

Envi-met 모델을 이용한 도심지역 대기오염측정망 주변의 바람장 분석

김민경 · 이화운* · 도우곤** · 정우식***

부산대학교 환경시스템협동과정, *부산대학교 지구환경시스템학부,
부산광역시보건환경연구원, *인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터
(2009년 1월 14일 접수; 2009년 2월 10일 수정; 2009년 6월 23일 채택)

An Analysis of Wind Field around the Air Quality Monitoring Station in the Urban Area by Using the Envi-met Model

Min-Kyoung Kim, Hwa Woon Lee*, Woo-Gon Dou** and Woo-Sik Jung***

*Department of Interdisciplinary Program of Environmental System
Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

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

***Busan Institute of Health and Environment, Busan 613-806, Korea*

****Department of Atmospheric Environment Information Engineering/Atmospheric
Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea*

(Manuscript received 14 January, 2009; revised 10 February, 2009; accepted 23 June, 2009)

Abstract

The urban microscale wind field around the air quality monitoring station was investigated in order to check how a building complex influences it. For this study as the high density areas Jwa-dong and Yeonsan-dong monitoring sites in Busan were chosen. As the direction of inflow which is perpendicular to the building of the monitoring station was expected to cause the considerable variation of the wind field, that direction was selected. The model Envi-met was used as the diagnostic numerical model for this study. It is suitable for this investigation because Envi-met has the microscale resolution. After simulating it, on the leeward side around a building complex the decrease of flow velocity and some of vortexes or circulation area were discovered. In addition, on the edge of the top at the building and at the back of the building the upward flow was developed. If the sampling hole of monitoring site were located in this upward flow, it would be under the influence of upward flow from the near street.

Key Words : Microscale wind field, Air quality monitoring station, Building complex, Envi-met

1. 서 론

도시화가 심화될수록 도심지의 건물 밀집도는 상

승하게 되고 도심 내 건물들은 공기 흐름을 변화시켜 국지적 대기 순환에 영향을 미치게 된다. 이는 국지 기후와 도심지의 오염물질 확산 양상에 변화를 가져오게 된다. 기상 측정소나 대기오염 측정소가 이러한 지역에 위치한 경우에는 건물의 영향으로 관측환경이 악화되기도 한다¹⁾.

Corresponding Author: Hwa Woon Lee, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Phone: +82-51-510-2291

E-mail: hwlee@pusan.ac.kr

대기환경보전법에 따르면, 대기환경의 변화나 대기오염의 실태를 파악하기 위하여 지방자치단체에서는 관할 구역 내에 대기오염 측정소를 설치 운영하도록 규정하고 있으며, 이에 따라 2007년 말 현재 총 363개소의 측정소가 전국적으로 설치·운영 중에 있다. 측정소의 위치를 용도지역별로 살펴보면 주거지역이 46.3, 상업지역이 22.3%, 공업지역이 14.9를 차지하고 있으며, 대부분 관공서(63.4)와 학교(11.0%) 건물의 옥상에 설치되어 있다²⁾.

대기오염 공정 시험법과 대기오염측정망 운영지침에 의하면 대기오염 측정소는 주위환경과 기상조건 등에 의한 영향을 최소화하기 위하여, 건물이나 수목 등의 장애물이 없고 지역의 대표성이 확보되는 지점에 설치하도록 하고 있으며, 건물이나 수목 등의 장애물이 있을 경우, 장애물 높이의 2배 이상 떨어지도록 규정하고 있다. 이러한 대기오염 측정소에서 측정되는 대기 오염도는 지역의 대기오염도 현황을 파악하고, 향후 대기질 예측과 대기정책 수립의 기초 자료로 사용되므로 지역 대표성이 높은 지역의 평균적인 대기오염도 측정은 매우 중요한 문제라 할 수 있다.

그러나, 측정소가 도심지에 위치해 있는 경우에는 측정소 주변으로 건물이 밀집되어 있는 경우가 대부분이며, 기존 측정소 주변으로 건물이 새로이 들어서게 되는 경우도 생기게 된다. 이러한 건물들은 측정소 관측 데이터에 영향을 미칠 수 있으므로, 측정소 일대를 중심으로 주변 건물에 의하여 공기 유동이 어떻게 나타나는지를 분석하는 것은 중요하다고 할 수 있다.

건물 주변의 유동 현상에 관한 연구는 대기 확산과 관련하여 활발히 진행되어 왔다. 도로 협곡에서의 흐름 및 오염물질 분산에 대한 연구^{3~5)}, 고층건물과 아파트에 의한 기류변형과 열환경 변화에 관한 연구^{6~8)}, 자동차 배기가스와 같은 도심지 대기오염물질 분산에 관한 연구들이 수행되었다^{9,10)}. 이러한 연구들은 주로 야외실험, 풍동실험, 수치실험 및 이론적인 접근 방법을 통하여 이루어져 왔는데, 이중 풍동실험이나 야외실험은 실제 상황에서 흐름을 파악하므로 가장 현실적이고 실제 모습을 잘 나타낼 수 있으나, 투입 비용이 높다. 이에 비해, 연구 비용이 낮고 다양한 주변 조건의 적용이 가능한 수

치모형이 유동 특성에 대한 이해 증진과 함께 꾸준히 발전해 오고 있다^{1,3)}.

부산광역시의 경우 도시화에 따른 다양한 배출원이 위치하고 있으며, 연안지역에서 나타나는 기상 효과 등으로 대기오염의 악화 가능성이 매우 높은 지역이다. 이에 따라 1979년 감전동 측정소의 설치 이후 지속적으로 대기오염 측정소를 추가하여 2007년 말 현재 총 17개의 도시대기 측정소를 운영 중에 있다. 그러나 도시화 등으로 인하여 측정소 주변으로 건물 등이 밀집되어 최초 설치 당시와 다른 주변 환경을 가지되는 지점이 증가하고 있으며, 따라서 측정소 주변의 건물로 인한 대기오염도 측정조건 변화에 대한 검토가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 미기상 수치모형을 이용하여 부산광역시 내의 측정소 주변으로 건물이 밀집되어 있는 대기오염 측정소를 대상으로 측정소 주변의 건물군이 주변 기류의 흐름에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보고 대기오염 측정조건 변화에 대하여 고찰하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. Envi-met 모델 개요

본 연구에서는 독일 Bochum대학의 Bruse에 의해 개발되었고 2004년에 최종 개선된 Envi-met 모델을 사용하였다¹¹⁾. 이 모델은 도시지역에서의 지면, 건물, 식생, 대기의 상호작용에 관한 미세규모 모델이다. 해상도는 수평규모로 수~수십m 정도로 도심지 개개의 건물과 식생, 지면 표현이 가능하다⁶⁾.

Envi-met 모델은 대기모형, 식생모형, 토양모형, 그리고 지면과 건축물에 관한 식으로 이루어져 있는데 좁은 영역의 상세한 기상정보를 도출하는 장점이 있다¹²⁾.

미기상모델로서 Envi-met은 여러 연구에서 사용되었다. 정은 Envi-met을 사용하여 개발로 인한 지형변화가 국지 바람장에 어떻게 영향을 미치는지 수치모의하였고^{12,13)}, 아파트단지 환기경로 파악⁶⁾을 위한 도구로 사용하였다. 박은 고층건물에 의한 열환경변화를 Envi-met으로 수치모의하였다⁸⁾. 국외에서는 Bruse와 Fler가 Envi-met을 이용하여 지표면-식생-대기와의 상호작용에 관한 시뮬레이션을 하였고¹⁴⁾, Ali-Toudert와 Mayer는 도시 협곡의 외형비와 solar orientation이 열전도(outdoor thermal comfort)에

미치는 영향에 대한 수치 모의를 한 바 있다¹⁵⁾.

Envi-met은 Windows 운용체제에서 사용이 가능하며 프로그램은 홈페이지¹¹⁾를 통해 무료로 제공되고 있고, 수치모의 결과는 LEONARDO라는 자체 결과 도출 전용 프로그램을 이용하거나 ASCII형태로도 나타낼 수 있다.

2.2. 연구대상

2.2.1. 대상지역

본 연구에서는 부산광역시에 소재하고 있는 대기오염 측정소 중 주변의 건물 밀집도가 높은 좌동 측정소와 연산동 측정소를 연구 대상으로 설정하였다. 좌동 측정소는 동사무소 옥상에, 연산동 측정소는 초등학교 옥상에 위치하고 있으며 두 지점 모두 건물이 밀집되어 있는 주거지역에 위치하고 있다.

좌동 측정소는 1998년에 조성된 부산광역시의 해운대 신시가지에 위치하고 있다. 해운대 신시가지는 1992년 착공을 시작으로 건물 밀집도가 상승하기 시작하였고, 현재에도 새로운 건물이 속속 들어서고 있다. 좌동 측정소를 중심으로 주변 건물군의 배치 형태는 Fig. 1과 같다. 그림에서 표시된 S 지점은 대기오염 측정소가 위치한 곳으로 시료 채취구를 나타낸 것이며 19 m 높이의 건물 옥상에 설치되어 있다. 검은색 8면체는 건물을 나타낸 것이며, 회색의 작은 8면체는 수목을 나타낸 것이다. 좌동 측정소의 서쪽 지역으로는 높은 건물이 없으나, 330° 방향으로 24 m 높이의 빌딩이 인접해 있고, 동쪽으로 6차선 도로가 있으며, 이 도로를 사이에 두고 36 m 높이의 건물이 위치해 있다.

연산동 측정소는 전형적인 주거지역의 주택밀집지에 위치하고 있다. 측정소 주변으로는 주택과 빌라, 상가들이 1~2 m의 간격을 두고 조밀하게 분포

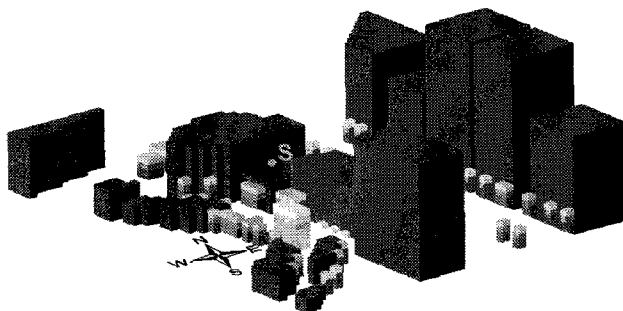


Fig. 1. Topographical map around the Jwa-dong monitoring station.

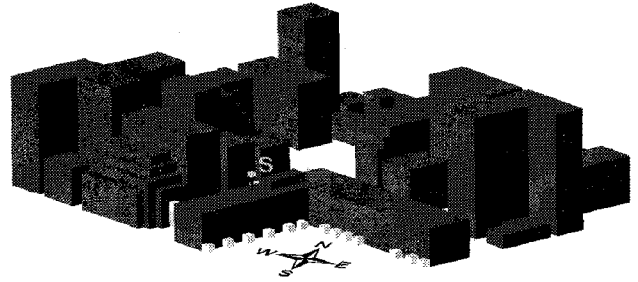


Fig. 2. Same as Fig. 1, except for Yeonsan-dong monitoring station.

되어 있다. 측정소의 시료 채취구는 초등학교 건물 옥상(14 m)에 위치하고 있고, 서쪽 지역으로 26 m 높이의 건물이 10 m 정도 떨어져 있다. 주변 도로는 차량통행량이 비교적 적은 지역이다. 연산동 측정소 주변 건물의 모습은 Fig. 2와 같으며, 회색의 8면체는 Fig. 1과 같이 수목을 의미한다.

2.2.2. 대상지역 대기오염도

본 연구 대상지역인 좌동과 연산동 측정소의 2008년 월평균 대기오염도는 Fig. 3과 같다. 회색의 면적은 부산광역시의 월평균 대기오염물질 농도 수준을 나타낸 것이다. 두 지점 모두 부산시 평균과 비슷한 월변화 패턴을 보이고 있으나 좌동 측정소의 경우 오존, NO₂, CO가 부산시 월평균보다 다소 높은 수준을 보이고 있으며, 연산동 측정소에서도 NO₂, CO 항목이 부산시 월평균보다 높은 것을 알 수 있다. 좌동과 연산동 측정소의 경우 주거지역에 위치한 곳으로 NO₂와 CO 농도를 증가시킬만한 특별한 배출원이 없는 지역으로 주변 도로에 의한 교통량의 영향을 받고 있음을 예상할 수 있다.

2.3. 모델링 영역

좌동 측정소 주변에서의 대기 유동 현상을 살펴보기 위하여 다음과 같이 격자망을 구성하였다. x방향으로는 44격자(격자 간격 4 m), y방향으로 56격자(격자 간격 3.5 m)로 구성하여, x방향으로 전체 176 m, y방향으로 전체 196 m의 영역을 모델링 대상 영역으로 설정하였다. 또한, 연산동 측정소는 x방향으로 50격자(격자 간격 2 m), y방향으로 57격자(격자 간격 2 m)로 구성하여, x방향으로 전체 100 m, y방향으로 전체 114 m의 범위를 모델링 대상영역으로 설정하였다.

연직방향(z방향)으로는 두 지역 모두 동일하게

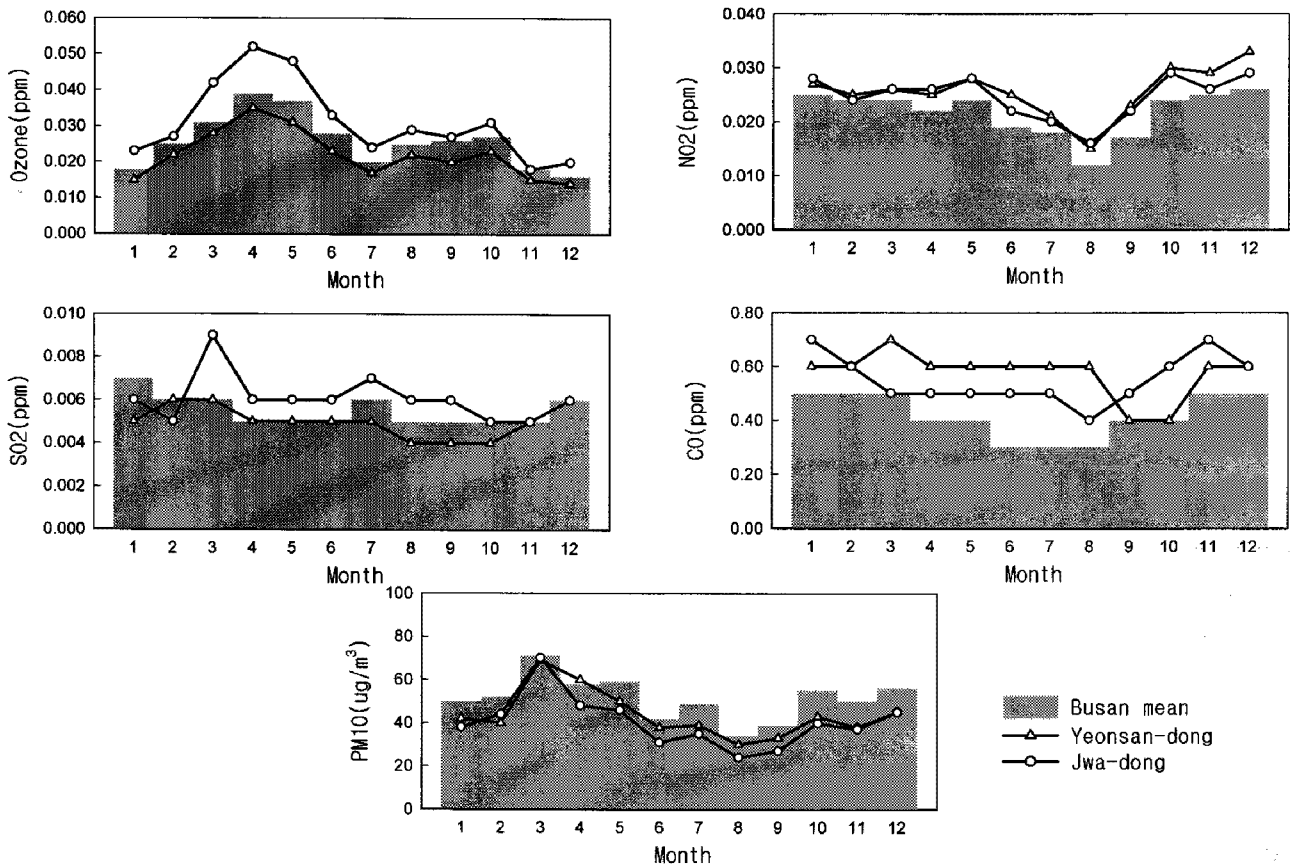


Fig. 3. Monthly trend of air pollution in the this study area at 2008.

25개 층으로 설정하였다. 첫 격자 간격은 2 m 설정하고, telescoping 옵션을 선택하여 상층으로 갈수록 5% 씩 증가하도록 하여 고도 95 m까지를 모델링 영역으로 하였다.

2.4. 모델 결과의 타당성 검토

본 연구에서 적용된 모델링 영역을 중심으로 모델 수행 결과의 타당성을 검토하기 위하여 모델링 결과와 실측치를 비교하였다. 모델 입력 조건으로 기상청 자동기상관측장비(AWS)의 풍향 풍속값을 적용하고, 같은 시간에 측정된 대기오염 측정소의 풍향, 풍속 관측치를 Envi-met 모델 계산 결과와 비교하였다. 좌동 측정소와 연산동 측정소 중 기상청 AWS가 인접해 있는 좌동 측정소를 대상으로 하였으며, 좌동 측정소와 해운대 AWS의 위치는 Fig. 4에 나타내었으며, 그림 중 별표는 좌동 측정소를 의미한다. 해운대 AWS는 좌동 측정소에서 북서쪽으로 약 840 m 떨어져있으며, 인접하여 큰 건물이 없고, 초등학교 옥상에 위치하여 모델의 입력 조건에 해



Fig. 4. The map of AWS(Automatic Weather Station) and monitoring sites in the this study area.*

당되는 모델링 영역내의 주 풍향, 풍속 조건으로 보기에 무리가 없을 것으로 판단된다. 해운대 AWS의

2008년 1월1일에서 11월 30일간의 시간별 풍향 풍속 자료를 바탕으로 아래와 같이 사례 일을 선정하였다. 먼저 강수가 없었던 날 중 가장 강한 풍속이 관측되었던 2008년 11월 5일(1400 LST)과 강수가 없는 날 중에서 해운대지역의 주풍향(Fig. 5)과 같은 풍계를 보이는 2008년 6월 26일(1800 LST)을 모델 결과의 타당성을 검토하는 대상시기로 결정하였다. 즉, 2008년 11월 5일(1400 LST)과 2008년 6월 26일(1800 LST)의 해운대 AWS의 풍계조건(풍향, 풍속)을 Envi-met 모델의 초기 조건으로 입력한 후, 수치모의 하여 좌동 측정소 지점에서의 모델링 결과와 실제 관측된 풍계를 비교하여 그 타당성을 검토하였다. 그 비교 결과는 Table 1에 나타내었다. 표에 제시된 바와 같이, 풍속이 강했던 2008년 11월 5일(1400 LST)의 경우에는 풍속이 약간 약하게 모의되었으나, 측정소 지점에서 저풍속의 경향적 특성이 나타났었다는 점을 고려해볼 때, 유의한 결과로 사료되며, 풍향 또한 동풍의 경향을 잘 나타내고 있다. 이와 더불어 해운대 지역의 주풍향을 보였던 2008년 6월 26일(1800 LST)의 경우에도 측정소 지점에서 수치모의된 풍향, 풍속이 이 지점에서 관측된 풍향, 풍속과 상당히 좋은 일치도를 나타내었다.

이상의 논의에서 살펴본 바와 같이, 상세 건물군으로 둘러싸여 있는 부산 도심지내에 위치하고 있는 대기오염측정망 주변의 복잡, 다양한 풍계를 상세하고 정확하게 진단, 파악하는데 있어 미기상 수

Table 1. Comparison of the observed(OBS) with calculated (CAL) wind speed (WS) and wind direction(WD) at Jwa-dong monitoring site

		5 November, 2008	26 June, 2008
WS(m/s)	OBS	3.3	2.8
	CAL	2.9	2.8
WD(degree)	OBS	95	78
	CAL	80	64

치모형인 Envi-met 모형의 활용이 충분히 타당함을 확인할 수 있었다.

2.5. 수치 실험 설계

일반적으로 바람이 건물에 직각인 방향으로 불어오는 풍향각의 경우에 건물 주변에서의 바람 변위가 가장 크게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 시료 채취구 주변에 위치한 건물을 향해 직각방향으로 바람이 불어오는 풍계 조건을 대상으로 연구를 수행하였다. 이들 풍계조건으로는, 좌동 측정소의 경우 유입되는 바람의 풍향이 60°(WD60 CASE), 330°(WD330 CASE)인 경우이며, 연산동 측정소의 경우에는 32°(WD32 CASE), 302°(WD302 CASE)의 풍향각이 해당된다. 이와 더불어 유입풍속의 강도변화에 따른 건물군 주변의 바람장 변위특성을 살펴보기 위하여 고도 10 m에서의 유입풍속이 1 m/s인 경우와 8 m/s인 경우를 대상으로 수치모의를 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 좌동 측정소 바람장 분석 결과

3.1.1. WD60 CASE

Fig. 6은 8 m/s 풍속의 바람이 60° 방향으로 유입되는 경우, 고도 2 m와 시료 채취구 높이인 19 m에서의 x-y단면 바람장을 나타낸 것이다. 건물 주변으로 복잡한 공기 흐름의 변화가 나타나고 있으며, 이들 지역에 6~7개의 와류(vortex)가 나타남을 알 수 있다. Fig. 7은 동일한 조건에서 고도 2 m에서의 등풍속도를 나타낸 그림으로 앞서 Fig. 6의 바람장 그림에서 와류가 나타났던 지역은 풍속이 2 m/s 이하로 약하게 나타나서 상대적으로 다른 지역보다 낮은 풍속분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한

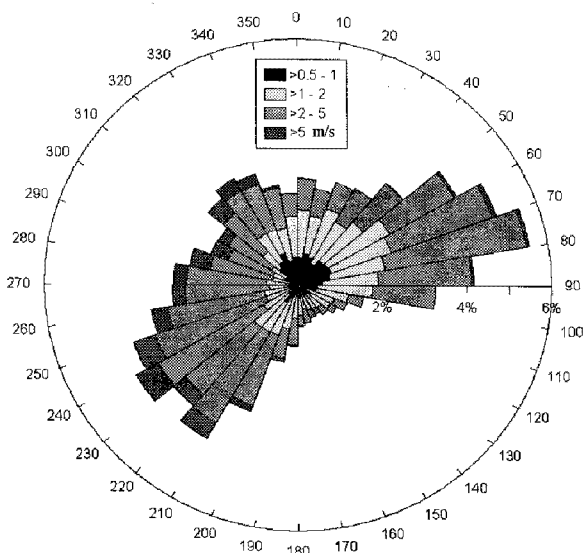


Fig. 5. Wind rose at Jwa-dong monitoring site in 2008.

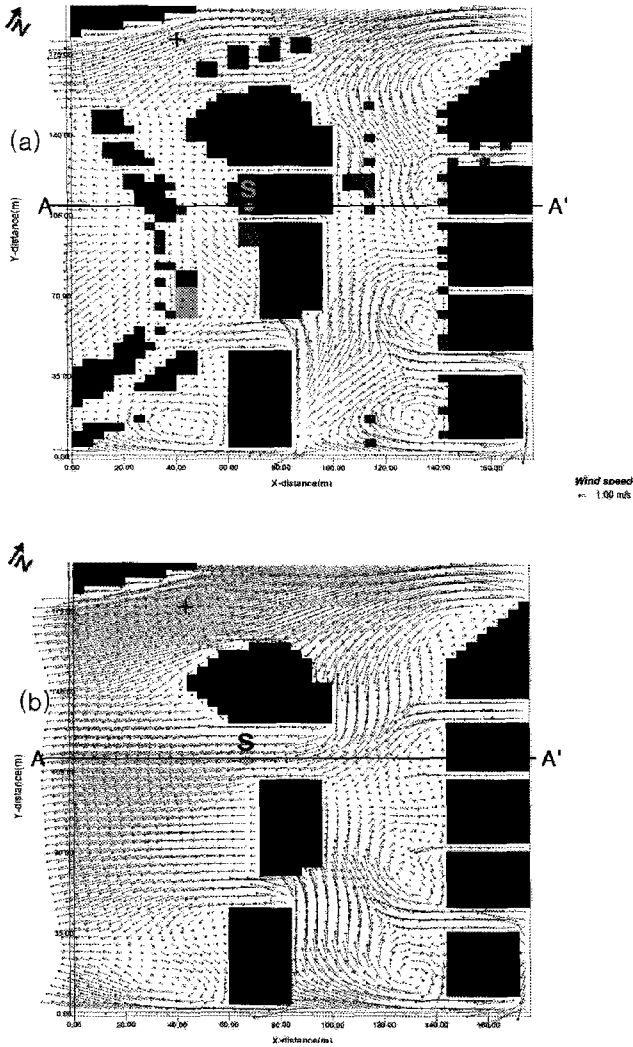


Fig. 6. Distribution of wind vector around Jwa-dong monitoring site at (a) $z=2$ m and (b) $z=19$ m in case of the WD60 CASE and the velocity of inflow wind is 8 m/s.

풍속의 급격한 감소는 해당 지역 주변에 오염물질의 정체 및 재순환 현상(recirculation)이 일어날 가능성이 상당히 높아질 수 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다. 이와 더불어 고도 19 m 에서의 바람장 분포를 살펴보면, 측정소 서쪽 지역에 위치한 낮은 건물은 19 m 고도에서는 나타나지 않아 이 지역에서의 풍향, 풍속이 고도 2 m 에서의 풍향, 풍속과 많은 차이를 보이고 있다. '+'로 표시된 지역에서도 수목으로 인해 고도 2 m에서 풍속이 감소했음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 WD60 CASE인 경우, A-A' 연직 단면에서의 바람장 변화를 나타낸 것이다. 측정소와 동쪽

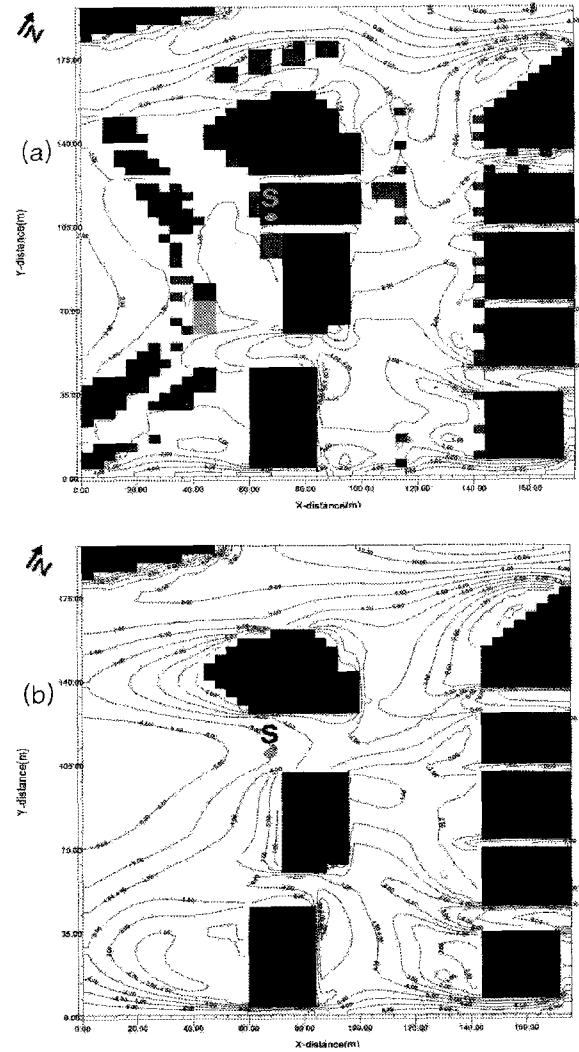


Fig. 7. Same as Fig 6, except for distribution of wind speed.

건물에서 바람이 불어오는 방향의 전면인 건물 옥상 모서리에 상승류가 발생하고 건물 후면에는 약한 풍속의 하강류가 나타나는 것을 알 수 있다. 일반적으로 건물 후면에서 발생하는 하강류는 와류 형태를 갖추면서 분리된 재순환현상 및 건물가까이에 공동(cavity)을 형성하기도 한다¹⁾. 즉, Fig. 8(b)에 나타난 바와 같이 일정조건의 풍속이 부는 경우에 재순환현상 및 와류가 뚜렷하게 나타날 수 있게 된다. 또한 Fig. 8(b)를 보면, 시료 채취구 건물과 오른쪽 건물 사이에서 상승류가 나타나고 있는데, 그림에서 보이는 상승류는 이 지역의 북쪽과 남쪽에서 유입되는 바람의 수렴에 의한 결과를 나타내고 있는 것이며(Fig. 6 참조), 이러한 상승류는 측정소 건물

전면 옥상의 상승류와 맞물리면서 강한 풍속으로 비교적 멀리까지 이동하며, 이로 인하여 측정소 건물과 오른쪽 건물 사이의 6차선 도로 지역에서의 공기가 시료 채취구로 유입될 가능성이 있는 것으로 분석되었다. Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)를 비교해 보면, 유입 풍속이 8 m/s로 증가할 때 도로 지역에서의 상승류 규모와 강도가 뚜렷이 증가하고 있으며, 고도 60 m까지 상승류가 발달하고 있음을 알 수 있다. 즉 풍속이 강할 경우 도로로부터 측정소로 기류의 수송을 더욱 용이하게 만들며, 측정농도에 더 많은 영향을 미칠 수 있음을 예상하게 한다. Fig. 8(a)와 (b) 모두 측정소 건물의 왼쪽 건물 옥상 모서리에서는 상승류가 나타나지 않고 있는데, 이는 서쪽 건물 높이가 측정소 건물 높이와 비슷하고 두 건물 사이 간격도 넓지 않아서 상승류가 제대로 발달하지 못하고 흐름 분리도 나타나지 않기 때문인 것으로 분석된다. Fig. 8(b)에서 측정소 건물과 서쪽 건물 사이의 건물 협곡에서는 와류가 발생되었고 Fig. 8(a)에서는 이러한 와류가 발생되지 않은 것으로 보아 와류는 일정 유입 풍속 이상에서 형성된다는 선행 연구³⁾와 일치되는 결과를 나타내고 있다.

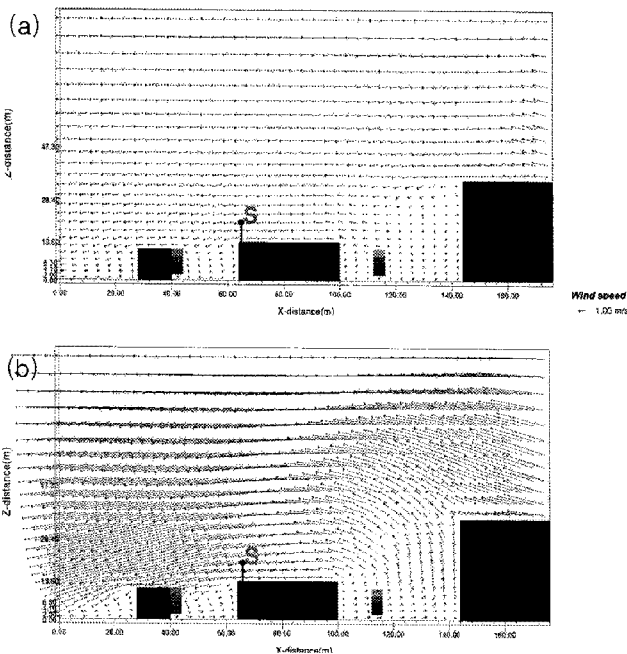


Fig. 8. Distribution of wind vector at the A-A' cross section on the inflow wind speed of (a) 1 m/s and (b) 8 m/s in the WD60 CASE.

3.1.2. WD330 CASE

Fig. 9와 Fig. 10은 좌동 측정소에서 유입 풍향과 풍속이 330°, 8 m/s 인 경우에 고도 2 m와 시료 채취구 높이인 19 m에서 분석된 바람장과 등풍속도이다. 그림 전반을 살펴보면, 풍상측 건물의 영향으로 인해 측정소 지점에서의 풍속이 완연하게 약화된 형태를 보이고 있다. 고도 2 m에서의 결과(Fig. 9(a), Fig. 10(a))를 살펴보면, 측정소 서쪽 지역으로 고도 10 m 미만의 건물들이 위치하고 있어 이 지역에서 풍속의 감소와 흐름의 변위가 확인되었다. 또한 동쪽 건물들 사이에서도 풍속의 감소가 고도에 관계없이 나타났으며, 이는 동쪽 건물 사이의 간격이 좁아 바람이 이곳으로 유입되지 않아 나타난 현상으

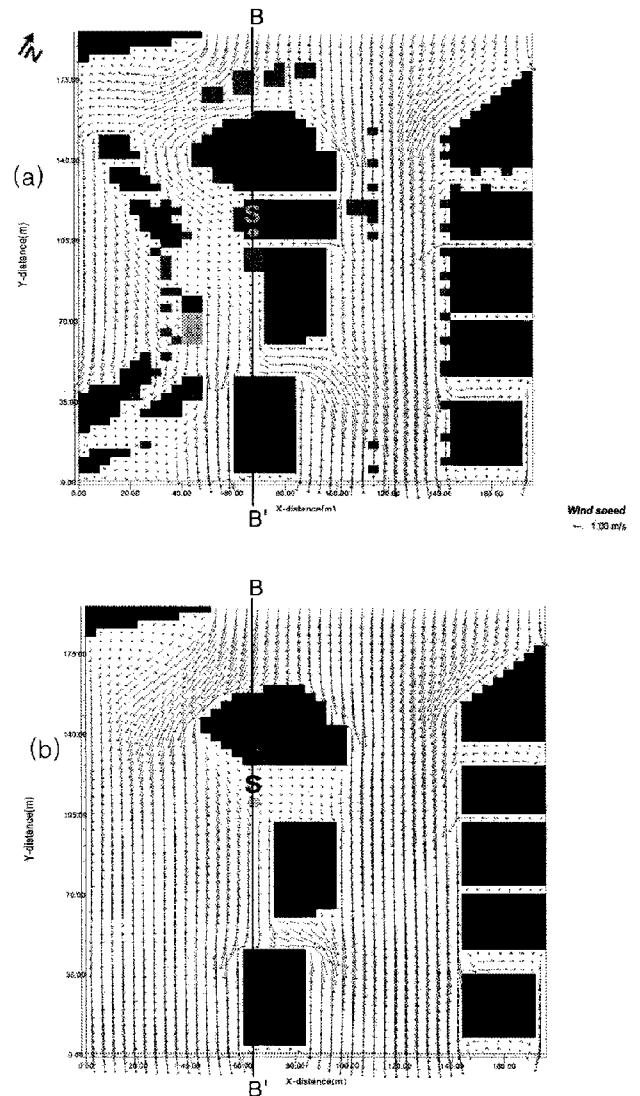


Fig. 9. Same as Fig. 6, except for the WD330 CASE.

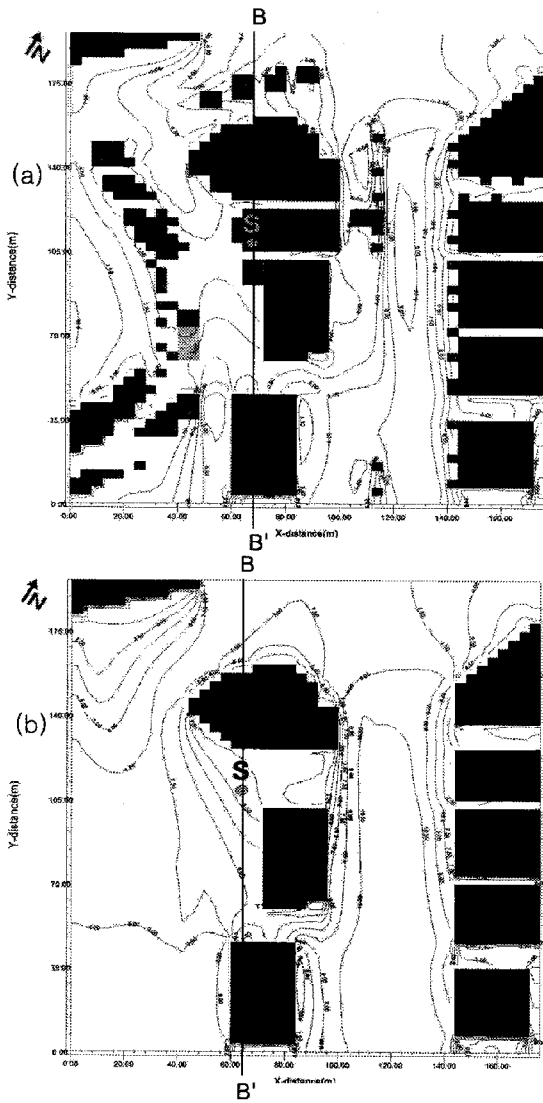


Fig. 10. Same as Fig. 9, except for distribution of wind speed.

로 판단된다. 이와 더불어 수목이 위치한 지역에서도 풍속의 감소가 나타났는데, 이는 WD60 CASE에서도 나타난 결과로써, 일반적으로 해안가 지역의 바닷가 모래 및 풍해를 방지하는 목적으로 수목을 식재하여 방풍림을 조성하여 강풍을 막는 것처럼, 본 연구에서도 수목에 의한 풍속 약화를 본 연구에서 사용한 수치모형이 잘 나타나고 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 WD330 CASE 인 경우 B-B' 연직 단면에서의 바람장과 등풍속도를 나타낸 그림이다. 측정소 건물을 제외한 두 건물의 옥상 모서리 부근에서 상승류가 뚜렷이 나타나고 있다. 측정소 건물 옥상 모서리에서 상승류가 나타나지 않는 것

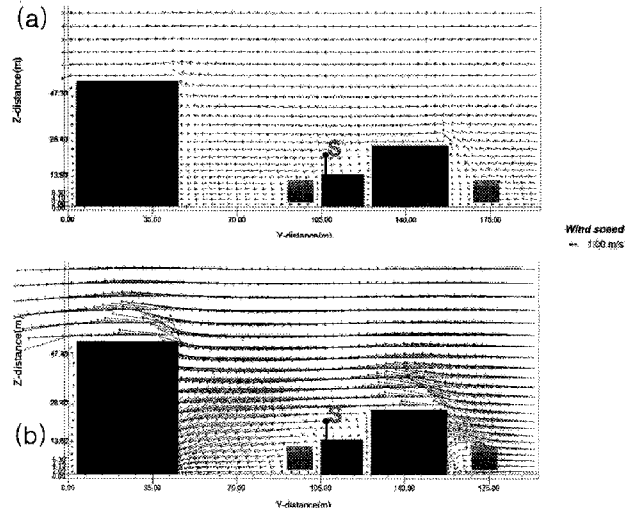


Fig. 11. Distribution of wind vector at the B-B' cross section on the inflow wind speed of (a)1 m/s and (b)8 m/s in the WD330 CASE.

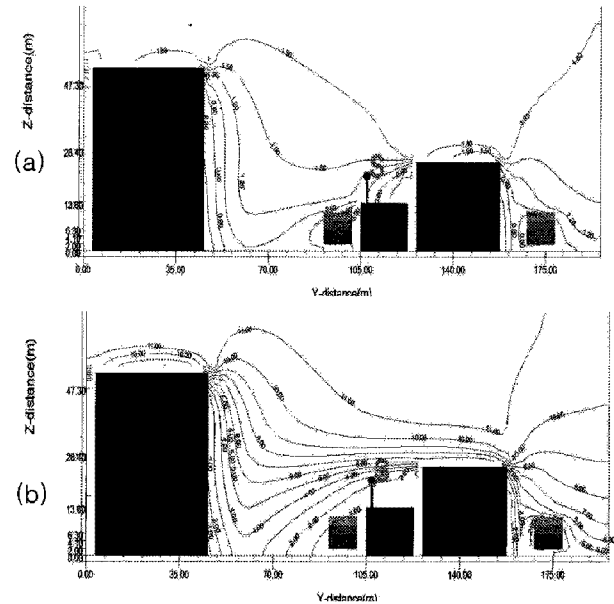


Fig. 12. Same as Fig. 11, except for distribution of wind speed.

은 측정소 오른쪽(Fig. 9에서는 측정소 북쪽)으로 측정소 건물 높이보다 높은 건물이 가까이 위치한 결과로 보인다. 건물과 측정소의 유입 풍속이 1 m/s인 경우와 8 m/s인 경우의 결과를 비교해 보면, WD60 CASE에서와 같이 풍속이 증가할수록 상승류의 높이와 폭이 커지고 풍속도 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 11(b)를 보면, 시료 채취구 건물과 오른쪽 건물 사이에서 상승류가 나타나고 있으며, 이는 이 지역

에서 북쪽에서 유입되는 바람의 수렴에 의한 결과를 나타낸 것이다(Fig. 9(b) 참조).

한편, Fig. 9에서 북쪽 지역(Fig. 11에서는 오른쪽 지역)은 6차선 도로가 위치한 영역이다. Fig. 9(b)를 살펴보면 측정소의 시료 채취구로 도로의 공기가 유입되고 있으며, Fig. 11에서 측정소 건물과 오른쪽 건물 사이에서 상승류 역시 북쪽 지역인 도로의 공기 유입으로 인한 것으로 나타나고 있다. 풍속이 약한 경우인 Fig. 11(a)에서는 상승류의 규모와 강도가 작으므로, 풍속이 약할 경우에는 도로의 공기 유입 가능성이 상대적으로 낮을 것으로 판단된다.

3.2. 연산동 측정소 바람장 분석 결과 및 고찰

3.2.1. WD32 CASE

연산동 측정소는 3층 건물의 초등학교 옥상에 위치하고 있으며, 주변 일대는 1~2 m 간격을 두고 주택과 빌라들이 밀집되어 있다. Fig. 13은 WD32 CASE에서 유입풍속이 8 m/s인 경우의 바람장을 예측한 것으로 Fig. 13(a)는 고도 2 m, Fig. 13(b)는 시료 채취구의 높이인 고도 14 m에서의 결과를 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 13(a)를 살펴보면, 모델 영역 중 북서쪽부분에 약한 와류형태의 바람장을 볼 수 있고, 영역의 중앙 부분으로 흐름이 수렴되어 비교적 강한 풍속으로 측정소 주변을 빠져 나가고 있다. 그림 상단에 나타난 와류는 2개 지역에서 나타나는데, 저층(고도 2 m)의 경우에는 기류의 이동이 원활하게 이루어지지 않아 공기의 환기효과를 기대하기 어렵고 이로 인해 대기오염물질의 확산이 원활하지 않을 것으로 예측된다. Fig. 13(b)는 초등학교 건물 고도보다 높은 위치에서의 바람장을 나타낸 것으로 고도 2 m에서의 결과와 크게 다르지는 않지만, 그림 상단에 나타났던 분명한 와류 현상이 약하게 나타나고 있다. 이는 저층(고도 2 m)에 비해 이 지역으로 기류의 유입은 없지만, 역으로 이 영역의 공기가 밖으로 배출되지도 않는 공동이 형성될 가능성이 높고, 따라서 이 지역은 고도에 관계없이 오염물질의 축적이 나타날 가능성이 높을 것으로 판단된다.

Fig. 14는 WD32 CASE의 연직 바람장 변화를 나타낸 그림이다. 결과적으로, WD32 CASE의 경우에는 바람의 강도 변화에도 불구하고(1m/s, 8m/s) 측정소 주변의 건물군에 의해 채취구 주변의 바람장이 크게 왜곡되거나 변위가 큰 결과는 나타나지 않는

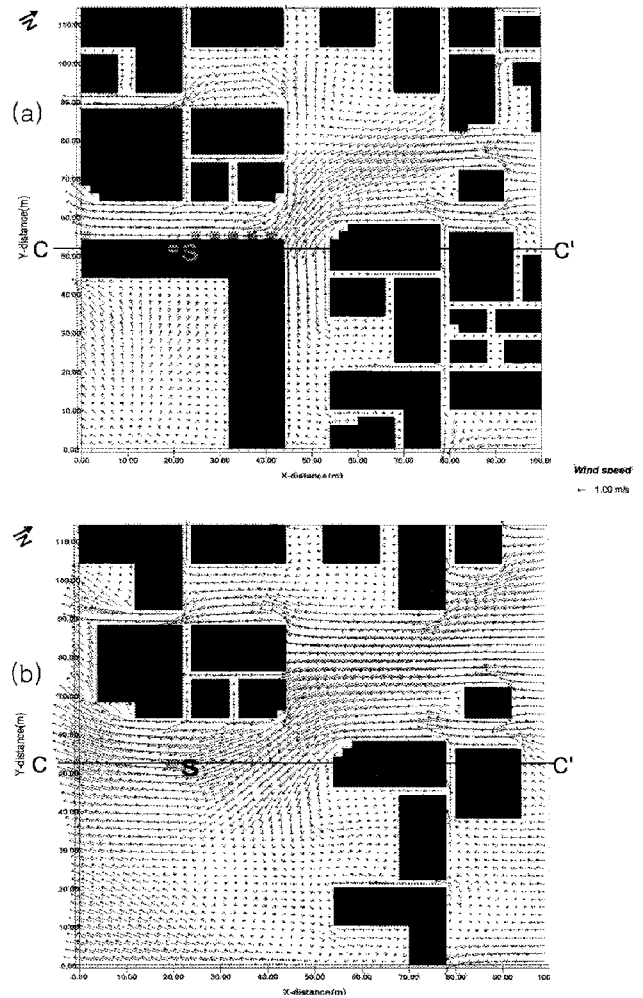


Fig. 13. Distribution of wind vector around Yeonsan-dong monitoring site at (a) $z=2$ m and (b) $z=14$ m in case WD32 CASE and the velocity of inflow wind is 8 m/s.

것으로 판단된다. 즉, 채취구로 불어오는 바람을 보면 상하층에 걸쳐 균일한 형태의 결과를 보이고 있고 풍속 또한 주변에 비해 비정상적으로 강하거나 약한 결과는 보이고 있지는 않다. 그림에서 나타난 채취구가 위치한 건물과 이 건물의 오른쪽에 위치한 건물 사이 영역에서의 상승류는, Fig. 13과 함께 살펴보면, 초등학교 건물의 모서리 지역으로 수렴되는 강한 흐름이 건물에 부딪혀 나타난 결과로 판단된다.

3.2.2. WD302 CASE

연산동 측정소에서는 302° 방향으로 건물들이 조밀하게 위치하고 있다. Fig. 15는 WD 302 CASE를 대상으로 고도 2 m와 고도 14 m에서 예측된 바람장

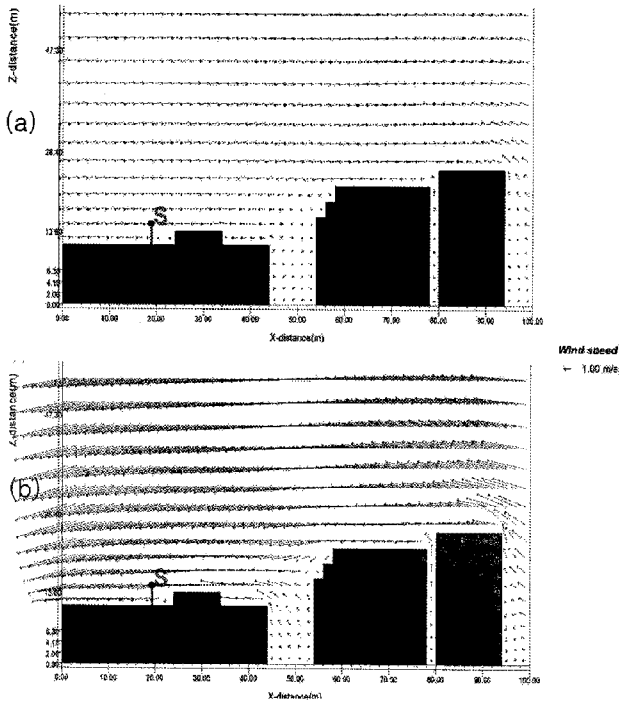


Fig. 14. Distribution of wind vector at the C-C' cross section on the inflow wind speed of (a) 1 m/s and (b) 8 m/s in the WD32 CASE.

을 나타낸 것이다. Fig. 16 (a)를 살펴보면, 대부분의 모의 영역에서 복잡 다양한 형태로 바람의 변위가 나타나고 있으며, 부분 영역별로 와류 현상이 나타난다. 특히 'B'로 표시된 지역에 나타난 와류는 고도에 관계없이 지속적으로 나타나서 WD32 CASE에서 분석된 바와 같이 구조화되어 있으며, 이를 통해 연산동 측정소 주변의 B 지역은 대기오염물질의 축적이 나타날 가능성이 높을 것으로 예상된다. C 지역 일대는 주변에 위치한 다양한 고도의 건물군의 영향으로 상하층(고도 2 m, 고도 14 m)에서의 풍향 변위가 다른 영역에 비해 크게 나타나고 있다. 즉, Fig. 15(a)를 보면, 풍상측 건물의 영향으로 이 지역으로 유입되는 바람의 규모가 작고, 풍하측의 건물은 상승류를 만들고 또한 동쪽 지역에 기류가 유입되면서 동풍으로 변위되고 있다. 반면, Fig. 15(b)에서 C 지역은 북동쪽에 건물이 없어 북풍으로 풍향이 변위된 모습이다. 시료 채취구 부근에서는 풍상측에 26 m 건물이 위치하고 있어서 풍속 감소가 나타나고 있다.

Fig. 16은 WD302 CASE의 연직 바람장 변화를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면, 풍속에 관계없이 측정소가 위치한 건물의 지표 부근 풍하측에 급격한

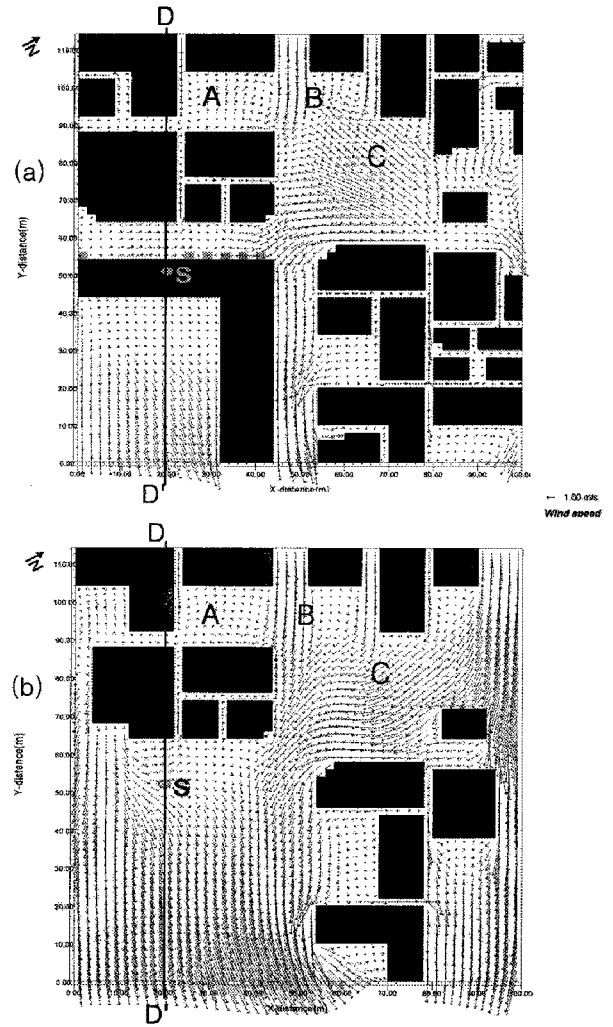


Fig. 15. Same as Fig. 13, except for WD302 CASE.

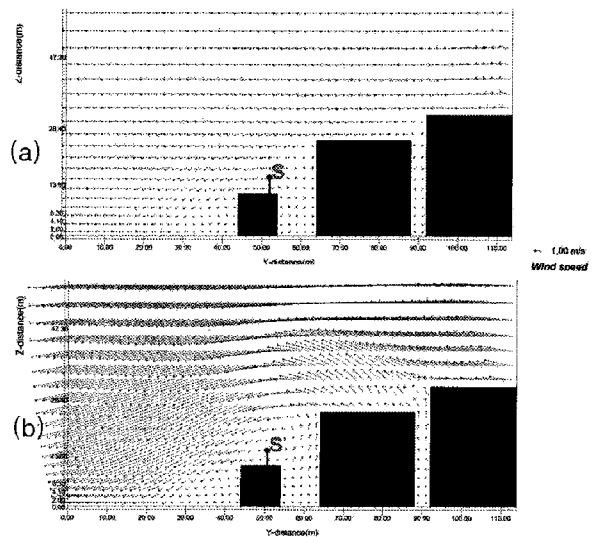


Fig. 16. Distribution of wind vector at the D-D' section on the inflow wind speed of (a) 1 m/s and (b) 8 m/s in the WD302 CASE.

풍속의 감소를 알 수 있다. 그림에서 볼 때 측정소 건물과 오른쪽 건물 사이에서 상승류가 나타나고 있으며, 이는 두 건물 사이의 도로 쪽으로 불어오는 남서풍과 북동풍의 수렴에 의해 나타나는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 부산광역시 소재 대기오염측정소 중 건물밀집도가 높은 좌동 측정소와 연산동 측정소를 중심으로 미기상 수치모델인 Envi-met을 이용하여 바람장을 수치모의 하였다. 일반적으로 건물에 직각인 방향으로 바람이 유입되는 경우에 건물 주변의 바람이 뚜렷한 변화를 나타내므로 좌동 측정소는 60°, 330°를 유입 풍향으로 설정하였고 연산동 측정소는 32°, 302°를 설정하여 연구를 진행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

두 측정소에서 공통적으로 분석된 특성으로는, 풍상측에 위치한 건물로 인하여 측정소 주변 풍하측 영역에서의 풍속은 약화되었다. 좌동 측정소는 유입 풍향이 330°일 때, 연산동 측정소는 유입 풍향이 302°일 때 측정소 위치에서 풍속의 급격한 감소를 관찰할 수 있었다. 또한, 건물과 직각인 방향으로 바람이 유입될 때 풍하측에 충분한 공간이 확보되도록 건물이 배치되었을 경우에는, 풍하측에서 와류와 기류 재순환 현상을 발견할 수 있었다. 이러한 지역에서는 맴돌이 형태의 벡터와 낮은 풍속으로 인하여 기류의 환기가 충분하지 않아서 오염물질의 축적이 일어나면서 대기오염 측정소 주변의 오염물질농도를 상승시킬 가능성이 높게 된다. 특히, 연산동 측정소의 경우, 유입 풍향 32°, 302° 모두의 경우에 일부 지역에서는 고도 2 m 뿐 아니라 16 m 에서도 와류가 나타나 이 지역에서의 오염 물질 축적 가능성은 매우 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서 살펴 본 두 측정소의 시료 채취구는 이러한 기류 재순환 지역에 위치하지는 않는 것으로 판단되었다.

건물의 옥상 모서리 부근의 경우 본 연구에서 살펴본 모든 CASE에서 상승류가 나타났고 건물의 후면에는 풍속이 약한 와류 형태 또는 상승류가 발생하였다. 두 개의 측정소 모두 옥상에 위치하여 유입풍의 방향이 건물과 수직한 경우에는 건물 후면에서 발생하는 상승류 또는 건물 전면 옥상에서 발생

하는 상승류의 영향 아래에 있었다. 좌동 측정소의 경우에는 측정소 주변으로 6차선 도로가 위치하고 있어 유입 풍향이 60°인 경우에는 도로 지역에서의 공기가 상승류의 형태로, 유입 풍향이 330°인 경우에는 유입풍을 따라 도로 지역의 공기가 시료 채취구로 유입되는 것으로 나타났으며, 이러한 도로의 공기 유입은 측정소의 대기오염물질 농도 상승에 영향을 미칠 것으로 분석되었다. 연산동 측정소의 경우에는 유입 풍향 32°와 302°일 때 인근 도로 지역에서의 상승류의 영향을 받고 있었으나, 상승류의 시작지점이 주거지역의 골목길로 대기오염물질이 크게 발생하지 않는 지역의 공기가 유입되는 것으로 분석되었다. 또한, 유입 풍속이 클수록 상승류의 형태는 더욱 뚜렷하게 형성되었으며, 그 크기나 강도 역시 더욱 크게 나타났다. 따라서 풍속이 낮을 때는 시료 채취구로 도로 지역의 오염물질이 유입될 가능성이 낮으나, 풍속이 높을 때는 상대적으로 그 가능성이 높다고 할 수 있다.

본 연구에서 미기상모델인 Envi-met을 이용하여 건물이 밀집된 지역에서의 바람장을 수치모의하고 그 특성을 분석해 보았다. 이와 유사하게 여러 대기오염 측정소에 대하여 수치모의를 수행할 수 있고, 이를 통해 측정소 인근 미기상 바람장을 파악함으로써 건물군이 측정소 주변 흐름과 측정소 데이터에 미치는 영향을 파악하는데 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006~2205)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 임은하, 한종일, 엄원근, 1996, 유압류의 시어와 외관비가 빌딩 주위 바람장에 미치는 영향에 관한 3차원 수치실험, 한국기상학회지, 32(2), 303-312.
- 2) 환경부, 2005, 대기오염측정망 기본계획(2006~2010).
- 3) 김재진, 박종진, 2005, CFD 모형을 이용한 도시 도로 협곡에서의 흐름 체계 분류, 한국대기환경학회지, 21(5), 525-535.
- 4) 김재진, 백종진, 2005, CFD 모형을 이용한 도시 지역 흐름 및 스칼라 분산 연구, 한국기상학회지,

- 41(5), 733-749.
- 5) 박승부, 백종진, 2007, CFD 모형을 이용한 3차원 비대칭 도로 협곡에서의 흐름 및 오염물질 분산 연구, 한국대기환경학회지, 23(2), 214-224.
 - 6) 정우식, 2007, 아파트단지 환기경로 파악을 위한 주풍향별 바람장 분석, 한국환경과학회지, 16(4), 467-477.
 - 7) 장은숙, 2005, 아파트 단지내의 열섬효과가 대기오염물질 확산에 미치는 영향 해석을 위한 열유동장 수치모의, 한국환경과학회지, 14(6), 577-582.
 - 8) 박명희, 김해동, 2006, 고층건물에 의한 기류변형과 열환경 변화에 관한 수치모의, 한국지구과학회, 추계학술발표회, 208-214.
 - 9) 유경석, 전영남, 노기환, 2003, 도심지 대기오염물 분산에 관한 수치해석, 환경관리학회지, 9(3), 357-365.
 - 10) 전영남, 송형운, 2004, 도심지 빌딩주변의 자동차 배기가스 분산에 대한 수치모델링, 대한환경공학회지, 26(5), 619-622.
 - 11) www.envi-met.com.
 - 12) 정우식, 박종길, 이화운, 2006, 개발에 따른 지형변화가 국지 바람장에 미치는 영향 분석 -Envi-met 모형을 이용한 수치모의-, 한국대기환경학회지, 22(6), 888-903.
 - 13) 정우식, 박종길, 이화운, 김은별, 2006, 강풍조건에서 국지규모 지형 변화에 따른 풍하측 바람장 변화, 한국기상학회지, 16(3), 169-185.
 - 14) Bruse M. and H. Fleer, 1998, Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model, Atmos. Environ., 13, 373-384.
 - 15) Ali-Toudert F. and H. Mayer, Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate, Building and environment, 41, 94-108.