

부산지역 도시대기환경지도를 활용한 대기환경 특성 분석

김민경[†] · 도우곤 · 조정구
대기보전과

The Analysis of Atmospheric Environment Features Using the Urban Atmospheric Environment Map in Busan

Kim Min-kyeung[†], Do Woo-gon and Cho Jeong-goo
Air Preservation Division

Abstracts

The atmospheric environment of urban area is important in the city life because the weather such as the temperature and the wind directly or indirectly affects the human life and it can increase or decrease the urban air pollution. It is vulnerable to air pollution than the atmospheric environment of rural area because of high energy usage, low albedo, low latent heat flux, and high air pollutant emissions. In this study to analyze the atmospheric environment features in Busan the urban atmospheric environment map was made and it consist of the atmospheric environment element map and the atmospheric environment analysis map. The atmospheric environment element map covered the topography, the urban climate, the buildings stories, the air pollutant emission, ozone and PM10 concentrations in Busan by using arc-GIS and Surfer and the atmospheric environment analysis map included the thermal environment and the wind flow by using WRF meteorological numerical simulation. The meteorological elements from 2007 to 2011 in Busan were used in this study. As a result, in the center of Busan the temperature was high, so it is needed to make the roof garden and retain wind pathway from the mountain. In Buk-gu along to the Nakdong river the temperature was also high, so it is required to perform a green business at the riverside of Nakdong river and to retain a wind way. To analyze the air flow of Busan 3 clusters depending on the wind direction were extracted with the cluster analysis. The results of the analysis on the detailed wind field of each cluster showed that the weak ventilation could be happened locally at the specific meteorological condition. In order to analyze the atmospheric environment in detail it is necessary to simulate the air quality in specific and smaller area. This study is expected to enhance the understanding the atmospheric environment in Busan and provide the assistance to make the environment-friendly Busan.

Key words : Urban Atmospheric Environment Map, WRF, Wind Pathway

서 론

1960~70년대 산업화를 거치면서 우리사회는 인구의 도시 집중화 및 도시권 확대 현상이 가속화되어 왔다. 국

토해양부 2011년 도시계획현황에 따르면 1960년 우리나라 전체 인구의 39.1%가 도시지역에 거주하였으나, 2011년에는 전체 인구의 91.1%가 도시지역에 거주하고 있는 것으로 나타났다¹⁾. 여기서 도시지역이라 함은 국토 계획법상 4개 용도지역 중 도시지역, 관리지역, 농림지역

[†] Corresponding author, E-mail : kmink@korea.kr

Tel : +82-51-309-2921, Fax : +82-51-309-2929

및 자연환경보전지역 중 하나를 의미하고 있으며, 대다수의 인구가 도시에서 생활하고 있고, 시민들의 삶의 질에 대한 관심 증가로 도시에서의 대기환경에 대한 관심과 중요성 또한 더욱 높아지고 있다. 대기환경은 열과 바람으로 발생하는 기상현상과 대기오염물질로 인한 대기오염으로 구분할 수 있으며, 이러한 현상은 도시의 고유 특성으로 인해 비도시와 구별되는 특징을 갖게 된다. 비도시 지역에 비해 도시지역은 인구밀도가 높고, 비농업적 산업 비율이 높은 특징이 있으며, 도시 인구가 증가되면서 도시 면적당 사용하는 에너지 및 대기오염물질이 증가하고, 토지의 적극적인 개발로 도시의 열용량은 높아지는 특징을 나타내게 된다. 이러한 도시에서의 에너지 사용 증대, 낮은 알베도로 태양 복사량 증대, 식생의 감소와 불침투성 지표면 증대로 인한 도시 대기의 잠열 플럭스 감소, 대기오염물질 방출량 증가는 도시열섬현상과 대기오염현상이라는 부작용을 나타내게 되며, 이는 곧 시민들의 쾌적하고 안락한 주거 환경에 악영향을 미치게 되므로, 도시의 대기환경에 대한 진단, 평가, 개선에 대한 과정은 중요하다고 할 수 있다.

도시에서의 기상현상은 기온, 바람, 강수량, 습도의 항목으로, 도시의 대기오염은 대기오염물질의 종류와 양으로 평가할 수 있으며, 도시에서의 기상현상과 대기오염은 모두 도시민의 생활과 건강에 직·간접적인 영향을 주게 된다. 또한 도시에서의 대기오염은 기상현상과 밀접한 관련을 가지게 되는데, 도시에서 발생하는 대기오염물질의 종류와 양이 도시 고유가 가지고 있는 지형적 특성과 기상현상에 의해 변화하여 한 도시에서의 대기오염정도를 나타내게 된다. 즉, 대기오염배출량, 지형적 특성, 기상현상의 종합적 작용으로 도시의 대기오염은 나타내게 되며, 시간 스케일 규모로 살펴보면 배출량과 지형적 특성에 비해 기상현상은 수시간~수일 단위로 변화하는 복잡한 모습을 나타내어, 대기오염 현상에서 기상은 중요한 부분을 차지하게 된다. 기상현상과 대기오염의 관련성을 확인하려는 시도는 여러 문헌에서도 찾아볼 수 있으며, 오존을 대기의 국지수송효과 및 환기경로 파악²⁾, 해륙풍의 영향³⁾과 연관하여 분석하기도 하였고, 미세먼지를 연무와 박무와 같은 기상현상^{4, 5)}과 관련하여 해석하기도 하였다. 방법상으로는 통계적 방법과 기상장 모델을 이용한 수치모의 방법이 주를 이루고 있었다.

본 연구에서는 도시대기환경지도를 활용하여 대기환경 특성을 분석해 보고자 한다. 도시 내에서도 지리적 특징, 토지이용도에 따라 대기환경 특성은 공간적으로 상이하게 나타나게 되고, 이를 정량적으로 나타내기 위해서 지도를

활용한 분석이 필수적이라고 할 수 있다. 2006년 발간된 「도시 기후·대기질 통합관리 추진방향에 관한 연구 보고서⁶⁾」에 따르면 도시에서의 대기질 관리와 도시 기후의 관련성 및 통합관리 필요성을 역설하고 있으며, 도시 대기환경지도에 대한 개념을 도입하고 이를 대기환경요소도와 대기환경분석도로 구분하여 구성할 것을 제안하고 있다. 본 연구에서는 도시대기환경지도의 구성을 받아들여 부산지역을 대상으로 분석해 보았으며, 연구 결과는 부산지역의 대기환경 특성 이해를 증진시키고 대기환경개선 및 대기오염 저감을 위해 대기환경 측면에서 필요한 방안을 도출함으로써 부산시민의 삶의 질 향상에 도움을 주고자 한다.

재료 및 방법

부산지역 도시대기환경지도를 크게 대기환경요소도와 대기환경분석도로 구분하였다. 대기환경요소도에는 도시 지역의 여러 환경적 요소에 대한 정보 제공을 목적으로 기상요소도, 지형요소도, 건물분포도, 토지이용피복도, 대기오염물질 배출량분포도, 대기오염 분포도로 구성하였다. 대기환경분석도는 공간적 해상도를 높여 공간적으로 자세하게 대기오염을 포함한 대기환경을 분석하기 위한 목적으로 작성하였으며, 열환경분석도와 공기흐름도로 구성하였다.

대기환경요소도

대기환경요소도에 입력되는 기상자료는 기상청의 2007~2011년간 AWS(Automated Weather Station)⁷⁾ 자료를 이용하였으며, 토지이용현황은 환경부 환경지리정보서비스(EGIS)에서 제공하는 2007년 1/50,000의 대분류 및 1/25,000의 중분류 토지피복자료⁸⁾를 이용하였다. 또한 인공구조물로 인한 대기환경을 파악하기 위하여 건물분포 및 높이 자료는 국토지리정보원의 2009년 1/5,000 Ver2. 수치지도⁹⁾를 이용하였다. 배출량은 환경부에서 발표한 부산지역의 면, 선, 점오염원에 의한 PM10, NOx, VOCs 배출량¹⁰⁾을 이용하였다. 대기오염도는 부산광역시 보건환경연구원 대기오염측정망을 이용하였으며, 항목은 오존과 미세먼지를 대상으로 하였고, Arc-GIS 9 및 Surfer 10을 이용하여 대기오염물질에 대한 도시대기환경지도를 작성하였다.

대기환경분석도

공간적 해상도를 높이기 위한 대기환경분석도는 기상장 수치모델을 이용하여 작성하였다. 실제로 우리나라에서 친환경 도시계획을 목적으로 하는 도시기후지도가 시단위로 만들어지고 있으며, 공간적 분포를 살펴보기 위해서 기상장 수치모델을 이용하는 연구가 계속되고 있다^{11, 12)}. 본 연구에서는 열적환경분석을 위해 시간최고기온이 나타난 날, 불쾌지수가 높은 날을 선정하여 수치모의 하였으며, 공기흐름도를 분석하기 위해 2007년~2011년간 총 1,826일 중 강수량 0.5 mm 이하인 비강수일과 황사 발생일을 제외한 1,374일을 대상으로 군집 분석하였으며, 그 결과 거리도가 가장 낮은 날을 선정하였다.

기상장 수치모델은 WRF(Weather Research and Forecasting model) 시스템을 이용하여 기상요소의 상세한 정보를 도출하였다. 본 연구에서는 ARW(3.3 버전)

를 사용하였으며, 초기 입력장으로는 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 의 해상도를 가지며, 6시간 간격으로 제공되는 NCEP FNL(Final Analyses) 자료를 사용하였다. 지형 및 토지이용자료는 미국항공우주국에서 제공하는 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) 3초 지형자료와 환경부에서 제공하는 KLU(Korea Land Use) 1초 토지이용자료를 사용하여 정확도를 향상시켰다. 수치모의 수행을 위한 시스템 설정은 Table 1과 같다. 영역 1은 한반도를 중심으로 한 동북아시아 일부를 포함하는 수평 격자 27 km의 영역이며, 영역 2, 영역 3은 수평 해상도를 9km, 3km로 높여 갔으며, 최종 도메인인 영역 4에는 수평해상도 1 km로 설정하였다(Fig. 1). 연직 층수는 28개의 층으로 설정하였다. 이러한 실험 설계를 바탕으로 각 사례일마다 72시간 동안 수치 적분을 실시하였다.

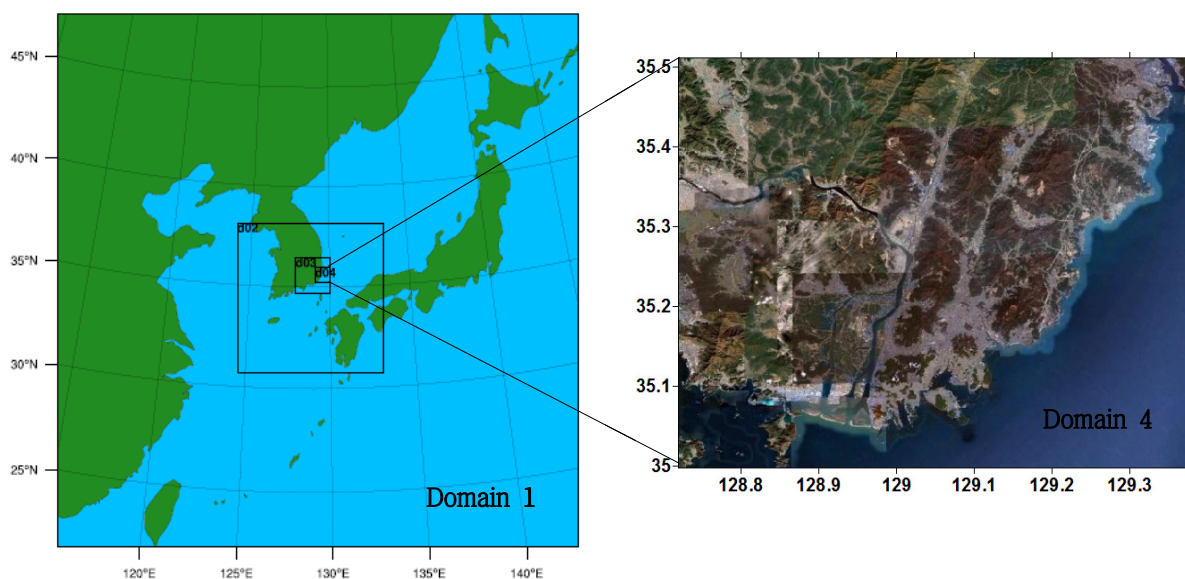


Fig. 1. The numerical model domains for WRF simulation.

Table 1. Description of WRF system

	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain4
Horizontal grid	107 × 107	91 × 91	61 × 55	60 × 57
Horizontal resolution	27 km	9 km	3 km	1 km
Vertical layers	28 layers			
Physical options	Kain-Fritsch scheme, RRTM Longwave Dudhia Shortwave, YSU PBL			
Initial data	NCEP FNL Operational Global Analysis data			

결과 및 고찰

대기환경요소

지형도

지형도에는 부산지역의 고도, 산 또는 골짜기의 위치, 분지 등 지형에 관한 정보를 공간적으로 표현한 지도이다. 지형은 그 지역의 대기환경특성을 1차적으로 결정짓게 하는 요인이라고 할 수 있는데, 산, 바다, 강과 같은 지형의 특성에 따라 기류와 기온이 달라지기 때문이다. 부산은 남쪽과 동쪽으로 바다가 위치해 있고 바다는 육지와 물리적 특성 차이로 인해 해륙풍 순환을 발생시키고, 이러한 해륙풍은 부산에서 뚜렷하게 나타나는 국지풍으로 부산지역 대기 흐름의 중요한 축을 이루게 된다. 오염물질 발생이 높은 낮시간 대에 발생하게 되는 해풍은 청정하고 차가운 바닷바람을 육지로 이송시켜 오염물질을 이루시키고 지표면 온도를 떨어뜨려 대기오염물질 농도 감소의 역할을 하는 반면, 지표면과 바다의 물리적 차이로 인해 발생하게 되는 대기경계층은 경계층 아래에서 대기오염물질 농도를 증가시키기도 한다.

부산은 한반도의 남동단에 위치하며, 산지는 비교적 높고 험준한 크고 작은 산들로 구성되어 있다. Fig. 2는 국토정보지리원에서 제공하는 지형도를 바탕으로 부산지역의 산들을 나타낸 그림이다. 그림을 살펴보면, 부산을 동서로 구분하는 금정산맥을 따라 간선도로가 발달해 있으며, 동쪽으로는 한단계 고도가 낮은 금련산맥이 위치하고 있어 부산의 시가지는 남북으로 길게 뻗어 있다. 금정산맥은 양산시의 원효산에서 시작해 금정산, 백양산, 구덕

산 등으로 이어지다가 다대포의 물론대에서 대한해협으로 몰입한다. 금련산맥은 해안에 치우쳐 해안선과 거의 평행하게 달리는 해안산맥의 성격을 지니며, 기장군 일광면의 달음산에서 시작해 장산, 황령산을 지나 영도의 봉래산으로 이어진다. 금정산맥에 비해 고도가 한 단계 낮고 경사가 완만하며, 대부분 고도 400~800 m의 독립된 구릉성 산지로 산지 사이에 소침식분지가 발달하였다. 부산의 중심부는 금정산맥과 금련산맥 사이에 주로 발달해 있으며, 부산의 주요 바람 통로는 금정산맥과 금련산맥 사이와 낙동강을 따라 형성될 것으로 판단된다. 이러한 부산지역의 높고 낮은 산은 산곡풍을 발생시켜 산에서의 차가운 공기를 산 아래 지역으로 이송시키는 역할을 할 수 있으나¹³⁾, 사방이 산 또는 구릉지로 둘러싸인 분지의 경우에는 환기가 어렵고 역전층이 생기기 쉬워 대기오염에 취약한 구조가 될 수 있다^{14,15,16,17)}.

부산지역에는 사방이 산으로 둘러싸인 분지는 없으나, 부산 중심부가 금정산맥과 금련산맥 사이에 위치해 있어 특정한 풍계에서 산에 의한 기류 집중 및 환기 부족이 나타날 수 있다. 반면 산의 녹지 지역과 바닷가에서 발생하는 신선한 공기 유입 가능성 또한 높다고 할 수 있다. 부산의 중심부를 지형을 중심으로 나누어보면 Fig. 2의 I~Ⅲ으로 나눌 수 있다. I 지역은 금정구와 기장군 사이 지역으로 서쪽으로 금정산, 동쪽으로 천마산과 운산 등이 위치해 있어 동풍 또는 서풍 계열의 바람 발생시 환기부족이 나타날 수 있고 반면 산풍으로 인해 산지의 차가운 공기가 유입되는 가능성 또한 있다. II 지역은 서쪽으로 백양산, 동쪽으로 장산, 남쪽으로 황령산이 위치해



Fig. 2. The topographical map in Busan.

있으며, 바다와 비교적 가까이 위치해 있어 바닷바람의 유입이 용이한 지역이다. 이 지역은 완전한 분지의 형태는 아니나 삼면이 산으로 둘러싸여 환기 측면에서 취약하다고 할 수 있으나, 신선한 바닷바람 유입 또한 용이하다고 할 수 있다. Ⅲ지역은 북쪽으로 백양산, 남서방향으로 엄광산, 동쪽으로 황령산이 위치해 있는 지역으로 남풍, 서풍, 북동풍 발생시 기류 집중과 환기 부족이 나타날 수 있으며, 이 지역도 마찬가지로 산풍에 의한 신선한 공기 유입도 가능하며, 바닷바람의 유입도 용이한 지역이다. 부산 중심부를 제외한 지역 중에서 삼면이 산으로 둘러싸여 환기 부족이 나타날 수 있는 지역으로는 기장군 정관면(A), 기장군 철마면(B), 해운대구 반송동(C), 북구 만덕동(D), 부산진구 당감동(E), 사하구 대신동(F)을 찾을 수 있었다. 산으로 둘러싸이지 않는 방향으로 바람이 불어오고 풍속이 낮을 경우, 환기가 어려워 오염물질 농도가 다소 상승할 수 있는 가능성이 있다. 그러나 이러한 형태는 특정 기상 하에서 발생할 수 있다고 판단되어져, 여러 형태의 기상과 함께 해당 지역에 대한 구 단위의 검토가 필요할 것이다. 지형도를 중심으로 부산의 대기환경을 분석한 결과를 요약해 보면, 부산 중심부는 금정산맥과 금련산맥 사이에 위치하고 있어 특정한 풍계에서 산맥에 의한 기류의 집중 또는 환기 부족이 나타날 수 있으며, 남동쪽

에 위치한 바다로 해륙풍의 영향을 받게 되고, 금정산맥과 금련산맥에서는 산곡풍이 발생하여 해륙풍과 산곡풍에 의한 대기오염물질의 확산, 이류가 나타나게 된다. 이와 더불어 부산 중심부를 둘러싼 산에서의 차가운 공기의 시가지로의 유입이 가능하며, 또한 인접한 해양에서의 신선한 공기도 내륙 쪽으로 이동할 수 있어 부산의 지형은 풍향 등과 같은 기상조건에 따라 오염물질의 확산이 원활하기도 하고, 불리하기도 한 양면성을 가진다고 할 수 있다. 또한 부산지역은 사면이 둘러싸인 분지는 없으나, 삼면이 산으로 둘러싸인 지역이 6개 지역으로 특정 기상조건에서 대기환경이 취약하게 나타날 수 있어 구 단위의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

토지피복도 및 건물분포도

토지피복도에서는 토지이용현황, 식생분포, 수계의 위치와 규모를 확인할 수 있다. 수계의 위치는 대기환경에서도 중요하게 되는데, 수계는 잠열을 가지고 있어 잠열 플럭스가 상대적으로 적은 지표에 비해 기온이 낮은 특징이 있으며, 이러한 수계에서의 열적 에너지 감소는 대기 흐름에도 영향을 주게 된다. 부산에는 북에서 남으로 낙동강과 서낙동강이 위치해 있으며, 남동쪽에 수영강이 위치해 있으며, 이러한 강이라는 불연속면은 대기환경 측면

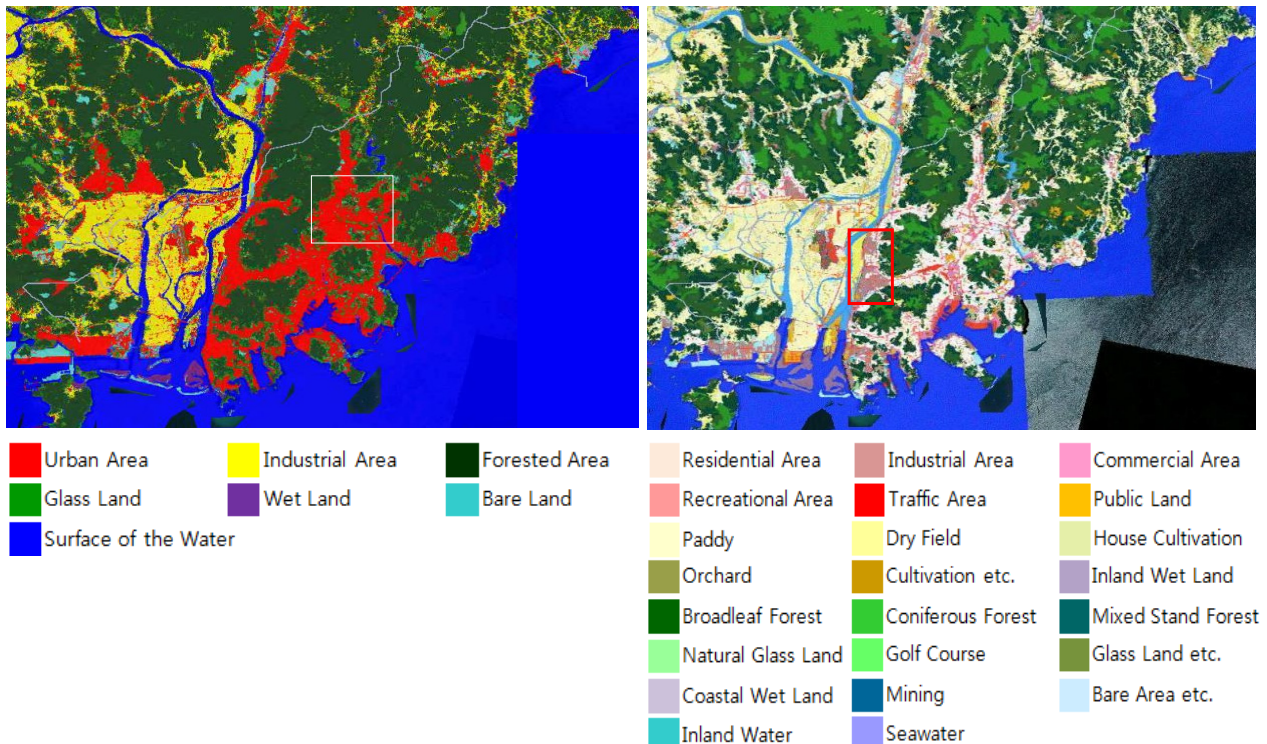


Fig. 3. The land cover map in Busan.

에서는 기온과 기류 분포에 차이를 종종 나타내게 된다. Fig. 3은 환경부에서 제공하고 있는 토지피복자료로서 왼쪽 그림은 대분류, 오른쪽 그림은 소분류 체계로 만들어진 자료이며, 부산의 중심부와 공업지역의 위치를 확인할 수 있다. Fig. 3의 대분류(왼쪽) 그림에서 붉은색 지역은 도심지역으로 낙동강 동쪽으로 산지를 제외한 대부분의 지역이 시가지화 되어 있으며, 낙동강 서쪽으로는 농경지로 이용되고 있다. 일반적으로 시가지화 되어 있는 지역은 열에너지 발생량이 높고, 외부지역과의 온도차로 발생하는 열섬현상, 하천의 복개화로 대기 중 잠열플럭스가 작아 대기 및 표면 온도상승이 나타나게 된다. 특히 흰색 박스는 부산의 시가지화된 중심부 지역으로 토지피복도와 지형을 함께 고려해 대기환경을 살펴보면, 서~북~동쪽으로 산이 둘러싸여 있어 저풍속의 남풍 계열 바람이 불어올 때 부산 중심부 지역에서 환기 부족이 나타날 수 있다고 판단된다. Fig. 3의 소분류(오른쪽) 그림에서 붉은색 박스에 해당하는 지역은 공업지역이 집중적으로 위치해 있는 것을 확인할 수 있다. 공업지역에서는 대기오염물질 배출량이 많아 오염도가 높게 나타날 가능성이 높게 되므로 주변 지역을 중심으로 대기오염도 관리에 주의가 요구된다.

Fig. 4는 건물의 분포와 높이를 나타낸 그림으로 회색과 검정색 부분이 건물을 나타낸 것이다. 검정색에 가까울수록 높이가 높은 건물을 의미하며, 그림에서 살펴보면, 해운대구 신시가지 지역, 북구 화명동 그리고 부산 시내 일원에 고층 건물 분포가 높게 나타나고 있다. 건물과 같은

지물은 지표면 불투수성을 높여 도시의 열용량을 증대시키며, 특히 고층 건물의 경우, 기류의 형태를 변화시켜 도시 대기환경을 특성을 바꾸기도 한다¹⁸⁾. 부산은 해안가에 위치한 산지가 많은 지형으로 산기슭 바로 아래 아파트 단지들이 위치해 있는 경우도 많으며, 최근에는 해안가를 따라 고층 건물이 위치해 있어, 이러한 고층 건물은 위치에 따라 신선한 산 또는 바다의 흐름을 저해하여 도시 전체의 대기환경 건전성을 떨어뜨릴 수 있다. 따라서 고층 건물 분포가 높은 부산 중심부 일원, 신시가지 지역(해운대구 좌동, 북구 화명동)을 중심으로 대기흐름의 원활 여부를 좀 더 자세히 살펴볼 필요가 있으며, 본 연구와 같은 부산 지역 전체를 대상으로 하는 도시대기환경지도가 아닌 규모가 좀 더 작은 구군 단위의 도시대기환경지도 작성 시에는 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

기상요소도

기상요소에는 기온, 풍향, 풍속, 강수량, 습도가 있으며, 본 연구에서는 기온과 풍향, 풍속에 대해 살펴보았다. 기온은 시민들의 삶에 직접적인 영향을 주며, 기온의 최대, 최소치는 시민들의 건강에 위협을 줄 수 있으며, 대기오염 측면에서도 시가지의 기온 상승에 의해 발생하는 열섬현상으로 비시가지에서 시가지로의 대기 흐름을 발생시킬 수 있으며^{19), 20)}, 환기 측면에서도 부정적인 영향을 줄 수 있고²¹⁾, 미세먼지 농도를 증가시킬 수 있다는 연구 결과도 있다²²⁾.

본 연구에서 기온은 기상청의 2007~2011년 AWS 자

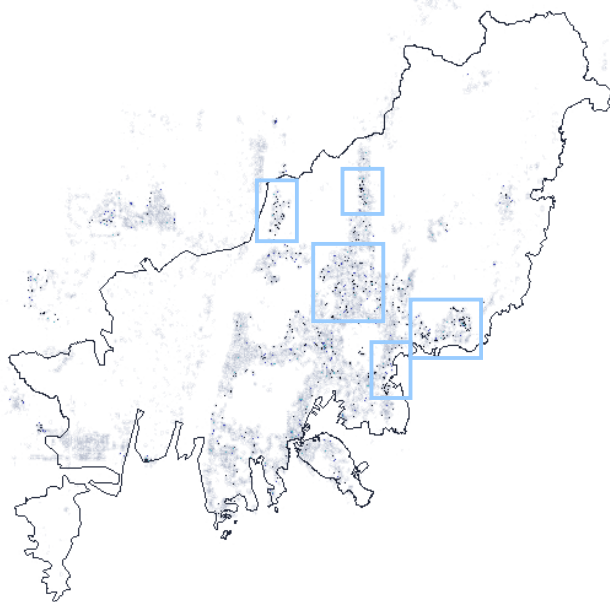


Fig. 4. The map of building height distributions in Busan.

Table 2. The atmospheric elements analysis in Busan from 2007 to 2011

Name of AWS Stations in Busan	Mean Daily Maximum Temperature (°C)	Mean Daily Maximum Sensible Temperature (°C)	Mean Daily Minimum Temperature (°C)	Mean Daily Minimum Sensible Temperature (°C)	Number of Tropical Night (Days)	Mean Daily Wind Speed (m/s)
BS Busan	18.6	19.1	12.0	10.7	87	3.3
YD Yongdo	17.5	18.2	11.9	10.7	36	3.5
BSJ Busanjin	18.4	19.5	11.7	11.4	113	2.0
DR Dongrae	19.1	20.2	11.5	11.3	113	1.9
DY Daeyeon	18.6	19.8	12.2	12.1	123	2.1
BG Bukgu	18.4	19.6	11.0	10.6	83	2.3
SYM Suyoungman	18.8	19.4	12.2	11.2	88	2.8
HUD Haundae	18.8	20.1	12.0	12.0	62	2.3
GJG Gemjeounggu	18.8	19.7	10.8	10.1	98	2.2
GDD Gaduckdo	17.7	18.1	12.1	10.2	36	4.4
GJ Gijang	18.7	19.6	9.9	9.7	37	2.1

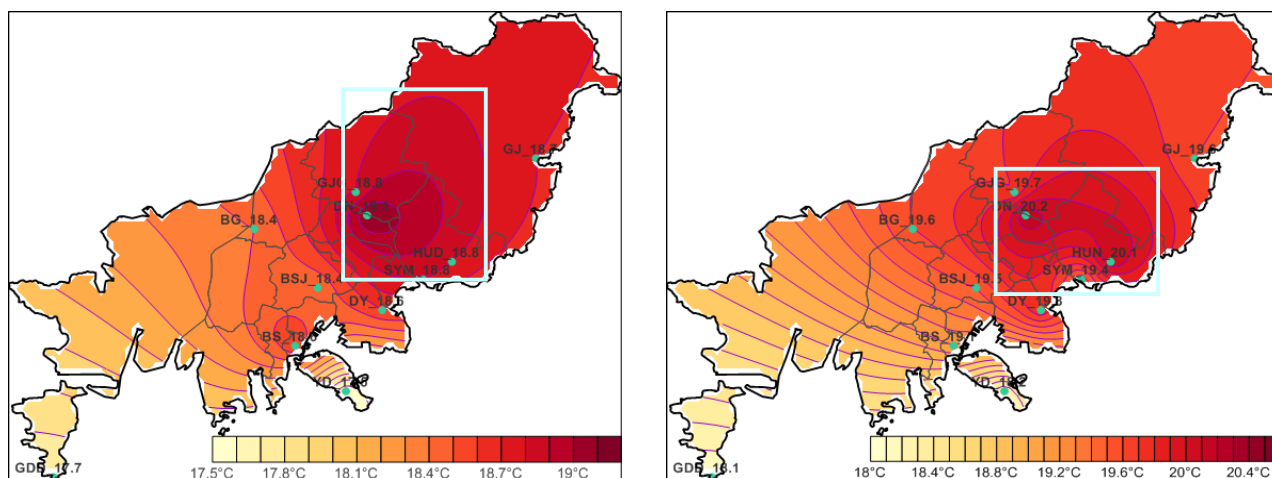


Fig. 5. The map of Mean Daily Maximum Temperature(left) and Sensible Temperature (right) in Busan from 2007 to 2011.

료를 이용하여 분석 결과를 Table 2에 나타내었으며, 이들 자료를 바탕으로 보간법을 이용하여 지도(Fig. 5~7)에 나타내었다. Table 2와 Fig. 5를 살펴보면, 일평균최고기온은 동래에서 19.1°C로 가장 높게 나타났으며, 다음으로 수영만, 해운대, 금정구가 모두 18.8°C, 기장 17.7°C로 높게 나타나 동부지역의 일평균최고기온이 전반적으로 높게 나타났다. 동래지역은 해안과 다소 떨어져 있어 내륙지역의 특성이 나타나며, 금정산, 백양산, 황령산, 운산 등으로 환기가 다소 부족하고 토지이용도 측면에서도 시가지로 둘러싸여 있어 기온이 높은 것으로 판단된다.

Fig. 6은 일평균최저기온과 일평균최저체감온도를 나타

낸 그림이다. 일평균최저기온을 살펴보면 기장이 9.9°C로 가장 낮고 다음으로 금정구(10.8°C)가 낮게 나타났다. 반면, 해운대지역(12.0°C)부터 강서지역까지의 해안지역에서는 일평균최저기온이 다소 높은 것으로 나타났다. 일평균최저체감온도는 기장 9.7°C, 금정구 10.1°C, 가덕도 10.2°C로 가장 낮게 나타났다. 가덕도는 일평균최저기온(12.1°C)에 비해 일평균최저체감온도(10.2°C)가 다소 낮게 나타났으며, 이는 가덕도 지역에서 높은 풍속(4.4m/s)으로 체감온도가 크게 떨어진 것으로 보인다. 인간의 열적 스트레스를 주게 되는 체감온도는 $13.12 + 0.6215 \times T - 11.37V^{0.16} + 0.3965V^{0.16} \times T$ 로 산출되며 여기서 T

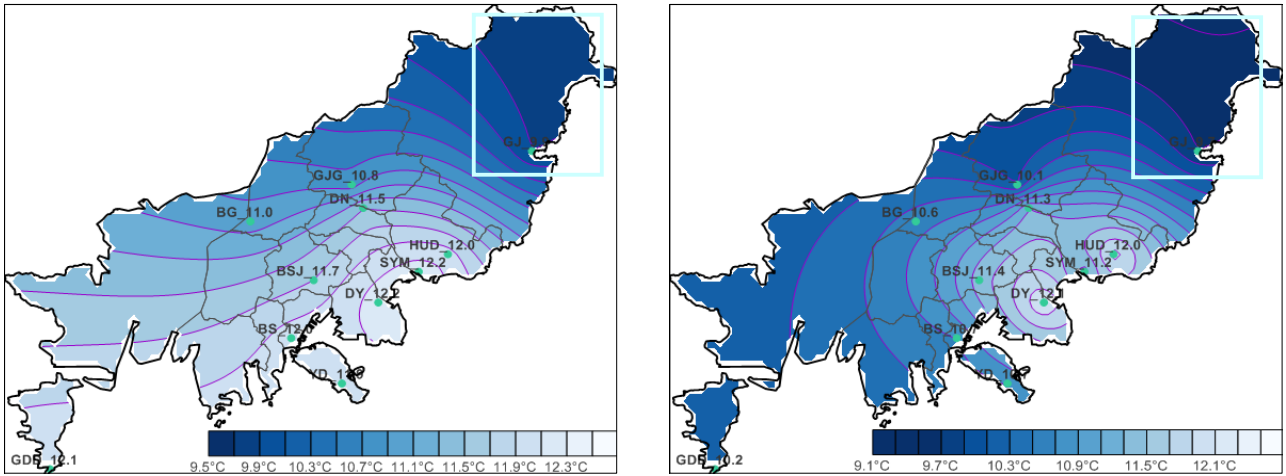


Fig. 6. The map of Mean Daily Minimum Temperature(left) and Sensible Temperature (right) in Busan from 2007 to 2011.

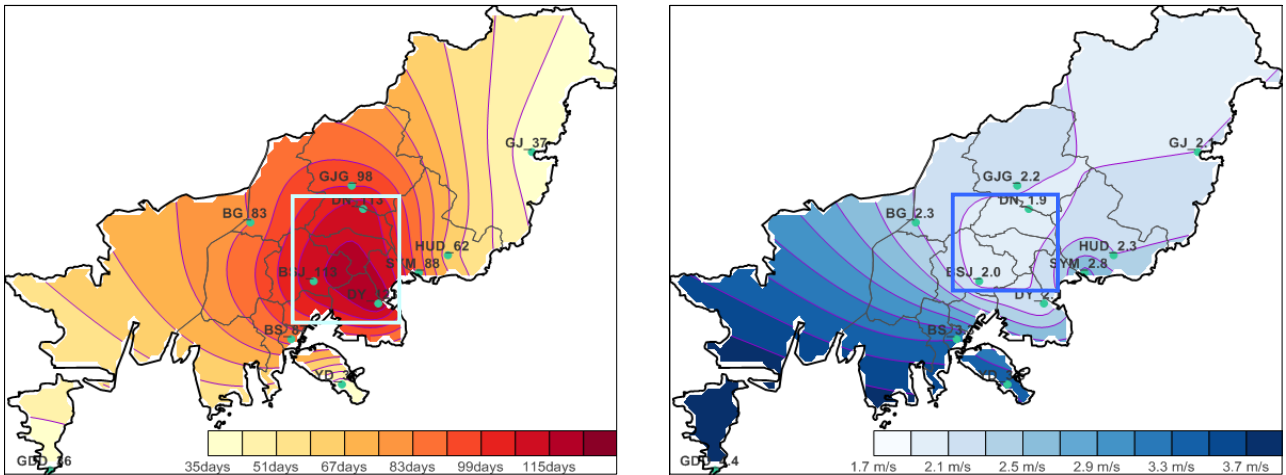


Fig. 7. The map of Number of Tropical Night (left) and Mean Daily Wind Speed(right) in Busan from 2007 to 2011.

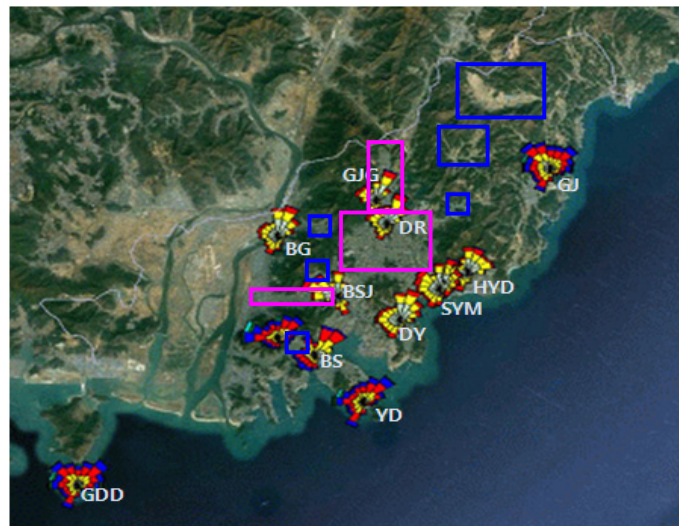


Fig. 8. The wind rose map of Busan from 2007 to 2011.

는 기온(°C)을, V는 풍속(km/h)을 의미한다. 즉 체감온도는 기온과 풍속의 항으로 이루어져 있으며, 기온이 낮고 풍속이 강할수록 체감온도는 낮아지게 된다. 일평균최저기온과 일평균최고기온 차를 분석해 보면 내륙에 위치한 금정구 및 동래지역에서 차가 크게 나타났으며, 해안에 위치한 해운대구와 남구는 차가 낮게 나타나는 해양성 기후의 특징을 나타내고 있었다.

Fig. 7의 왼쪽 그림은 2007년~2011년 열대야 일수를 나타내었으며, 오른쪽 그림은 일평균풍속을 나타낸 그림이다. 열대야는 일최저기온이 25°C 이상인 날을 의미하는데, 남구지역이 123일로 열대야가 가장 빈번히 나타났으며, 다음으로 동래와 부산진구 지역이 113일로 열대야 출현이 높은 것으로 나타났다. 가장지역은 일평균최고기온은 다소 높으나 열대야 일수는 37일로 다소 낮게 나타났다. 일평균풍속은 가덕도가 4.4 m/s로 가장 높게 나타났으며, 영도(3.5 m/s), 광복동(3.3 m/s) 지점을 중심으로 풍속이 다소 높게 나타났다. 금정구(2.2 m/s), 동래(1.9 m/s), 부산진(2.0 m/s), 대연(2.1 m/s)등의 부산 중심부에서는 풍속이 다소 낮게 나타났으며, 이는 도심지를 둘러싸고 있는 산과 같은 지형과 도심지내에 위치해 있는 건물과 같은 지물에 의해 외곽지역보다 풍속이 낮게 나타나게 된다.

Fig. 8은 2007년~2011년 기상청 AWS의 바람장미도를 나타낸 그림이다. 금정구, 동래구, 북구는 풍속이 비교적 비슷하고 주풍향도 북동계열인 것으로 나타났다. 부산진은 북서계열이 주풍향으로 나타났으며, 대연, 수영만, 해운대는 풍속이 비슷하고 주풍향이 북동계열인 것으로 나타났다. 영도, 광복, 가덕도도 풍속이 유사하고 북동계열이 주풍향으로 나타났으며, 가장지역에서는 북서계열이 주풍향으로 나타났다. 앞서 지형도에서 언급하였듯이 부산시내는 서~북~동쪽으로 산이 위치해 있어 남풍계열의 바람이 나타날 때 내륙 안쪽으로 환기가 취약할 것으로 판단되어지나, 남풍 계열의 풍향 빈도수가 낮아 저풍

속의 남풍 계열로 인해 발생할 수 있는 부산시내의 환기 부족 빈도수는 높지 않을 것으로 보인다. Fig. 8에서 분홍색 박스는 Fig. 2에서와 같이 부산 중심부를 2개의 지역(I~Ⅲ)으로 나누었던 3개의 지역이고, 파란색 박스는 삼면이 산으로 둘러싸인 지역을 의미한다. 지형도 분석시(Fig. 2) 부산은 6개의 삼면이 산으로 둘러싸인 지역이 있었으며, 그 중 사하구 대신동과 부산진구 당감동 지역에서는 주풍향이 산풍의 형태로 나타나 환기에 어려움이 없어 보이나, 기장군 정관면, 기장군 철마면, 북구 만덕동과 해운대구 반송동 지역에서는 주풍향 풍하지역으로 산이 위치해 있어 환기에 다소 취약할 것으로 판단되는 반면 풍상지역에도 산이 위치해 있어 산풍으로 인한 신선한 공기 유입도 가능할 것으로 판단된다. 이와 더불어 국지적 형태의 대기환경은 지역의 배출량 등이 함께 고려되어야 할 사항으로 보다 종합적인 검토가 요구된다고 할 수 있다.

대기오염물질 배출량 분포도

지역의 대기오염도는 일반적으로 대기오염 배출량과 오염도는 양의 상관관계를 보여, 대기오염도 분석을 위해서는 배출량 분포 분석이 선행되어야 한다. 그러나 대기오염도는 지형, 기상, 대기오염물질 종류, 배출량 산정 방법과 같은 여러 가지 인자들에 의해 영향을 받게 되어 배출량 분포가 직접적으로 오염도 분포를 나타내지는 않는다. Table 3과 Fig. 9는 부산지역의 TSP, PM10, NOx, VOCs 배출량을 나타낸 것이다. 환경부에서 발표한 배출량(2009년)¹⁰⁾은 면, 선, 점오염원으로 구분하여 제공하고 있으며, Fig. 9는 면, 선, 점오염원을 합한 전체 배출량을 나타낸 그림이다.

Table 3에서 살펴보면, PM10 배출량은 강서구가 660 ton/yr로 가장 높게 나타났으며 다음으로 사하구 551 ton/yr, 서구 524 ton/yr, 동구 445 ton/yr로 시내 중심부를 중심으로 다소 높게 나타났다. NOx 배출량도

Table 3. Air pollutants emission of Busan in 2009¹⁰⁾.

(ton/yr)

	Gangseo-gu	Gemjeong-gu	Gi-jang-gun	Nam-gu	Dong-gu	Dong-rae-gu	Busan-jin-gu	Buk-gu	Sa-sang-gu	Sa-ha-gu	Seo-gu	Su-young-gu	Yeun-je-gu	Young-do-gu	Joong-gu	Haeundae-gu
PM10	660	91	100	74	445	64	108	151	114	551	524	39	78	134	35	112
NOx	10034	2163	2468	1822	6267	1620	2593	3347	2030	9441	7108	1046	1822	2167	836	2887
VOCs	3651	2021	1644	2238	893	1707	2954	3136	4119	5813	968	1139	1825	1146	558	2923

10,034 ton/yr 로 강서구에서 가장 높게 나타났으며, 다음으로 사하구 9,441 ton/yr 서구 7,108 ton/yr 로 높게 나타났다. VOCs 배출량은 사하구 5,813 ton/yr, 사상구 4,119 ton/yr 로 공업지역을 중심으로 높게 나타났다. 국립환경과학원에서 발표한 「대기오염물질 배출량 2009」¹⁰⁾에 따르면 부산의 경우 도로 및 비도로이동오염원에 의한 TSP와 PM10, NOx 배출량이 높은 것으로 나타났으며, VOCs 배출량의 주요 배출원은 유기용제 사용이 주된 것으로 나타났다. 즉, 선박과 같은 비도로이동오염원이 집중되어 있는 강서구, 서구, 동구와 도로이동오염원이 높은 부산 중심부를 중심으로 PM10과 NOx 배출량이 높게 나타나고 있었으며, VOCs 배출량은 공업지역을 중심으로 높게 나타났다.

배출량을 공간적으로 분석해 보면, Fig. 9와 같이 TSP 배출량은 부산 시내지역인 동래구, 부산진구, 연제구, 해운대 신시가지 일대가 다소 높게 나타나고 있으며, 남해고속도로, 동서고가도로, 중앙로를 따라 도로이동오염원에 의한 TSP 배출량이 다소 높은 것으로 나타났다. 또한, 금정구 일대에 위치한 시내지역과 사상사하 공업단지, 수영구 해변로를 따라 TSP 배출량이 소폭 높은 것으로 파악되었다. PM10 배출량 분포는 TSP 배출량 분포와 비슷한 패턴으로 부산 중심부와 주요 도로, 공업단지를 중심으로 다소 높게 나타나고 있으나, 신항과 태종대 인근에 위치한 선박 등과 같은 비도로이동오염원이 위치해 있는 지역에서도 또한 높게 나타나고 있었다. PM10은 10 μ m 이하 부유물질로서 인체 호흡가능성이 높아 호흡기 장애 유

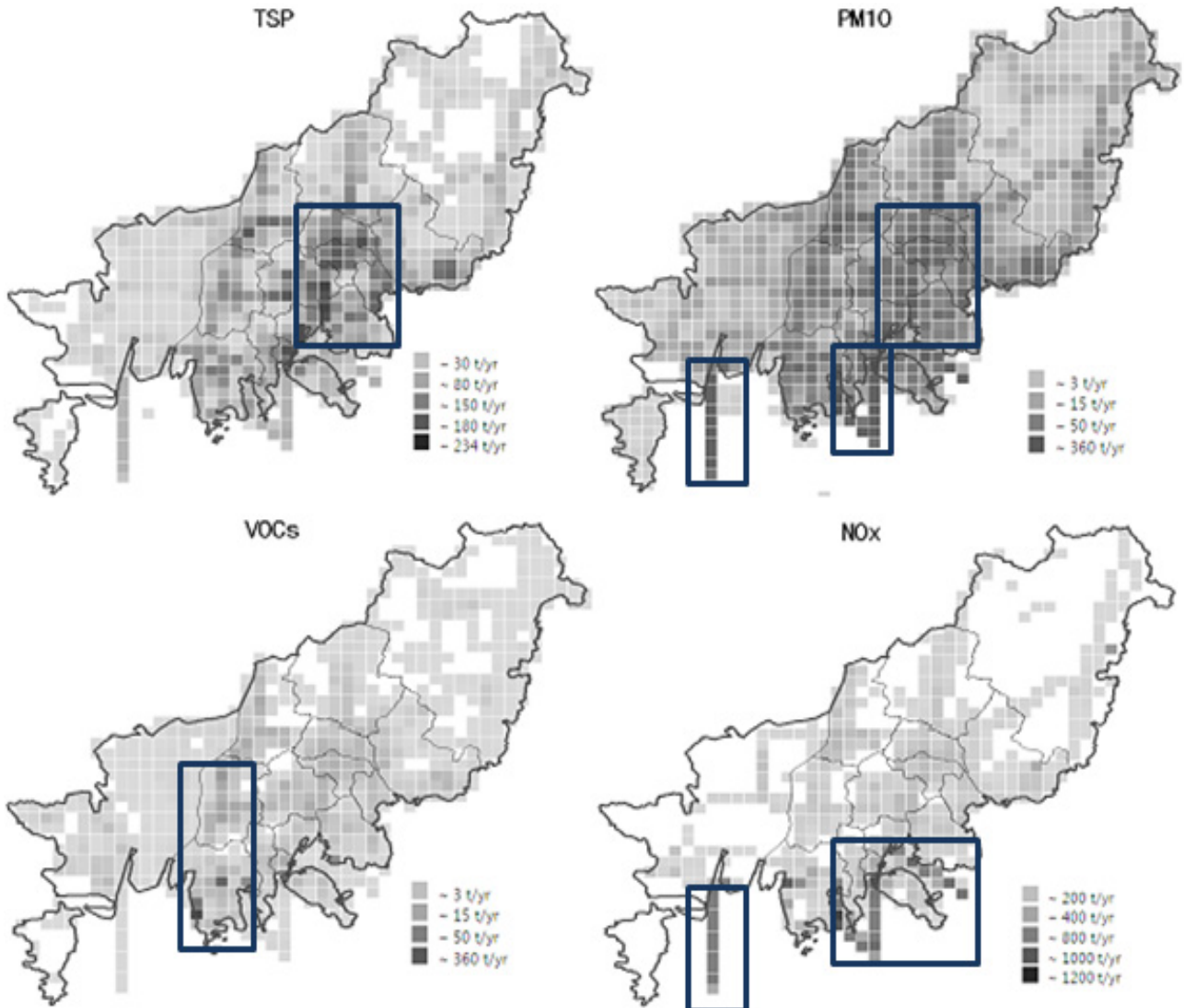


Fig. 9. The air pollutants emission map of PM10, NOx and VOCs in Busan.

발 가능성이 있으며, 시정 장애, 농작물 피해 등의 부작용을 나타낼 수 있는 물질이다. PM10과 함께 도시에서의 주요대기오염물질로 오존이 있으며, 오존은 NOx와 VOCs와 같은 오존전구물질이 광화학반응에 의해 발생하는 2차 오염물질로서 산화력이 강해 고농도에서 호흡기 장애를 나타낼 수 있다. 따라서 오존 저감을 위해서는 오존전구물질인 NOx와 VOCs의 배출량 제어가 필요할 수 있다. 먼저 NOx의 주요 배출원은 이동오염원으로 부산지역에서는 도로를 중심으로 고른 분포를 나타내고 있으나, 비도로이동오염원에 의한 NOx 배출량 또한 높게 나타나고 있었다. VOCs 배출량 분포는 부산지역 주요 도로를 중심으로 분포되어 있으며, 남해고속도로, 동서고가로, 부산진구 시내 중심가와 사하구 지역 및 녹산지역 공단을 중심으로 다소 높은 수준을 나타내고 있었다. 앞서 대기 환기측면에서 다소 취약할 것으로 예상된 기장군 정관면, 기장군 철마면, 북구 만덕동과 해운대구 반송동 지역에서는 배출량이 부산평균 이하로 나타나 대기환경측면에서 크게 우려할 사항은 아니라고 판단된다.

대기오염도

앞서 지적한 바와 같이 우리나라 대기오염물질 중 가장 중점대상항목으로 관리되고 있는 항목이 오존과 PM10 항목이다. Table 4는 환경부에서 발행한 대기환경연보²³⁾ 중 2011년 오존 및 미세먼지 대기환경기준 달성 정도를 나타낸 것이며, 이에 따르면 오존은 시간당 오존 최고 농도 100 ppb 이내 기준을 달성한 측정소는 전체 중 59.8%, 8시간 평균 60 ppb 이내를 달성한 측정소는 불과 2.5%로 나타났다. PM10은 연평균 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 달성한 측정소는 55.6%, 24시간 평균 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 달성한 측정소는 불과 1.7%로 환경기준 달성률이 낮은 항목으로 관리되고 있다.

부산의 대기오염도를 공간적으로 살펴보기 위하여 2007년~2011년 부산지역 오존과 PM10의 평균농도분포를 Table 5와 Fig. 10에 나타내었다. 용수리, 광안동, 태종대, 녹산동을 중심으로 오존 농도가 다소 높은 모습을 나타내고 있으며, 내륙 지점으로 덕천동이 소폭 높은 모습을 나타내고 있다. 해안과 비교적 가까운 거리에 위치해 있는 용수리, 광안동, 태종대, 녹산동은 지형과 기상 영향으로 오존 농도가 다소 높은 것으로 판단된다. 즉, 오존은 오존전구물질인 VOCs와 NOx 배출량, 태양광과 같은 광에너지, 기상과 같은 복합적인 영향으로 부산지역의 지역적 농도 분포를 나타내게 되며, 연안지역에 위치한 도시에서 육지와 바다의 열적 특성 차이에 의해 발생하는 해풍과 대기경계층, 해륙풍 순환에 의한 오존 및 오존전구물질의 재순환에 의해 해안가를 중심으로 오존이 다소 높게 나타날 수 있어, 기상과 대기질의 상관성은 분명하게 높다고 할 수 있다. 다음으로 PM10을 살펴보면, 학장동과 장림동, 녹산동을 중심으로 다소 높게 나타나고 있으며, 부산 시내에 위치해 있는 명장동 일대에서도 다소 높은 수준을 나타내고 있어 PM10을 공간적으로 살펴보면 크게 동저서고의 패턴을 나타낸다. 학장동과 장림동, 녹산동은 공업지역이 위치해 있는 지역으로 공업지역에서 발생하는 PM10에 의해 학장동, 장림동, 녹산동 인근이 다소 높게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 명장동 일대는 부산 중심부에서 발생된 PM10이 운산 등 금련산맥에 의해 기류가 집중되면서 PM10 농도가 다소 높게 나타난 것으로 판단된다.

Table 4. The Achievement of the Ozone and PM10 environmental standards in 2011²³⁾

	Environment standards		The number of total stations	The number of valid stations	The number of relevant stations		The rate of achievement environment standards(%)
					achievement	not achievement	
Ozone	8 hours	0.06 ppm	250	239	6	233	2.5
	1 hour	0.1 ppm			143	96	
PM10	1 year	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	250	239	133	106	55.6
	24 hours	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			4	235	

Table 5. The air pollution distributions from 2007 to 2011 in Busan.

	GBD	GAD	GJE	NSD	DYD	DJD	DCD	MJD	BGD	YSD	YSR	JLD	JPD	JD	CLD	TJD	HJD
Ozone (ppm)	0.022	0.030	0.025	0.030	0.025	0.024	0.026	0.026	0.025	0.023	0.032	0.022	0.023	0.030	0.025	0.030	0.022
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	54	40	38	58	51	58	53	56	50	45	47	63	55	37	53	46	63

GBD	Gwangbok-Dong	DCD	Deokcheon-Dong	JPD	Jeonpo-Dong
GAD	Gwangan-Dong	MJD	Meongjang-Dong	JD	Jwa-Dong
GJE	Gijang-Eup	BGD	Bugok-Dong	CLD	Cheongyong-Dong
NSD	Noksan-Dong	YSD	Yeonsan-Dong	TJD	Taejeoungdae
DYD	Daeyeon-Dong	YSR	Yongsu-Ri	HJD	Hakjang-Dong
DJD	Daejeo-Dong	JLD	Janglim-Dong		

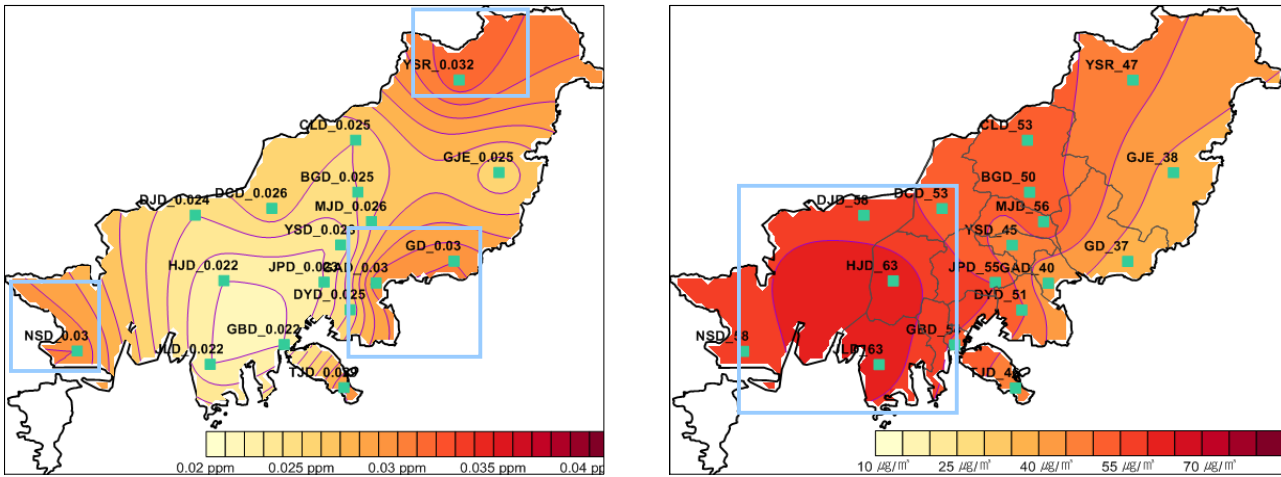


Fig. 10. The ozone and PM10 concentration distribution map in Busan area.

대기환경분석

열환경 분석

기상현상을 일으키는 원동력이 되는 대기의 열 에너지는 시민의 삶에 직접적인 영향을 주며, 대기오염물질 거동에도 영향을 미친다. 특히 여름철에 발생하는 고온은 환경오염 취약자에게 열사병과 같은 건강에 직접적인 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 부산지역 2007년~2011년 기상청 AWS 자료를 분석한 결과, 금정구 지점에서 2007년 7월 27일 14시에 37.9 °C로 가장 높게 나타났으며, 이날을 대상으로 기상 수치 모의한 결과를 바탕으로 부산지역 전체의 온도 분포를 살펴보았다. 이를 분석하여 부산지역에서 열환경이 취약한 지역을 진단해 보고, 해당일의 오존과 PM10 농도를 분석해 보았다. Fig. 11의 상단 오른쪽 그림은 14시의

부산지역 바람, 기온 분포를 수치 모의한 결과로 나타내 그림이며, 상단 왼쪽 그림은 바람장을 해발고도와 함께 나타낸 것이다. 낙동강을 따라 가장 기온이 낮게 나타나고 있었으며, 다음으로 해안가를 따라 기온이 낮게 나타났다. 다음으로 금정산맥과 금련산맥을 따라 기온이 낮게 나타났으며, 부산 중심부와 낙동강과 금정산맥 사이, 낙동강 서쪽의 평야지대, 기장군 정관면 일대를 중심으로 기온이 높게 나타났다. 산, 바다, 강과 같은 알베도가 높은 토지는 시가지에 비해 기온 상승이 크지 않았다. 따라서 부산은 고온의 열환경 측면에서는 유리한 지역이라고 할 수 있다. 반면 부산의 중심부가 산으로 다소 둘러싸인 형태로 저풍속 또는 안정한 기상 상태에서는 국지적으로 불리한 열환경이 나타날 가능성도 있다. 산이 위치해 있는 지역에서는 해발고도 상승에 따라 기온이 감소하게 되어, 고도로 도시

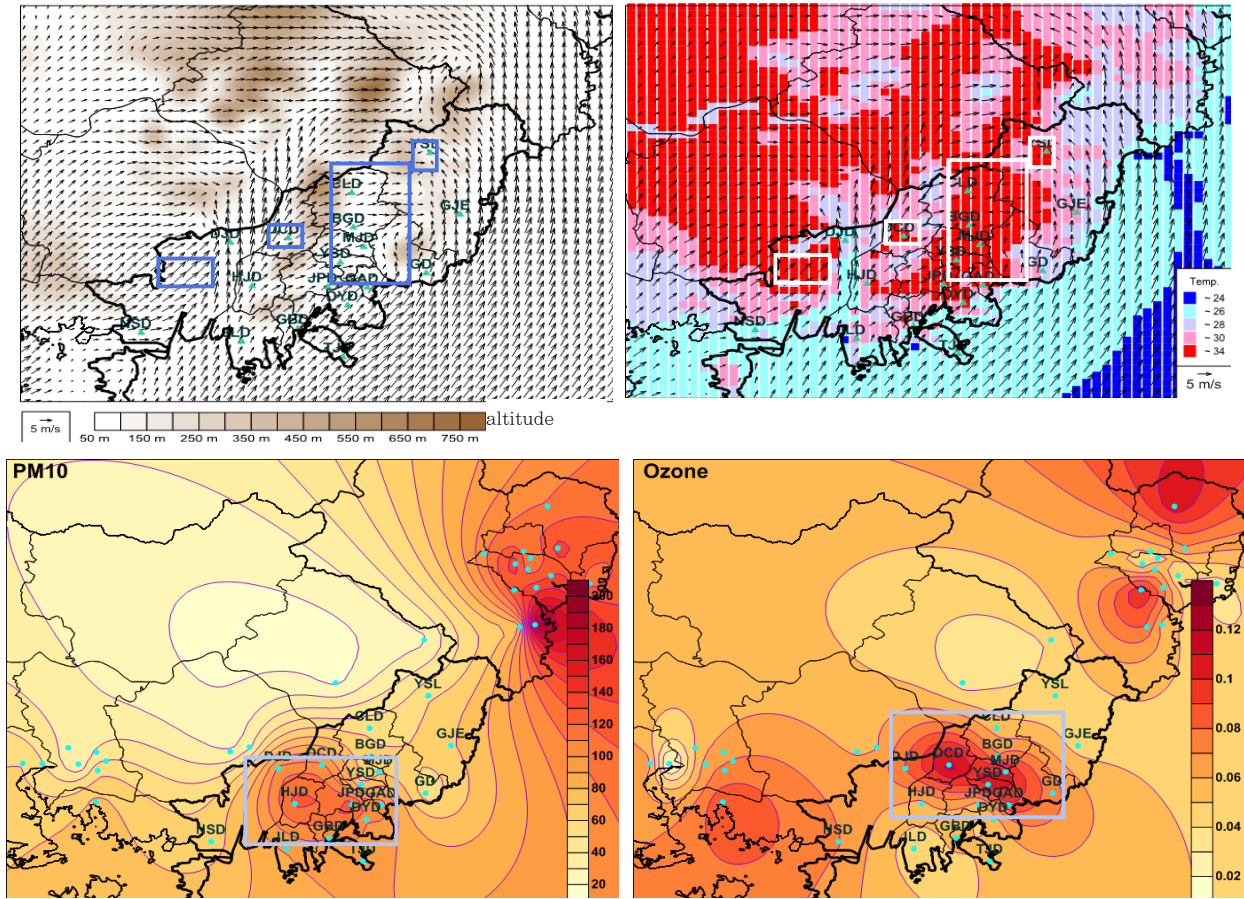


Fig. 11. The wind flow, temperature and air quality map at the highest temperature day in Busan for 2007–2011; 2007.07.27, 1400LST

Table 6. The Ozone and PM10 concentrations on the day of the highest temperature in Busan for 2007–2011; 2007.07.27, 1400LST

	GBD	GAD	GJE	NSD	DYD	DJD	DCD	MJD	BGD	YSD	YSR	JLD	JPD	JD	CLD	TJD	HJD
Ozone (ppm)	0.053	0.089	0.045	0.071	0.053	0.081	0.118	0.106	0.069	0.108	0.044	0.044	0.052	0.075	0.055	-	0.056
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	99	109	69	64	100	104	103	69	62	66	59	91	128	53	58	-	123

화된 지역에서 쾌적한 열환경을 위해 산지의 찬바람이 중요하다고 할 수 있다. 낙동강을 따라 기온이 낮게 나타나고 있으며, 이는 수계가 가지는 잠열 플럭스로 인해 기온 상승이 낮으며, 또한 부산 시내에 비해 토지피복도 측면에서 알베도가 크게 나타나 기온이 낮다. 기온이 높은 지역은 부산의 중심부로 금정산맥과 금련산맥 사이 지역에서 30 ℃를 넘는 기온분포를 나타내고 있었다. 해당일의 부산 중심부에서는 서풍 내지는 남서풍이 나타나고 있어, 남쪽에 위치해 있는 시내 일원의 풍향이 남서풍으로 시내 일원의 높은 열에너지가 중

심부로 집중시켜 기온이 높게 나타나는 것으로 판단된다. 낙동강 서쪽지역에서도 30 ℃ 이상의 온도 분포를 나타내고 있었으며, 이러한 모습은 김해평야 일대의 고온 현상과 맥을 같이 하고 있는 것으로 보인다. 낙동강과 금정산맥 사이에서 국지적으로 고온이 나타나고 있으며, 이는 서풍으로 인해 금정산과 백양산에 가로막혀 환기가 다소 부족하여 나타난 것으로 판단된다. 또한 기장군 정관면 일대에서도 국지적으로 고온 현상이 나타났으며, 이는 남동풍 발생으로 열에너지가 서쪽에 위치한 천마산 등지에 막히면서 기온 상승이 나타

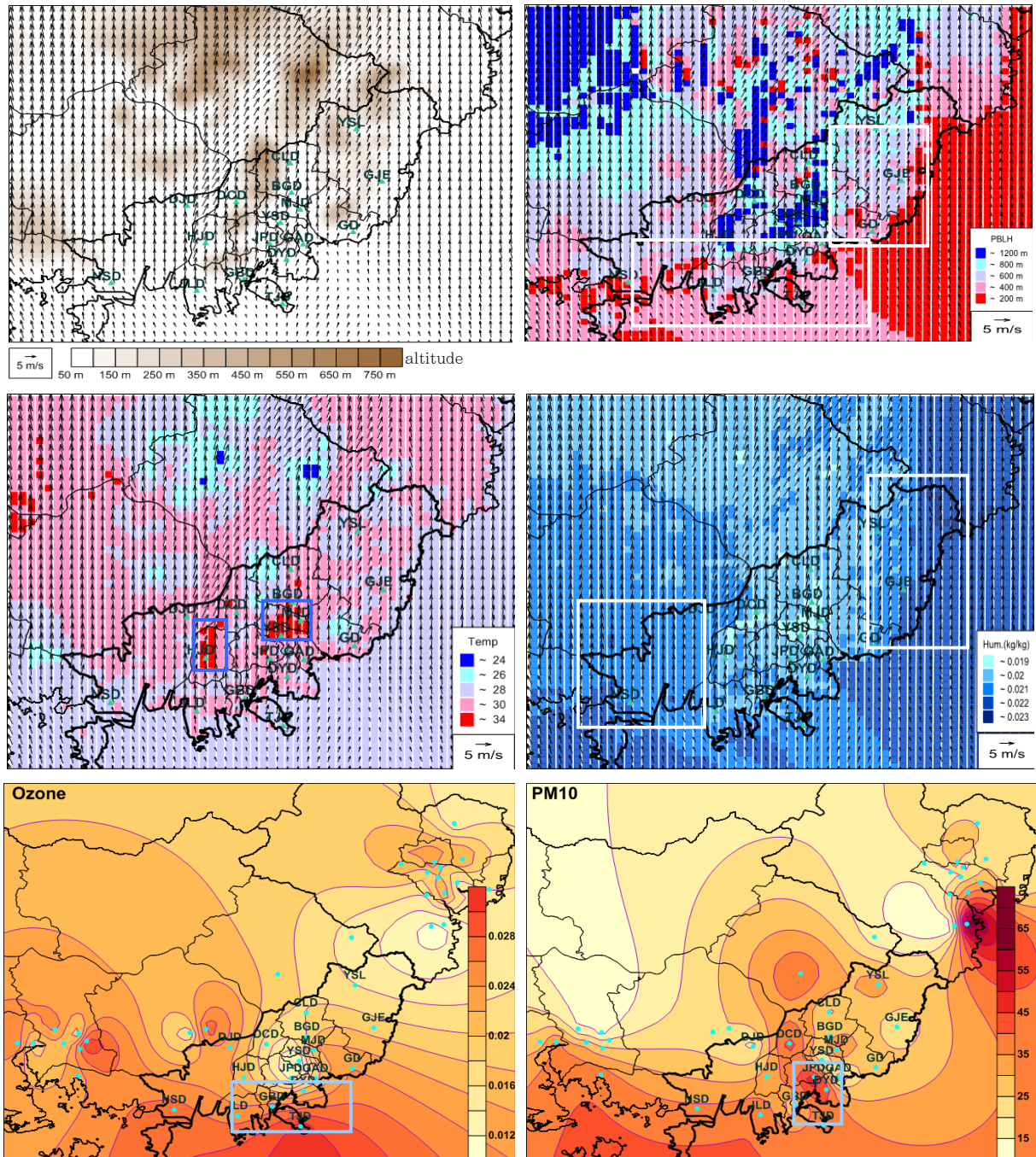


Fig. 12. The temperature, wind flow, humidity, PBLH(plenary boundary layer height) and air quality map at the highest discomfort day in Busan for 2007–2011; 2010.08.05, 1700LST

Table 7. The Ozone and PM10 concentrations on the day of the highest discomfort index in Busan for 2007–2011; 2010.08.05, 1700LST

	GBD	GAD	GJE	NSD	DYD	DJD	DCD	MJD	BGD	YSD	YSR	JLD	JPD	JD	CLD	TJD	HJD
Ozone (ppm)	0.025	0.019	0.019	0.027	0.021	0.023	0.017	0.023	0.018	0.011	0.016	0.025	0.013	0.024	-	0.031	-
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	25	15	21	36	44	18	43	40	27	16	33	40	50	28	24	39	-

난 것으로 판단된다.

해당 사례일 시간대의 오존과 PM10 농도 분포를 Fig. 11 하단과 Table 6에서 나타내었다. 오존은 덕천동 0.118 ppm, 명장동 0.106 ppm, 연산동 0.108 ppm과 같이 부산의 중심부에서 다소 높게 나타났으며 이는 부산 중심부에서 광범위하게 나타난 고온으로 인해 고농도 오존이 생성된 것으로 판단된다. PM10은 배출량이 높은 공업지역인 학장동에서 $123 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높게 나타나, 고온이 발생한 지역 분포와는 다른 동저서고 형태로 공업지역을 중심으로 높게 나타났다.

다음으로 인간에게 직접적인 영향을 미치는 불쾌지수를 분석해 보았다. 불쾌지수 산정을 위해서 2007년~2011년 광복동 지점에서의 불쾌지수를 분석하였으며, 2010년 8월 5일 17시에 84.3으로 가장 높게 나타났다. 불쾌지수는 $0.72(\text{건구온도} + \text{습구온도}) + 40.6$ 의 식으로 산정되며 이 식에서 습구온도를 상대습도로 환산하면 $9/5 \times \text{건구온도}(\text{℃}) - 0.55 \times (1 - \text{상대습도})(9/5 \times \text{건구온도} - 26) + 32$ 으로 나타나게 된다. 여기서 상대습도 단위는 소수단위를 의미하며, 불쾌지수가 75 이상일 때는 50% 이상 사람이 불쾌하게 느끼며, 80 이상일 때는 대부분의 사람이 불쾌감을 느끼는 수준이다. 해당 사례일 시간대의 수치모의 결과 중 바람장, 온도, 습도, 대기경계층 높이(PBLH)를 Fig. 15 상단에 나타내었으며, Fig. 15 하단의 그림은 동시간대 대기오염측정소 오존과 PM10 농도를 나타낸 그림이다. 해당일에는 남풍이 불어오면서 해양의 습한 공기가 내륙쪽으로 이류하고 있었으며, 그 결과, 높은 습도와 기온으로 인해 불쾌지수가 높게 나타

난 것으로 판단된다.

해당 사례일 시간대의 오존과 PM10 농도 분포를 Fig. 12 하단과 Table 7에서 나타내었다. 오존은 태종대 0.031 ppm, 녹산동 0.027 ppm, 광복동 0.025 ppm으로 해안을 중심으로 다소 높게 나타났으며, PM10도 전포동 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 대연동 $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 남쪽 해안을 중심으로 다소 높게 나타난 분포를 보였다. 이는 Fig. 12의 대기경계층 높이(PBLH)가 부산지역 남쪽 해안가를 중심으로 500 m 이하로 다소 낮게 나타났으며 이로 인하여 남풍의 형태로 나타난 해풍으로 발생한 낮은 대기경계층으로 해안가 오존 및 PM10이 다소 높게 나타난 것으로 판단된다.

공기흐름분석

바람의 강도와 방향은 열에너지와 대기오염물질의 이송 및 확산의 원동력이 되므로 도시 환경에서 이러한 공기의 흐름을 정확히 분석하여야 보다 객관적인 열 및 대기오염도의 분포를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 부산 지역의 주된 대기흐름을 살펴보기 위해 2007년~2011년 총 1,826일 중 강수량 0.5 mm 이하인 비강수일과 황사 발생일을 제외한 1,374일 12개 지점의 AWS의 풍향을 분석하였다. 각 지점의 일 주풍을 분석하여 동서방향인 u와 남북방향인 v로 구분하였으며, 총 12개 AWS 지점의 u, v 성분에 대해 군집 분석하여 3개의 군집으로 나누었다. 군집분석은 개체들간의 유사성 또는 이와 반대 개념인 거리에 근거하여 개체들을 집단으로 묶는 통계적 방법으로 특정 현상의 객관적인 패턴을 분류할 수 있다. 본 연

Table 8. Statistical tests for determining the number of clusters

No. Cluster	R2	Pseudo-F	Pseudo-t2
10	0.4488	123.3002	51.7123
9	0.4445	136.4367	10.0820
8	0.4436	155.4432	2.4997
7	0.3412	117.9332	243.7139
6	0.3403	141.0145	2.5404
5	0.3336	171.1909	12.6933
4	0.3309	225.7190	6.9093
3	0.3279	334.2577	5.6189
2	0.0015	2.0264	665.5068
1	0.0000		2.0264

Table 9. The average u, v components according to each cluster after K-average cluster analysis in Busan AWS (m/s)

		Busan	Guduk	Yongdo	Gaduckdo	Gijang	Haeundae	Busanjin	Gemjeounggu	Dongrae	Bukgu	Daejeon	Suyoungman
Cluster I	u	1.92	2.67	1.56	1.13	0.63	1.26	0.25	0.58	0.62	0.44	1.24	0.36
	v	2.41	-0.33	2.55	-0.69	0.85	1.44	0.93	0.75	0.81	1.13	0.69	1.74
Cluster II	u	-1.62	-2.88	-2.45	-4.15	0.26	-0.98	-0.40	-0.90	-1.14	-0.51	-1.66	-0.72
	v	-1.74	-1.86	-2.58	-0.80	-1.81	-1.36	-0.55	-1.91	-0.79	-1.92	-0.76	-1.21
Cluster III	u	1.56	5.20	1.05	2.26	1.21	1.50	1.80	0.50	0.18	0.64	1.33	2.08
	v	-1.70	-3.12	-0.18	-2.57	-0.62	-0.32	-0.84	-1.16	-0.98	-0.44	-0.20	-1.78

구에서는 통계프로그램인 SAS(Statistical Analysis System)을 이용하여 군집의 수를 추출하였으며, 이 군집의 수를 기초하여 통계프로그램인 SPSS를 이용하여 각 날짜에 대한 군집을 K-평균 군집분석 방법으로 최종군집을 결정하였다. Table 8은 군집 수 변동에 따른 R2, pseudo-F, pseudo-t2 값을 나타낸 표로 pseudo-F 값이 전후 단계보다 높은 결합의 단계나 pseudo-t2 값이 낮아진 결합의 단계, R2값이 급격히 증가한 단계에서 군집의 수가 결정되며, 따라서 군집의 수를 3으로 선정하였다. K-평균 군집분석 결과 군집 1에는 313, 군집 2에는 434, 군집 3에는 541의 날이 선택되어졌으며, 각 u, v 성분에 대한 군집별 평균값은 Table 9와 같다. 군집 1은 u와 v가 양의 값을 가져 남서계열의 바람이 선택되어졌으며, 군집 2는 u, v 두 성분이 음의 값을 가져 북동계열의 바람이, 군집 3은 u가 양의 값, v가 음의 값을 가져 북서계열의 바람이 선택되어졌다. 각 군집에서 거리도가 가장 낮은 날을 사례일로 선정하였으며, 군집1은 2010년 9월 3일, 군집 2는 2008년 10월 5일, 군집 3은 2008년 11월 26일로 선정되었다.

군집 1의 사례일인 2010년 9월 3일에 대한 기상요소에 대한 수치모의 결과와 대기오염측정소에서 측정된 오존과 PM10 농도를 Fig. 13과 Table 10에 나타내었다. 먼저

대기흐름을 살펴보면, 부산전역에 남서계열의 바람이 불어오고 있으며, 주요 바람길은 낙동강을 따라 양산시내로 흘러가는 바람길과 부산 중심부를 지나 덕계, 웅상으로 빠지는 바람길이 주된 바람길로 나타났다. 부산 중심부를 살펴보면 부산 중심부를 지나 덕계, 웅상으로 빠지는 바람길은 확보되었으나 부산 중심부의 대기오염물질이 바다로 빠져나가지 않고 내륙으로 빠져나가면서 부산 시내에는 전반적으로 환기가 용이한 기류 형태는 아닌 것으로 판단된다. 금정산맥과 금련산맥 사이사이에 위치해 있는 시가지는 북동쪽에 산이 위치해 있으면서 환기가 다소 불리해 보인다. 반면 해안과 인접해 있는 지역에서는 신선한 바닷바람의 유입이 가능한 것으로 판단된다. 앞서 Fig. 2에서 삼면이 산으로 둘러싸여 환기 부족이 나타날 수 있는 지역인 기장군 정관면(A), 기장군 철마면(B), 해운대구 반송동(C), 북구 만덕동(D), 부산진구 당감동(E), 사하구 대신동(F)에서는 모두 북쪽 내지는 북동쪽에 산이 위치해 있어 남서풍 유입시 대기 환기 측면에서 다소 불리한 모습을 나타내고 있었다. Table 10에서 오존 농도를 살펴보면, 오존은 2010년 9월 3일 13시에 용수리가 0.039 ppm으로 가장 높게 나타났으며, 동시간대 부산지역의 오존 농도를 살펴보면, 용수리 다음으로 덕천동 0.033, 청룡동 0.029 ppm으로 높게 나타났다. 따라서

Table 10. The Ozone and PM10 concentrations on the minimum day of the statistical distance index among Cluster I ; 2010.9.3 (unit : ozone-ppm, PM10- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	GBD	GAD	GJE	NSD	DYD	DJD	DCD	MJD	BGD	YSD	YSR	JLD	JPD	JD	CLD	TJD	HJD
Ozone (1300LST)	0.021	0.015	-	0.006	0.015	0.027	0.033	0.019	0.023	-	0.039	0.013	0.012	0.015	0.029	-	0.018
PM10 (Daily Mean)	32	20	-	40	49	28	41	54	45	20	36	51	55	21	31	36	54

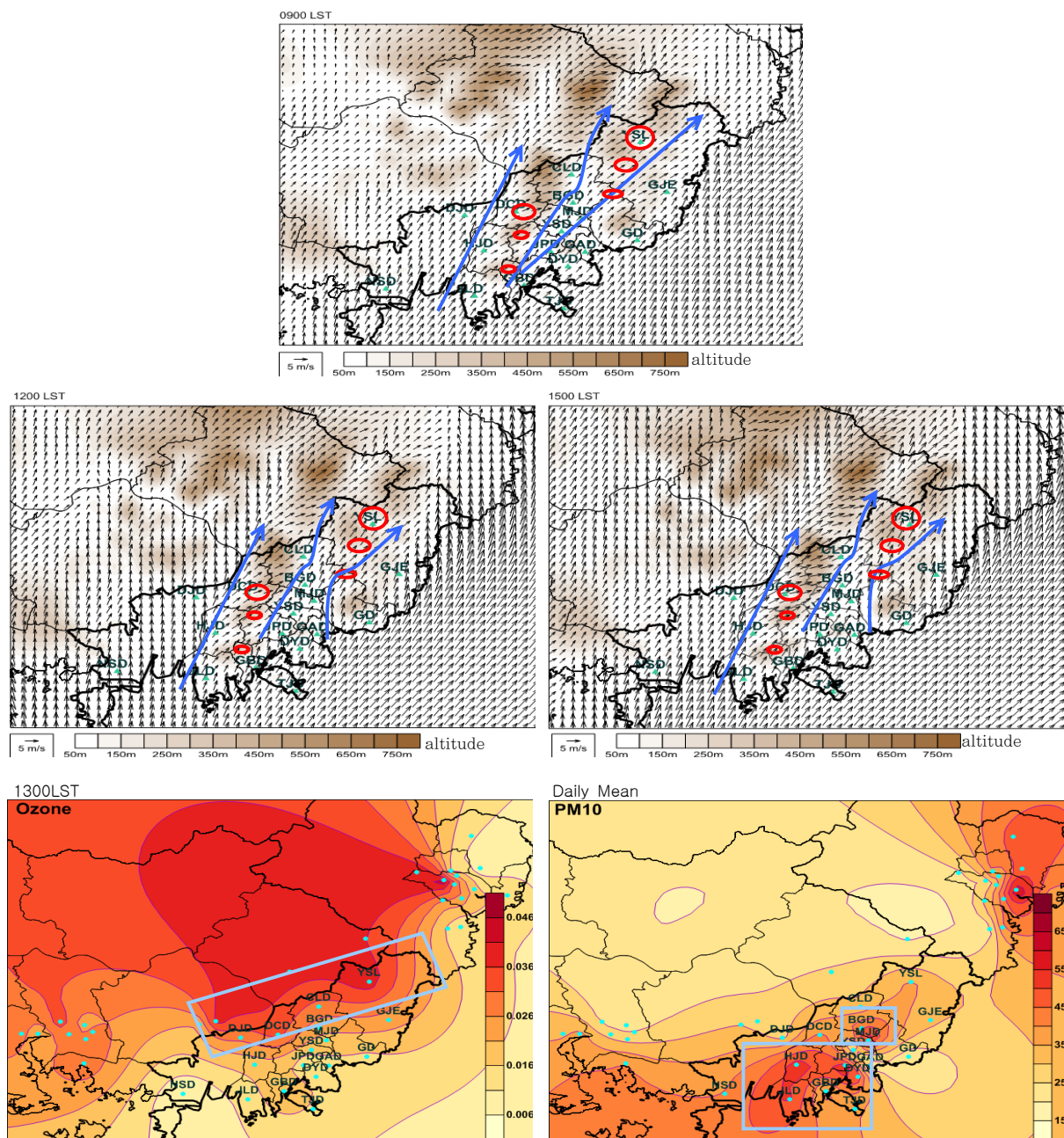


Fig. 13. The air flow and air quality map on the minimum day of the statistical distance index among Cluster I ; 2010.9.3.

Table 11. The Ozone and PM10 concentrations on the minimum day of the statistical similarity index among Cluster II ; 2008.10.5. (unit : ozone-ppm, PM10- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	GBD	GAD	GJE	NSD	DYD	DJD	DCD	MJD	BGD	YSD	YSR	JLD	JPD	JD	CLD	TJD	HJD
Ozone (0500LST)	0.019	0.051	0.030	0.064	0.055	0.038	0.044	0.050	0.047	0.043	0.032	0.026	0.040	0.060	0.048	0.066	0.024
PM10 (Daily Mean)	72	-	45	66	54	89	60	74	76	47	69	72	66	42	91	48	66

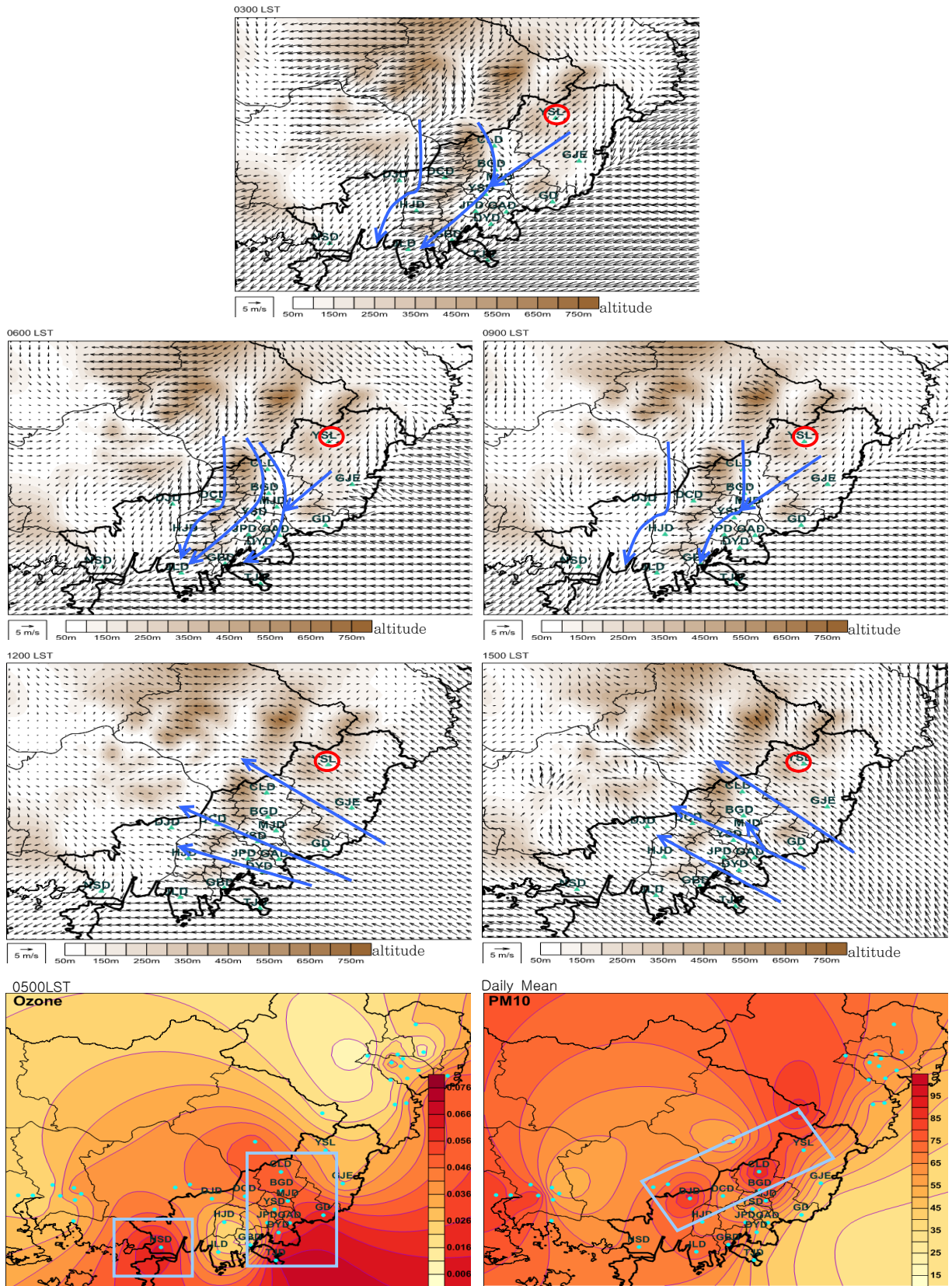


Fig. 14. The air flow and air quality map on the minimum day of the statistical similarity index among Cluster II; 2008.10.5.

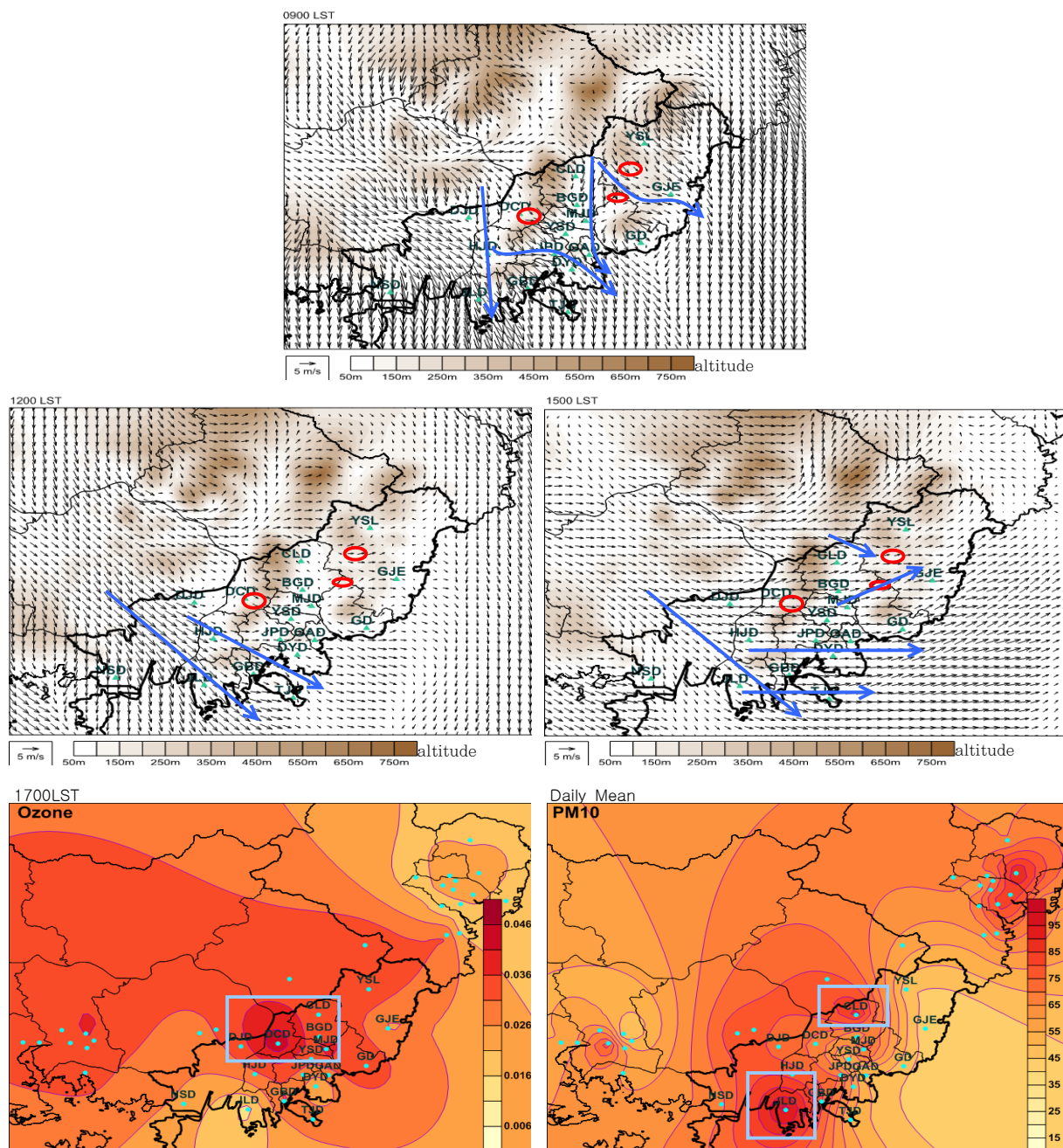


Fig. 15. The air flow and air quality map on the minimum day of the statistical distance index among Cluster III; 2008.11.26.

Table 12. The Ozone and PM10 concentrations on the minimum day of the statistical distance index among Cluster III; 2008.11.26 (unit : ozone-ppm, PM10- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	GBD	GAD	GJE	NSD	DYD	DJD	DCD	MJD	BGD	YSD	YSR	JLD	JPD	JD	CLD	TJD	HJD
Ozone (1700LST)	0.032	-	0.025	0.025	0.021	0.034	0.045	0.039	0.032	0.032	0.035	0.014	0.029	0.036	0.033	0.028	-
PM10 (Daily Mean)	-	48	41	68	59	72	68	79	57	48	46	98	70	47	88	54	78

오존은 내륙지역에서 상대적으로 높은 농도가 나타나고 있었다. PM10은 전포동 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 학장동과 명장동 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 공업지역인 학장동과 장림동을 중심으로 다소 높게 나타났으며, 부산 중심부의 PM10이 남서풍을 따라 내륙쪽으로 밀려들어가면서 부산 중심부인 명장동에서 다소 높게 나타나는 것으로 판단된다. 즉, 부산 중심부 중 I 지역(금정구, 동래구) 지역은 운산과 같은 금련산맥에 의해 기류가 집중되면서 PM10 농도가 다소 증가한 것으로 판단된다.

군집 2의 사례일인 2008년 10월 5일에 대한 수치모의 결과와 오존과 PM10 농도를 Fig. 14와 Table 11에 나타내었다. 오전 9시까지의 바람장을 살펴보면 해안에서는 동풍이 나타나고 있었으나 육지에서는 북풍이 나타나면서 바람장이 다소 복잡한 형태로 나타나고 있었다. 오후 12시 이후에는 해풍의 영향으로 주풍향이 동풍으로 바뀌고 해풍이 내륙까지 밀려들면서 오전의 복잡한 풍계는 동풍 내지는 남동풍으로 고르게 분포되었다. 오전 9시까지의 부산지역 주된 바람길은 양산 시내에서 불어오는 바람이 낙동강을 따라 흘러가고 있으며, 다른 하나의 바람길은 덕계, 웅상지역에서 부산시내를 관통하여 영도 쪽으로 흘러가는 바람이 있었다. 그러나 오후가 되면서 주풍이 동풍으로 바뀌면서 주된 바람길도 남동풍 계열로 나타나면서 금정산맥과 금련산맥 사이사이로 분산되는 모습을 보여주고 있었다. 부산 중심부를 중심으로 살펴보면 오전 9시까지는 부산 중심부의 오염물질이 해안쪽으로 밀려나가고 있어 대부분 환기가 부족하지 않는 것으로 판단되나 금련산맥 서쪽으로는 부분적으로 해안쪽에서 들어오는 동풍과 내륙쪽에서 들어오는 북서풍이 집중되면서 국지적 성격의 기류 정체가 나타날 수 있는 것으로 판단된다. 오후 12시를 지나면서 육지에서 주풍향이 남동풍으로 나타나면서 부산 중심부 지역과 기장군 정관면(A) 지역에서 환기가 다소 부족한 것으로 분석되었다. 부산 중심부 지역의 풍하지역에는 백양산이 자리하고 있으며, 그림 14에

서 붉은 원으로 표시된 기장군 정관면(A)에서도 산으로 인해 환기가 다소 부족한 것으로 판단된다. 2008년 10월 5일에는 태종대에서 5시에 0.066 ppm으로 가장 높게 나타났으며, 동시간대 부산지역 오존 농도를 살펴보면 녹산동 0.064 ppm, 좌동 0.060 ppm으로 해안가를 중심으로 다소 높게 나타났으며 명장동 0.050 ppm, 부곡동 0.047 ppm으로 소폭 높은 것으로 나타났다. 2008년 10월 5일에는 풍속이 전반적으로 3 m/s 이하의 저풍속이 나타나 부산 중심부의 광범위한 지역에서 다소 높은 농도의 오존이 나타난 것으로 판단된다. PM10은 청룡동이 91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 나타났으며, 다음으로 대저동 89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 부곡동 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 다소 높게 나타났다. 청룡동은 남동풍 계열의 바람이 불면서 금정산에 막혀 환기가 다소 부족하여 PM10 농도가 높게 나타난 것으로 보여진다.

군집 3의 사례일인 2008년 11월 26일에 대한 수치모의 결과와 오존과 PM10 농도를 Fig. 15와 Table 12에 나타내었다. 군집 3의 주풍향은 북서풍계열로 풍계가 다소 복잡한 모습을 보여주고 있다. 오전 9시 풍계를 살펴보면, 김해지역에서 유입되는 바람이 강서구를 지나 백양산과 구덕산 사이로 지나가고 있으며, 또 다른 바람길로는 덕계, 웅상지역에서 부산시내를 지나 황령산과 장산 사이로 빠지는 바람길이 있었다. 북서풍이 나타나면서 부산 중심부의 대기오염물질은 남쪽으로 원활하게 환기될 것으로 판단되며, 반면 Fig 2에서 나타내었던 기장군 철마면(B), 해운대구 반송동(C), 북구 만덕동(D)에서는 풍하지역에 위치한 산으로 인해 오염물질 환기가 다소 원활하지 않을 것으로 판단된다. 2008년 11월 26일에는 17시에 덕천동에서 0.045 ppm으로 가장 높게 나타났으며, 동시간대 부산지역 오존 농도를 살펴보면 명장동 0.039 ppm, 좌동 0.036 ppm, 용수리 0.035 ppm로 나타나 덕천동을 중심으로 내륙이 해안보다는 대체적으로 높은 패턴을 보여주고 있었다. 2008년 11월 26일 일평균 PM10

Table 13. The Ozone and PM10 concentrations on the day of the lowest wind speed in Busan for 2007–2011; 2010.12.1 (unit : ozone-ppm, PM10- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	GBD	GAD	GJE	NSD	DYD	DJD	DCD	MJD	BGD	YSD	YSR	JLD	JPD	JD	CLD	TJD	HJD
Ozone (1400LST)	-	0.068	0.048	0.037	-	0.047	0.053	0.042	0.040	0.035	0.047	0.045	0.033	0.072	0.048	0.047	0.046
PM10 (Daily Mean)	110	95	84	163	120	120	99	104	100	108	77	156	109	87	93	115	162

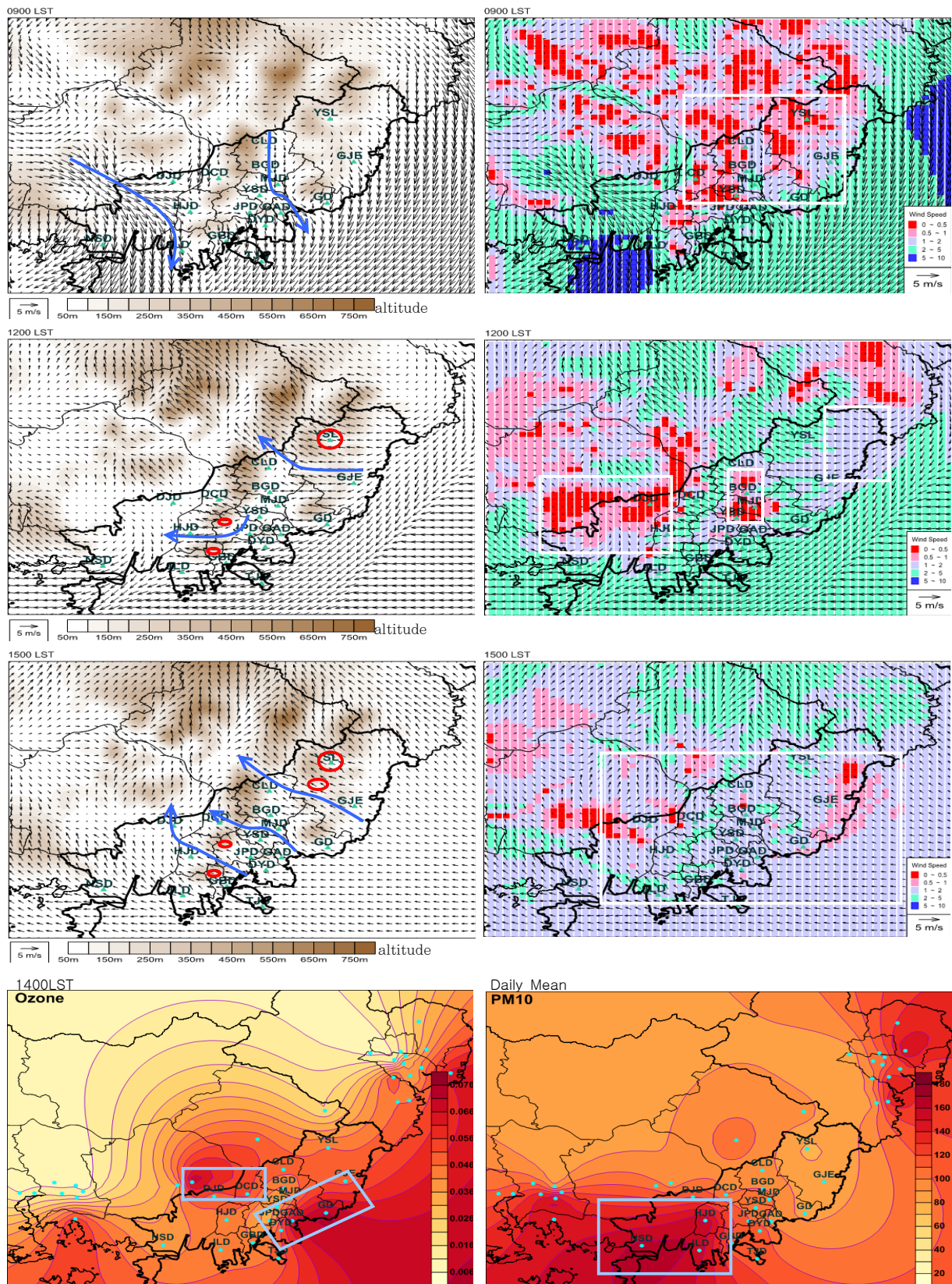


Fig. 16. The wind speed, wind direction and air quality map at the minimum day of wind speed in Busan for 2007–2011; 2010.12.1.

농도를 살펴보면 장림동 $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 명장동 $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 학장동 $78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 서풍계열의 바람이 불면서 동쪽에 산이 위치한 명장동에서 PM10 농도가 다소 높게 나타난 것으로 판단된다.

마지막으로 저풍속에서의 공기흐름을 분석하여 보았다. 풍속이 작으면 오염물질의 정체가 발생할 가능성이 있기 때문에 저풍속의 기상환경하에서는 대기오염관리에 있어 주의가 필요하다. 저풍속의 풍계를 나타내는 사례일을 선정을 위해 2007년에서 2011년까지 일강수량 0.5 mm인 날을 제외하고 AWS의 일풍속을 평균한 결과 2010년 12월 1일에 1.3 m/s로 가장 낮게 나타났다. 수치모의한 결과를 Fig. 16에 측정소의 오존과 PM10 농도도 함께 나타내었다. 그림에서 빨간색 부분은 풍속이 0.5 m/s 이하인 지역, 분홍색 부분은 풍속이 0.5~1.0 m/s인 지역을 나타내었다. 오전 9시에는 낙동강 동쪽의 대부분 지역에서 풍속 1.0 m/s 이하로 나타났으며, 오후 12시에는 낙동강 서쪽지역과 시내 중심부, 기장 지역에서 저풍속이 나타났으나 오후 15시에 접어들면서 부산의 대부분 지역에서 저풍속이 나타났다. 부산 중심부가 외곽에 비해 풍속이 더 낮게 나타나고 있었으며, 이는 부산 중심부가 금정산맥과 금련산맥 사이에 형성되어 있어 풍속이 낮게 나타나는 것으로 판단된다. Table 13에서 2010년 12월 1일 14시에 좌동에서 0.072 ppm으로 가장 높게 나타났으며, 동시간대 부산지역 오존 농도를 살펴보면 광안동 0.068 ppm, 덕천동 0.053 ppm으로 남동쪽 해안을 중심으로 다소 높고, 내륙에 위치한 덕천동 지역도 다소 높은 것으로 나타났다. PM10 농도를 살펴보면 학장동 $162 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 장림동 $156 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 공업지역에서 높게 나타났으며, 해당 사례일에는 저풍속으로 인해 PM10 농도가 전반적으로 높게 나타났다.

고 찰

도시대기환경지도는 여러 요소도들로 구성되어 있으며, 이를 종합적으로 판단하여 실제로 어느 지역이 대기환경적으로 문제가 되고 있는지, 또는 좀 더 개발하여도 대기오염도에 큰 영향을 미치지 않을 것인지 등에 대한 제시가 실질적으로 필요하다고 할 수 있다. 먼저 열환경 분석결과 부산 중심부와 낙동강과 금정산맥 사이, 낙동강 서쪽의 평야지대, 기장군 정관면에서 기온이 높게 나타났다. 따라서 부산 중심부의 녹지 및 바람길 확보와 같은 열환경 개선 사업이 필요하다고 할 수 있으나, 기 개발된 지역에 대한 사업은 비용 측면에서 어려울 수 있어, 옥상 녹화사업과 같은 상대적으로 저비용인 방법이 도움이 될 수

있다. 부산 중심부 중에서도 바다와 비교적 떨어져 있는 동래구 지역의 기온이 가장 높게 나타나 관리가 필요한 지역으로 꼽을 수 있었다. 낙동강과 금정산맥 사이 화명동 일대에서도 기온이 다소 높게 나타나, 낙동강 둔치를 따라 녹화 사업이 필요하다고 판단되며, 금정산과 백양산의 신선한 공기의 유입이 원활하도록 신규 아파트와 같은 지물 설치시 바람길 확보에 유의해야 할 것이다. 이러한 방향은 기장군 정관면에서도 마찬가지로 주변 산에서의 신선한 공기가 효과적으로 유입될 수 있도록 신규 아파트 설치시 유의하여야 한다.

부산 중심부에서 대기환경을 개선하기 위해서는 소규모 식생면적을 증가시키는 옥상 녹화사업 외에도 건물과 도로에 밝은 색의 포장재를 사용하여 알베도를 낮게 만드는 방법이 있다. 또한 옥상에 개방형 물저장 탱크를 설치하여 잠열 플럭스를 유도하고 알베도를 낮게 할 수 있으며, 이와 비슷하게 반사율이 도로 포장재 및 도로를 사용할 수 있으며, 오솔길 및 주차장에 대해서도 포장 보다는 자갈화를 추진하는 방법이 있다⁶⁾.

부산 지역의 대기오염도와 관련하여 부산 중심부가 금정산맥과 금련산맥 사이에 위치해 있어 전체적으로 환기에 취약하나, 부산 지역 내에 산과 강이 위치해 있고 주변 바다로 인해 신선한 공기의 유입 가능성은 높다고 할 수 있다. 부산 중심부 주변 지역으로 삼면이 산으로 둘러싸여 환기 부족이 나타날 수 있는 지역으로는 기장군 정관면(A), 기장군 철마면(B), 해운대구 반송동(C), 북구 만덕동(D), 부산진구 당감동(E), 사하구 대신동(F)으로 분석되었으며, 이들 지역은 반면 인근에 위치하여 산에서 불려오는 신선한 공기 유입 가능성 또한 높다고 할 수 있다. 그러나 특정 풍계 즉 풍하측에 산이 위치하게 되면 기류 집중 및 환기 부족이 나타나 대기오염도가 높아질 수 있다. 다만 이들 지역에서는 대기오염 배출량이 상대적으로 적어 크게 우려할 상황은 아니라고 판단된다.

본 연구에서는 부산전역을 대상지역으로 분석하였으며, 따라서 보다 정확하고 상세한 대기환경을 분석하기 위해서는 구군단위의 해상도가 좀 더 높은 도시대기환경지도를 통한 분석이 필요하다. 먼저 건물 분포도와 관련하여 건물 배치와 바람길에 대한 세부적인 검토가 필요하다고 판단되며, 해운대구 신시가지 및 마린시티, 북구 화명동과 같은 대단위 아파트 단지가 위치해 있는 지역, 환기 부족이 나타날 수 있는 반분지형 지역(A~F), 사상구 및 사하구 공업지역의 주변 지역과 같이 오염물질 유입이 용이한 지역에 대한 구군 단위의 건물 분포와 관련된 분석이 필요하다고 할 수 있다. 또한 본 연구에서는 도시대

기환경지도를 기초로 기상과 대기오염도와의 관련성을 살펴봐왔는데, 이와 함께 대기오염도 분포 파악을 위한 대기오염모델수행이 보완되어 진다면 대기환경 분석 결과에 대한 객관성이 더욱 확보될 것이다.

결 론

부산지역 대기오염 특성을 이해하고 대기환경개선 및 대기오염을 저감하기 위해 대기환경 측면에서 필요한 방안을 도출하기 위하여 도시대기환경지도를 작성하여 대기환경 측면에서 분석해 보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2007년~2011년 부산지역 AWS 기온을 분석한 결과, 일평균최고기온 및 일평균최고체감온도는 금정구와 동래에서 가장 높게, 가덕도와 영도에서 가장 낮게 나타났다. 일평균최저기온 및 일평균최저체감온도는 기장군 및 금정구, 북구 지역이 낮게, 해안가를 따라 대연동 등지에서 높게 나타났다. 열대야 일수는 동래, 남구, 부산진구 지역에서 높게 나타났으며, 기장, 영도, 가덕도에서 가장 낮게 나타났다.
2. 일평균풍속은 영도, 광복동 지점이 풍속이 다소 높게, 금정구, 동래, 부산진과 같은 부산시내에서 다소 낮게 나타났다. 주풍향은 금정구, 동래구, 북구, 영도, 광복, 가덕도에서는 북동계열, 부산진, 기장은 북서계열이 나타나 부산전역에는 남동풍 계열을 제외한 풍향이 빈번히 나타나는 것으로 분석되었다.
3. 부산의 지형의 측면에서 대기환경특성을 살펴보면, 부산 중심부가 금정산맥과 금련산맥 사이에 위치해 있어 산에 의한 기류 집중 및 환기 부족이 나타날 수 있었다. 또한 중심부를 이외 지역으로 삼면이 산으로 둘러싸여 환기 부족이 나타날 수 있는 곳은 기장군 정관면(A), 기장군 철마면(B), 해운대구 반송동(C), 북구 만덕동(D), 부산진구 당감동(E), 사하구 대신동(F)을 찾을 수 있었다. 그러나 이러한 형태는 특정 기상 하에서 나타나므로 여러 형태의 기상 조건과 함께 해당 지역에 대한 구 단위의 검토가 필요하며, 이들 지역에서 배출량이 다른 지역에 비해 낮게 나타나고 있어 크게 우려할 사항은 아닌 것으로 판단된다.
4. 부산지역 대기환경특성 분석을 위해서 배출량을 살펴 보았다. TSP는 부산 중심부를 중심으로 다소 높고, PM10은 부산 중심부 및 부산 남쪽 해안의 항만시설 등지에서 다소 높게 나타났다. NOx 역시 부산의 남쪽 해안에서 높게 나타났으며, VOCs는 부산 중심부, 도로,공단지역을 중심으로 높게 나타났다.
5. 대기오염물질 오염도는 오존이 용수리, 광안동, 태종대, 녹산동 등 해안가를 중심으로 다소 높게 나타났고, PM10은 학장동과 장림동, 녹산동과 같은 부산의 남서지역과 내륙의 명장동 지역이 다소 높게 나타났다. 오존은 해풍 발생으로 대기경계층이 발생 또는 오존 및 오존전구물질의 재순환에 의해 해안가를 중심으로 다소 높게 나타나고 있으며, PM10은 학장동 등 공업지역에서 다소 높게 나타났다.
6. 공간적 해상도를 높이고자 기상 수치모의를 하였으며, 시간최고온도가 발생한 2007년 7월 27일 분석 결과, 부산 중심부 지역과 낙동강과 금정산맥 사이에 위치한 화명동 지역, 반 분지형인 기장군 정관면에서 기온이 높게 나타났다.
7. 부산지역 주풍향을 군집 분석한 결과, 남서, 북동, 서풍 계열인 군집으로 분류하였다. 각 군집에 대한 공기흐름 분석 결과, 남서계열인 군집 1에서는 부산 중심부와 그 외 지역(A~F)에 환기가 불리할 것으로 예상되었다. 북동계열인 군집 2에서는 다소 복잡한 풍계를 나타내고 있었으며, 오후가 되면서 해풍 유입으로 남동계열로 바뀌어 나타났다. 북동 내지 남동의 풍계는 부산 중심부 중 동래구 지역과 기장군 정관면에서 풍하측에 금정산맥이 위치하면서 오염물질 환기에는 취약한 것으로 나타났다. 군집 3은 북서풍계열으로 기장군 철마면, 해운대구 반송동, 북구 만덕동에서 환기에 불리한 것으로 분석되었다.
8. 금정구와 동래구 일대 대기환경 개선을 위해서는 옥상녹화, 금정산 일대 바람길 확보가 필요하며, 낙동강을 따라 북구와 사상구 일대에는 낙동강 둔치의 녹화사업, 금정산과 백양산의 바람길 확보를 위해 신규 아파트 설치 시 유의해야 할 것이다. 부산 중심부에서 대기환경을 개선하기 위해서는 옥상 녹화사업 외에도 건물과 도로에 밝은 색의 포장재 사용, 옥상 개방형 물저장탱크 설치, 반사율이 높은 도로 포장재 및 도로를 사용, 오솔길 및 주차장 자갈화 하는 방법등이 있다.

참고문헌

1. 국토해양부, 도시계획현황(2011).
2. 구현숙, 김해동, 대구지역의 국지순환풍의 환기경로 및 대기오염수송에 관한 수치모의, Jour. Korean Earth Science Society, 25(6), pp.418~427(2004).

3. 김유근, 이화운, 전병일, 홍정혜, 부산 연안역의 오존 농도에 미치는 해풍의 영향, 한국환경과학회지, 5(3), pp.265~275(1996).
4. 신문기, 이충대, 하현섭, 최춘석, 김용희, 기상인자가 미세먼지 농도에 미치는 영향, 한국대기환경학회지, 23(3), pp.322~331(2007).
5. 황윤정, 이순진, 도화석, 이윤기, 손태정, 구건택규, 한정욱, 강동훈, 김종우, 대구지역 대기 중 미세먼지의 오염도 분석 및 기상인자에 따른 영향 평가, 한국대기환경학회지, 25(5), pp.459~471(2009).
6. 인제대학교 산학협력단, 도시 기후·대기질 통합관리 추진방향에 관한 연구(2006).
7. 기상청, 지역별상세관측자료(AWS), <http://www.kma.go.kr>.
8. 환경부, 대분류 및 중분류 토지피복지도, <http://egis.me.go.kr>.
9. 국토해양부 국토지리정보원, 수치지형도 V2.0 5,000 :1, <http://www.ngii.go.kr>.
10. 환경부 국립환경과학원, 대기오염물질 배출량 2009(2010).
11. 박명희, 정우식, 김해동, 대구지역의 환경친화적 도시 계획을 위한 도시환경기후지도 작성에 관한 연구, 한국환경과학회지, 20(4), pp.465~482(2011).
12. 신동훈, 조상필, 이규석, 친환경 도시계획을 위한 도시 기후지도 작성에 관한 연구, 서울도시연구, 12(1), pp.1~16(2011)
13. Gunter Baumbach, Ulrich Vogt, Experimental determination of the effect of mountain-valley breeze circulation on air pollution in the vicinity of Freiburg, Atmospheric Environment, 33, pp.4019~4027(1999).
14. A. G. Triantafyllou, P.A.Kassomenos, Aspects of atmospheric flow and dispersion of air pollutants in a mountainous basin, the Science of the Total Environment, 297, pp.85~103, 202.
15. P.A. Kassomenos, H.A. Flocas, S. Lykoudis, A. Skouloudis, Spatial and temporal characteristics of the relationship between air quality status and mesoscale circulation over an urban Mediterranean basin, the Science of the Total Environment, 217, pp.37~57(1998).
16. RONG Lu, RICHARD P. TURCO, Air pollutant transport in a coastal environment- II. Three-dimensional simulations over Los Angeles Basin, Atmospheric environment, 29, pp.1499~1518 (1995).
17. Rupak Kumar Aryal, Beyong-Kyu Lee, Rahul Karki, Anup Gurung, Bivek Baral, Seung-Hyeok Byeon, Dynamics of PM2.5 concentrations in Kathmandu Valley, Nepal, Journal of Hazardous Materials, 168, pp.732~738(2009).
18. Man Sing Wong, Janet E. Nichol, Pui Hang To, Jingzhi Wang, A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis, Building and Environment, 45, pp.1880~1889 (2010).
19. Chuan-Yan Lin, Fei Chen, J.C. Huang, W.-C.Chen, Y.-A. Liou, W.-N. Chen, Shaw-C. Liu, Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan, Atmospheric Environment, 42, pp.5635~5649(2008).
20. Haider Taha, Meso-urban meteorological and photochemical modeling of heat island mitigation, Atmospheric Environment, 42, pp.8795~8809 (2008).
21. H. Merbitz, M. Buttstadt, S. Michael, W. Dott, C. Schneider, GIS-based identification of spatial variables enhancing heat and poor air quality in urban areas, 33, pp.34~106(2012).
22. Puneeta Pandey, Dinesh Kumar, Amit Prakash, Jamson Masih, Manoj Singh, Surendra Kumar, Vinod Kumar Jain, Krishan Kumar, A Study of urban heat island and its association with particulate matter during winter months over Delhi, Science of the Total Environment, 101, pp.494~507(2012).
23. 환경부, 대기환경연보(2010), (2011).