

경북대 캠퍼스 내 대기환경 및 미규모 모델(MUKLIMO)을 이용한 바람장 모의 연구

민 경 덕·윤 지 원·안 광 득*
경북대학교 천문대기과학과, *기상연구소 예보연구실
(2005년 1월 19일 접수; 2005년 3월 18일 채택)

A Study on the Atmospheric Environment and Simulations of Wind Field using MUKLIMO at the KNU Campus

Kyung-Duck Min, Ji-Won Yoon and Kwang-Deuk Ahn*

Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

*Forecast Research Lab., METRI/KMA, Seoul 156-720, Korea

(Manuscript received 19 January, 2005; accepted 18 March, 2005)

Elements of atmospheric environment, temperature, humidity and wind, at the campus of KNU(Kyungpook National University) were investigated by the observations. The observed data were compared with those of DWS (Daegu Weather Station). The simulations of wind field and dispersions of polluted gases were conducted by MUKLIMO under the various conditions. The results show that the atmospheric environment of KNU are suitable but the campus does not play role as a heat sink in the city. The simulations of wind field show the air flows and wind channels in the campus clearly. The exhausted gases by motor vehicles on the northside street of campus affect very much to the campus with NW(300°) wind. The running cars in the campus are also pollute much on the campus with the various wind directions. The characteristics of environmental conditions, various meteorological fields, wind channels, and dispersion of exhausted gases at the campus of KNU were understood quantitatively in the study.

Key Words : Campus environment, Wind fields, MUKLIMO, Pollution, Dispersion

1. 서 론

도시 내에 위치한 대학 캠퍼스의 대기환경은 대학구내에서 활동하는 학생 및 교직원의 교육과 연구활동은 물론 주변 도시의 환경에도 많은 영향을 미친다.

도시의 기후는 인구의 집중, 에너지 사용의 증가, 도로의 증설과 포장, 건물의 신축, 공원의 조성, 하천의 정비 등 도시의 개발과 도시화에 의해 영향을 받으며, 이로 인하여 열섬 현상과 기온 상승 등의 특이 기상을 보임으로써 도시 외곽의 교외와는 상이한 도시기후의 특징이 나타난다. 도시내의 고

층 건물의 건설과 도로의 확장 그리고 공원의 조성 등 도시개발은 도시 내의 기온과 습도 등의 분포는 물론 바람의 이동과 바람장의 변화를 가져오고 이러한 변화는 도시민의 생활에 커다란 영향을 미치고 도시 내에 위치한 대학 캠퍼스에도 큰 영향을 미친다.

도시 기후의 연구와 도시 내에서의 바람장의 변화와 이의 연구는 독일 슈튜트가르트(Stuttgart) 도시를 비롯하여 많은 도시에서 이의 연구가 수행되고 있다^{1~7)}.

도시 바람장의 연구는 도시의 복잡한 구조로 인하여 모델 연구가 주로 행해지고 있다. 도시 바람장 모의에서 도시 캐노피층에 대한 연구는 Pankrath⁸⁾가 유선함수 방법과 중립대기의 난류교환계수를 이용하여 2차원의 바람장의 확산을 계산한 바 있으며 Kotake and Sano⁹⁾는 난류교환계수를 이용하여 3차

Corresponding Author : Kyung-Duck Min, Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea
Phone: +82-53-950-6361
E-mail: minkd@knu.ac.kr

원 바람장을 계산한 바 있다. Siever and Zdunkowski¹⁰⁾는 도시 캐노피층을 미세하게 분해하고 혼합길이를 이용하여 난류교환계수를 계산하는 방법을 이용하여 바람장을 계산하였다. 그 후 Sievers²⁾는 앞의 방법을 3차원으로 확장하는 연구를 하였고 이 연구 결과를 가지고 독일 베를린 교외를 4 m×4 m 간격의 바람장을 모의한 바 있다.

우리나라에서 도시지역의 바람장에 대한 연구는 박영연·이태영¹¹⁾, 김병곤¹²⁾ 등이 수도권이나 한반도 지역의 지형효과를 고려한 바람장 산출에 대한 연구를 수행한 바 있다. 그리고 이승우·이동규¹³⁾도 3차원 중규모 모델을 이용하여 수도권 지역의 국지 규모 순환의 특성을 살펴본 바 있으나, 모델 분해능이 수 km에 이르렀으므로, 국지 규모 순환의 특성을 상세히 밝히는 데는 부족함이 많았다.

임영권 등¹⁴⁾은 서울지역의 지형효과와 토지이용도에 따른 3차원 바람장을 수 백 m의 해상도로 모의한 바 있으나, 수 백 m 해상도의 국지순환의 특성에서 중요한 건물 등에 의한 효과를 나타내지는 못하는 문제점이 있었다. 보다 상세한 격자를 이용한 도시바람장의 연구는 기상연구소^{15,16)}를 중심으로 이루어졌다. 부경은 등¹⁷⁾에 와서 수 십 m의 고해상도 모델을 도입하여 여의도 지역의 바람장을 수목공원 조성효과를 고려하여 실험하였으며, 이에 의한 바람장 변화와 오염 확산을 연구한 바 있다.

한편, 국내에서 수치모델을 이용한 도시바람의 연구는 Baik et al.^{18,19)}에 의해서 도시협곡에서의 바람장 모의 연구가 있으며 이를 오염물질의 전파에 응용한 연구가 있다.

그 후 기후모델 MUKLIMO를 이용하여 복잡한 구조를 갖는 경기장이나 좁은 지역에서의 기후 환경 및 바람길 등의 연구가 안광득²⁰⁾에 의해 이루어졌고, 보다 복잡한 지형과 수목효과를 고려한 연구가 민경덕 등²¹⁾ 그리고 윤지원·민경덕²²⁾ 등에 의해 행해졌으며 MUKLIMO의 다양한 활용성을 입증하고 바람장의 모의를 실시하였다.

본 연구는 경북대 캠퍼스내의 대기환경을 조사하고 경북대와 같이 건물과 수목이 많은 지역의 바람장을 모의하여 기온 및 습도의 분포와 건물에 의한 바람의 효과와 바람길 등에 대해 규명하며 또 주변도로와 캠퍼스내의 자동차에 의해 발생하는 오염물질의 경북대 캠퍼스내에서 확산을 모의 연구함으로써 경북대 구내의 대기환경 요소의 특성과 오염 전파를 규명하는데 목적이 있다. 대기 환경 요소에는 기상 이외에도 오염, 소음, 냄새, 진동 등의 각종요소가 모두 포함되지만 이들은 각각의 주제로 연구되는 분야이므로 본 연구에서는 기상과 오염의

전파만을 한정하여 연구를 하였다. 비록 경북대 캠퍼스를 대상으로 하였으나 이 연구결과는 복잡한 지형이나 구조물이 존재하는 도시 내에서의 바람길, 바람장의 연구에 활용될 수 있을 것이며 많은 대학에서의 바람장 및 바람길 연구에 도움이 되리라 생각된다.

2. 경북대 캠퍼스의 대기환경

2.1. 지형 및 건물의 배치

경북대학교 캠퍼스는 대구광역시의 도시 중심부에 가까이 위치하고 해발고도가 35 m에서 58 m에 달하는 낮으막한 언덕과 평지의 복잡한 지형구조를 지니고 있으며, 건물은 평균적으로 16 m에서 33 m의 높이로 조밀하게 구성되어 있고, 가장 높은 건물은 34.5 m와 45 m의 높이를 가지고 있다. 모델의 영역 내에서 경북대 지역의 지형구조를 Fig. 1에 제시하였으며, 오른쪽의 바는 m 단위의 해발고도를 나타낸다. 모델의 영역 내에서 경북대 지역은 북에서 남으로 갈수록 높아지는 형태를 띠고 있으며, 북쪽과 남서쪽은 35 m 해발고도로 낮은 지형구조를 가지고 있다.

경북대 캠퍼스내의 건물 배치는 Fig. 2와 같다. 경북대 지역은 남쪽과 북쪽으로 건물이 밀집되어 있어 동서로 건물의 영향을 받지 않는 지역이 자리하고 있다. 건물 신축에 의한 효과는 Fig. 2에 나타난 A 건물(백호관)에 의한 효과를 주로 실험하였다. 이 A 건물은 최근 신축된 건물이고, 그 고도는 34.5 m로 서쪽 가장자리에 위치하여 서풍이 불 때 캠퍼스내의 바람장에 영향을 끼칠 것으로 고려되는 건물이다.

2.2. 기상요소의 관측

경북대 캠퍼스내의 대기환경은 기온, 습도, 바람의 측정과 그의 분석에 의해 규명하였다. 물론 대기환경 요소에는 그밖에 다른 요소들을 포함할 수 있으나 본 연구에서는 연구 조건상 위의 기상학적 요소만으로 한정하였다.

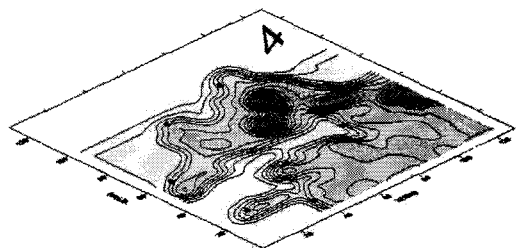


Fig. 1. Topography of Kyungpook National University's campus. The contours shown are sea-level height(m).

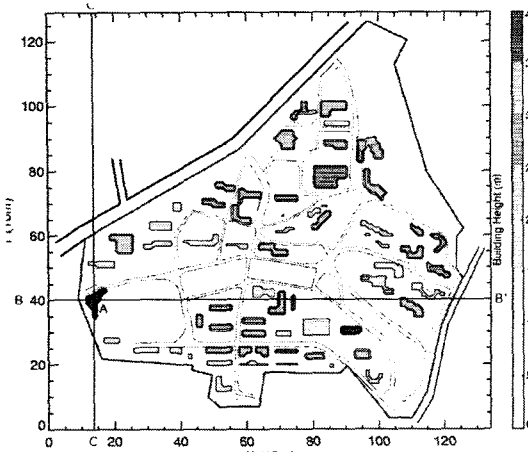


Fig. 2. Distribution of buildings at Kyungpook National University. Point 'A' remarks the location of the building for the experiments. B-B' and C-C' are used for the cross section analysis of vertical wind fields.

대기환경 요소의 기상관측은 경북대의 전 캠퍼스를 대표할 수 있는 12개 지점을 선정하여 5개 지점에서는 AWS에 의한 관측 그리고 7개 지점은 간이 백엽상을 설치하고 기온과 습도를 측정하였다. 측정을 위한 측기는 사전에 실내관측에서 오차표를 만들고 보정하였다. 다만 바람관측은 AWS로 실시하였으나 대체로 3 m 높이의 바람이므로 지형과 주위의 영향이 커서 대표바람은 천문대기과학과 앞에 설치된 10 m 바람탑에서 측정된 바람자료를 이용하였다.

관측은 09, 12, 15, 18 시의 3시간 간격 4회를 실시하였다. 관측을 위한 관측자의 동원과 겨울철 추위 등을 고려하여 봄, 여름, 가을, 겨울의 4계절에서 대표되는 4일을 선정하고 1일 4회 관측을 실시하였고 AWS 관측은 24시간 관측을 하였다. 비록 측정은 1일 4회씩 4계절에 걸쳐하였지만 본 논문에서는 12시의 관측치와 여름, 겨울의 기온과 습도 분포만을 분석하고 제시하였다.

2.3. 기온 분포와 변화

먼저 캠퍼스내의 수평기온 분포는 12개 지점의 평균값과 각 지점의 관측치를 비교한 상대기온으로 분석하였다. 경북대 캠퍼스에는 조밀한 건축물과 도로 포장이 되어 있고 일부 숲이 분포하고 있으며 중앙에는 광장이 그리고 서편에는 넓은 운동장이 있다. 따라서 기온의 분포는 매우 복잡하게 나타나고 있다.

여름철 8월중 12시의 기온 분포(Fig. 3(a))를 보면 구내 캠퍼스의 중앙부와 운동장에서 온난구역이 나타나고 언덕의 북녘 그늘 지역에 해당하는 쪽에 상대적으로 한랭구역이 나타나며 그 온도차는 2~3°C 미만임을 볼 수 있다. 그러나 학교내의 숲 속 내지 그늘에서의 기온은 양지에 비해 3~5°C 정도 차이가 나 숲이 학교 내의 온도의 냉원 역할을 함을 알 수 있다.

겨울철(1월)의 기온분포(Fig. 3(b))는 나뭇잎이 없기 때문에 본관 앞 아늑한 잔디광장 부분이 제일 높고 북풍이 몰아오는 북문 부근에서 낮게 나타나며 그 차는 약 3°C 정도이다. 대체로 양지 바른 건물 앞 부근에 따뜻한 구역이 나타난다. 봄, 가을철의 기온 분포는 대체로 여름과 겨울의 분포와 유사하지만 그 값의 차는 이보다는 적게 나타나고 있다.

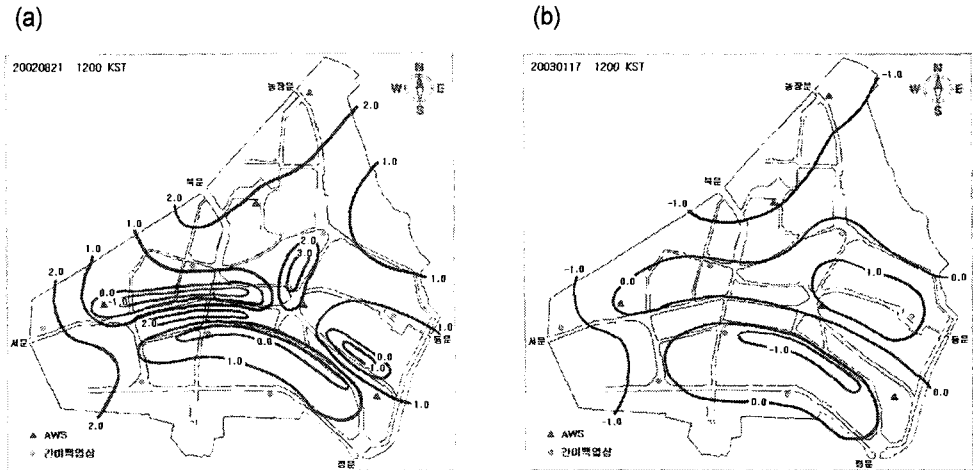


Fig. 3. Horizontal distribution of relative air temperature at 12 KST in KNU campus. Relative temperature represents the temperature difference between mean temperature of 12 points and one point temperature. (a) Aug. 21, 2002 and (b) Jan. 17, 2003.

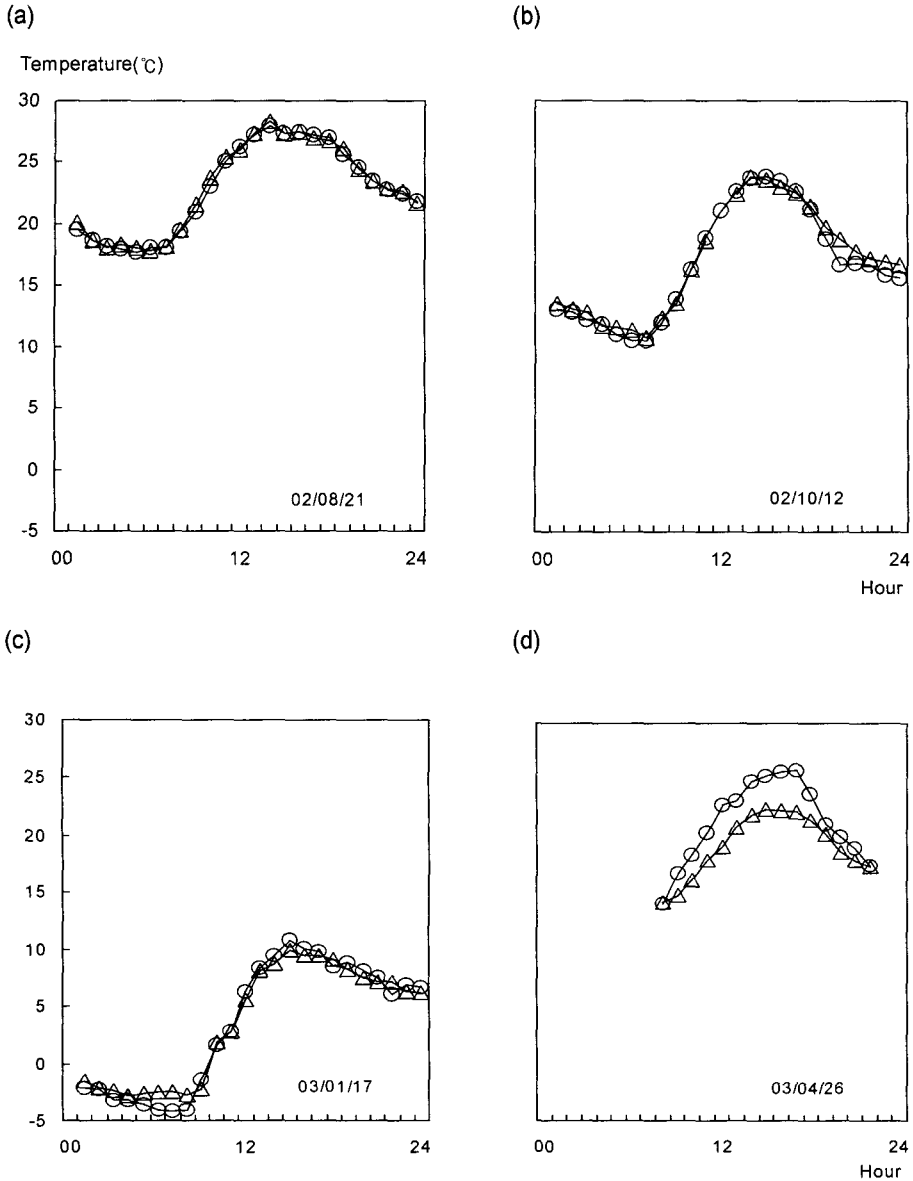


Fig. 4. Variation of air temperature(°C) at KNU(-○-) and Daegu Weather Station(-△-) in (a) Summer (b) Autumn (c) Winter and (d) Spring.

경북대 캠퍼스내의 12개 지점의 시간별 평균기온과 대기기상대에서 동일시각에 측정된 기온의 비교는 Fig. 4와 같다. 원표시(○)의 경북대(KNU) 기온과 사각형(□)의 대기기상대(DWS) 기온은 거리가 비교적 가까우므로(~1 km) 별 차이가 없다. 여름철(8월)의 온도는 하루 중 거의 일치하고 있으나 가을(10월) 중의 온도는 야간과 새벽녘에 최대 1~1.5°C 정도의 차가 난다. 겨울철(1월)은 경북대 캠퍼스내의 온도가 약간 높게 나타난다. 이것은 건물이 북풍을

막아주고 아늑한 지형의 효과에 기인하는 것으로 사려된다. 그러나 봄철(4월)의 온도는 경북대 캠퍼스가 최대 3°C의 높은 온도를 보이고 있다. 이것도 또한 지형과 건물의 효과로 보여진다.

일반적으로 경북대 캠퍼스내에는 여름철 숲과 넓은 광장으로 인하여 냉원 역할을 할 것으로 사려되나 실제로는 작은 숲 면적과 과밀한 빌딩군에 의한 복사에너지의 방출로 냉원 역할을 하지 못하는 것으로 밝혀졌다. 따라서 아늑하고 시원한 그리고 청결

한 캠퍼스의 조성을 위해서는 더 많은 녹지와 숲의 조성이 요망됨을 보여준다. 본 관측 이후 태풍 루사에 의해 캠퍼스의 나무가 더 많이 쓰러지고 사라졌으므로 냉원의 역할은 더욱 적어졌을 것으로 사려되어 조속한 복구와 그린 캠퍼스의 확장이 요망된다.

2.4. 습도 변화

경북대 캠퍼스내의 습도의 월평균 값은 최대 75% (여름철)에서 최소 60%(겨울철)를 보이고 있으며 8

월의 12시 및 1월의 12시의 각 관측 지점에서의 습도 분포 1~2% 미만으로 매우 적었다.

경북대 캠퍼스에서 측정된 평균 습도와 대구 기상대에서 측정된 습도의 비교는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 시간에 따라, 계절에 따라 양측의 습도는 비록 거리는 멀지 않으나 많은 차이를 보이고 있다. 이것은 캠퍼스내의 일기온과 계절의 기온변화와 관계가 있다. 습도의 차는 봄철에 제일 크

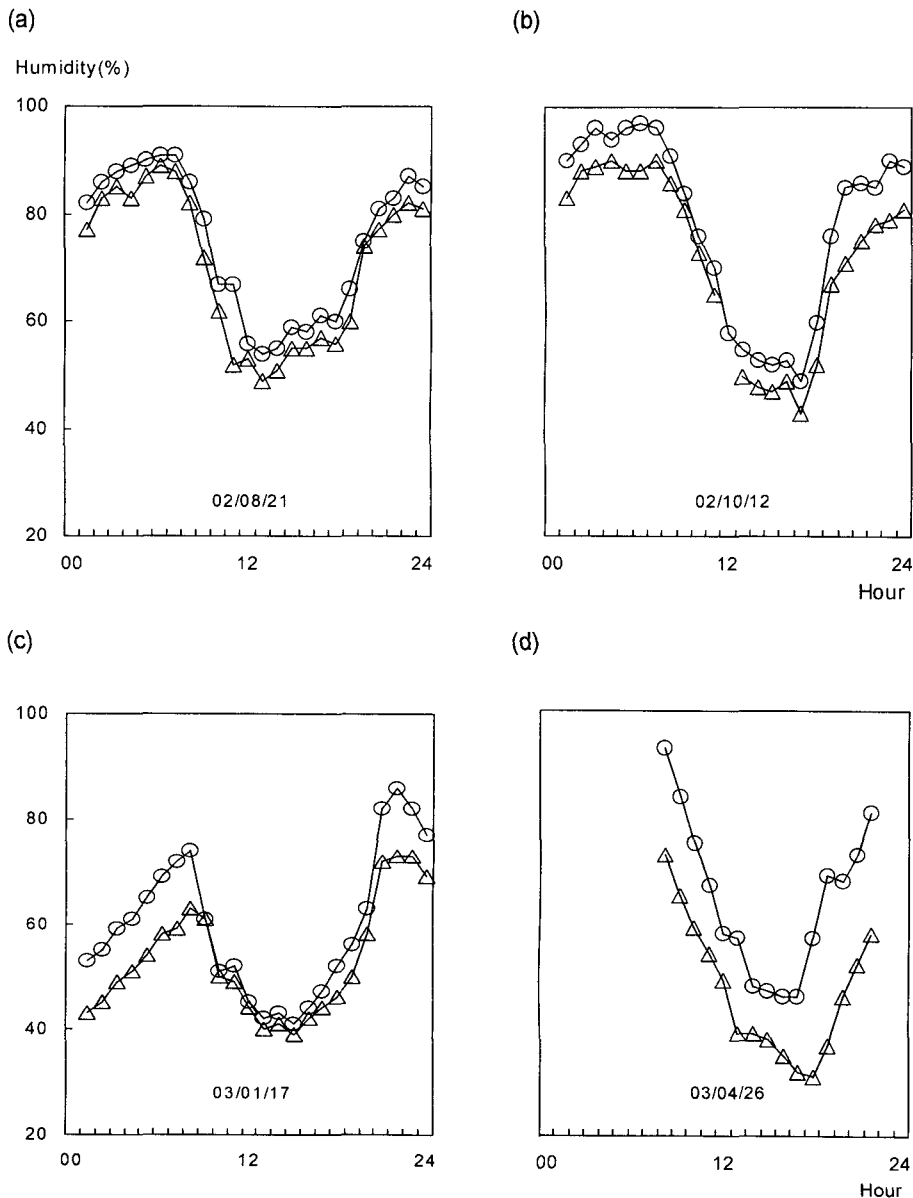


Fig. 5. Variation of Humidity(%) at KNU(-○-) and Daegu Weather Station(-△-) in (a) Summer (b) Autumn (c) Winter and (d) Spring.

고 여름철에 제일 적으며 가을과 겨울에는 야간에 그 차가 크게 나타난다. 봄철 양측의 습도차는 적게는 10%, 많게는 20%의 차를 보이며 경북대 캠퍼스에서 높게 나타나고 있다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 경북대 캠퍼스내에는 많은 건물과 숲이 있으며 또 분수 및 연못이 있으나 기상대는 공개된 열린 지역이며 관측 지점의 고도가 틀려 많은 차를 보이는 것 같다.

습도는 기온과 대기중의 수증기량에 의해 좌우되는데 그리 멀지 않은 거리에서의 이러한 차는 학교내의 활동으로 수분사용량이 많고 또 연못과 분수 등에 저장된 물의 증발, 그리고 숲에 의한 작용으로 판단된다.

2.5. 바람 변화

캠퍼스내에서의 바람은 천문대기학과 건물 앞 노장에 설치한 10 m 바람탑에서 측정한 바람과 대구기상대 측정 바람의 비교를 행하였다. 바람은 주위의 지형과 건물 등에 의해 큰 영향을 받으므로 캠퍼스내에서서도 위치에 따라 크게 달라질 수 있으므로 캠퍼스내에 설치한 3 m 높이의 AWS에서 측정한 바람의 수평 분포와 비교는 분석하지 않았다.

경북대내의 바람은 Table 1에서 볼 수 있듯이 계절에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 본 연구에서 바람은 1년간의 관측을 빈도에 따라 나타낸 것이다.

경북대 캠퍼스내의 바람은 Table 1에 제시한 바와 같이 봄철은 120°의 동풍 및 310°의 서풍계열에서 여름은 120°의 동풍계열, 가을은 100° 부근의 동풍계열 그리고 겨울철은 300° 부근의 북서풍에서 주풍을 이루고 있다. 한편 대구기상대의 바람은 겨울철과 봄철은 290°, 320°의 북서풍 계열에서 그리고 여름과 가을철에는 남동풍에서 주풍을 이루며 강하게 분다. 일반적으로 대구지역은 여름철에는 남동풍계열, 그리고 겨울철에는 북서계열풍이 불고 풍속은 2~4 ms⁻¹의 바람이 불고 있으며 계절이 바뀌는 봄과 가을에는 남동풍과 북서풍이 다소 빈도가 높게 나타난다.

경북대 캠퍼스내에는 지형과 건물의 영향으로 이보다 다소 약하게 부는 것으로 밝혀졌으나 짧은 관측으로 대표 바람을 지정하기는 곤란하다. 그러나 대구기상대의 바람과 비교하여 볼 때 그 경향성은 뚜렷이 알 수 있었다.

전체적으로 볼 때 경북대학교 내의 기온, 습도, 바람 등의 대기환경은 대구기상대의 기후환경과 매우 유사하며 교육환경의 입장에서 볼 때 대체로 양호한 환경으로 판단된다.

Table 1. Comparison of prevailing winds at Kyuntpook National University(KNU) with Daegu Weather Station(DWS)

| | KNU | | DWS | |
|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Direction (°) | Speed (m/sec) | Direction (°) | Speed (m/sec) |
| Spring | 300° | 2.6 | 290° | 2.9 |
| Summer | 120° | 5.4 | 110° | 6.8 |
| Autumn | 100° | 1.5 | 290° | 1.4 |
| Winter | 300° | 4.0 | 290° | 4.2 |

3. 바람장 수치모의

3.1. 모델 및 연구 방법

본 연구에서 사용한 모델은 도시기후에 대한 수치모의를 위해 Sievers and Zdunkowski¹⁰⁾가 개발한 MUKLIMO(Microscale Urban Climate Model)이다. 이 모델은 초기 2차원 모델로 개발되었으나 Sievers²⁾가 유선함수 방법을 이용하여, 3차원 바람장 모델로 개선하였고 본 연구에서는 개선된 모델을 이용하였다.

개선된 모델은 1~2 km내의 영역에서 수 m~수 십 m의 바람장을 계산할 수 있도록 설계되었으며, 비발산, 비압축인 이상적인 중립대기를 가정하고, 대기 상태가 균질한 수평면 y축 위에서 수평좌표 x와 연직좌표 z에 의존하는 변수들을 계산하는 방식으로, 지표온도는 모델 영역의 모든 지역에서 동일하게 가정되고 건조 단열감율을 이용한다.

바람장 계산을 위해 사용되는 운동방정식은 Bussinesq 근사에 의한 운동방정식이며, 다음과 같다.

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho_0 (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} + \nabla \cdot \vec{J} = -\nabla p - (\rho_0 + \rho') \nabla \phi - 2\rho_0 \vec{\omega} \times \vec{V} \quad (1)$$

ρ_0 는 평균공기밀도, ρ' 은 평균밀도의 편차, \vec{J} 는 레이놀즈 텐서, ϕ 는 지오폠펠셜, $\vec{\omega}$ 는 지구의 자전 각속도이다.

식 (1)에서 기압성분 p를 제거하고, 유선함수(Ψ)를 포함한 와도(ζ) 식으로 변형하면

$$\zeta_1 = \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial y \partial x} \quad (2)$$

$$\zeta_2 = \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial x \partial y} \quad (3)$$

를 얻게 되며 식 (2)와 (3)의 유선함수 값 Ψ_1, Ψ_2 로부터 다음과 같은 바람장 성분 u, v, w 를 얻는다.

$$u = \frac{\partial \Psi_2}{\partial z} ; v = -\frac{\partial \Psi_1}{\partial z} ;$$

$$w = \left(\frac{\partial \Psi_1}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_2}{\partial x} \right) \quad (4)$$

자세한 유도과정은 Sievers²¹⁾, 안광득 등²³⁾ 그리고 윤지원·민경덕²²⁾에 제시되어 있으므로 참고하기를 바란다.

한편 식 (1)의 레이놀즈 텐서 \vec{J} 의 발산은 다음과 같이 모수화 된다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\rho_0 \nabla \times (K_M \nabla \times \vec{V}) = -\rho_0 \nabla \times K_M \zeta \quad (5)$$

여기서 K_M 은 난류 교환계수(turbulent exchange coefficient)이며 중립대기에서 혼합길이와 연직 바람시에어에 비례하여 정의되는 양이며 혼합길이 l 은 Blackadar²⁴⁾의 다음의 식으로 구한다.

$$l = \frac{x(l_0 + z_0)}{1 + \frac{x(l_0 + z_0)}{l_\infty}} \quad (6)$$

여기서 x 는 von Kármán 상수, z_0 는 거칠기 길이, l_0 은 모델 각층의 고도, l_∞ 는 모델 상부 한계에서의 혼합길이 값이며, 중립대기에서 30m의 값을 가진다(Wu²⁵⁾). 하부 경계조건으로는 지면에서 $\Psi_1 = 0$, $\Psi_2 = 0$ 경계조건을 적용하며, 상부 경계는 상부 경계에서 초기치와의 차이를 최소로 하는 혼합 상부 경계조건을 적용한다.

3.2. 바람장 수치 모의

3.2.1 수치실험

MUKLIMO의 초기 자료의 입력을 위해서는 고해상도의 지형자료와 건물 높이 자료, 지면 거칠기 자료, 수목 자료 등이 필요하다. 경북대 캠퍼스는 건물이 조밀하게 분포한 지역이므로 초기 입력자료의 획득에 매우 용이하다.

모델의 영역은 Fig.2에서와 같이 1.3 km×1.3 km의 영역으로 구성하였으며, 각 격자 간격은 10 m의 수평격자로 130×130 격자이다. 연직층은 110 m의 16개 층으로 지표에서부터 10 m까지는 2 m 간격의 층으로, 10 m에서 20 m까지는 5 m 간격, 20 m 이후부터는 10 m 간격으로 점차 늘려가면서 구성하여 지표의 바람장을 자세히 볼 수 있도록 하였다.

모델 내에서 경북대 주변의 건물들은 분해되지 않는 건물형태로 입력되었다. 수목은 격자 영역의 형태로 모델 내에서 구성되게 되며, 수목의 높이는 0.5~1.5 m의 값을 주었고, 잎면적 밀도는 0.1 m²m³으로 하였다. 지표 중 초지 지역은 Stull²⁶⁾에 의해 0.1 m의 거칠기를 주고, 아스팔트에 해당되는 도로지역은 0.05의 값을, 건물 외벽은 0.03의 값을 취했는데, 부

경은¹⁷⁾의 실험과 같이 3 cm와 5 cm의 거칠기 차이는 계산결과에 큰소함을 보였다.

모델의 초기 입력 바람 자료를 자동기상 관측장비를 이용하여, 지역 대표풍의 값을 구하여 모델의 초기치로 입력하는 방법을 택하여야하므로 Table 1에 제시된 주풍을 참조하여 빈도가 큰 주풍의 방향(120°, 240°, 300°)을 초기치로 이용하여 모의하였다. 초기 입력 바람의 고도는 경북대 지역의 고도(35 m)와 대구 기상대의 바람탑의 고도(59 m)를 고려하여 24 m로 하였다. 경북대 지역의 바람장 실험에서는 계절별 대표풍에 의해 나타나는 건물과 지형효과가 고려된 도심지역의 바람장과 건물 신축에 의해 나타나는 바람장의 변화를 주로 살펴보았다.

바람장 수치모의는 Table 2와 같이 서풍계열(240°)의 경우 건물(A)이 있을 때와 없을 때, 그리고 동풍계열(120°)의 바람과 북서풍(300°)의 바람시 건물(A)이 있을 때 실제 캠퍼스내 10 m 고도에서의 바람장을 모의하였다. 건물(A)의 유무가 경북대 캠퍼스내의 바람의 강도와 공기의 흐름(바람길)에 미치는 영향 그리고 탁월풍이 불 때 캠퍼스내의 바람길을 고찰하였다. 지상 20 m 상공의 바람의 모의 결과는 다소 강한 바람을 보이거나 공기의 흐름을 잘 보여주고 있다.

Table 2. Initial winds and control building(A) for the simulations

| Experiments | Wind direction | Wind speed | Buinding(A) |
|-------------|----------------|------------|-------------|
| 1 | 240° | 5 m/sec | exist |
| 2 | 240° | 5 m/sec | remove |
| 3 | 120° | 5 m/sec | exist |
| 4 | 300° | 5 m/sec | exist |

3.2.2. 모의 결과

모델에 의한 모의 결과 중 봄철 대표풍인 300° 풍향에 2.9 ms⁻¹를 초기 바람자료로 수치모의 한 수평 바람장의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)의 10 m 고도의 바람장에서는 A 건물 후면에 상향와동이 잘 나타나고 있다. 오염적인 측면에서 이 상향와동에 의한 역순환은 서쪽으로부터 유입되는 오염물질이 건물후면에서 다시 건물방향으로 흘러 들어와 건물 후면에 정체할 수 있음을 보여준다.

Fig. 6(a)에서 A 건물의 영향은 건물 후면에 약 350 m까지 바람장 변화를 보여주는데, 이것은 기상 연구소¹⁵⁻¹⁶⁾의 연구에서 건물에 의해 영향을 받는 건물 후면의 바람장은 건물높이의 10배까지 영향을 받는다는 것과 Hirt and Cook²⁷⁾의 연구결과와도 잘 일치한다. 이것은 34.5 m의 건물 신축에 의해 주변

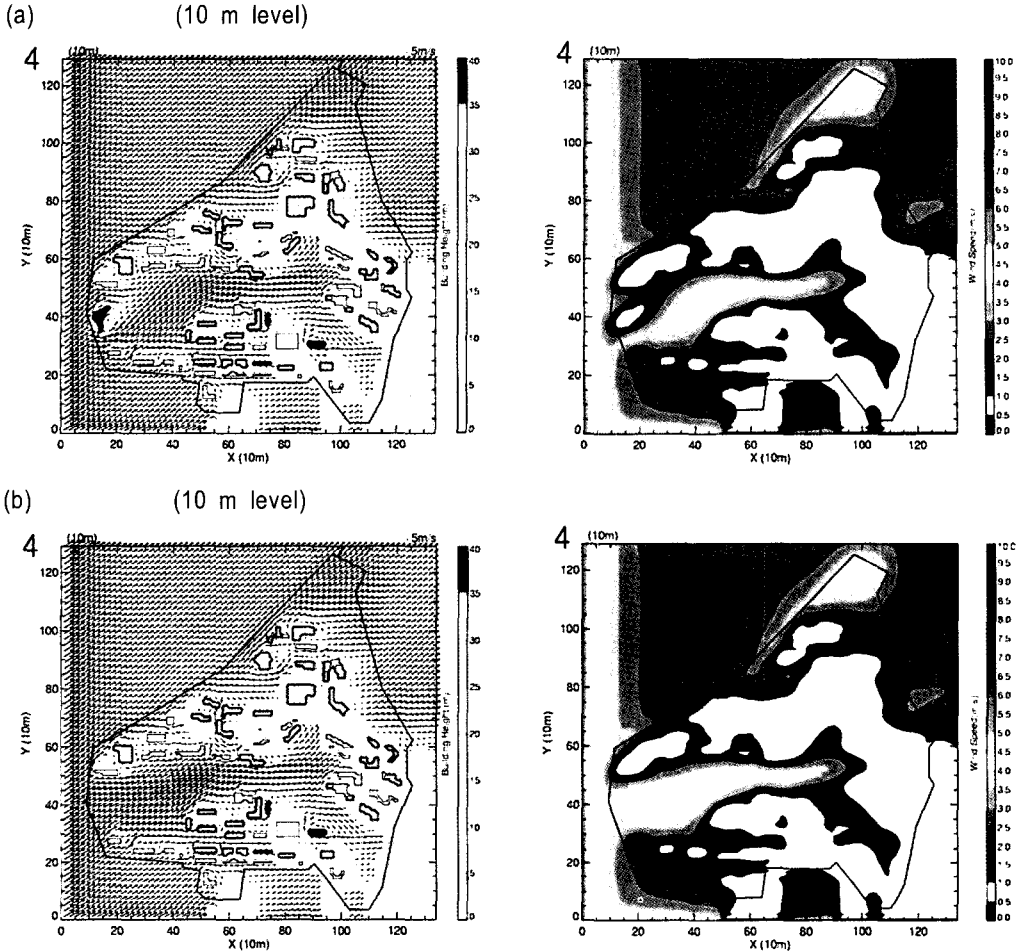


Fig. 6. Simulations of wind field at 10 m level. (a) and (b) represent experiment 1 and 2, respectively. Left panels represent the wind vector and Right panels wind speed.

지역 바람장의 많은 부분이 영향을 받을 수 있다는 것이다. 모델의 지표 고도로부터 20 m 고도의 바람장은 남서쪽이 높은 지형에 의해 막혀져 바람이 나타나지 않고 있으며, 이러한 효과는 고도가 높아짐에 따라 감소된다. Fig. 6(b)의 10 m 고도의 수평바람장에서는 조밀한 건물들에 의한 바람의 감속효과가 경북대 지역의 북쪽과 남쪽에 주로 보여지며 고도가 증가함에 따라 건물에 의한 감속효과는 고도 당 약 1 ms^{-1} 로 줄어들고 있다.

저층 고도에서 건물효과를 뚜렷하게 보여준 A 건물이 없을 때의 바람장 변화를 살펴보기 위해 모델 영역에서 A 건물을 제거한 바람장을 모의하여 보았다. 모든 조건은 A 건물이 있을 때와 같은 초기 조건을 이용하였으며, Fig. 6(b)에 제시하였다. Fig. 6의 (b)에서 A 건물이 없음으로 인해 A 건물 후면의 상향와동은 완전히 없어졌으며, 경북대 지역에서는 주로 동서의 순환이 있었음을 알 수 있다. 이러한

동서의 순환이 A 건물의 신축으로 인해 막히는 효과를 가지게 되었고, A 건물의 높이가 34.5 m이므로 A 건물에 의한 영향은 30 m 고도의 바람장에서도 뚜렷이 나타나고 있다.

동풍계열(120°)의 탁월풍이 불 때는 Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 바람길은 주로 정문에서 도로 및 주차장을 따라 서편 운동장으로 이동하는 바람길이 뚜렷이 나타나며 법대, 사회대 및 박물관 등에 의한 바람의 감속과 건물이 밀집한 지역에서의 감속이 뚜렷이 나타나고 있다.

한편 북서계열(300°)의 바람의 경우는 Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 북편 도로변에서 캠퍼스내로의 바람의 유입과 체육관 옆 낮은 지역과 서편의 서문 부근을 통해 운동장으로 유입되는 바람이 도로를 따라 캠퍼스 중심부로 이동해와 정문 쪽과 복지관 쪽으로 이동하는 바람길이 잘 모의되고 있다.

본 연구결과 캠퍼스내의 바람길과 바람 강도가

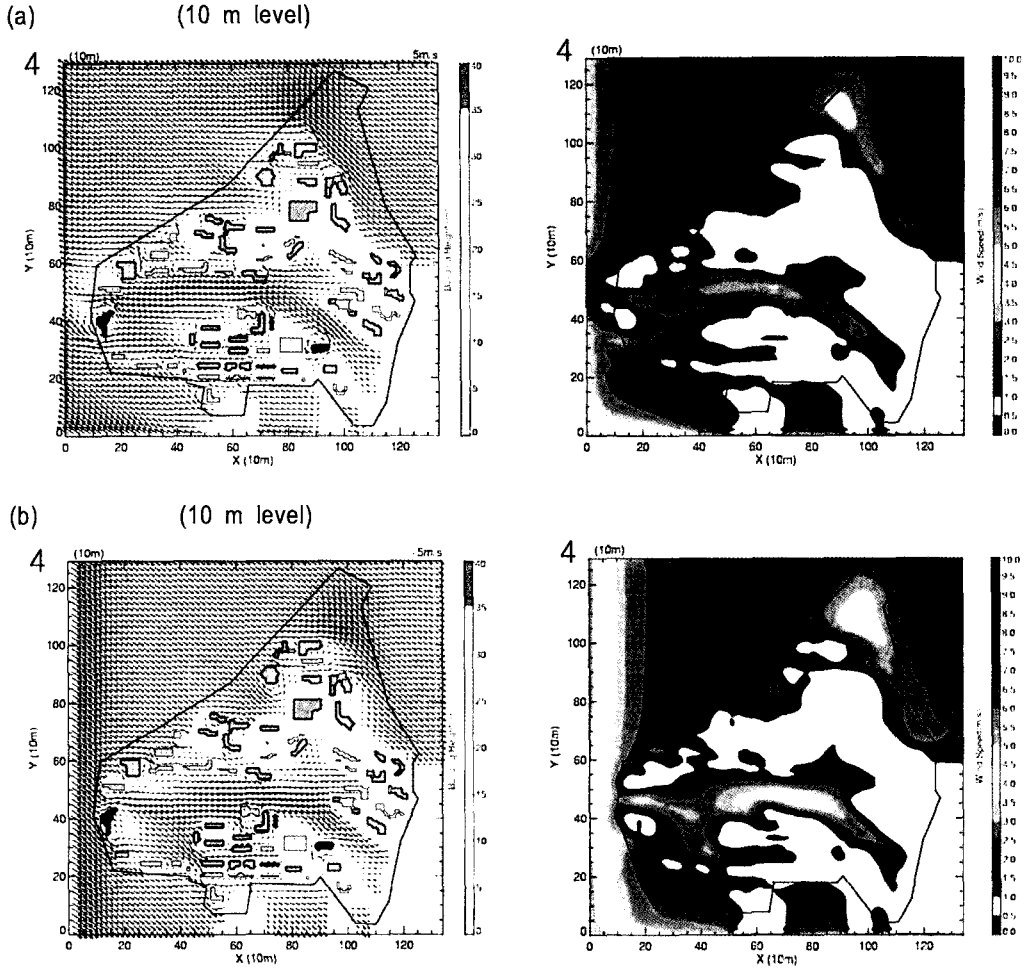


Fig. 7. Same as Fig. 6, but experiment 3 and 4, respectively.

잘 모의되고 있음을 볼 수 있으며 이것은 대도시의 건물 신축에 따른 바람길의 변화 또는 오염 물질 확산에 미치는 바람의 이해 등에 활용될 수 있음을 보여준다.

A 건물에 의한 영향을 좀더 자세히 보기 위해 Fig. 8에 A 건물이 있을 때와 없을 때의 연직 바람장을 나타내었다. Fig. 8(a)에서 x 격자점 10 부근에 나타나는 장애물에 의한 바람의 상향과 장애물 후면의 하향 효과가 A 건물에 의한 것이며, 이 후 나타나는 장애물은 지형과 다른 건물에 의한 것이다. Fig. 8(a)에서 A 건물에 의한 효과는 40 m 고도까지 나타나며, 건물후면에는 하강기류와 현저한 풍속의 약화를 보여준다. 이러한 풍속의 약화는 건물 전면의 같은 지점과 비교해 볼 때 건물 전면 풍속의 75%가 감소되어지며, 10 m 고도에서는 초기 풍속이 2.9 ms^{-1} 임에 반해 건물 후면에서는 0.2 ms^{-1} 로 나타난다. Fig. 8(b)에서는 A 건물이 없음으로 인해

x 격자점 10 부근에 장애물이 나타나지 않고 있으며, 지면 거칠기에 의한 연직시어만 나타나고 있다.

Fig. 8(a)에서 Baines²⁸⁾에 의한 정체점(stagnation point)은 건물의 서쪽의 낮은 부분에 위치하는데, 이것은 건물의 형태가 정방형이 아니고 바람의 방향이 건물면에 직각이 아니기 때문인 것으로 판단되어진다. 건물 후면에 나타나는 역순환은 Fig. 8(a)의 15 격자점에서 잘 보여지는데, 이것은 A 건물 후면에 형성된 공동구역의 영향이다. 하지만 건물후면에서 건물면을 따라 상승류는 보이지 않을 정도로 약하다. 이는 전면의 상승류가 1.0 ms^{-1} 의 풍속으로 약하므로 후면의 상승류는 상대적으로 더 약화된 0.25 ms^{-1} 를 가지기 때문이다²⁹⁾.

Fig. 9에서는 A 건물을 중심으로 남북 방향인 yz 평면의 연직 바람장을 나타내었다. Fig. 9(a)에서 A 건물이 위치한 지점의 남쪽인 격자점 35 부근에 $5\sim 6 \text{ ms}^{-1}$ 를 나타내는 풍속의 강화를 볼 수 있다. 이러한

코너기류(Corner Streams)는 건물의 바람맞이 벽면의 바람은 측방으로 피하지만 건물의 모서리에서 흐르는 바람은 벽면에서 떨어져 매우 빠른 흐름이 되는 것을 말하며, 고층건물이 밀집한 지역의 재해의 원인이 되기도 한다. Fig. 9(b)에서는 이러한 A 건물에 의한 효과는 완전히 없어졌으며, 지형에 의한 연직 풍향의 미소 변화와 지표 거칠기에 따른 지면 부근에서의 풍속 감소가 나타날 뿐이다.

이상에서 건물이 조밀하게 분포하고 지형이 복잡한 경북대 캠퍼스 지역에 대해 기후모델을 이용하여 10 m 해상도의 바람장 수치실험을 하였으며, 또 건물의 신축이 전체 지역의 바람장에 미치는 효과를 살펴보았다. MUKLIMO에서는 이러한 건물 조밀지역의 건물효과에 의한 바람장이 잘 모의되었으며, 지형과 건물효과를 잘 고려하고 있음을 알 수

있었다. 도시 기후적인 측면과 오염적인 측면에서 건물 밀집지역내의 바람장을 수 m로 분해해내는 일은 매우 의미있는 일이다. MUKLIMO를 이용한 많은 응용이 기대된다.

그러나, 본 경북대 실험에서는 10 m 높이의 한 지점에서 관측한 풍향과 임의의 풍속(5 m/s)을 이용하였으므로 모의 결과와 관측에 의한 실제적인 검증에는 어려움이 있다. 검증을 위해 관측에 의한 바람자료를 초기 자료로 입력하는 것도 문제가 있는데, 어느 지역이든 대부분의 관측지점은 건물과 지형 또는 수목의 영향을 받기 때문이다.

임은하 등³⁰⁾, 부경은 등¹⁷⁾ 그리고 안광득 등²²⁾의 실험과 같이 건물 외부 관측자료를 이용하여 모델의 초기자료로 입력하고 수치모의하여 건물 효과가 고려된 바람장을 구하고, 실제 건물 영향을 받으면

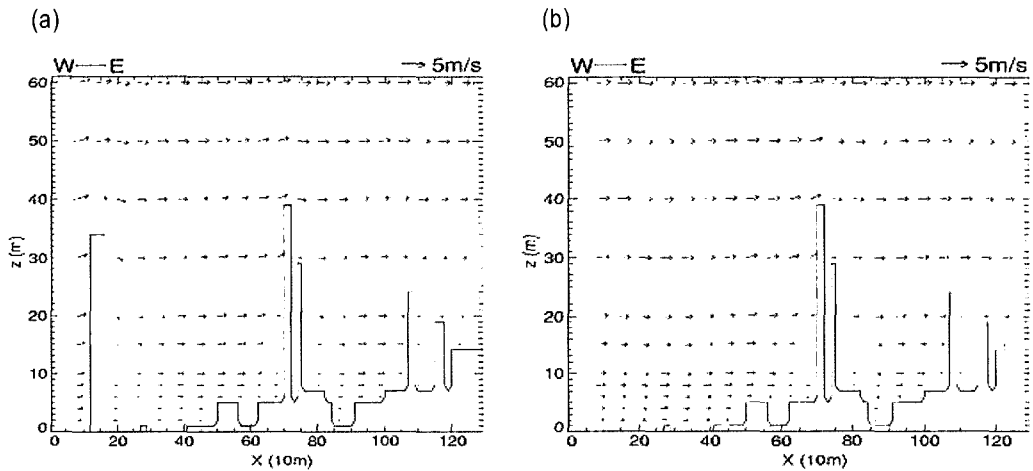


Fig. 8. Simulations of vertical wind fields at KNU along the B-B' in Fig. 2, (a) Building A exists and (b) Building A removed.

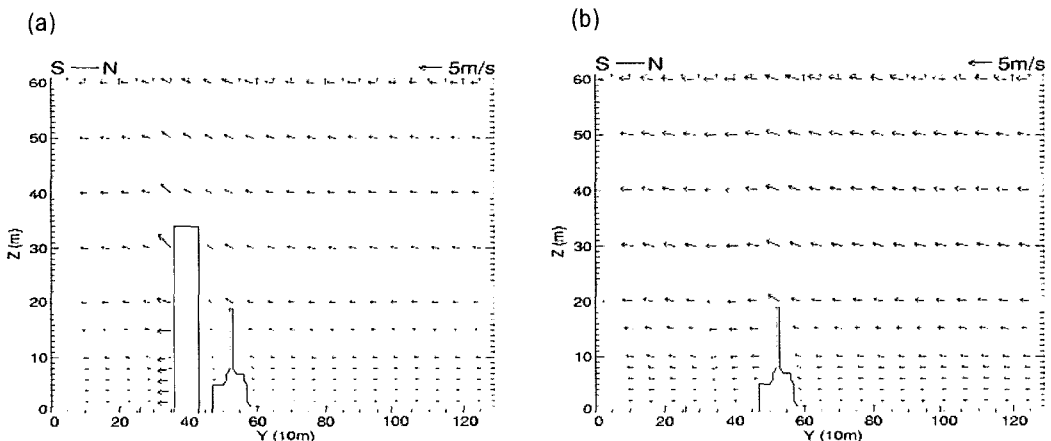


Fig. 9. Simulations of vertical wind fields at KNU along the C-C' in Fig. 2, (a) Building A exists and (b) Building A removed.

서 관측되는 바람자료와 비교하는 방법을 택하였다. 이 결과 기존의 선행연구에서는 만족할만한 실험 결과를 얻었으므로 본 연구에서는 관측과 실험의 어려움으로 이들의 검증 사례를 그대로 인정하고 별도의 검증을 수행하지 못하였다.

4. 오염물질의 전파 모의

4.1. 모의 방법

바람장은 오염물질의 수송과 확산에 매우 큰 영향을 미치며 복잡한 지형에서 풍향, 풍속에 따른 오염물질의 확산은 지형에 따른 바람장의 변화로 오염물질이 쌓이거나 오염물질의 분산 너비와 거리에 중요한 영향을 미친다. 앞에서 모의된 바람장을 이용하여 경북대 캠퍼스내에서 어떠한 형태로 확산되고, 그 영향을 미치는지 알아보기 위해 캠퍼스 밖의 도로와 구내를 주행하는 자동차에 의해 배출되는 배기가스를 선 오염원으로 하여 배기가스의 분산 실험을 하였다.

도로상에서의 오염물질의 배출은, 통과하는 자동차의 대수, 차량의 종류, 대수당 배출되는 평균 오염물질량, 그리고 배출 시간에 좌우된다. 경북대 캠퍼스내에서 동분에서 북분으로 통과하거나, 정문 통과 후 주차때까지의 시간은 3분으로 하고 배출 가스는 국립환경연구원 자동차 공해 연구소의 실험자료 값인 시속 40 km/h의 차량이 방출하는 양 1.74 kg/h·대를 이용하여 1초 간격으로 3분 적분하여 배기가스의 분산을 모의하였다. 이 값은 도로상에서 배출되는 실제 배출량과 다소 다를 것으로 생각되나 본 연구에서는 배출가스의 전파 양상과 상대적 오염량을 중시하여 이 값을 이용하여 모의하였다.

경북대 캠퍼스 주위를 지나가는 북편도로, 동편도로, 서편도로 그리고 캠퍼스내 도로에서의 배출량은 도로상의 통과 자동차 대수와 도로의 크기에 의해 Table 3과 같이 결정하였으며 이 때의 바람과 차량의 속도도 제시하였다.

오염확산 실험에서 오염원의 분산은 Sievers²²⁾의 다음의 분산식에 의해서 구해진다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla c + \frac{1}{\rho_0} \nabla \cdot \vec{J}^c = \frac{1}{\rho_0} Q^c \quad (7)$$

여기서 \vec{J}^c 는 $\vec{J} = -\rho_0 K_h \nabla c$ 와 같이 모수화되며, c 는 질량 농도, Q^c 는 c 의 체적원, K_h 는 열교환 계수이다. 이 분산식은 모델에서 바람장이 계산되어지고 난 후 각 격자점에서의 u, v, w 와 K_h 를 가지고 오염 분산을 계산하게 된다. 분산 실험의 결과는 지형을 따르는 방법(Terrain following method)으로

Table 3. Initial conditions and amounts for the experiment of dispersion of exhausted gases along the streets

| Initial wind directions | Amounts of exhausted gases | |
|-------------------------|----------------------------------|--------------|
| 300° | Northside street | 19.3 μg/sec |
| 60° | Eastside street | 6.433 μg/sec |
| 240° | Westside street | 19.3 μg/sec |
| 60°120°240°300° | Campus road | 6.433 μg/sec |
| Wind speed ; 5 m/sec | Speed of motor vehicle ; 40 km/h | |

각 방위별로 10 m 고도에서 5 ms⁻¹의 초기바람을 입력하여 10 m와 20 m 고도에서의 바람장을 모의하였으며, 10 m 고도에서의 분산 패턴은 60°, 120°, 240°, 300°일 때 각각 Fig. 10과 같다.

4.2. 모의 결과

앞에서 언급한 바와 같이 경북대 주위는 4방향에 도로로 둘러싸여 있다. 남쪽의 도로는 캠퍼스 중심에서 500~600 m 정도 떨어져 있고 서쪽도로는 후문에서 약 150 m 떨어져 있으나 접하는 도로는 불과 100여 m에 지나지 않는다. 그리고 북쪽과 동쪽의 도로는 캠퍼스의 담을 사이에 두고 지나가고 있다. 북쪽의 도로는 왕복 6차선의 간선 도로로써 통행량도 많이 시간당 평균 2500대 내지 3500대가 통과하고 있다. 동쪽도로는 왕복 2차선의 도로이며 차량의 통행량도 북쪽에 비해 적고 캠퍼스와 접촉도 300 m에 불과한 도로이다. 남쪽도로는 비교적 멀고 또 건물이 막고 있어서 모의 실험에서는 제외하였다. 북쪽도로와 동쪽도로상의 각 격자점에서 매초 19.3 μg/sec의 배기가스가 배출된다고 하고 도로 통과시간을 3분으로 하여 풍향에 따라서 캠퍼스내로 분산되는 오염물질의 분포와 양을 모의를 하였으며 그 결과는 Fig. 10과 같다.

Fig. 10(a)에서 보는바와 같이 북편도로상에서 배출되는 오염물질은 북서풍계열(300°) 바람이 불 때 북문 근방의 도로상에서 최대 95 μg/m³을 보이고 강당 앞 광장쪽으로 유입되거나 인문대 및 도서관 등에 의해 막히고 또 자연대와 농대 뒤편쪽에서 캠퍼스 안으로 들어오는 것을 볼 수 있다. 대학 본부 앞 광장에서 오염물질의 농도는 15~20 μg/m³을 보이고 있다. 그러므로 오염량은 북쪽도로에서 멀리 남쪽으로 갈수록 약해짐을 볼 수 있다.

동편도로는 차량의 통과량이 북편도로의 1/3로 가정하고 매초 6.433 μg/sec의 배기가스가 방출되는 것으로 계산하여 동풍계열(60°) 즉 오염물질이 캠퍼스로 유입되는 바람에 따라 오염물질의 전파를 모의하였으며 그 결과는 Fig. 10(b)과 같다. 동편쪽은 차

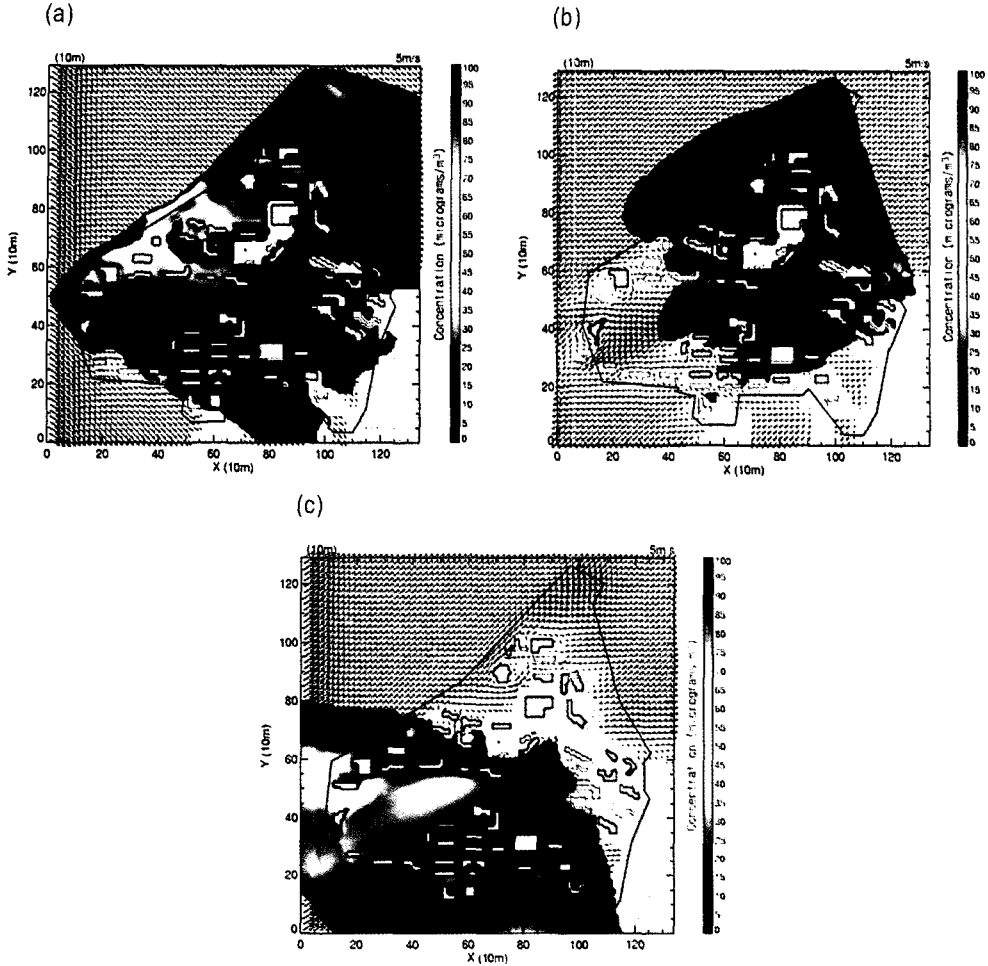


Fig. 10. Dispersions of exhausted gases where sources of pollution located along (a) the northside street with 300°, (b) the eastside street with 60°, (c) the westside street with 240° winds at 10m level, respectively.

량도 적어 오염물질은 도로 부근 쪽에 한정되고 일부 약한 값이 캠퍼스내에 나타나고 있으나 그 양은 상대적으로 매우 적다. 대학 본부 앞 광장에서의 오염물질의 농도는 15~20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 보이고 있다. 한편 서편 도로상에서 방출되는 오염물질은 240°의 경우 운동장을 통과하여 캠퍼스 중심부 테니스장쪽까지 오염물질의 유입을 볼 수 있으나 그 값은 0~5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로써 매우 적다. 3분간의 모의에서는 캠퍼스의 동편쪽은 전혀 영향을 받지 않는 것으로 모의되었다.

60°의 바람과 240°의 바람은 북편도로와 거의 나란한 상황이므로 오염물질은 도로상에 한정되고 캠퍼스내에는 바람의 방향에 따라 거의 영향이 없는 곳들이 나타난다. 그러나 300°의 경우는 캠퍼스 전역에 오염물질이 전파됨을 볼 수 있다.

캠퍼스내에서 정문에서 북문으로 또는 북문에서 정문으로 이어지는 도로상에서 오염물질이 배출될

때 주풍에 따른 캠퍼스내의 오염물질 분산도 모의 실험하였으며 이때 사용한 배기가스의 값은 북편도로 상의 값의 1/30을 가정하여 입력하였다.

Fig. 11은 모의 결과를 나타낸다. 60°의 바람의 경우 Fig. 11(a)에서 보는 바와 같이 오염물질이 서편 쪽으로 전파됨을 볼 수 있으며 120°의 경우(Fig. 11(b))와 300°의 경우(Fig. 11(d))는 도로의 방향과 거의 비슷하므로 도로를 따라 오염물질이 좁은 지역에 밀집하여 전파됨을 볼 수 있고, 240°의 경우(Fig. 11(c))는 캠퍼스 동편쪽으로 확산전파됨이 잘 모의되고 있다. 학교 중심부의 분수대 부근에서 100 m 떨어진 남서편 지점에서 북동풍(60°)이 불 때, 동편 지점에서 서풍(240°)이 불 때, 북쪽 지점에서 남동풍(120°)이 불 때 그리고 남동쪽에서 북서풍(300°)이 불 때의 오염물질의 농도는 각각 2~4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0~2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 4~6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 그리고 0~2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을

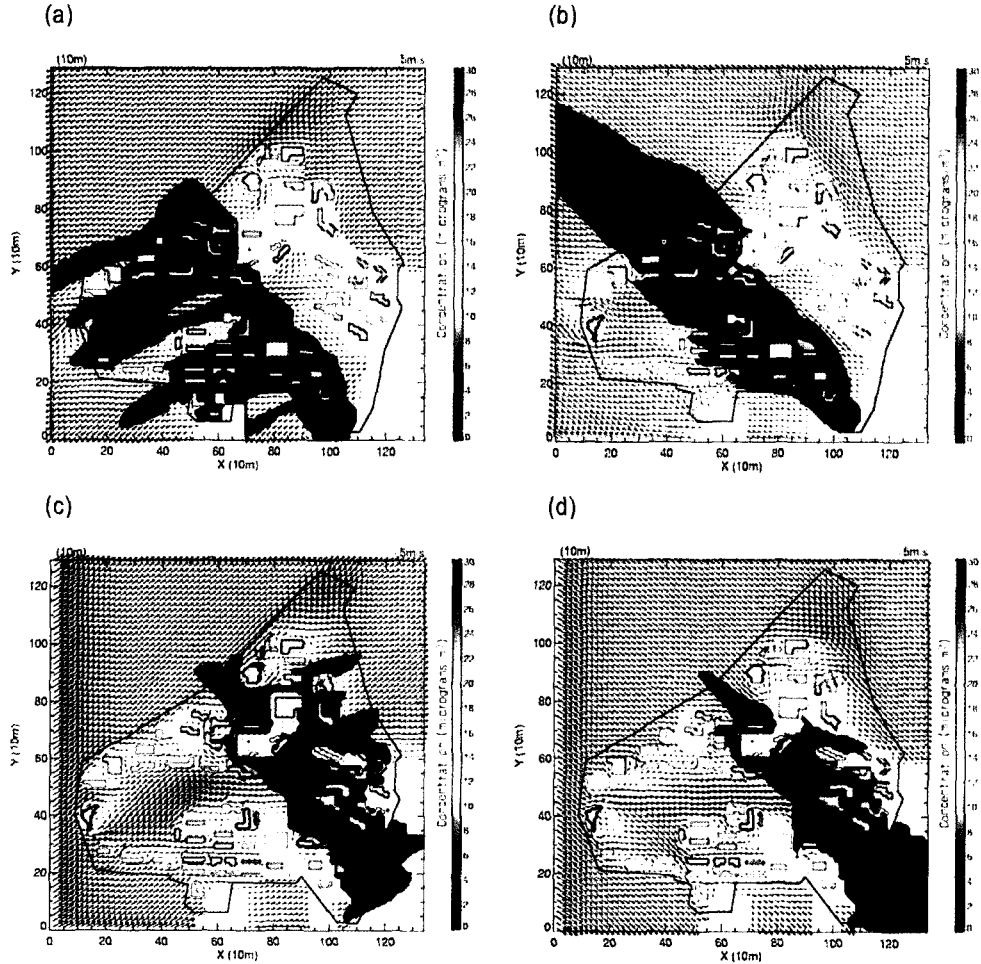


Fig. 11. Same as Fig. 10, but sources of pollution locate across the campus with (a) 60°, (b) 120°, (c) 240° and (d) 300° winds at the 10m level, respectively.

보이고 있다.

오염물질 전파의 모의 실험은 3분간의 모의 결과 이므로 모의 시간을 연장하면 비록 농도는 적다하더라도 전파는 캠퍼스 전체로 퍼질 수 있다. 따라서 실제 오염물질의 농도 관측은 아니지만 오염 물질의 전파 양상과 상대량은 본 실험결과로서 파악할 수 있었다.

5. 요약 및 결론

경북대학교 캠퍼스는 비교적 대구 중심부에 위치하고 23만평의 거대한 면적을 차지하고 있어 캠퍼스내의 환경은 대구시의 기후에 영향을 미치고 대구시의 기후는 캠퍼스에 영향을 미칠것으로 사려된다. 또 캠퍼스 주변의 간선도로 등에서 발생하는 오염물질들은 바람의 방향에 따라 캠퍼스내의 오염물질 수송을 일으켜 교육환경에도 영향을 미칠 것으

로 사려된다.

따라서 본 연구는 경북대 캠퍼스내의 기온, 습도, 바람 등의 대기환경을 실제 관측하여 분석하고 또 대구기상대 자료와 비교분석하여 그 특성을 규명하였고 바람장의 모의로 바람길 그리고 건축물의 신축이 미치는 바람의 통로의 변화 및 자동차 이동에 따른 오염 전파 특성을 규명하고자 하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

경북대 캠퍼스의 기온과 습도, 바람 등의 기상요소의 분포가 밝혀짐으로서 구내의 기상특성이 규명되었다. 그러나 경북대 캠퍼스와 대구기상대 기상요소 값을 비교한 결과는 경북대 캠퍼스내가 기온이 오히려 약간 높게 나타났다. 이것은 캠퍼스가 대구 시내에 근접해 있고 조밀한 건축물에 의한 복사에너지의 방출 그리고 녹지의 훼손 등으로 캠퍼스가 열의 냉원 역할을 하지 못함이 밝혀졌다. 다만 녹지

가 있는 좁은 지역에서는 이러한 냉원 초과가 나타나고 있을 뿐이다.

MUKLIMO에 의한 모의 실험 결과 주풍 또는 임의 바람에 따라 공기의 흐름, 즉 바람길의 상태가 밝혀졌다. 240°의 서풍의 경우 서쪽으로부터 유입된 바람이 운동장, 테니스장을 지나 동편쪽으로 잘 빠지는 모습과 운동장 옆에 세운 백호관이 바람의 진행에 미치는 영향도 알 수 있었고, 건물이 풍향과 풍속에 미치는 모습도 잘 알 수 있었다.

한편 경북대 주변의 도로에서 발생하는 자동차 배기가스와 구내 통과 차량에 의한 배기가스의 배출과 분산모의는 오염물질의 분포와 오염물질의 전파 모습을 알 수 있었다.

본 연구 결과로 경북대학교 구내의 대기환경과 바람길, 그리고 오염물질의 전파 양상을 알 수 있었으므로 차후 학교 구내의 건축 신축 또는 건물 배치, 층수의 결정과 그 영향 등의 학교 건설 계획에 활용할 수 있으리라 생각된다. 또 복잡한 지형과 구조물 내에서의 바람장 모의와 도시기후의 연구 등에도 활용할 수 있을 것으로 사려된다. 경북대 캠퍼스가 도시내의 냉원 역할을 하기 위해서는 태풍 루사 이후 파괴된 녹지를 그린 캠퍼스 등의 운동으로 녹지화하고 공원화함으로써 도시기후학적 측면에서 기능을 할 수 있도록 캠퍼스 환경의 조성이 요망된다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 경북대학교 연구비에 의하여 연구되었음. 관측에 협조한 경북대학교 천문대기과 학과 학생들에게 감사하며 특히 논문 정리를 도와준 대학원생 정찬기군의 노고에 감사한다.

참 고 문 헌

- 1) Hjelmfelt, R., 1982, Numerical simulation of the effects of St. Louis on mesoscale boundary-layer airflow and vertical air motion; Simulations of urban vs non-urban effects, *J. Appl. Meteor.*, 21(9), 1239-1257.
- 2) Sievers, U., 1995, Verallgemeinerung der Stromfunktion-smethode, *Meteorol. Zeitschrift*. N. F., 4, 3-15.
- 3) 김문일, 이종범, 1979, 서울 지방의 수평기온 분포, *기상연구소 연구논문집*, 1, 57-62.
- 4) 이현영, 1989, 도시기후학(역서), *대광문화사*, 303pp.
- 5) 한영호, 김보한, 이동인, 1993, 부산 지역 도심의 열섬 현상과 기온 변화에 관한 연구, *한국기상학회지*, 29(3), 205-216.
- 6) 민경덕, 김경익, 윤일희, 이인숙, 1994, 대구 지역의 기상특성 연구 및 확산 모델의 개발 I, 도시 기온 및 상대습도의 수평 분포, *한국기상학회지*, 30(2), 289-301.
- 7) 윤일희, 민경덕, 김경익, 1994, 대구 지역의 기상특성 및 확산 모델의 개발 II, 도시 열섬 현상에 관한 사례 연구, *한국기상학회지*, 30(2), 303-313.
- 8) Pankrath, J., 1975, Numerische Modellierung der Substanzund Waermeausbreitung in der Wirbelstroemung in einer Gelaendevertiefung, *Beitr. Phys. Atmosph.*, 48, 327-348.
- 9) Kotake, S. and T. Sano, 1981, Simulation model for air pollution in complex terrains including streets and buildings, *Atmospheric Environment*, 15, 1001-1009.
- 10) Sievers, U. and W. G. Zdunkowski, 1986, A microscale urban climate model, *Beitr. Phys. Atmosph.*, 69(1), 13-40.
- 11) 박영연, 이태영, 1990, 서울에서의 겨울철 바람장에 관한 수치적 연구, *한국기상학회지*, 26(4), 247-262.
- 12) 김병곤, 1993, 지상 관측자료를 이용한 3차원 바람장의 추정, *서울대학교 대학원 석사학위논문*, 64pp.
- 13) 이승우, 이동규, 1998 ; 수도권 지역에서 지표 및 지형효과에 따른 국지규모 대기 순환의 수치 실험, *한국기상학회지*, 34(1), 1-19.
- 14) 임영권, 오성남, 윤원태, 전영신, 2000 ; 서울 지역의 지형 및 토지 이용도에 따른 3차원 바람장 산출에 관한 연구, *한국기상학회지*, 36(2), 229-244.
- 15) 기상연구소, 1994, 바람 측정시 장애물의 영향에 관한 연구(I), MR94I-007, 116.
- 16) 기상연구소, 1995, 바람 측정시 장애물의 영향에 관한 연구(II), MR95H-007, 65.
- 17) 부경은, 전영신, 오성남, 2000, 여의도 지역의 바람장 수치 실험, *한국기상학회지*, 36(3), 327-336.
- 18) Baik, J. J. and J. J. Kim, 1999, A Numerical Study of Flow and Pollutant Dispersion Characteristics in Urban Street Canyons, *J. of Appl. Meteor.*, 38(11), 1576-1589.
- 19) Baik, J. J., R. S. Park, H. Y. Chun and J. J. Kim, 2000, A Laboratory Model of Urban Street-Canyon Flows, *J. of Appl. Meteor.*, 39(9), 1592-1600.
- 20) 안광득, 2002, 미세규모 기후모델을 이용한 대구

- 종합 운동장 주변의 국지 순환 모의, 경북대학교 대학원 석사학위논문, 63pp.
- 21) 민경덕, 김상윤, 윤지원, 장상급, 2003, 우주센터 사업부지내 기상장 수치모의, 과학기술부 보고서, 136pp.
- 22) 윤지원, 민경덕, 2004, 지형과 지표효과를 고려한 외나로도 우주센터의 국지규모 바람장 수치모의, 한국지구과학회지, 25(8), 660-670.
- 23) 안광득, 이용희, 조천호, 민경덕, 2003, 미세규모 기후모델을 이용한 2002 월드컵 경기장 주변의 국지 순환 모의, 한국기상학회지, 39(5), 587-605.
- 24) Blackadar, A. K., 1962, The vertical distribution of wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 67, 3095-3102.
- 25) Wu, S. S., 1965, A study of heat transfer coefficient in the lowest 400 meters of the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 70, 1801-1807.
- 26) Stull, R. B., 1988, An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publishers, 666pp.
- 27) Hirt, C. W. and J. L. Cook, 1972, Calculating three-dimensional flows around structures and over rough terrain, *J. Comp. Phys.*, 10, 324-340.
- 28) Baines, W. D., 1963, Effects of velocity distribution on wind loads and flow patterns, Proceedings of the Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures, England, June 26-28, 197-225pp.
- 29) Lighthill, M. J., 1956, Drift, *J. of Fluid Mech.*, 1, 31-53.
- 30) 임은하, 한종일, 엄원근, 1996, 유입류의 시어와 외관비가 빌딩 주위 바람장에 미치는 영향에 관한 3차원 수치실험, 한국기상학회지, 32(2), 303-313.