

울산지역의 기상 특성: 기온과 바람을 중심으로

Meteorological Characteristics in the Ulsan Metropolitan Region: Focus on Air Temperature and Winds

오 인 보* · 방 진 희 · 김 양 호¹⁾

울산대학교 의과대학 환경보건센터

¹⁾울산대학교 의과대학 직업환경의학교실

(2014년 12월 22일 접수, 2015년 3월 19일 수정, 2015년 4월 7일 채택)

Inbo Oh*, Jin-Hee Bang and Yangho Kim¹⁾

Environmental Health Center, University of Ulsan College of Medicine

¹⁾*Department of Occupational & Environmental Medicine,*

University of Ulsan College of Medicine

(Received 22 December 2014, revised 19 March 2015, accepted 7 April 2015)

Abstract

Spatial-temporal meteorological features of the Ulsan metropolitan region (UMR) were analyzed using observations and high-resolution numerical modeling. Long-term trend analysis (1970~2013) showed a significant increase of $0.033^{\circ}\text{Cyr}^{-1}$ in the 5-year moving average temperature, although detailed short-term features varied, whereas wind speed and relative humidity over the same period displayed clear decreases of -0.007 ms^{-1} and $-0.29\%\text{yr}^{-1}$, respectively. These trends indicate the effects of regional climate change and urbanization in the UMR. Seasonal variations averaged for the most recent three years, 2011~2013, showed that temperatures in three different regions (urban/industrial, suburban, coastal areas) of the UMR had similar seasonality, but significant differences among them were observed for a certain season. Urban and industrial complex regions were characterized by relatively higher temperatures with large differences (max.: 3.6°C) from that in the coastal area in summer. For wind speed, strong values in the range from 3.3 to 3.9 ms^{-1} occurred in the coastal areas, with large differences clearly shown between the three regions in September and October. Diurnal variations of temperature were characterized by pronounced differences during the daytime (in summer) or nighttime (in winter) between the three regions. Results from the WRF modeling performed for four months of 2012 showed large variations in grid-average temperature and winds in the UMR, which displayed significant changes by season. Especially, a clear temperature rise in the urban center was identified in July (0.6°C higher than nearby urban areas), and overall, relatively weak winds were simulated over urban and inland suburban regions in all seasons.

Key words : Meteorological features, Ulsan metropolitan region, Temperature, Urbanization, WRF modeling, Winds

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)52-250-8402, E-mail : oinbo@ulsan.ac.kr

1. 서 론

울산은 영남권 주요 대도시중 하나로 국가산업단지를 포함해 다수의 산업시설이 밀집된 곳이다. 연안을 따라 대규모 산업단지(온산 및 울산미포 국가산업단지 등)가 형성되어 있고 그 인근 내륙으로 상업 및 주거지역이 집중 분포하는 특징적 도시환경을 가지고 있다. 이로 인해 오래전부터 대기오염현상이 가장 중요한 지역사회 환경문제로 인식되어 왔다. 최근에는 기후변화 및 도시화 현상으로 산업단지 배출 대기오염물질의 고농도 노출뿐만 아니라 폭염 및 도시열섬 현상 등과 연계된 환경보건 문제가 지역사회의 중요한 이슈로 부각되고 있다. 이러한 문제들의 진단과 해결은 대기오염물질의 분포특징과 기상조건을 정확히 이해하는 것으로 시작하여 노출과 영향에 대한 신뢰성 있는 평가로 가능할 것이다.

대표적 물리환경인 기상에 대한 해상도 높은 평균적·정량적 평가는 인구집단 및 개인의 기상환경 노출을 이해하는 데 필요하며 대기오염 현상과 연계하여 우선적으로 파악해야 할 중요한 연구부분이다. 하지만 어렵게도 울산지역을 대상으로 기상 특성을 시·공간적으로 면밀히 분석한 선행연구는 거의 없었다. 기후변화 또는 대기오염현상과 관련하여 몇몇의 연구발표들이 있었으나(Lee and Lee, 2010; Choi et al., 2006; Kim et al., 2003a, b) 특정지점과 사례기간에 국한되어 있어 지역의 대표성을 가지며 일반화될 수 있는 연구결과를 포함하고 있지 못하다.

본 연구의 목적은 관측 자료와 고해상도 기상 수치모델링 결과를 이용하여 울산지역의 기상 특성을 시·공간적으로 파악하고 대표성 있는 결과를 제시하는 데 있다. 1970년 이후부터 총 44년간(1970~2013년) 울산기상대에서 관측된 자료를 이용하여 기온, 풍속, 상대습도의 장기적인 변화를 조사하였고, 지역 내 위치한 지상관측지점들에서 최근 3년간(2011~2013년) 모니터링 된 자료를 근거로 평균적인 특성을 상세히 연구하였다. 또한 수치모델링을 통해 고해상도 공간정보를 생성하여 관측지점에 한정되었던 분석 범위를 울산 전 지역으로 확장하여 기온, 바람의 공간적 특성을 계절별로 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 대상지역

울산은 한반도의 동남단, 태백산맥의 남단에 위치한 인구 118만(2013년 12월 말 기준, 1970년 대비 약 4배)의 산업도시이다. 서쪽으로는 가지산(1,241 m), 신불산(1,209 m) 등 해발 1,000 m가 넘는 높은 산들이 위치하고 남동쪽으로는 동해남부해상과 접하며 복잡한 해안선이 형성되어 있다(그림 1). 도시를 북서쪽에서 남동쪽으로 가로지르는 태화강은 울산만과 연결되어 있으며 주변으로 약 60만의 인구가 거주하고 있다(Ulsan metropolitan city, 2013a). 또한 울산만과 연이어 있는 울산항, 온산항, 방어진항구들의 내안 구릉지에는 대규모 국가산업단지들이 조성되어 있는 것이 도시환경의 주요 특징이다.

지난 30년간(1981~2010년) 평균된 울산의 기온과 강수량의 경우 각각 14.1°C(여름/겨울: 24.1°C/3.4°C)와 1,277 mm(여름/겨울: 649.4 mm/99.5 mm)로 기록되어 비교적 온화하고 여름에 강수량이 많은 기후조건을 보였다(KMA, 2011a). 지표부근 바람의 경우는 연중 북-서계열의 바람이 우세하나 늦은 봄부터 여름까지는 동풍계열 빈도가 높다.

2.2 관측자료 분석

울산지역 기상인자의 장·단기 시간적 변화를 분석하기 위해 지역 내에 위치한 울산기상대 종관기상관측(Automatic Synoptic Observation, ASOS) 지점과 7개의 자동기상관측(Automatic Weather System, AWS) 지점의 모니터링 자료를 이용하였다. 분석된 기상인자는 기온, 바람, 상대습도이며 이들은 그 자체로 도시 생활환경과 건강에 영향을 주며 대기질 변화에도 직·간접적으로 관여하는 중요한 인자들이다.

장기분석에서는 울산 ASOS로부터 지난 44년간(1970~2013년) 관측된 기온, 풍속, 상대습도 자료를 이용하여 5년 이동 연평균 값의 추세를 파악하였고, 단기분석은 울산 ASOS와 7개 AWS에서 최근 3년간(2011~2013년) 관측된 자료를 이용하여 연중 일별 변화, 일중 시간별 변화를 조사하였다. 울산지역 내 국지적인 차이를 함께 파악하기 위해 기상관측지점의 위치와 환경을 고려하여 교외지역(삼동과 상북

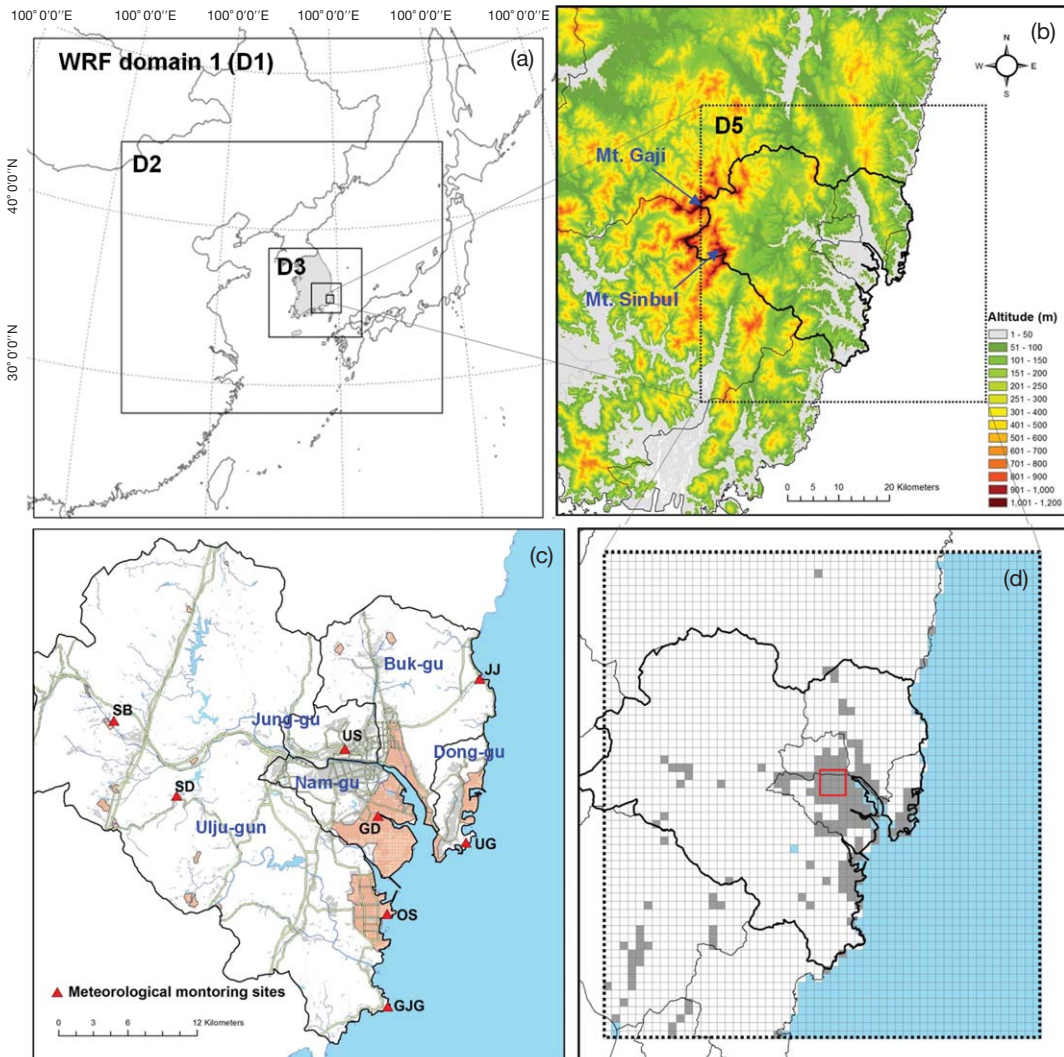


Fig. 1. (a) Five domains for the WRF modeling. (b) Terrain in the Ulsan metropolitan region (UMR) and its surroundings. The thick black line is the boundary of the UMR. (c) Meteorological sites in the UMR (US: Ulsan KMA station, GD: Gongdan, SD: Samdong, SB: Sangbuk, UG: Ulgi, GJG: Ganjeolgot, JJ: Jeongja, and OS: Onsan). The light red shaded regions and gray lines indicate industrial areas and main roads, respectively. (d) Urban built-up areas (gray shaded rectangles) for the 1-km grid inner-most WRF domain. The red line rectangle indicates the urban center area for comparison study.

AWS), 도심·공단지역(울산 ASOS와 공단 AWS), 그리고 연안지역(울기, 간절곶, 정자, 온산 AWS)으로 구분하여(그림 1 참고) 분석하였다.

모든 기상인자 통계의 기초자료는 1시간 평균값이며, 연, 월, 일 통계 값은 75% 이상 관측된 유효일 만을 대상으로 산출되었다.

2.3 기상모델링

기상인자의 고해상도 공간정보를 얻기 위해 WRF 모델(Weather Research & Forecasting model, v.3.4.1)을 사용하여 계절별 1개월씩(2012년 1, 4, 7, 10월) 모델링을 수행하였다. WRF 모델의 개요와 자세한 설명은 사용자 가이드와 논문 등(Wang *et al.*, 2009; Ska-

Table 1. The configuration of the WRF modeling.

Domain		D1	D2	D3	D4	D5
Horizontal grid		48 × 43	88 × 73	76 × 73	73 × 73	55 × 61
Horizontal resolution (km)		81	27	9	3	1
Vertical layer		43 layers (12 layers below 2 km AGL)				
Initial/Boundary condition		NCEP FNL ¹⁾ data				
Terrain/Land use		SRTM ²⁾ /EGIS ³⁾ data				
Physics options ⁴⁾	Microphysics	WSM3 (D1 and D2), WDM6 (D3, D4 and D5)				
	Cumulus	Kain-Fritsch (only D1 and D2)				
	Radiation	RRTMG (long & short wave)				
	PBL	YSU				
	Surface layer	Revised MM5				
	Land Surface	Noah Land Surface Model				

¹⁾Stunder (1997), ²⁾Farr and Kobrick (2007), ³⁾Environmental Geographic Information Services (2014), ⁴⁾NIER (2013)

marock *et al.*, 2008)에서 찾아 볼 수 있다.

본 연구에서 수행한 모델링 설계에 대한 주요정보는 표 1에 제시하였다. 대기경계층인자의 모델링 정확도를 높이기 위해 지상 2km 이내에 다수의 연직층(12개)을 두었고 고해상도 지형자료와(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) 및 토지피복 자료(Environmental Geographic Information System, EGIS)를 사용하였다(Jeong *et al.*, 2011). 물리옵션의 경우, 여러 선행연구에서 좋은 결과를 보인 옵션들을 선택하였고 NIER (2013)에서 수행한 영남권지역 모델링에 적용한 옵션과 동일하다. 각 달의 모델링은 안정적인 계산결과 도출을 위해 시간을 나누어 2회 수행되었고 초기 적응시간(spun-up time) 2일이 매회 추가로 포함되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 장기변화(1970~2013년)

그림 2는 지난 44년간의 울산 ASOS에서 관측된 기온, 풍속, 상대습도의 연평균값 변화를 보여주는 것으로 5년 이동평균값과 추세회귀선이 함께 제시되어 있다.

연평균기온은 분석기간 동안 14.0°C의 평균값을 보였고 최고 15.2°C(2004년), 최저 12.7°C(1980년)로 기록되었다. 지난 44년간 상승과 하강의 변화가 있었지만 전반적으로 상승 경향이 뚜렷하였다. 마지막 5년

(2009~2013년) 이동평균값은 처음 5년(1970~1974년) 평균값에 비해 0.9°C가 상승하였고 이동평균의 추세선 기준 0.033°C/년($p < 0.01$)의 상승률을 보였다(1년 평균값의 경우 0.031°C/년). 이러한 경향은 지난 100년간 지구의 평균기온 상승 값인 0.75°C(IPCC, 2007)와 비교해 매우 높은 것이다. 또한 기존 조사된 서울과 부산의 연간 기온 상승률 수치(0.037°C와 0.028°C, 분석기간: 1973~2010년)(KMA, 2011b)와 비교해 볼 때 비교기간의 차이는 있지만 서울보다는 낮고 부산보다는 높은 수치이다. 부산과는 연안도시라는 공통점이 있지만 빠른 도시성장(Kim *et al.*, 2008)과 산업 활동의 증가(Kim and Park, 2011) 등이 상대적으로 높은 기온상승의 일부 원인으로 볼 수 있다. 물론 두 도시 ASOS 지점의 위치 차이(울산의 경우 상대적으로 내륙에 위치함) 역시 기온 상승률 차이에 기여할 수 있는 부분이다.

전반적인 연평균 기온의 상승과 함께 나타난 연도별 큰 변동은 대규모 기상조건의 차이 등 여러 가지 원인들이 존재한다. 3~7년의 발생주기를 가지는 엘니뇨현상도(Kang *et al.*, 1995) 한 원인으로 들 수 있는데 엘니뇨 해의 한반도 겨울철 평균 기온은 대체로 평년보다 높고 여름철 평균 기온은 평년보다 낮게 나타나는 것이 특징이다(Kang, 1998; Min and Yang, 1998). 예로 1998년의 고온현상은 강한 엘니뇨의 영향과 관련한 겨울철 이상 고온의 영향으로 설명될 수 있다(KMA, 1998).

풍속의 경우 전체 분석기간 동안 2.2 ms⁻¹의 평균

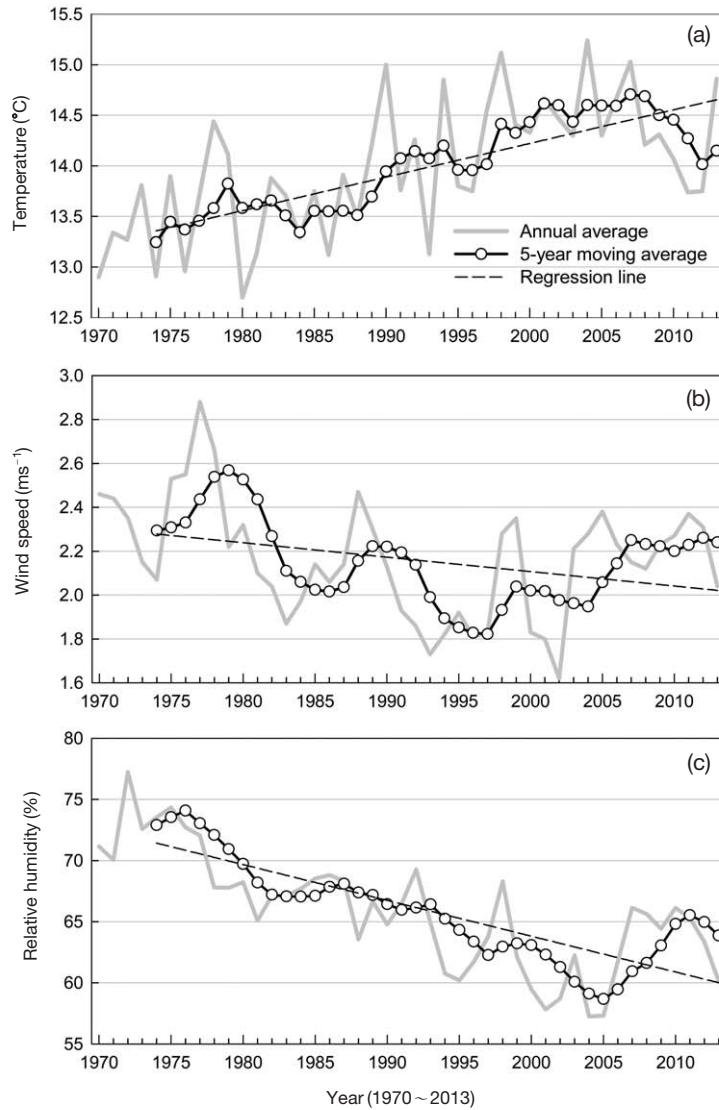


Fig. 2. The long-term variation of the annual average and 5-year moving average of (a) temperature, (b) wind speed, and (c) relative humidity for the years 1970~2013.

값을 보였고 최고 2.9 ms^{-1} (1977년), 최저 1.6 ms^{-1} (2002년)로 기록되었다. 기온과 마찬가지로 매년 변동은 있으나 전반적으로 감소 경향을 확인할 수 있다. 5년 이동평균값의 풍속 감소율은 매년 0.007 ms^{-1} ($p=0.01$)으로 계산되었다. 상대습도는 분석기간 동안 65.9%의 평균값을 보였고 최고 77.2% (1972년), 최저 57.3% (2005년)를 기록하였다. 전반적으로 감소 경향이

뚜렷하며 마지막 5년 이동평균값은 처음 값에 비해 약 12%가 감소하였고 감소율은 $0.29\%/\text{년}$ ($p<0.01$)으로 나타났다.

이상과 같이 분석된 기온의 상승, 풍속과 상대습도의 감소는 도시화 영향이 잘 나타난 기상조건의 변화로 볼 수 있다 (Ongoma *et al.*, 2013; Hua *et al.*, 2008; Um *et al.*, 2007; Unger, 1999). 즉 지난 수 십 년간 도

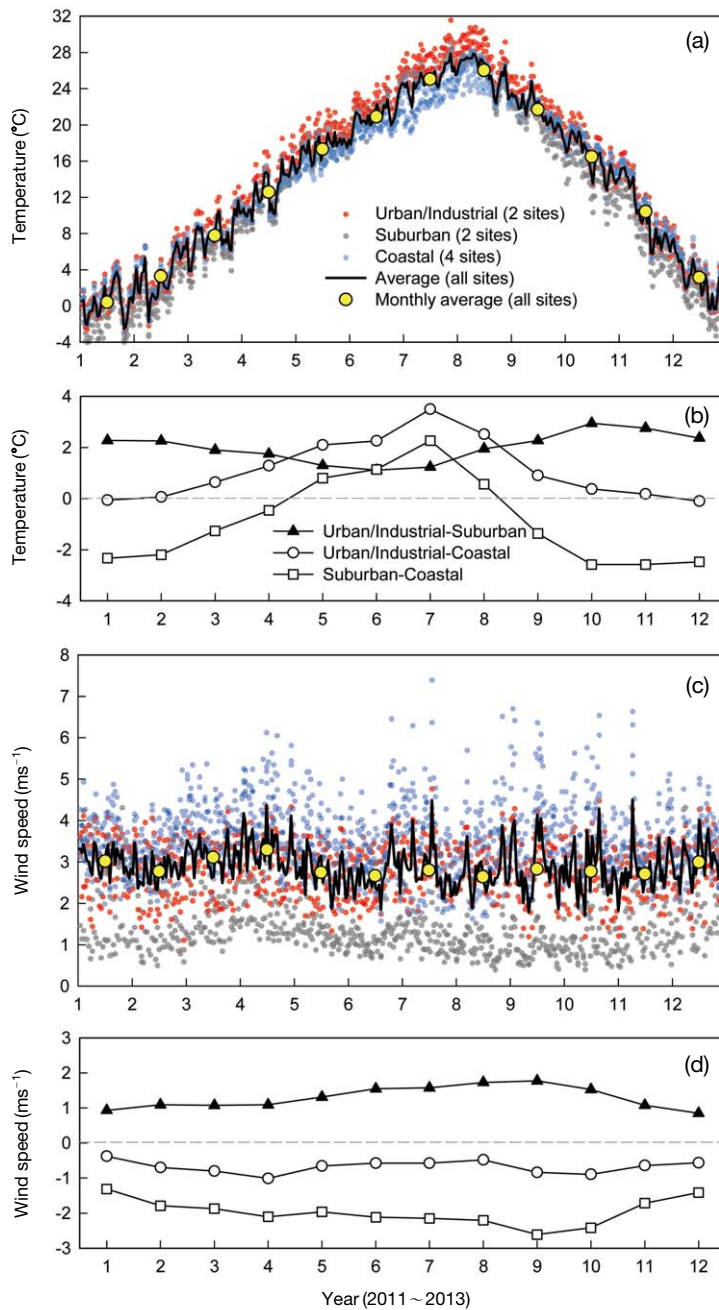


Fig. 3. Time series of daily mean and its difference between regions for (a and b) temperature and (c and d) wind speed, 2011~2013 (urban: US and GD sites, suburban: SB and SD, coastal: JJ, UG, OS and GJG sites).

시의 인공열이 증가하고 건물의 열저장효과와 지표면 상태변화로 인한 지표마찰이 커지는 도시화 과정이 진행되어 나타난 결과로 해석된다. 반면, 최근 약 5~6년간의 변화만 고려한다면 전체 기간의 변화 추

세와 반대 경향을 볼 수 있는데 이는 상대적으로 빈번했던 태풍의 영향과 운량의 증가(KMA, 2004~2013), 그리고 울산지역 도시화 현상의 악화(예로 인구증가를 감소, Ulsan metropolitan, 2013b)가 고려할 수 있는 원인이다.

3.2 단기 변화: 계절 및 일중 변화

최근 3년간(2011~2013년)의 울산 ASOS와 AWS 지점자료를 이용하여 기온과 바람의 평균 연중 변화와 일중 시간별 변화를 분석하였다. 그림 3은 일평균 기온과 풍속의 연중 변화를 나타낸 것으로 울산지역 8개의 기상관측지점의 전체 평균값과 교외, 도심·공단, 연안지역으로 구분된 세 지점들의 일 평균값, 그리고 각 지역 월 평균값 차이들이 비교되어 제시되어 있다. 표 2는 지점들의 기온, 풍속, 풍향에 대한 연평균 통계값을 보여준다.

우선 울산의 연중 기온 변화는 단기적 변동을 포함한 뚜렷한 계절성이 있고 지역별로 연중 변화 폭과 계절적 차이가 존재함을 그림 3a와 3b에서 알 수 있다. 연중 월평균 최저기온과 최고기온은 1월에 0.3°C, 8월에 26.2°C로 각각 나타났다.

도심·공단지역 평균기온은 14.9°C(1.1°C(1월)~27.5°C(8월))로 세 지역 중 가장 높았다. 여름에는 연안지역과 최대 3.5°C(7월)의 큰 기온차가 나타났고 가을/겨울에는 교외지역과 최대 2.9°C의 차이를 보였다. 이러한 도심·공단지역의 고온현상은 산업활동의 영향 및 도시효과(인공구조물, 인공열 등)를 반영해주는 결과로 해석된다(Taha, 1997). 교외지역 평균기온은 12.9°C로 세 지역 중 가장 낮게 나타났고 특히 삼동(SD)지점이 울산지역 전체 8개 지점 중 가장 낮은 연평균 기온(12.4°C)을 기록하였다. 연중 기온차

는 타 지역에 비해 크고(-1.1°C(1월)~25.7°C(8월)) 지역 간 차이는 가을과 겨울에 뚜렷하였다(최대차이: 도심·공단지역 평균과 2.9°C, 연안지역과 2.6°C). 연안지역 평균기온은 13.7°C로 나타났고 4개 연안지점들 값들이 유사하였다. 연중 0.9°C(1월)에서 25.4°C(8월)의 범위를 가지며 다른 두 지역과 비교하여 기온차가 작은 특징을 보였다. 특히 겨울철은 교외지역 지점들과 차이가 뚜렷이 나타나며 11월에 최대 2.6°C가량이 높다. 이는 해양 공기괴의 영향이 연안지역 지점들의 기온 하락 억제에 기여한 결과로 볼 수 있다.

풍속의 경우 전 지역 연평균 2.9 ms⁻¹ 값을 보이며 여름과 가을에 변동이 비교적 크다. 연중 뚜렷한 계절적 변화는 볼 수 없지만(2.6 ms⁻¹(8월)~3.3 ms⁻¹(4월)) 지역별 차이는 크게 나타났다.

도심·공단지역 풍속은 연평균 2.8 ms⁻¹로 나타났고(2.7 ms⁻¹(9월)~3.1 ms⁻¹(1월)) 교외지역보다는 강하고 연안지역보다는 약하다. 교외 및 연안지역과의 차이는 계절적으로 9월(1.8 ms⁻¹)과 10월(0.9 ms⁻¹)에 비교적 크다. 내륙에 위치한 교외지역은 1.6 ms⁻¹의 약한 연평균 풍속을 보이며 겨울철 상승이 나타난다(최고: 2.1 ms⁻¹, 1월). 특징적으로 도심·공단지역 및 연안지역과는 큰 풍속 차이를 보였고 연중 9월에 각각 1.8 ms⁻¹, 2.6 ms⁻¹로 가장 뚜렷하였다. 연안지역 풍속은 연평균 3.5 ms⁻¹로 세 지역 중에 가장 강하며 4월에 최고값(4.1 ms⁻¹)이 나타났다. 교외지역과의 차이가 크며 9월에 뚜렷하다.

지역 간 연중 월평균 풍속 비교를 통해 9월, 10월에 차이가 크게 나타나는 특징을 확인할 수 있었다. 이는 계절의 전환 시점에서 종관 계절풍이 약한 시기로 바다와 가까운 연안지역과 도심·공단지역에 해륙풍의 영향이 반영되어 나타난 결과로 해석된다.

Table 2. Annual mean temperature and wind speed at three regions (8 sites), 2011~2013.

Region	Site	Temperature (°C)		Wins speed (m s ⁻¹)		Dominant wind direction
		Region	Site	Region	Site	
Urban center/Industrial	US	14.9±9.4	14.1±9.4	2.8±1.0	2.2±0.9	NW/NE
	GD		15.6±9.4		3.5±0.6	NNW/N
Suburban	SD	12.9±9.7	12.4±9.7	1.6±1.0	1.2±0.6	E/SW
	SB		13.3±9.6		1.9±1.2	N/NW
Coastal	UG	13.7±8.5	13.5±8.3	3.5±1.4	3.3±1.3	ENE/N
	GJG		13.7±8.0		3.9±1.6	N/NNE
	JG		13.7±8.9		3.1±1.1	WSW/W
	OS		14.0±8.7		3.7±1.3	NE/N

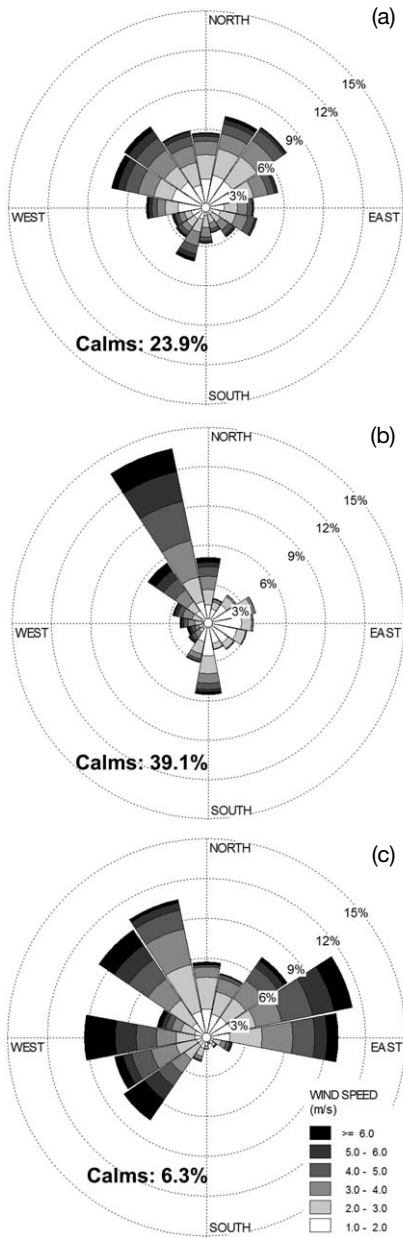


Fig. 4. Wind roses at three sites: (a) US, (b) SB, and (c) UG, 2011 ~ 2013.

울산지역의 풍향은 연중 북~북서계열 바람의 빈도가 높다(표 2, 그림 4). 겨울에는 북서풍이 탁월하며 늦은 봄과 여름에는 동풍의 빈도가 상대적으로 높음을 계절별 바람장미도(여기서는 제시하지 않음)

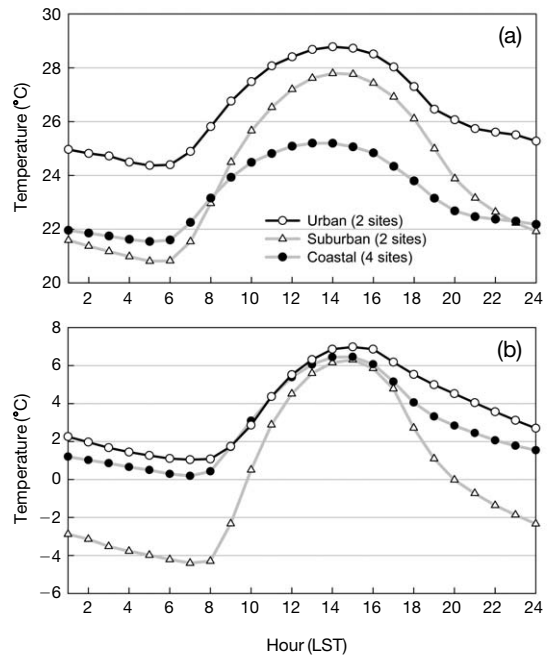


Fig. 5. Diurnal variations of hourly mean temperature at three regions in (a) summer and (b) winter.

를 통해 확인되었다. 하지만 국지적으로 바람 분포의 큰 차이가 존재하는데 그림 4에 제시된 울산 ASOS 지점과 상북과 울기 AWS 지점의 바람장미도에 잘 나타나 있다.

울산 ASOS 지점의 바람은 비교적 울산 도시지역의 대표성이 있는 곳이다(해발고도: 35 m, 풍향계의 지상높이: 10 m). 전반적으로 북서-북북동계열의 바람 빈도가 높지만 연중 다양한 풍계가 형성된다. 3 ms^{-1} 이하의 약풍이 빈도가 높은 것이 특징이며 이는 도시의 마찰효과 등이 반영된 결과로 해석된다. 교외에 위치한 상북 AWS 지점은 주변 지형과 계절풍의 영향으로 북서풍과 남풍이 탁월하며 북서풍을 제외하고는 전반적으로 바람이 약한 것이 특징적이다. 연안에 위치한 울기 AWS 바람분포는 5 ms^{-1} 이상의 강풍의 빈도가 높고 남풍을 제외하고는 다양한 풍계가 형성된다. 주변의 지상 마찰이 적고 계절풍 및 해풍 영향의 결과로 해석된다.

그림 5는 도심·공단, 연안, 교외지역을 대상으로 일 중 시간별 평균기온의 변화를 여름(6~8월)과 겨울(12~2월)로 구분하여 나타낸 것이다. 여름은 세

Table 3. Statistics summary results for meteorological variables.

Variable (refer. height)	Statistical measures	Hourly data (January/April/July/October)	Benchmarks ¹⁾
Temperature (2 m)	R	0.96/0.95/0.96/0.94	-
	MBE	-0.39/-0.07/-0.08/0.25	≤ ±0.5°C
	MAGE	0.78/0.78/0.68/0.86	≤ 2°C
	RMSE	1.25/1.28/1.09/1.49	-
	IOA	0.98/0.98/0.98/0.97	≥ 0.8
Wind speed (10 m)	R	0.75/0.87/0.86/0.84	-
	MBE	0.78/0.41/0.28/0.49	≤ ±0.5 ms ⁻¹
	MAGE	0.95/0.64/0.52/0.63	-
	RMSE	1.68/1.21/0.96/1.14	≤ 2 ms ⁻¹
	IOA	0.83/0.93/0.92/0.90	≥ 0.6
Wind direction (10 m)	R	0.96/0.95/0.96/0.94	-
	MBE	5.2/1.9/-8.4/3.09	≤ ± 10°
	MAGE	27.8/26.7/30.4/34.9	≤ ± 30°

¹⁾U.S. EPA (2007)

지역 모두 새벽 5시에 최저값(평균 22.2°C)과 오후 2시에 최고값(평균 27.3°C)이 나타났지만 지역별로 최고/최저값과 일교차의 차이가 뚜렷하다. 일 최고기온의 경우 도심·공단과 교외지역은 각각 28.8°C, 27.8°C로 비슷한 반면 연안지역은 25.2°C로 도시지역과 비교해 3.6°C 이상의 큰 차이를 보였다. 이는 열용량이 큰 바다의 영향과 빈도 높은 해풍의 유입과 관련한 기온 상승의 억제가 주된 원인으로 볼 수 있다. 최저기온은 교외와 연안이 각각 20.8°C, 21.5°C로 비슷하나 도심·공단의 경우 24.4°C로 높게 나타난다. 교외지역은 7°C의 큰 일교차를 보여 내륙지역 기온의 일변화 특성을 잘 보여 준다.

겨울철은 세 지역 모두 오전 7시에 최저값(평균 -1.1°C)을 오후 3시에 최고값(평균 6.6°C)이 나타났고 교외지역과 나머지 두 지역 간의 최저값과 일교차의 차이가 뚜렷하다. 여름철과는 달리 최고기온의 지역별 차이는 크지 않은 반면 최저 기온은 도시·공단 지역, 연안지역은 유사하나 교외지역은 큰 차이로 낮게 나타났다(도시: 1.0°C, 교외: -4.4°C, 연안: 0.2°C). 또한 일교차는 교외지역에서 가장 크게(약 11°C) 나타남을 볼 수 있다. 도심·공단과 연안지역의 적은 일교차는 도심열섬의 영향(Yi et al., 2014; Kwon et al., 2008)과 해양의 영향(Seo et al., 2009)이 반영된 결과로 설명된다.

3. 3 수평분포

이 절에서는 WRF 기상모델링을 통해 계산된 고해

상도 기온과 바람장에 대한 분석결과를 제시하였다. 이에 앞서 WRF 모델링 결과와 관측자료와의 검증 통계량(평균 편향 오차(mean bias error, MBE), 평균 절대 오차(mean absolute gross error, MAGE), 평균 제곱근 오차(root mean square error, RMSE), 일치도 지수(index of agreement, IOA))을 계산하여 표 3에 제시하였다. 검증은 지역 내 위치한 8개 기상관측지점(그림 1 참고)의 시간별 관측자료와 해당격자의 모델값을 비교하였고 계절별 모델링 전체기간의 자료를 대상으로 하였다.

검증결과, 계절별 다소의 차이는 존재하나 여러 기존 문헌에서(Denby et al., 2010; Borge et al., 2008; Hogrefe et al., 2001) 제시한 기상모델링 수행 평가를 위한 통계지표의 신뢰성 범주에 대부분 포함되었고 특히 기온에 대한 정확도는 매우 높았다. 계절별 관측값과 모델값의 산포도(그림 6)와 시계열 변화(여기서는 제시하지 않음) 비교에서도 모델 결과가 관측 자료의 변화를 큰 차이 없이 재현함을 보여주었다.

그림 7은 WRF 모델링을 통해 생성된 월평균 기온과 바람벡터의 수평분포를 보여준다. 울산지역 기온과 바람은 계절적인 변화와 함께 내륙에는 도시지표 상태의 차이 및 지형 효과로 인해(그림 1 참고) 국지적 차이가 크게 나타남을 알 수 있다.

겨울을 대표하는 1월의 경우 해상과 지상의 기온차가 뚜렷하다. 지상에서는 연안과 도시/산업단지 지역에서 상대적으로 기온이 높지만 강한 탁월풍의 영향으로 공간적 차이가 크지 않다. 울산지역 전체 격자

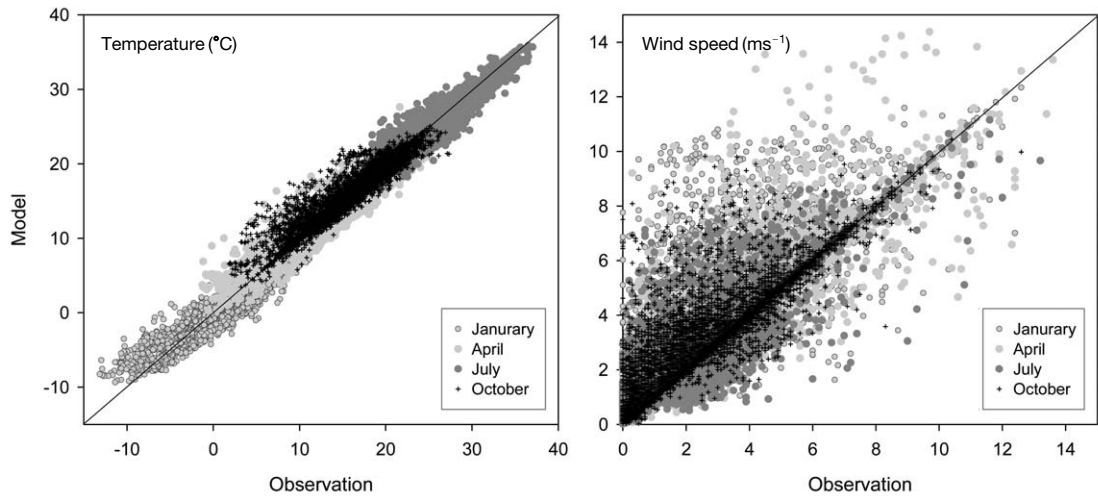


Fig. 6. Comparison between the simulated and observed temperature and wind speed in four seasons of 2012.

(울산 경계 내 총 격자수: 1,118개)의 평균값은 $-0.6 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 로 나타났고 격자별 $-4.6 \sim 3.3^{\circ}\text{C}$ 의 분포를 보였다. 대부분의 인구가 거주하고 있는 도시역(울산 지역 전체 격자수의 약 11%, 그림 1d의 회색 영역)만을 한정하면 평균기온은 $1.3 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ (최저: -0.1°C , 최고: 2.0°C)로 전체 영역 평균값과 비교해 약 2°C 높다. 1월 바람의 경우 내륙에는 지형에 의한 풍향 변화가 다소 존재하나 영역 전체에 계절풍과 관련한 강한 북서풍이 탁월하다(특히 해상). 울산지역 전체 격자의 평균풍속은 $4.9 \pm 1.4 \text{ m s}^{-1}$ (최저: 2.2 m s^{-1} , 최고: 9.0 m s^{-1})로 계산되었고 도시역은 $4.5 \pm 0.4 \text{ m s}^{-1}$ (최저 2.7 m s^{-1} , 최고 7.0 m s^{-1})로 전체지역에 비해 약하다.

4월의 경우 해상과 지상의 기온차가 크지 않으며 내륙 도시역 및 주변지역의 국지적 차이가 뚜렷하다. 울산지역 전체 평균값은 $12.9 \pm 1.1^{\circ}\text{C}$ 로 계산되었고(최저: 9.2°C , 최고: 15.0°C) 도시역 평균 기온은 $14.5 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ (최저: 13.5°C , 최고: 15.0°C)로 나타났다. 지역의 평균 바람은 남서풍이 탁월하지만 특정 풍향의 강한 바람을 볼 수 없다. 이는 봄철 이동성 고기압의 영향과 해륙풍 발달 등에 의한 다양한 풍계의 형성이 이유로 해석된다. 울산지역 전체 평균 풍속은 $4.0 \pm 0.8 \text{ m s}^{-1}$ (최저: 2.8 m s^{-1} , 최고: 6.7 m s^{-1})이고 도시역은 $3.4 \pm 0.4 \text{ m s}^{-1}$ (최저 2.9 m s^{-1} , 최고 4.6 m s^{-1})로 상대적으로 약하다.

여름의 중심에 있는 7월의 경우 내륙 기온의 상승

이 뚜렷하며 인근 해상과의 기온차가 1월과 유사하게 크게 나타난다. 울산지역 기온 분포는 4월과 유사하게 국지적 차이가 뚜렷하며 도심·공단지역과 연안 지역과의 차이가 크다. 울산지역 전체 평균값은 $24.7 \pm 1.1^{\circ}\text{C}$ (최저: 21.6°C , 최고: 27.2°C)이며 도시역 평균 기온은 $26.3 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$ (최저 24.2°C , 최고 27.2°C)로 계산되었다. 평균바람은 남서~남풍이 탁월하지만 내륙 도시역의 경우 풍속이 매우 약하여 특정 풍향이 볼 수 없다. 울산지역 평균풍속은 $2.8 \pm 0.6 \text{ m s}^{-1}$ (최저 1.6 m s^{-1} , 최고 5.5 m s^{-1})이고 도시역은 $2.6 \pm 0.5 \text{ m s}^{-1}$ (최저 1.9 m s^{-1} , 최고 4.2 m s^{-1})이다.

마지막으로 10월의 경우 지상의 기온이 하강하면서 1월과 유사한 공간적 기온 패턴을 보인다. 내륙 도시역의 고온현상은 잘 나타나지만 연안지역 기온과의 경도는 크지 않다. 울산지역 전체 평균값은 $14.9 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ (최저: 11.3°C , 최고: 18.1°C), 도시역 평균 기온은 $17.3 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ (최저 16.0°C , 최고 17.8°C)로 나타났다. 평균바람의 경우 전반적으로 북서풍이 우세하지만 내륙에는 약한 풍속의 다양한 풍계가 존재한다. 지역 평균풍속은 $3.7 \pm 0.9 \text{ m s}^{-1}$ (최저 1.9 m s^{-1} , 최고 6.2 m s^{-1})이고 도시역은 $3.3 \pm 0.6 \text{ m s}^{-1}$ (최저 2.1 m s^{-1} , 최고 4.7 m s^{-1})이다.

모든 계절에서 나타난 도시역 고온현상을 보다 상세히 고찰하기 위해 주거지와 도로가 집중 분포되어 있는 도심지역(그림 1d의 빨간색 사각형 영역)의 기

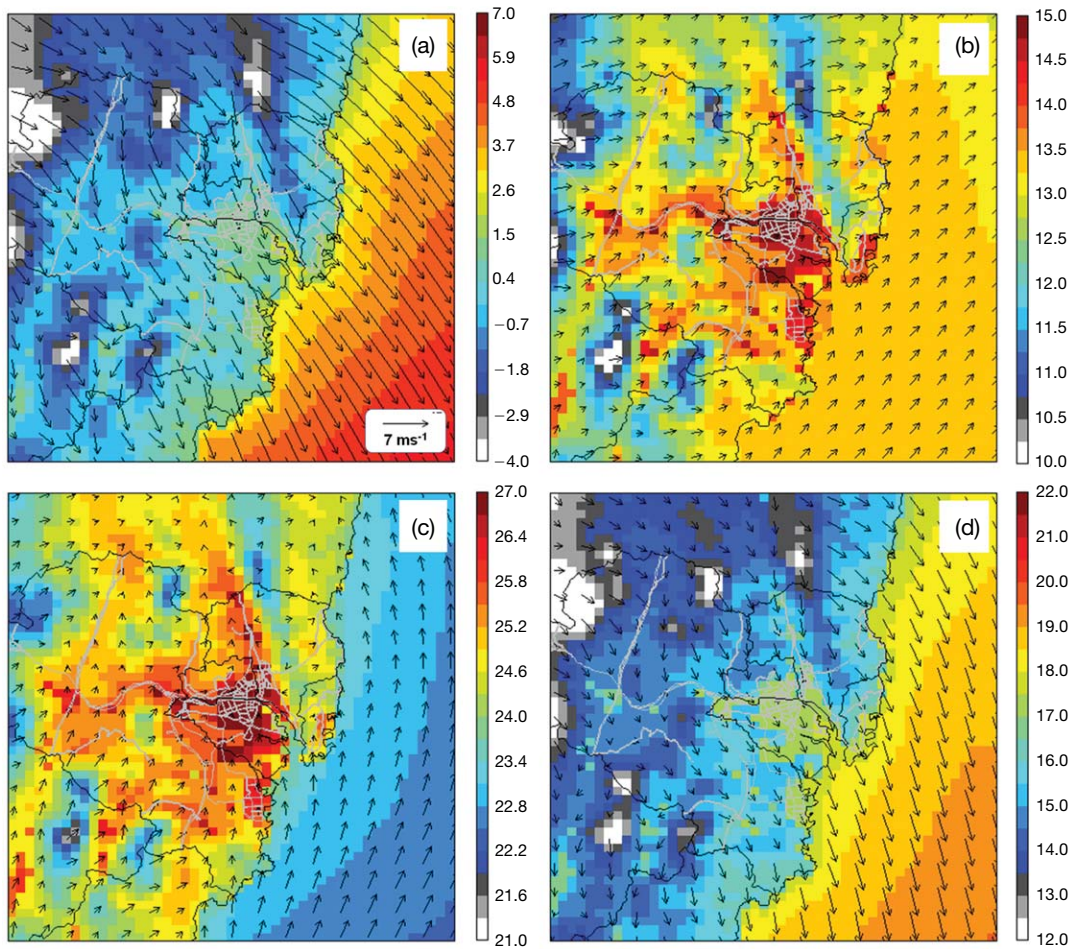


Fig. 7. Horizontal distributions of the simulated monthly mean temperature and wind vectors at 10 m AGL for (a) January, (b) April, (c) July, and (d) October. The wind vectors are displayed every three grid points and their lengths are proportional to the wind speeds.

온 값과 울산 경계 내의 도시역(그림 1d 참고) 기온 값을 비교하였다. 그 결과 모든 계절에서 도심지역 기온이 울산 전체 도시역 평균 보다 높게 나타났는데 1, 4, 7, 10월의 도심지역 평균기온은 각각 1.4°C, 14.8°C, 26.9°C, 17.4°C로, 울산 경계 내에 도시역 평균은 1.3°C, 14.5°C, 26.3°C, 17.3°C로 계산되었다. 특히 7월에 나타난 0.6°C의 뚜렷한 기온 차이는 앞서 제시한 지점 관측자료 분석결과와(연안과 도심·공단지역간에 나타난 7월 평균기온의 큰 차이, 그림 3b 참고) 일치한다. 물론 본 모델은 건물효과나 인공열로 인한 열섬효과를 고려하지 못하기 때문에 도심지

역 기온의 정량적 해석에 분명 한계가 있다. 특히 최근 형성되고 있는 연안지역 고층건물의 효과가 도시 기온의 공간적 분포에 영향을 유의하게 미칠 것으로 예상되지만(Hwang *et al.*, 2012) 본 모델결과는 이를 설명하지 못한다.

이상과 같은 모델링 결과에서 연중 도시역(특히 도심)의 고온현상, 지형적 특성으로 인한 극지적인 큰 차이와 계절적 변화를 볼 수 있었다. 평균 바람장은 1월/10월이 유사하지만 4월/7월과의 차이가 뚜렷하였고 특히 4월/7월의 경우 울산 도시역 바람이 약하고 다양한 풍계가 나타났다. 또한 모델링 결과는

지형과 지표면 상태가 기온의 공간적 분포에 큰 영향을 주며 아울러 바람의 영향이 기온분포의 국지성과 관련하는 패턴을 보여 주었다.

4. 결 론

본 연구에서는 울산지역 주요 기상인자의 장기적 추세와 다년간 평균된 계절 및 일변화 특징들이 제시되었다. 또한 고해상도 기상 모델링을 통해 계절별 기온과 바람의 공간적 특징들이 파악되었다.

지난 44년간 관측된 자료를 이용하여 장기추세를 분석한 결과 기온 상승과 풍속 및 상대습도의 뚜렷한 감소현상을 알 수 있었다. 특히 기온의 경우 5년 이동평균값 기준 0.033°C/년의 높은 상승률을 보였다.

최근 3년간 평균된 기온과 바람의 단기변화 분석에서는 계절과 지역에 따른 뚜렷한 차이를 확인할 수 있었다. 도심·공단지역의 고온현상(연안지역과 최대 3.5°C 차이, 7월), 연안지역 기온의 작은 연교차와 겨울철 교외지역과의 뚜렷한 차이(최대 2.6°C, 11월)가 특징적이다. 풍속은 교외지역을 제외하고는 뚜렷한 계절변화를 볼 수 없었고 연안지역 풍속이 상대적으로 강하다. 바람장미 분석에서 북~북서풍이 울산지역에서 연중 탁월한 바람임을 보여 주었지만 지형과 도시지표상태가 다른 지역 간 바람분포 차이가 컸다. 일 중 시간별 평균기온의 변화에서는 여름에는 주간의 기온이, 겨울에는 야간의 기온이 지역별로 큰 차이를 보였다.

고해상도 수치모델링을 통한 기온과 바람의 공간 분포를 분석한 결과 뚜렷한 국지적 차이와 계절적 변화를 공간적으로 확인할 수 있었다. 기온은 계절적 차이는 있지만 연중 도시지역에서 높게 나타나며 7월의 경우 도심의 기온 상승이 뚜렷하고 주변지역과 차이가 가장 크게 나타났다. 모의된 바람장 패턴의 경우 내륙 도시/교외지역의 바람이 주변 연안과 산악지역과 비교해 약하게 나타났고 특히 4월과 7월은 다양한 풍향의 약한 바람이 탁월하였다.

이상과 같이 관측자료와 수치모델링 결과 분석을 통해 울산지역의 평균적이며 대표성 있는 기온과 바람의 시·공간 분포 특성을 파악할 수 있었다. 하지만 도시화 효과 및 지역간 차이를 보다 정확히 이해

하기 위해서는 도시지역 기상관측의 확대 필요성이 크며, 인공열 및 건물 등의 고해상도 지표 입력자료 구축과 관련 모델의 적용을 통해 (Hwang *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2011) 추가적인 모델링 연구가 요구된다.

본 연구의 결과는 울산지역 기상조건의 전반적인 이해와 더불어 향후 도시열섬, 열대야 등의 특정 기상조건을 분석하고 산업단지/도심에서 배출되는 대기오염물질의 확산과 영향권을 평가하는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 환경부 환경보건센터 재원에 의해 이루어졌습니다.

References

- Borge, R., V. Alexandrov, J.J. Del Vas, J. Lumberras, and E. Rodriguez (2008) A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula, *Atmos. Environ.*, 42, 8560-8574.
- Chen, F., H. Kusaka, R. Bornstein, J. Ching, C.S.B. Grimmond, S. Crossman-Clarke, T. Loridan, K.W. Manning, A. Martilli, S. Miao, D. Sailor, F.P. Salamanca, H. Taha, M. Tewari, X. Wang, A.A. Wyszogrodzki, and C. Zhang (2011) The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems, *Int. J. Climatol.*, 31, 273-288.
- Choi, B.-W., J.-H. Jung, W.-J. Choi, B.-H. Shon, and K.-J. Oh (2006) Characteristics of the Distribution of High Ambient Air Pollutants with Sources and Weather Condition in Ulsan, *J. Environ. Health Sci.*, 32(4), 324-335. (in Korean with English abstract)
- Denby, B., E. Georgieva, S. Larssen, C. Guerreiro, L. Li, J. Douros, N. Moussiopoulos, L. Fragkou, M. Gauss, H. Olesen, A.I. Miranda, P. Dilara, P. Thunis, S. Lappi, L. Rouil, A. Lukewille, X. Querol, F. Martin, M. Schaap, D. van den Hout, A. Kobe, C. Silibello, K. Vincent, J. Stedman, M. Goncalves, G. Pirovano, L. Volta, A. van Pul, A.G. Ortiz, P. Roberts, and D. Oettl (2010) Guidance on the use of models for the European air quality directive. In: Denby, B. (Ed.),

- A Working Document of the Forum for Air Quality Modelling in Europe. FAIRMODE Technical Report Version 4.2ETC/ACC.
- Environmental Geographic Information Services (2014) <http://egis.me.go.kr/main.do>
- Farr, T.G. and M. Kobrick (2007) The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45(2).
- Hogrefe, C., S.T. Rao, P. Kasibhatla, G. Kallos, C. Tremback, W. Hao, D. Olerud, A. Xiu, J. McHenry, and K. Alapaty (2001) Evaluating the performance of regional-scale photochemical modeling systems: Part I-Meteorological predictions, *Atmos. Environ.*, 35, 4159-4174.
- Hua, L.J., Z.G. Ma, and W.D. Guo (2008) The impact of urbanization on air temperature across China, *Theor. Appl. Climatol.*, 93, 179-194.
- Hwang, M.-K., I.-B. Oh, and Y.-K. Kim (2012) Numerical Modling for the Effect of High-rise Buildings on Meteorological Fields over the Coastal Area Using Urbanized MM5, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 28(5), 495-505. (in Korean with English abstract)
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- Jeong, J.-H., I.-B. Oh, D.K. Ko, and Y.-K. Kim (2011) The Characteristics of Seasonal Wind Fields around the Pohang Using Cluster Analysis and Detailed Meteorological Model, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 20(6), 737-753. (in Korean with English abstract)
- Kang, I.-S., Y.-M. Lee, and S.-I. An (1995) Interannual variability of Typhoon activity over the Western Pacific and El-Nino, *J. Korean Meteor. Soc.*, 31(1), 390-396. (in Korean with English abstract)
- Kang, I.-S. (1998) Relationship between El-Nino and Korean Climate Variability, *J. Korean Meteor. Soc.*, 34(3), 390-396. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.-K., Y.-K. Lim, and Y.M. Cho (2003a) Heat island effects by climate change in Ulsan area, *Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference*, 12(1), 323-324.
- Kim, Y.-K., Y.-M. Lee, and P.-K. Lee (2003b) Meteorological characteristics associated with odor episode in Ulsan metropolitan city, *Proceeding of the 35th Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*, 308-309.
- Kim, D.S., M.G. Huh, and D.H. Lee (2008) Analysis of City Size Distribution and Spatial Structure-with Korean Metropolitan Statistical Areas (MSA)-, *J. Econ. Geogr. Soc. Korea*, 11(4), 549-563. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.-B. and D.-H. Park (2011) A Comparative Study on Industrial Structure Characteristics and Change for Specialized Industry Strategy: The Case of Busan, Ulsan and Kyungnam, *GRI Review*, 13(2). (in Korean with English abstract)
- KMA (1998) Characteristics of 1997/98 El Niño and weather in Korea, Korea Meteorological Administration.
- KMA (2004~2013) Annual Climatological Report, Korea Meteorological Administration.
- KMA (2011a) Climatological Normals of Korea (1981~2010), Korea Meteorological Administration.
- KMA (2011b) Report of Regional Climate Change (Seoul), Korea Meteorological Administration.
- Kwon, S.I., J.S. Kim, J.-H. Park, K.Y. Oh, and C.M. Song (2008) Characteristics of Temperature Variation in Urban and Suburban Areas During Winter, *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, 50(2), 15-26. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.T. and B.K. Lee (2010) Analysis of a Climate Change Pattern using Meteorological Factors in Ulsan, *Proceeding of the 51th Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*, 428-428.
- Min, Y.-K. and J.S. Yang (1998) A Study on Correlation between El-Niño and Winter Temperature and Precipitation in Korea, *J. Korean Assoc. Reg. Geogr.*, 4(2), 151-164. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Environmental Research, NIER (2013) Studies on the optimization method for improving the accuracy of air quality modeling, Report No. 11-1480523-001619-01.
- Ongoma, V., N.J. Muthama, and W. Gitau (2013) Evaluation of Urbanization influences on Urban Winds of Kenya cities, *Ethiopian J. Environ. Stu. Manag.*, 6(3), 223-231.
- Seo, M.S., S.K. Hong, and J.H. Kang (2009) Characteristics of Seasonal Mean Diurnal Temperature Range and Their Causes over South Korea, *J. Korean Meteor. Soc.*, 19(2), 155-168. (in Korean with English abstract)
- Skamarock, W.C., J. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, W. Wang, and J.G. Powers (2008) A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical Note, NCAR/TN-468+STR. Mesoscale and Micro scale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.
- Stunder, B. (1997) NCEP model output-FNL archive data, Tech. Rep. TD-6141, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD (Available at <http://www.arl.noaa>).

- gov/ready-bin/fnl.pl.)
- Taha, H. (1997) Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat, *Energy Build.*, 25, 99-103.
- Ulsan metropolitan city (2013a) 2013 Ulsan Metropolitan City White Paper.
- Ulsan metropolitan city (2013b) The Statistical yearbook of Ulsan.
- Um, H.H., K.J. Ha, and S.S. Lee (2007) Evaluation of the urban effect of long-term relative humidity and the separation of temperature and water vapor effects, *Int. J. Climatol.*, 27, 1531-1542. (in Korean with English abstract)
- Unger, J. (1999) Urban-Rural Air Humidity Differences in SZEGED, HUNGARY, *Int. J. Climatol.*, 19, 1509-1515.
- U.S. EPA (2007) Guidance on the use of models and other analyses for demonstrating attainment of air quality goals for ozone, PM2.5, and regional haze. Technical Representative, EPA-454/B-07-002, Research Triangle Park, NC.
- Wang, W., C. Bruyère, M. Duda, J. Dudhia, D. Gill, H.-C. Lin, J. Michalakes, S. Rizvi, and X. Zhang (2009) ARW Version 3 modeling system user's guide Mesoscale and Microscale Division, NCAR: Boulder, USA.
- Yi, C.-Y., K.-R. Kim, S.-M. An, and Y.-J. Choi (2014) Impact of the Local Surface Characteristics and the Distance from the Center of Heat Island to Suburban Areas on the Night Temperature Distribution over the Seoul Metropolitan Area, *J. Korean Assoc. Geogr. Inf. Stud.*, 17(1), 35-49. (in Korean with English abstract)