, 2004; Dixon과 Mote, 2003). 또한 기상예측모델을 통해 다양한 도시환경에 따른 열섬을 시뮬레이션 함으로써 도시의 열환경을 평가하는 방향으로 발전시켜나가고 있으며(Byon 등, 2010; Hwang 등, 2010; Lee 등, 2003) 그러한 기술을 바탕으로 현재를 넘어 미래 도시열섬을 예측함으로써 미래 도시계획 수립 등에 활용하고자 하는 노력도 진행되고 있다(McCarthy, 2010; Rosenzweig 등, 2005). 하지만 미래 도시 열환경을 예측하고 평가하기 위해서는 다양한 도시 내부요인의 변화에 따른 열환경의 변화 추세를 파악하는 것이 선행되어야 하며 각 도시가 갖고 있는 지리·지형적 특성 및 미래 사회·환경적 특성까지도 함께 조사·분석하는 것이 필요하다.

본 연구는 향후 진행될 기상모델을 활용한 미래 도시 열환경 평가를 위한 선행연구로서 최근 10여년의 기간동안 빠른 속도로 도시개발이 진행된 부산지역에 대하여 과거 기상관측자료를 활용하여 부산지역의 도시열섬 구조 변화를 분석하고 선행연구에서

논의되었던 다양한 도시 내부요인(토지피복, 인구밀도, 교통량 등)을 주 원인으로 가정하여 도시열섬 구조 변화와의 상관관계를 분석하였다.

2. 자료 및 연구방법

부산지역의 도시열섬 구조 변화와 그 원인 분석에 앞서 열섬연구에서 열섬강도 분석을 위해 필요한 도심과 교외를 선정하기 위해 본 연구에서는 부산지역에 해당되는 부산광역시와 인근 위성도시인 김해시와 양산시에 대한 환경부 환경공간정보서비스(<http://egis.me.go.kr>)의 중분류 토지피복도 자료와 통계청 국가통계포털(<http://kosis.kr>)의 인구통계 자료를 활용하였다. 또한 연구대상 지역에 위치한 종관기상관측시스템(ASOS; automated synoptic observing system)과 자동기상관측장비(AWS; automatic weather system) 16개 지점의 위치정보를 Fig. 1과 같이 토지피복 자료와 함께 표기하고 Table 1의 인구밀도 자료를 분석함으로써 자동관측기상장비 인근의 토지피복 상태와 인구밀도를 고려하여 도시(U; urban), 교외(S; sub-urban) 그리고 시골(R; rural)을 각각 선정하였다. 교외는 도시 내부요인의 특성이 열적 분포에 어떻게 영향을 주는지에 대한 정량적

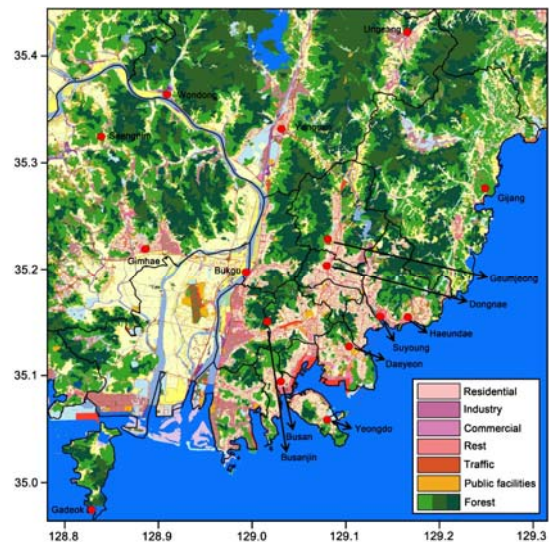


Fig. 1. Spatial distribution of land-use around Busan metropolitan area in 2007 and locations of the ASOS and AWS in 2010 marked with red circles.

Table 1. The population, area and population density of administrative districts near ASOS and AWS in the study area in 2010

City	Name of Observation site	Gu	Dong & Myeon	Population (persons)	Area (km ²)	Population density (persons/km ²)
Busan	Daeyeon	Nam	Daeyeon 3-dong	30497	3.84	7942
	Bukgu	Buk	Gupo 2-dong	29351	2.91	10086
	Suyoung	Haeundae	U 2-dong	25681	3.41	7531
	Haeundae	Haeundae	Jwa 3-dong	19067	0.79	24135
	Dongnae	Dongnae	Boksan-dong	12621	0.78	16181
	Geumjung	Geumjung	Janggeon 2-dong	11885	2.06	5769
	Busanjin	Busanjin	Beomcheon 2-dong	11243	0.97	11591
	Busan	Jung	Daechong-dong	7543	0.35	21551
	Youngdo	Youngdo	Dongsam 2-dong	7248	3.31	2190
	Kijang	Kijang	Ilgwang-myeon	7046	35.76	197
Gadeokdo	Gangseo	Cheonga-dong	2296	23.5	98	
Yangsan	Yangsan	-	Jungang-dong	48759	13.7	3559
	Ungsang	-	Ungsang-eup	87828	64.53	1361
	Wondong	-	Wondong-myeon	2911	148.01	20
Gimhae	Gimhae	-	Buwon-dong	7227	2.06	3508
	Saengrim	-	Saengrim-myeon	4448	50.18	89

비교를 위해 추가로 선정하였다. 그 결과, 주요 기상관측 지점 중, 도시는 동래(U1)와 대연(U2)의 두 곳이 선정되었으며 교외는 양산(S), 시골은 대상영역 외곽에 위치한 원동(R)이 각각 선정되었다. 사실상 부산시 내부의 주요 관측지점은 토지피복만을 고려하였을 때, 모두 도시에 해당이 된다고 할 수 있다. 하지만 대연과 동래 지점의 경우 다른 지점에 비해 인구수와 인구밀도가 높고 인구 유동량이 높아 다른 관측지점에 비해 전형적인 도시에 해당되는 지점이라 할 수 있다. 북구, 수영 그리고 해운대 지점 또한 인구수와 인구밀도가 높지만 북구는 비교적 부산시 외곽에 위치해 있다는 점, 수영과 해운대 지점은 연안에 위치해 있어 도시 내부의 열적 효과를 제대로 반영할 수 없을 가능성이 높다는 점이 고려되어 도시지점 선정에서 제외되었다. 교외는 일반적으로 상·공업지대가 아닌 주거지에 해당되므로 부산시의 베드타운(*bed town*)에 해당되는 김해시와 양산시가 적절하나 김해 지점은 2007년 이후에 관측을 시작하여 시간 변화에 따른 도시열섬 구조 변화를 분석하고자 하는 본 연구의 목적에 부합하지 않아 장기관측 자료를 확보할 수 있는 양산 지점이 교외로 선정되었다. 시골지역은 부

산 외곽의 기장, 원동, 생림 지점이 대상 후보지점에 해당되나 기장과 생림 지점은 인근에 소규모 공단 및 거주 지역이 분포해 있고 상대적으로 원동 지점보다 인구밀도도 높아 가장 낮은 인구밀도를 나타내는 원동이 시골에 적합하다고 판단하였다.

열섬강도는 동일한 시간에 도시와 시골의 기온차이로 정의되며 일반적으로 낮보다는 일몰 이후 야간시간에 강해지는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 부산지역에서 이 같은 열섬의 일반적인 특성이 나타나는지를 분석하고 최근의 도시 구조 변화에 따른 열섬 구조의 변화가 있었는지를 알아보기 위해 연구 대상지역 내의 기상청 ASOS 및 AWS 지점의 1시간 간격 관측 자료를 활용하였다. 또한 효율적이고 정확한 열섬효과 분석을 위해 강수일은 분석에서 제외하였고 관측자료의 정확도 및 연속성 확보를 위해 장비 점검 및 고장 등으로 인한 결측일을 제외하고자 일 75% 이상의 관측일(1일 24회 관측 중 18회 이상 관측된 날짜)에 대해서만 분석을 실시하였다. 분석에 활용된 기상청 AWS 데이터는 해당 연구기간 동안에 관측지점이 이동하거나 추가되었으며 이러한 이유로 우리는 동일한 조건에서 AWS 데이터를

분석할 수 없었다(2000년 14개지점, 2010년 16개 지점). 하지만 도시 내부의 열적 공간분포 분석에 있어 관측지점의 개수가 많을수록 분석이 용이하다는 점에서 관측지점의 추가를 배제하지 않았다. 또한 이동된 관측지점은 기존 관측지점과 동일한 행정구역 내에서 이뤄졌고 이동 전후의 지점 모두가 각 행정구역의 대푯값으로 활용되고 있다는 점을 감안하여 연속적인 시간에 대한 기온 분석 자료로 타당하다고 가정하였다.

선정된 도시, 교외, 시골지점을 바탕으로 지난 11년(2000-2010)의 열섬 구조 변화가 어떻게 이뤄졌는지를 분석하기 위해 연구 대상지역에 대하여 기온의 연평균 변화 분석 및 2000년과 2010년에 대한 열섬강도의 공간분포 특성을 분석하고 두 연도의 지점별 열섬강도 차이를 시간에 따라 분석하였다. 이를 통해 본 연구에서는 도시열섬 구조가 시·공간적으로 어떻게 변화하였는지를 인식하고자 하며 이러한 변화의 요인이 어떠한 도시 내부변화에 기인하였는지를 알기 위해, 토지피복, 인구 밀도, 교통량 변화를 주요 원인으로 가정하여 각 원인의 시간에 따른 변화경향을 분석하였다.

3. 결과

3.1 열섬강도 변화 분석

3.1.1 시간적 변화

Fig. 2는 지난 11년간 부산 전 지점에 대한 평균기온과 도심, 교외 그리고 시골지점에 대한 평균기온 변화 및 열섬강도의 연 평균 변화로 2010년의 기온분포 및 열섬강도가 최근 부산지역의 기온변화와 연속적인 상태에 있는지를 사전에 살펴보기 위해 분석하였다. 부산 지역의 전체 평균기온은 기후적인 요인으로 인해 증가와 감소를 반복하지만 전체적으로 증가하고 있는 추세를 보이고 있으며 특히 최근 유량이 증가한 하천을 끼고 있는 U1지점은 기온이 감소하고 있고 도시 토지피복이 증가한 U2의 기온이 U1에 비해 증가하여 열섬강도도 증가하고 있는 추세를 나타내고 있어 2010년의 기온분석이 최근의 변화경향을 잘 반영한다고 볼 수 있다. 따라서 부산권역의 열섬강도가 과거에 비해 어떻게 변화하였는지를 알기위해 2000년을 과거, 2010년을 현재로 가정하여 각 연도에 대한 열섬강도의 시간별 연 평균값을 구하여 Fig. 3과 같이 도식화 하였다. 열섬강도의 시

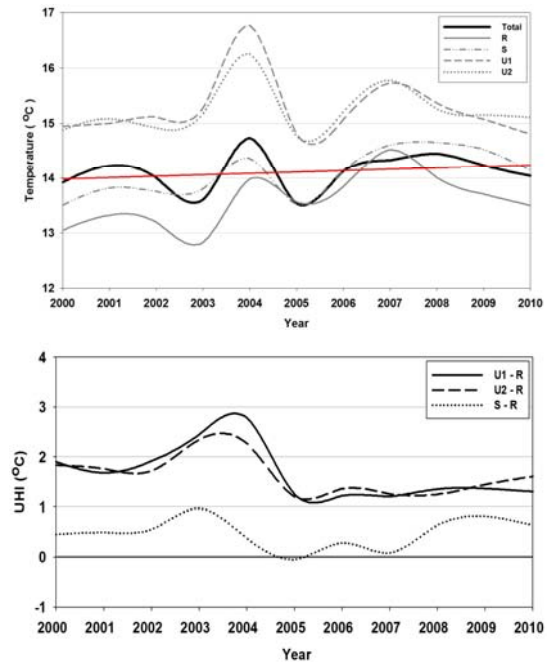


Fig. 2. The time series of annually averaged temperature (upper panel) and UHI (bottom panel) in BMA. Red solid line indicate the trend of average temperature among the total observation sites in BMA.

간별 연 평균값의 일변화는 지점에 따라 다소 차이를 보였는데 2000년의 열섬강도는 U1과 U2가 대체로 유사한 범위에서 일변화를 보이는 것으로 나타났다. 일중 최대 열섬강도는 일출(06시) 이후 7시에서 9시 사이에 나타났으며 이후 지표가열로 인해 열섬강도는 점차 약해지다가 태양이 남중하고 난 이후 16시 전후에 최소값을 나타냈다. 이후 열섬강도가 차츰 증가하여 일몰 이후 18시에서 20시 사이에 가장 빠르게 강도가 강해지는 특성을 보였다. 특히, U2는 U1보다 열섬강도의 변동폭이 더 크게 나타났으며 2000년에는 U2와 S, 2010년에는 U1과 U2가 한낮에 음의 값을 보였다. 이와 관련하여 내륙 도시의 친수공원·도시숲 조성과 같은 토지피복 차이에 의한 냉섬효과(cold island effect)가 있다는 보고가 있으며(Ahn과 Kim, 2006), Gaffin 등(2008)은 낮 시간 연안인근 지점에서 냉섬이 나타나는 원인을 도시녹화와 더불어 해풍의 영향으로 보고 뉴욕시의 열섬강도의 시공간적 변화를 분석하기도 하였다. 우선 도시와 교외로

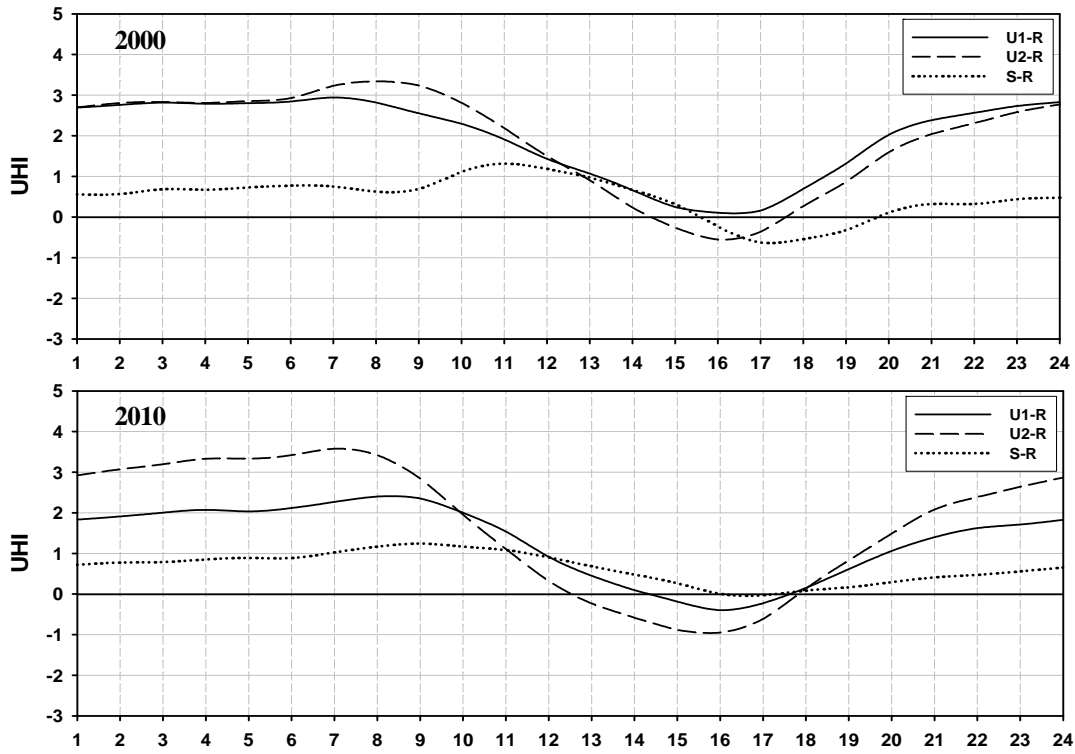


Fig. 3. Diurnal variation on an annual average of UHI intensity in 2000 (upper panel) and 2010 (bottom panel), BMA.

지정된 U1, U2, S의 관측지점 인근에는 낮 시간 동안 온도 저감효과를 가져올 하천 혹은 녹지지역의 비율이 R에 비해 상당히 낮다(Fig. 1). 또한 밀집된 도시로 구성된 U1, U2의 지리적인 위치가 해풍의 영향을 잘 받는 연안에 위치해 있는데 반해, R은 상대적으로 해륙풍의 강도가 약한 내륙 산지에 위치해 있으므로 낮 시간 동안 온도 저감효과가 낮을 수밖에 없다. 해륙풍과 관련한 이 같은 주장을 뒷받침 하기 위해 도시지점(U1, U2)에서의 연간 풍향빈도분포를 분석해보았다(Fig. 4). 두 지점은 낮 시간 동안 2000년과 2010년에 대하여 각각 해륙풍이 주로 부는 방향인 남풍 및 동풍 계열의 바람이 우세하게 부는 것으로 나타나 낮 시간 동안 해풍에 의한 온도 저감효과가 있었을 가능성이 높다. 하지만 2000년에 U1에서의 열섬강도는 낮동안 음의 값이 나타나지 않는데 반해 2010년에는 낮동안 음의 값이 나타나는데, 이것은 2010년에 인근 하천으로 낙동강물이 인위적으로 유입되면서 하천의 유량증가로 인한 온도 저감효과

가 추가되었기 때문으로 사료된다. 반면, 교외에 해당되는 S는 일변화 경향이 도심보다 2~3시간 정도 늦게 나타나는 경향을 보였으며 열섬강도는 야간에 약 2도 가량 차이가 나는 것으로 분석되어 도심보다 열적 효과가 적은 것을 알 수 있었다.

열섬강도의 일변화 경향은 2000년과 2010년에 두 지점에서 모두 유사하게 나타난다. 하지만 U2의 경우 2010년에 열섬강도의 일변화 폭이 2000년보다 증가하여 U1보다 열섬강도가 강해지는 경향을 보였다. 반면, U1은 2000년에 비해 2010년에 전반적으로 약 1도가량 열섬강도의 일변화 폭이 감소하여 두 도심 간의 열섬강도의 차이가 더욱 뚜렷하게 나타나는 것으로 분석되었다(Fig. 3). 이러한 열섬강도의 연도별 변화는 Fig. 5의 계절적 특성분석에서도 두드러지는데 2000년은 전반적으로 계절에 따른 U1과 U2의 열섬강도 차이가 크지 않은 것으로 분석되었으나 2010년에는 계절적인 차이가 뚜렷해져 U1보다 U2의 열섬강도가 더 강해지고 있

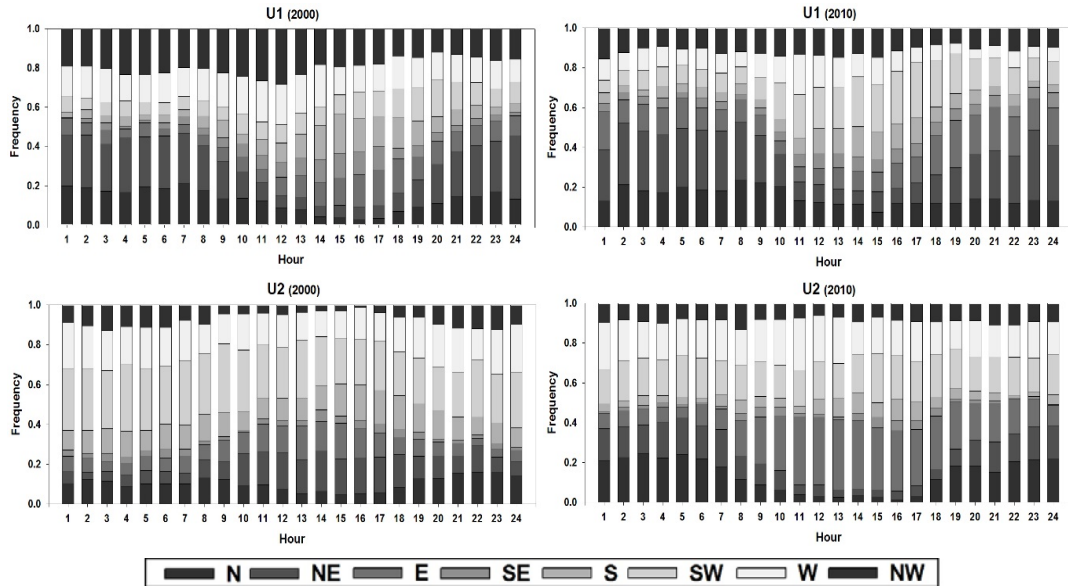


Fig. 4. Frequency of wind direction on the U1 (upper panel) and U2 (bottom panel) in 2000 and 2010, BMA.

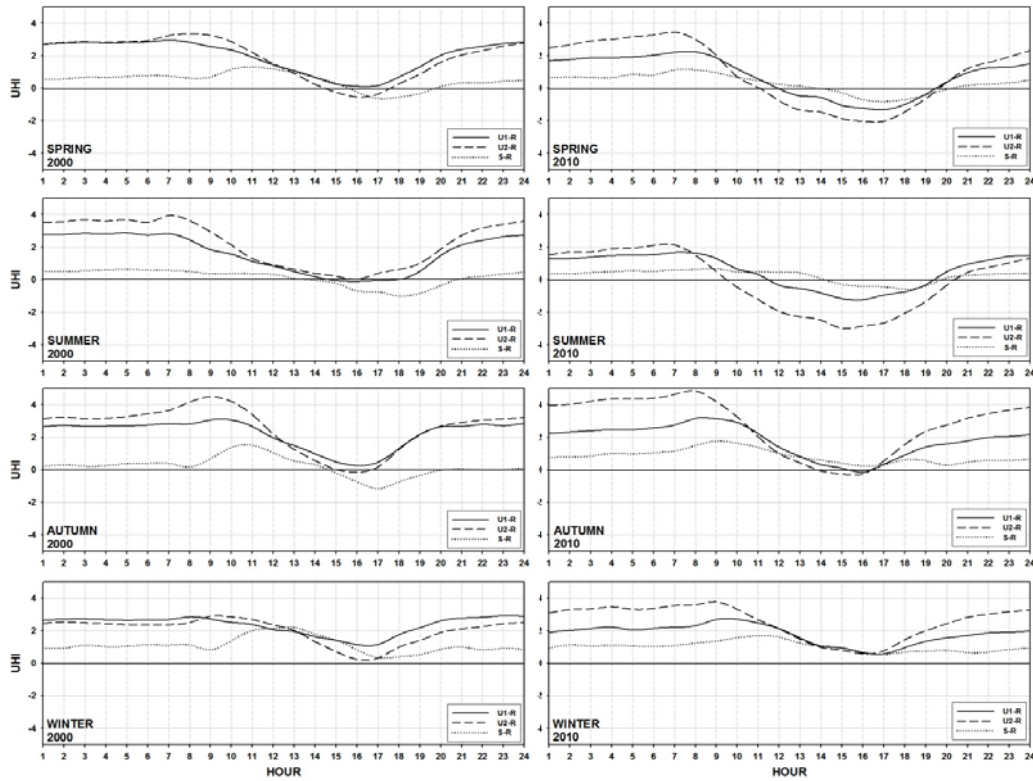


Fig. 5. Diurnal variation on a seasonal average of UHI intensity in 2000 (left panel) and 2010 (right panel), BMA.

Table 2. The hourly annual average of maximum UHI intensity at main observation sites

Year	sites	Time (LST)																								
		Ave.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2000	U1	7.7	8.4	8.2	8.5	7.9	7.6	7.9	8.1	7.9	7.5	8.4	8.8	9.3	9.6	10.4	6.0	6.2	7.2	7.0	6.0	5.7	5.8	6.3	8.1	8.2
	U2	8.3	10.6	9.2	8.8	8.6	8.3	8.0	8.4	8.8	9.3	9.4	10.8	9.0	7.9	8.1	8.4	7.3	7.0	7.0	7.3	7.1	7.1	7.4	7.4	7.8
	S	5.9	5.4	5.5	5.2	6.1	6.3	5.6	5.9	5.9	6.2	6.4	6.3	8.6	7.6	8.4	7.5	5.7	6.0	4.7	3.6	4.1	4.0	4.5	5.3	6.6
2010	U1	6.8	6.6	7.1	7.9	7.2	8.3	7.5	7.2	7.7	7.5	8.0	8.6	7.8	7.1	6.0	5.8	5.3	5.6	6.2	5.0	4.8	5.5	6.8	6.2	6.9
	U2	8.0	8.0	10.4	9.0	8.9	9.2	8.9	9.2	9.1	10.6	10.9	9.7	9.0	7.9	6.3	6.5	6.0	5.1	5.2	5.8	6.1	6.5	7.4	7.5	8.4
	S	5.0	4.5	4.0	5.0	4.6	5.5	4.9	4.8	4.9	4.8	6.9	7.3	6.3	5.0	5.2	5.6	4.6	3.9	3.9	4.8	4.5	4.8	4.2	4.5	4.4

음을 알 수 있었다. 특히, 여름의 열섬강도는 타 계절에 비해 가장 낮았으며 가을의 열섬강도가 가장 강한 것으로 분석되었다. 또한 열섬강도의 일변화도 가을이 가장 큰 것으로 나타났으며 상대적으로 2000년보다 2010년의 일변화가 더 큰 것으로 분석되었다. 주목할 만한 것은 2010년 봄과 여름에 U1과 U2 모두 낮시간 동안 열섬강도가 음의 값을 보인다는 것인데, 이는 교외지역인 R지점의 기온상승이 주된 원인이 아니었나 사료되며 그러한 기온상승의 원인은 4장에서 다뤄질 것이다.

최대 열섬강도의 연평균과 시간대별 평균값도 이러한 두 도심 간의 열적 환경 변화를 잘 보여주었는데 전반적으로 열섬강도는 2000년보다 2010년에 감소하였으나 U1의 감소폭이 더 크고 U2의 감소폭은 적게 나타났다(Table 2). 시간대별로 최대 열섬강도를 분석해 보았을 때에도 U2는 U1보다 높게 나타났으며 그 차이는 2010년에 더 크게 나타나 U2의 열적 변화를 불러온 외부적인 요인이 있었을 것으로 사료

된다. 이러한 분석 결과는 Fig. 6과 Fig. 7에서 보다 명확해지는데, Fig. 6은 각 지점별로 2000년과 2010년 연평균 열섬강도의 차이를 시간대별로 나타낸 그래프로 U1의 열섬강도는 전체 시간대에서 2000년보다 2010년에 약 1도가량 감소한 것으로 나타났으며 U2의 열섬강도는 낮시간에는 감소하였다가 야간과 새벽에 열섬강도가 강하게 나타나는 것으로 분석되어 야간시간대 열섬강도가 강해지고 있음을 알 수 있다. S의 경우 오전 7-9시, 오후 17-19시에 열섬강도의 증가경향이 뚜렷하게 나타나는데 이는 출퇴근시간과 일치하며 추가적인 분석이 필요하겠으나 2000보다 2010년에 교외에서 도시로 통근하는 인구유입이 늘어난 것이 주원인이 아니었나 사료된다. 또한 Fig. 7은 도심과 시골간의 열섬강도 차이가 5℃ 이상 나타나는 강한 강도의 열섬이 발생하는 빈도를 막대그래프로 나타낸 것으로 U1은 2000년 대비 2010년에 60~70% 가량 발생빈도가 감소하였으며 U2는 2000년

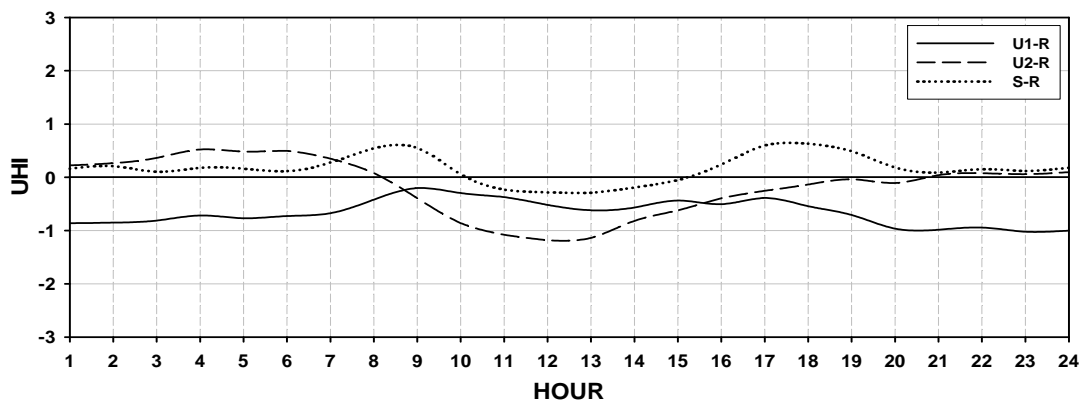


Fig. 6. Diurnal variation on a difference between 2000 and 2010 of an annual average of UHI intensity in BMA.

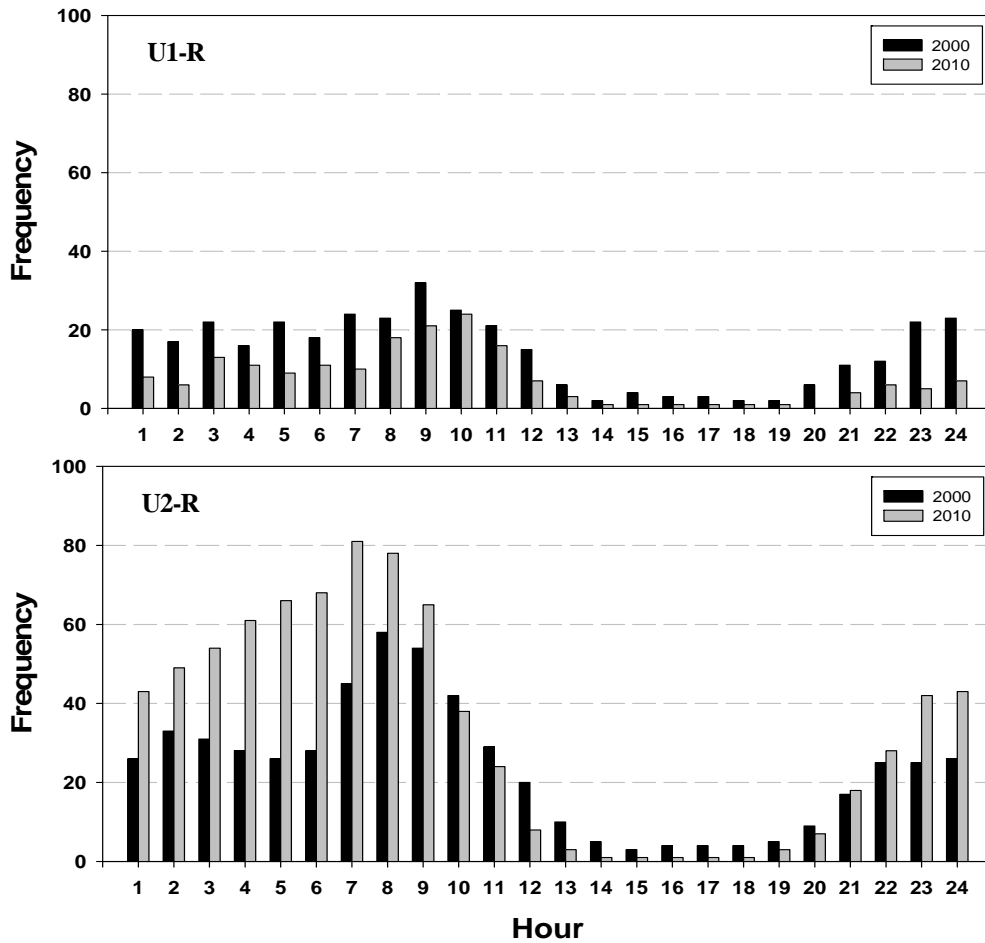


Fig. 7. Frequency of UHI intensity hourly over 5°C among U1 (upper panel), U2 (bottom panel) and R in 2000 and 2010.

대비 2010년에 30~60 % 가량 발생빈도가 증가한 것으로 나타나 야간과 새벽시간 대에 강한 강도의 열섬 발생 횟수가 U1보다 U2에서 2010년 들어 더 많이 발생하고 있음을 알 수 있다.

3.1.2. 공간적 변화

지난 10여년의 기간동안 부산지역의 열적 분포가 어떻게 변화하였는지를 분석하기 위하여 2000년과 2010년에 대하여 부산지역에 대한 기온의 연평균에 대한 공간분포를 가까이 있는 실측 값에 더 큰 가중값을 주어 보간하는 방법인 IDW(inverse distance weighted) 보간법(interpolation)으로 분석하였다(Fig. 8). 일반적으로는 주위 값들과의 선형 조합으로 그 값을 예측하는

Kriging 보간법을 많이 사용하지만 본 연구 대상지역의 경우 전체 면적에 비해 관측지점의 개수가 적고 관측지점별 열적 구조 변화분석에 더 많은 비중을 두고 있기 때문에 가까이 있는 실측값에 더 큰 가중치를 주어 보간하는 방법인 IDW 보간법을 사용하였다. 시계열 분석과 달리 공간분포 분석은 각 관측지점이 위치한 고도가 기온에 미치는 영향이 있다. 본 연구에서는 그러한 관측지점의 지형적인 특성을 감안하기 위해 2010년을 기준으로 모든 관측지점의 고도를 조사하였으며 부산지역의 관측지점들은 모두 Table 3과 같이 100 m 이하의 저고도에 위치하고 있다. 일반적으로 100 m의 고도 상승 시, 습윤단열은 0.5도, 건조단열은 1도의 기온 하강이

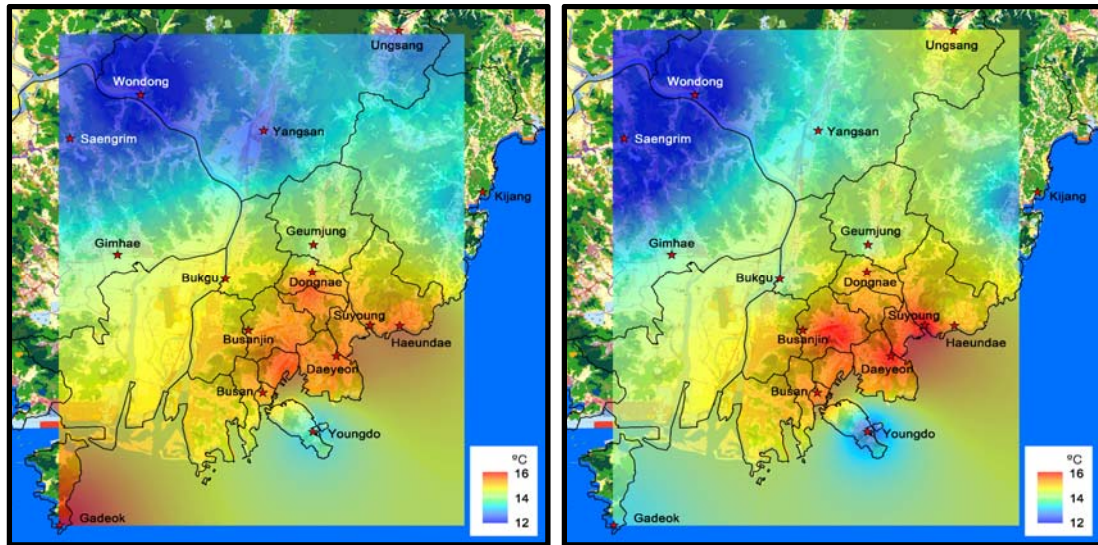


Fig. 8. Spatial distribution of an annual average of surface temperature in 2000 (left panel) and 2010 (right panel) with land-use in BMA.

있다고 알려져 있으나, 관측지점의 고도가 연평균 기온에 미치는 영향은 적은 것으로 가정하였으며 과거와 현재의 열섬강도 차이를 분석할 때는 큰 영향을 주지 않으므로 관측된 기온에 대한 고도 보정은 추가로 실시하지 않았다. 공간분포 분석결과, 2000년은 부산진과 동래를 중심으로 주요 고온역이 형성되고 대연과 해운대로도 기온이 높게 나타나는 경향을 보인다. 반면, 원동, 생림, 웅상 등 시골 및 교외지역으로 저온역이 형성돼 부산지역의 도심과 교외의 평균 기온은 남고북저형으로 뚜렷하게 구분이 된다. 가덕도 지역이 기온이 높게 나타나는 것은 2000년 3월 1일부터 4월 30일의 기간동안 관측이 제대로 이뤄지지 않아 계산에서 누락되면서 전체적인 기온평균값이 높게 계산되었기 때문으로 사료된다. 이러한 2000년의 부산지역의 기온 공간분포는 2010년에 다소 변화하게 되는데, 우선 시골지역과 비교하였을 때, 도심지역의 고온역은 더욱 뚜렷하게 분석된다. 부산진과 동래에 걸쳐 형성되어 있던 고온역의 중심은 2000년에 비해 다소 남하하여 부산진, 대연, 수영에 걸쳐 형성되었으며 상대적으로 동래는 고온역의 중심에서 떨어진 것으로 분석되었다. 2000년과 마찬가지로 원동과 생림은 여전히 저온역으로 나타나고 있으나 교외에 해당되는 웅상과 양산은 상대적으로 기온이 상승하여 2000

년의 남고북저형 기온배치가 동고서저의 형태로 변형되고 있는 것으로 나타났다.

Table 3. The height above sea level of the observation sites in the study area

Name of Observation site	The height above sea level (m)
Daeyeon	14.86
Bukgu	34.54
Suyoung	11.14
Haeundae	69.82
Dongnae	18
Geumjung	71.08
Busanjin	17.55
Busan	69.56
Youngdo	45
Kijang	13.11
Gadeokdo	71.92
Yangsan	40
Ungsang	99.97
Wondong	19.56
Gimhae	59.34
Saengrim	29.11

3.2 열섬강도 변화의 원인분석

3.2.1. 토지피복의 변화

도시열섬의 원인은 다양하게 연구되었으나 그 중에서 가장 대표적인 것은 산업화 및 각종 도시개발로 인한 토지피복의 변화를 꼽을 수 있다. 지난 10여년의 기간 동안 부산광역시 주요 도심의 토지피복 분포를 분석해 본 결과 상당부분 변화가 있었음을 알 수 있었다. Fig. 9는 부산 도심에 위치하고 있는 주요 AWS 관측지점의 2000년과 2010년의 위치와 2003년과 2007년의 토지피복의 공간분포를 나타낸 것으로 2003년과 2007년의 자료는 각각 2000년과 2010년을 대표하는 것으로 가정하

였다. 토지피복 분포를 분석하였을 때, 2003년에 비하여 2007년은 도시 내부의 교통망이 보다 상세하게 묘사되어 있으며 군사시설이 있었던 수영만과 해운대 신시가지 개발 등으로 도시 내부의 토지피복 변화가 뚜렷하였다. 하지만 이러한 변화는 관측지점 주변의 토지피복 변화를 정량적으로 분석하기가 힘든 단점이 있다. 따라서 shape 파일로 되어있는 토지피복 자료를 ArcGIS를 이용하여 1 m 간격의 raster 격자 파일로 변환하여 주요 관측지점을 중심으로 반경 1km의 각 토지피복 비율의 변화를 분석하였다. 그 결과, 각 해당 구역에 토지피복 격자 개수의 비율은 Table 4와 같이 나타났다. U1의 경

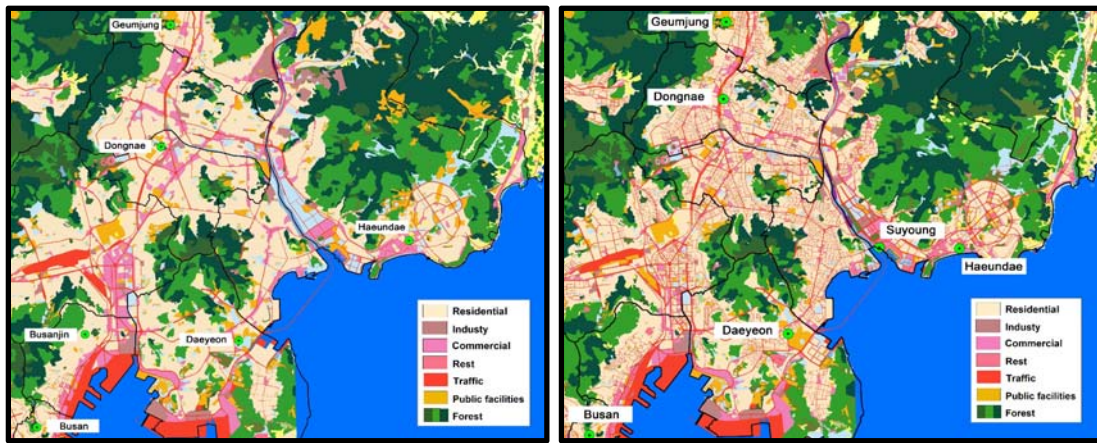


Fig. 9. Spatial distribution of land-use in 2003 (left panel) and 2007 (right panel) near inner city Busan for the comparison of the land-use changes.

Table 4. The ratio (%) of the land-use within 1-km radius of AWS in 2003 and 2007

		Residential	Industry	Commercial	Traffic	Public facilities	Forest
U1 (Dongnae)	2003	58.09	3.96	16.30	9.51	5.08	1.87
	2007	55.42	0.62	7.04	15.73	3.29	10.79
	Diff	-2.67	-3.34	-9.26	6.22	-1.78	8.93
U2 (Daeyeon)	2003	44.77	0.25	6.32	9.10	10.21	8.88
	2007	43.53	-	4.83	13.97	15.49	10.03
	Diff	-1.24	-0.25	-1.49	4.88	5.28	1.15
S (Yongsan)	2003	13.17	2.27	3.31	13.30	1.98	26.12
	2007	23.59	2.61	3.62	16.81	1.19	16.84
	Diff	10.42	0.35	0.31	3.51	-0.79	-9.28
R (Wondong)	2003	4.54	0.09	0.20	3.67	0.26	27.34
	2007	4.00	0.09	0.34	3.89	0.16	24.05
	Diff	-0.54	0	0.14	0.22	-0.10	-3.28

우 교통지역의 비율이 6.22% 증가하였으나 도시에 해당되는 토지피복(주택, 상공업 및 공공시설 등)은 17.05% 감소하였으며 반대로 산림의 비율은 8.93% 가량 크게 증가하여 토지피복에 의한 기온증가 효과가 둔화 혹은 감소하였을 것으로 예상된다. 반면, U2의 경우 U1에 비해 주택(-1.24%), 상공업 지역(-0.25%)의 감소 비율이 적었고 교통(4.88%) 및 공공시설(5.28%)이 큰 폭으로 증가하면서 전체적으로 도시에 해당되는 토지 피복의 비율이 6.18% 가량 증가하였고 산림의 비율은 U1 보다 적게 증가(1.15%)하여 토지피복에 의한 기온 증가 효과가 뚜렷하였을 것으로 예상된다. S는 도시면 적 비율이 11.08%(주택: 10.42%, 상공업: 0.66%), 교통 시설 면적이 3.5% 각각 증가하고, 산림의 비율이 9.28% 감소하고 있어 주거지 위주로 구성되는 전형적인 베드타운형 개발이 이뤄지고 있음을 알 수 있다. R은 도시 비율이 0.40% 가량 다소 감소하였으나 도로 확장 등으로 교통시설은 증가(0.22%)하였고 산림은 3.28% 정도 감소한 것으로 나타났다.

3.2.2. 인구밀도와 교통량의 변화

토지피복뿐만 아니라 인구밀도와 교통량도 도시열섬 구조 변화의 주요 원인으로 보고되고 있다(Yuan 과 Bauer, 2007; Stankowski, 1972). Fig. 10은 부산광역시

의 2000년과 2010년 인구밀도의 변화를 행정구역별로 나타낸 그림이다. 지난 10여년간 부산광역시의 인구밀도는 대연 AWS 지점이 있는 남구를 비롯해 해운대와 수영 AWS 지점이 있는 해운대구, 그리고 비교적 교외에 해당되는 북구와 같은 주요 거점지역을 중심으로 증가한 것을 알 수 있으며 부산광역시 외곽의 김해, 양산, 웅산을 중심으로 인구밀도가 증가하여 도시 주요 거점에서의 인구 집중현상과 교외로의 인구 이탈이 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 반면, 동래 AWS 지점이 있는 동래구를 비롯해 부산 ASOS 지점이 있는 중구, 그리고 인근의 영도구는 인구밀도 감소가 나타나고 있어 과거 도심이었던 지역의 인구유출이 심화되고 있음을 알 수 있다. 이러한 인구밀도 분포의 변화는 열섬의 공간적인 분포 및 시간적인 변화와 일관성이 있다고 사료된다.

또한, 교통량 증가를 유발시키는 주체는 사람이라는 점을 감안하였을 때, 교통량의 증가는 대체로 인구밀도 증가 혹은 인구유동이 높은 지역과 상관관계가 높다고 볼 수 있다. Fig. 11은 지난 2000년과 2010년의 부산광역시 주요 교차로에서 측정된 차량 통행량 분포로서 부산 전 구역에 대해 관측되지 않아 원하는 지점에 대한 값을 구할 수가 없다. 하지만 본 연구에서 열섬강도 분

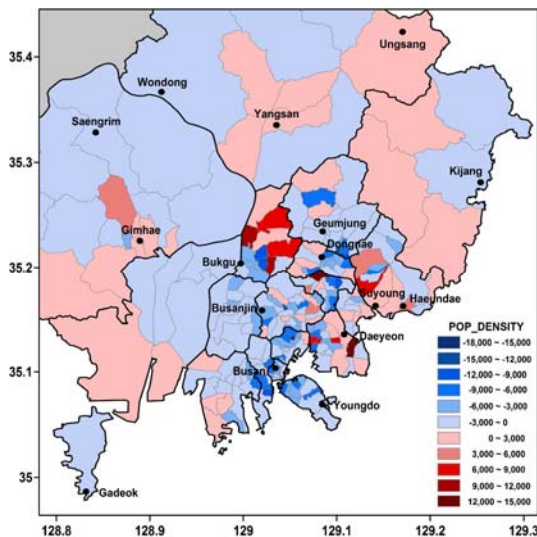


Fig. 10. Spatial distribution of population-density shifts during last 10 years (from 2000 to 2010) in BMA.

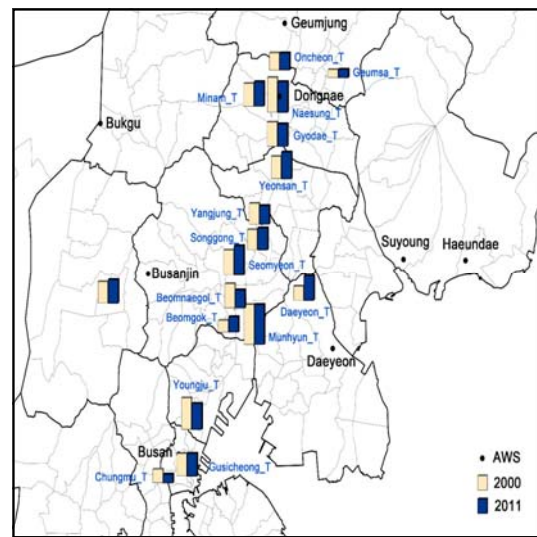


Fig. 11. Spatial distribution of the volume of traffic during last 10 years (from 2000 to 2010) in BMA.

석을 위해 선정된 도심 U1과 U2 인근에 내성교차로와 대연교차로가 있어 두 지점이 각각 동래와 대연 AWS 기상관측값에 영향을 준다고 가정하였다. 내성교차로의 경우 지난 10여년의 기간동안 교통량이 14 % 감소하였으며 대연교차로의 경우는 부산 전역에서 가장 큰 폭으로 교통량이 증가(78.5 %) 하였음을 알 수 있다.

이를 통해, 열섬강도가 감소한 U1은 토지피복 중 도시의 비율이 감소하고 관측지점 인근 행정구역의 인구밀도가 감소하였으며 교통량도 감소한 것을 알 수 있었으며 열섬강도가 증가한 U2인 대연은 토지피복 중 도시의 비율이 증가하고 관측지점 인근 행정구역의 인구밀도가 크게 증가하였으며 교통량도 증가한 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 도시 내부 열섬강도 변화의 주요 요인으로 연구된 바가 있는 토지피복, 인구밀도, 교통량의 변화가 부산지역에 대해서도 동일하게 적용된다는 것을 입증한다.

4. 결론

본 연구는 최근 10여년간 빠른 속도로 도시 내부 구조가 변화하고 있는 부산광역시를 포함한 인근 지역을 대상으로 도시열섬 구조가 어떻게 변화하고 있는지를 시공간적으로 분석하고 그 변화의 요인으로 알려져 있는 토지피복, 인구밀도, 교통량 등의 변화를 분석하여 각각의 요인이 열섬강도에 어떤 영향을 주었는지를 정성적으로 분석하였다. 열섬강도 분석을 위해 동래(U1), 대연(U2), 양산(S), 원동(R)을 각각 도심, 교외 그리고 시골로 선정하였으며 2000년과 2010년의 연평균 열섬강도를 시간대별로 비교하였다. 그 결과, 2000년에 비해 2010년의 U1은 야간에 전반적으로 열섬강도가 약해지고 있음을 알 수 있었고 반면, U2는 강해지고 있음을 알 수 있었다. 또한, 공간적으로도 부산의 중심에 끌려 분포해 있던 열섬의 중심이 대연을 비롯한 해운대가 있는 남쪽으로 이동하면서 동래지점은 열섬의 중심에서 멀어지고 있는 것을 알 수 있었다. 이러한 열섬강도의 변화는 도시 내부의 다양한 열적요인의 변화경향과도 일치하는 것을 알 수 있었는데 토지피복 변화를 조사하였을 때, U1 인근 지역의 도시 비율은 현저하게 감소하였으나 U2 인근 지역의 도시 비율은 지난 10여년 동안 크게 증가하였다. 인구밀도의 경우, 인근의 행정구역

들은 인구밀도가 감소하였으나 U2는 반대의 경향을 나타내었다. 교통량도 인구밀도와 유사한 패턴을 보였다. 따라서 지난 10여년동안 부산광역시의 열섬강도의 변화는 토지피복, 인구밀도, 교통량의 변화와 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되었다.

비록 본 연구에서는 열섬강도의 주요 변화요인으로 가정한 토지피복, 인구밀도, 교통량과 열섬강도의 변화 간에 정량적인 상관관계는 도출하지 못하였다. 하지만 많은 연구에서 열섬의 주요 원인으로 보고된 바 있는 도시 내부변화 요인이 국내의 대표도시 중 하나인 부산지역에 대해서도 동일하게 열섬 구조 변화요인으로 적용되고 있음을 알 수 있었다는데 의의가 있다. 향후에는 관측값이 부족해 정밀한 도시열섬의 공간분포 및 정량적 상관관계를 도출하지 못한 단점을 보완하기 위해 동일 대상지역에 대해 열섬이 발생한 대표일을 선정하고 기상모델링 연구를 수행한다면 열섬강도 변화와 주요 영향요인간의 정량적인 상관관계를 도출하는 것이 가능할 것이며 또한 미래 도시 기후 예측 연구의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Ahn, J. S., Kim, H. D., 2006, On the seasonal variation of urban heat island intensity according to meteorological condition in Daegu, *J. Environ. Science.*, 15(6), 527-532.
- Akbari, H., Konopacki, S., 2005, Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies, *Energy Policy*, 33(6), 721-756.
- Byon, J. Y., Choi, Y. J., Seo, B. G., 2010, Evaluation of urban weather forecast using WRF-UCM (Urban Canopy Model) over Seoul, *Atmosphere*, 20(1), 13-26.
- Dixon, P. Grady, Thomas, L. Mote, 2003, Patterns and causes of Atlanta's urban heat island - initiated precipitation. *J. Appl. Meteor.*, 42, 1273 - 1284.
- Gaffin, S. R., Rosenzweig, C., Khanbilvardi, R., Parshall,

- L., Mahani, S., Glickman, H., Goldberg, R., Blake, R., Slosberg, R. B., Hillel, D., 2008, Variations in New York city's urban heat island strength over time and space. *Theoretical and Applied Climatology*, 94, 1-11.
- Golden, J. S., 2004, The Built Environment Induced Urban Heat Island Effect in Rapidly Urbanizing Arid Regions - A Sustainable Urban Engineering Complexity, *Environ Sciences*, 1(4), 321-349.
- Hu, Y., Jia, G., 2010, Influence of land use change on urban heat island derived from multi-sensor data, *Intl. J. Climatol.*, 30, 1382-1395.
- Hwang, M. K., Kim, Y. K., Oh, I. B., Kang, Y. H., 2010, High-resolution Simulation of Meteorological Fields over the Coastal Area with Urban Buildings, *J. Korean Soc. for Atmos. Environ.*, 26(2), 137-150.
- Jiang J., Tian, G., 2010, Analysis of the impact of Land use/Land cover change on Land Surface Temperature with Remote Sensing, *Procedia Environ. Sci.*, 2, 571-575.
- Jusuf, S. K., Wong, N. H., Hagen, E., Anggoro, R., Hong, Y., 2007, The influence of land use on the urban heat island in Singapore, *Habitat international*, 31(2), 232-242.
- Kolokotroni, M., Giannitsaris, I., Watkins, R., 2006, The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies, *Solar Energy*, 80(4), 383-392.
- Konopacki, S., Akbari, H., 2002, Energy savings for heat -island reduction strategies in Chicago and Houston (including updates for Baton Rouge, Sacramento, and Salt Lake City), Lawrence Berkeley National Laboratory -49638.
- Kusaka, H., Kimura, F., 2004, Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model, 43, 1899-1910.
- Lee, H. W., Oh, E. J., Roh, S. A., Ban, S. J., 2003, Numerical Simulation for local circulation of urban area and deposition phenomenon, *J. Korean Soc. for Atmos. Environ.*, 19(6), 773-787.
- Masayuki, I., Hisaya, I., Kimiko, K., Akihiro, N., 2006, Evaluation of rooftop greening as a method of heat -island reduction based on actual measurement, *J. of Environ. Engineering*, 605, 47-54.
- McCarthy, M. P., Best, M. J., Richard A. B., 2010, Climate change in cities due to global warming and urban effects, *Geophysical Research Letters*, 37, L09705.
- Miao, Y., Liu, S., Chen, B., Zhang, B., Wang, S., Li, S., 2013, Simulating urban flow and dispersion in Beijing by coupling a CFD model with the WRF model, *Advanced in Atmospheric Sciences*, 30(6), 1663-1678.
- Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Parshall, L., Chopping, M., Pope, G., Goldberg, R., 2005, Characterizing the urban heat island in current and future climates in New Jersey, *Environmental Hazards*, 6, 51-62.
- Stankowski, S. J., 1972, Population density as an indirect indicator of urban and suburban land-surface modifications. Professional Paper: Report 800B. (pp.B219—B224). U.S. Geological Survey
- Yokobori, T., Ohta, S., 2009, Effect of land cover on air temperatures involved in the development of an intra -urban heat island, *Clim. Res.*, 39, 61-73.
- Yuan, F., Bauer, M. E., 2007, Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 106, 375-386.

