

도시기후 평가와 방재를 위한 도시기상 수치모의

Numerical Simulation for Urban Climate Assessment and Hazard

오성남 (기상청 지구대기관측소 소장)

Abstract

Since it is important to understand the bio-climatic change in Seoul for ecological city planning in the future, this paper gives an overview on bio-climate analysis of urban environments at Seoul. We analyzed its characteristics in recent years using the observations of 24 of Automatic Weather Station (AWS) by Korea Meteorological Administration (KMA). In urbanization, Seoul metropolitan area is densely populated and is concentrated with high buildings. This urban activity changes land covering, which modifies the local circulation of radiation, heat and moisture, precipitation and creating a specific climate. Urban climate is evidently manifested in the phenomena of the increase of the air temperature, called urban heat Island and in

addition urban squall line of heavy rain. Since a city has its different land cover and street structure, these form their own climate character such as climate comfort zone.

The thermal field in urban area such as the heat island is produced by the change of land use and the air pollution that provide the bio-climate change of urban eco-system. The urban wind flow is the most important climate element on dispersion of air pollution, thermal effects and heavy shower. Numerical modeling indicates that the bio-climatic transition of wind wake in urban area and the dispersion of the air pollution by the simulations of the wind variation depend on the urban land cover change. The winds are separately simulated on small and micro-scale at Seoul with two kinds of kinetic model, Witrak and MUK-LIMO.

1. 서론

도시 생태와 연관하여 도시화로 인한 토지이용 변경은 녹지 감소, 도로 포장율의 증가, 도시 하천의 변화, 등으로 기온상승과 대기오염의 집중 등 주변 교외지역과는 다른 도시 특유의 기후를 형성하고 이에 따라 발생하는 도시 스콜라인(city squall line)은 국지적 호우의 원인이 되고 있다(Olgyay, 1973). Klysiak and Fortuniak (1999)에 따르면 도시기후의 대표적 특성은 도시 열섬으로서 이는 주변교외지역보다 도시지역에 건축물의 증가로 인해 기온이 현저히 증가되는 현상이다(Sievers, et al. 1986). Stull (1988)은 열섬(heat Island) 효과의 원인은 국지적 바람 특성과 크게 연관이 있음을 밝힌바 있다.

이와 연관하여 본 연구에서는 서울의 도시기후를 주위 근교기후와 비교하고 이를 도시 지표구조물에 따른 기상변화를 조사하여 그 특성을 정의함이 목적이다. 이를 위하여 도시 효과가 가장 높은 지역을 중심으로 도시 열섬 효과와 바람 구조를 분석하여

생태계와 국지적 기상 변화에 미치는 원인을 분석하고 도시의 지표 변화가 도시기상에 미치는 효과를 살펴보았다. 이를 위하여 기상청에서 서울시 24개 지점과 교외지역 5개 지점에서 관측한 자동기상관측(Automatic Weather Station, AWS) 값을 분석하여 보았다. 분석된 요소는 기온, 습도, 기압, 그리고 바람으로써 분석에는 1999년 1월, 4월, 7월과 11월의 24시간 시간별 관측 값을 평균하여 구한 일별 값을 10% 미만의 결측률 범위 내에서 서울의 도시기후를 주위의 근교 기후와 비교하여 이용하였다.

2. 서울 지역 도시의 기온 분포

서울의 기온을 Fig.2와 Fig.3과 같이 월별 평균과 월별 최저기온에 대하여 1월, 4월, 7월 및 11월의 수평분포를 조사하여 보았다. 이 경우 도심지로 향할수록 기온이 상승하는 경향이 뚜렷이 나타났다. 기온이 가장 높은 기온 핵 지역이 청량리의 강북 도심지, 강남 아파트 지역, 강동구 중랑지역과 영등포 및 양천 일대에 나타났으며 관악산과 북한산이 위치한 서울 외곽 지역은 공통적으로 기온이 감소함을 나타내었다. 그리고 청량리의 강북도심지를 제외하면 대체적으로 한강 남쪽지역의 기온이 한강 북쪽 지역 기온보다 높게 나타났다.

월별 최저기온 분포를 보면 월별 평균기온과는 달리 영등포 및 양천 일대의 높은 기온핵 지역이 청량리, 강남지역보다 보다 강하게 나타났다. 이에 대하여 조하만 등(1988)의 결과와 비교해 볼 때 과거에는 동대문 및 종로일대의 강북 도심지와 강남 아파트촌, 강동구 일대가 고온 자역으로 나타났으나 본 연구에서는 이들 결과보다도 영등포지역으로 고온역이 더 확대 진행되고 있는 것으로 나타났다.

또 높은 기온핵이 위치한 지역을 Figs. 2의 결과와 같이 살펴보면 지표 피복에 따른 열용량의 차이에서 비롯됨을 알 수 있다. 즉, 토양과 녹지가 많은

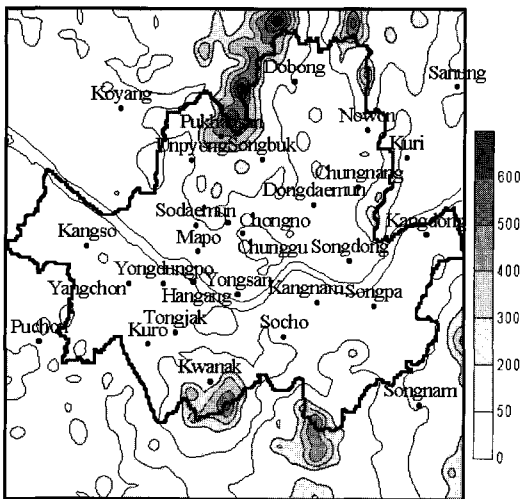


Fig. 1. The location of Automatic Weather Station. Scale bar means the height(m) of topography

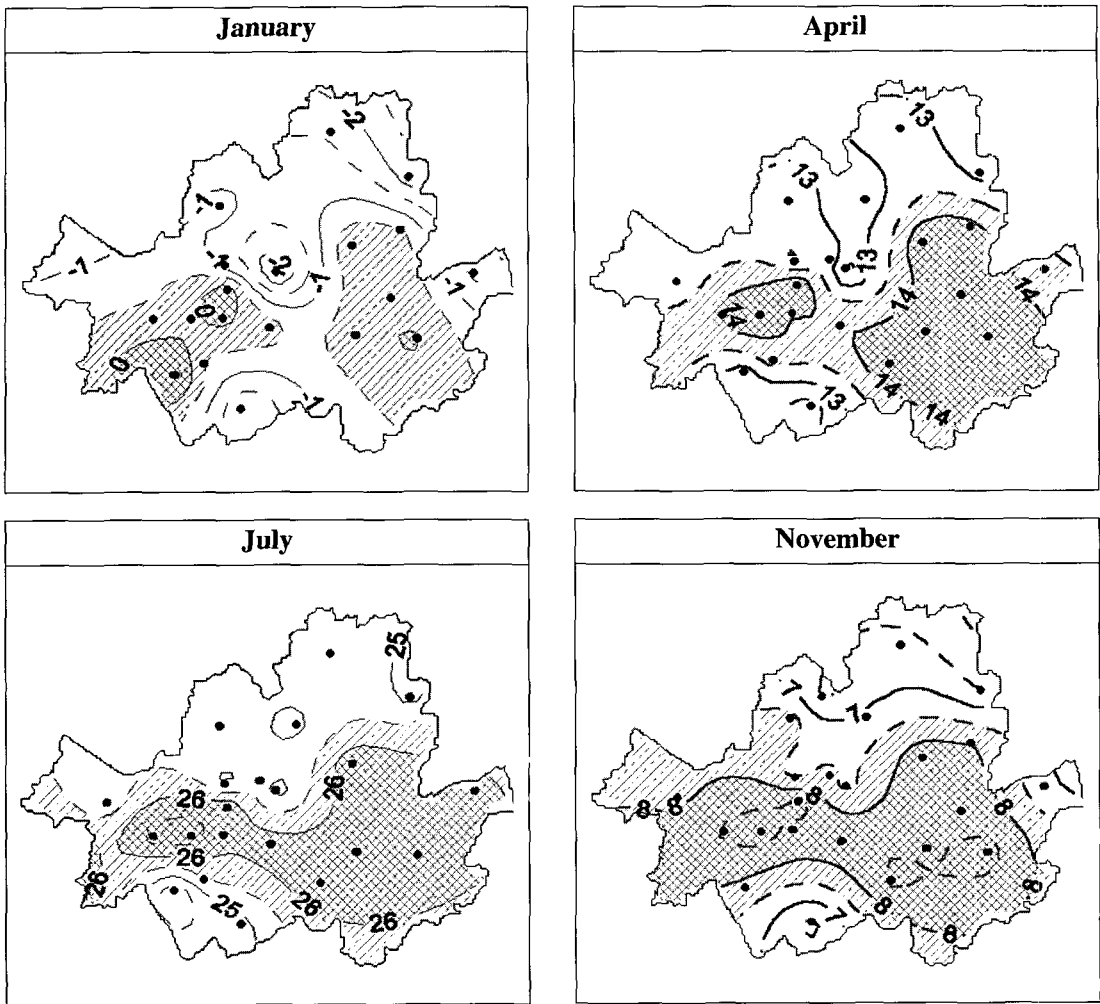


Fig. 2. Monthly mean temperature (C) in Seoul for January, April, July and November, 1999. Black dots designate AWS. Contour interval is 0.5°C. Relative warm area is shaded.

교외지역은 도시의 높은 건물지역보다 열용량이 상대적으로 적음으로서, 일사(solar radiation)에 노출되면 도시지역보다 교외지역에서 복사에너지의 교환이 활발하여 일몰 후 빠르게 냉각됨을 알 수 있다. 반면 도시지역의 열 지체 효과로 인하여 교외지역보다 가열 및 냉각 시간이 지연되어 야간에 교외지역보다 상대적으로 기온이 높게 나타난다. 열용량이 높은 콘크리트 지역은 최저기온의 상승을 부추기고 이러한 현상이 일 평균 기온장에 반영됨으

로써 도시기후의 독특한 특성을 형성되게 한다. 이에 대하여 Lowry(1991)는 도시의 콘크리트 기온 상승지역은 대기이류(상승)에 의한 지표의 수렴현상으로 주위의 오염이 모이게되고 수렴된 오염 공기피는 도시지역의 기온 역전층에 덩게를 이루어 높은 대기오염도를 이루게 하며, 이들 오염이 aerosol 과 같은 미세먼지로 되어 있을 때 여름철 집중호우의 원인이 될 수 있음을 지적하였다.

도시지역의 열섬현상의 강도를 자세히 파악하기

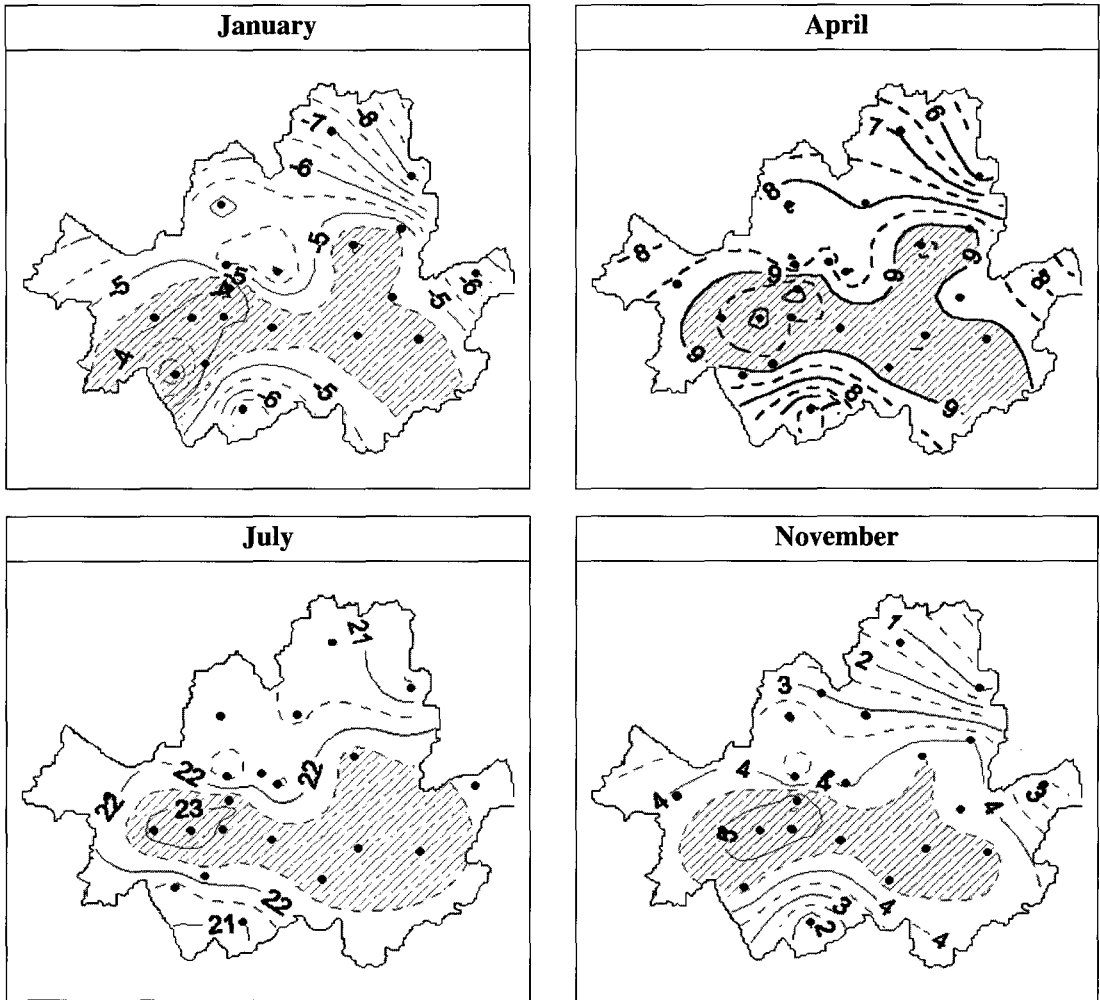


Fig. 3. Monthly distribution of daily mean minimum temperature in Seoul (1999)

위해 월별 최저기온(Fig. 3)과 월별 평균기온 분포에서 고온 핵으로 보였던 영등포의 기온분포를 도시 외곽 지역인 사능의 분포와 비교하여 보았다.

영등포와 사능의 기온비교는 Fig.4와 같이 영등포의 기온에서 사능의 기온을 제거한 값(이하, ΔT_{u-s})을 시간별로 조사하는 방법을 택하였다. 따라서 0600 LST와 2400 LST에 ΔT_{u-s} 의 값이 매우 컸으나 1200 LST와 1800 LST에는 상대적으로 작게 나타났다. 여기서 도심지와 근교간의 토지피복물질

의 복사 냉각을 차이에 따라 야간에 도시열섬이 뚜렷이 발달하는 것을 볼 수 있어 도시의 대기오염 섬과 열대야 현상을 형성할 수 있음을 알 수 있다.

3. 도시 기후 Comfort Zone 분석

도시 생태 조건의 쾌적 기후 구역(이하 기후 comfort zone)은 인간이 옷을 걸치지 않은 휴식상태에 있을 때 혈관 운동반사만으로 체온조절이 가능한

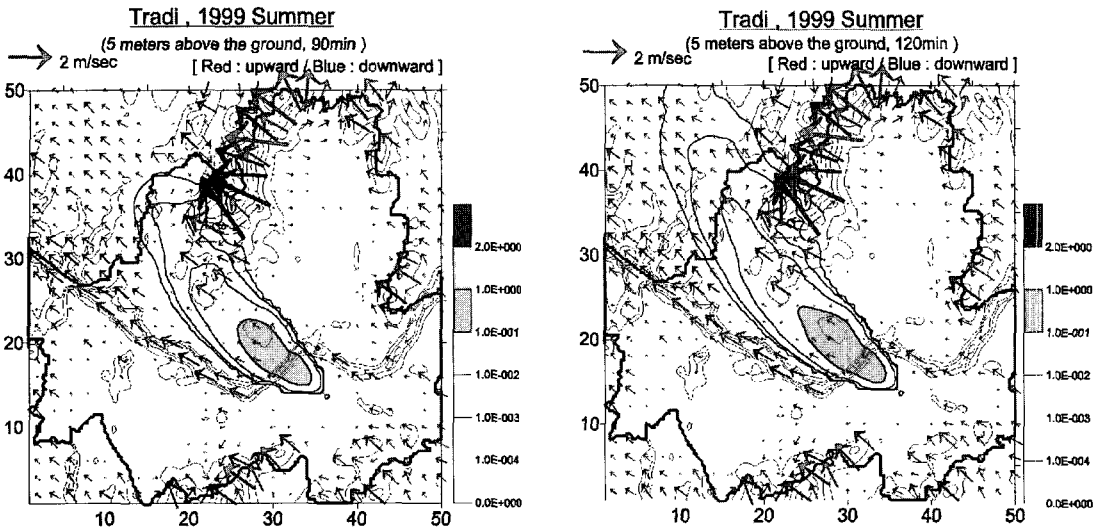


Fig. 4. Simulated horizontal wind, transport and diffusion field of non-reactive pollutant at stack height level at the time of a) 90 minutes and b) 120 minutes after emission, respectively. The initial wind direction data corresponds to most frequent wind in July, 1999.

범위에 대한 실외기온 구간을 의미한다. Comfort zone 내에서는 인간의 대사가 증가해서 열 생산이 높아지고 이것에 의하여 체온조절이 이루어진다. 따라서 기후comfort zone보다 기온이 상승하면 땀흘림에

의하여 체온조절이 이루어진다. 이 comfort zone은 기온과 습도, 풍속과 일사를 고려하여 인간이 느끼는 쾌적도를 나타냄으로서 도시지역의 쾌적 구간을 결정하게 한다. 이에 대하여 학자마다 그리고 도시에 따라 그 기준 값이 다르며, 특히 기온에 따라 분류한 Brooks(1981)에 따르면 영국의 경우 comfort zone은 58 - 70 F 이고, 미국의 New York - New Jersey 지역 경우는 69 - 80 F이고 상대 습도는 30 - 70% 이다. 이러한 기준은 적용 도시에 따라 임의성이 있으나 다양한 도시환경과 복잡한 건축구조물에 의한 영향을 상호 비교하여 살펴볼 수 있는 기준을 제시한다는 점에서 중요하다고 하겠다. 이들 결과를 바탕으로 서울시의 쾌적도를 조사하여 보았다.

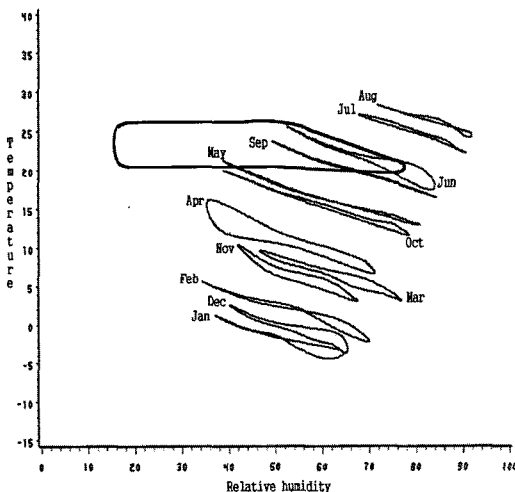


Fig. 5. Bioclimatic evaluation for Seoul using the monthly mean temperature and relative humidity in 1995.

분석에 사용한 자료는 기상청의 송월동 관측소에서 측정된 3시간별 관측 일기상 자료로서 1995년 이후의 기온과 상대습도 관측값을 월별 평균하여 Fig. 5와 같이 분석하였다. 이 결과에 따르면 일 출후 기온이 상승하고 상대습도가 낮아지며 일몰후 다시 기온이 하강하고 상대습도가 높아지는 기온과 상대습

도의 일 변화가 뚜렷이 나타났다. comfort zone에 포함되는 것은 6월과 9월로서 서울에서 체험적으로 알려진 월별 쾌적도가 잘 나타나고 있으며 5월은 부분적으로 쾌적한 것을 알 수 있다. 7월과 8월은 기온이 높고 상대습도가 매우 높아 쾌적도에서 벗어나고 있으며 1월, 2월, 3월, 4월, 10월, 11월, 12월은 상대습도는 쾌적도 기준에 속하지만 기온이 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 따라서 보다 정확한 comfort zone이 개발된다면 시민의 생활에 쾌적한 시기를 알려주고, 또 comfort zone 분석에 지역과 연도별 정보를 추가한다면 각 지역별 도시기후의 차이와 연도별 변화 변동에 대한 정보를 얻게 됨으로서 도시 계획에 있어 중요한 자료로 활용될 수 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5의 경우는 New York - New Jersey 기후에 따른 comfort zone을 적용한 결과이다.

4. 도시 바람 순환 구조 모의실험

도시화는 대기환경에서 국지적으로 저층의 바람에 현저한 변화를 가져오는데 이는 도시 지표의 거칠기 변화에 기인하는데, 도시 구조물들은 바람순환구조에 지면 마찰을 가하여 풍속을 현저히 약화시키고 불규칙한 난류를 발생시키는 것이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 서울시의 토지이용도에 따른 토지피복현상이 반영된 바람장 구조를 서울시 지역과 여의도 지역에 대하여 살펴보았다. 여기서 토지 이용 변경이 가져오는 지면 마찰 증가는 국지적 기류의 흐름을 감소시켜 도시 지역 내 대기오염 발생에 직접적 영향을 주는 환기 능력에 장애를 가져 올 수 있음을 예상할 수 있다.

먼저 기상청 송월동 관측소와 오산 기상 관측지점의 1999년도 바람 관측자료를 이용하여 서울시 지형에 따른 계절별 바람의 통계적 특성을 조사하였다. 계절별 풍향으로 1월, 4월, 7월 11월을 선택하였으며 1월, 4월, 11월은 북서풍 계열로 모사풍계가

유사한 반면 7월은 남동풍으로 다른 결과를 보였다. 이 월별 평균 풍향과 평균 풍속값을 이용하여 서울시에 대하여 600m 격자 간격으로 여름에 대하여 모의한 결과를 제시한다. 사용한 수치모형은 WiTraK (Windfeld-, Transport- und Klimatologie Programm) 이고 모델의 바람장은 서울의 지형과 토지 이용도에 따른 지면 거칠기, 대기 안정도 효과 등이 고려되어 계산된다.

바람장을 보면 북한산, 관악산, 남산 등의 산악지형에 의하여 풍속과 풍향이 변화되고 이것이 오염물질의 확산 방향이나 속도, 수렴을 지배한다는 것을 알 수 있다(Fig. 4). 토지 이용도 역시 풍속에 많은 영향을 주는데 도심지나 산지에서 풍속의 약화가 두드러진 반면 낮은 구조물들이 존재하지 않는 한강 지역바람이 주변 육지의 지역보다 상대적으로 강하게 부는 것이 모의되었다. 대기의 안정도가 강할수록 지형에 따른 풍향의 변화정도가 심하였고 산 정상에서의 풍속강화와 풍하층에서의 공기의 수렴구조가 더욱 강하게 나타났다. 즉 안정할수록 바람은 지형의 영향이 크게 나타난다는 것을 확인할 수 있었다.

도시지역 내의 부경온과 오성남(2000)이 지적한 바와 같이 바람 장은 오염원으로부터 방출된 오염물질 확산의 수평거리, 수직거리, 확산속도 등의 분포에 절대적인 영향을 미치므로 서울시내에 점 오염원으로 가정하여 굴뚝에서 배출된 비반응 물질의 단거리 수송 수치실험에서 풍속, 대기안정도와 지형이 확산 분포 수평 거리에 미치는 영향을 살펴보았다. 점 오염원으로부터 활동 후 약 90분 정도 후에 서울의 서쪽 경계까지 확산되어가는 것이 나타나고 북한산에 의해 확산 방향이 약간 바뀌는 것을 볼 수 있다. 지형의 효과로 인한 확산장의 방향 전환은 앞서 모의된 바람분포를 생각해 볼 때 안정한 대기일수록 커질 것임을 생각해 볼 수 있다. 대기안정도는 연직 확산 분포에도 영향을 미치는데 안

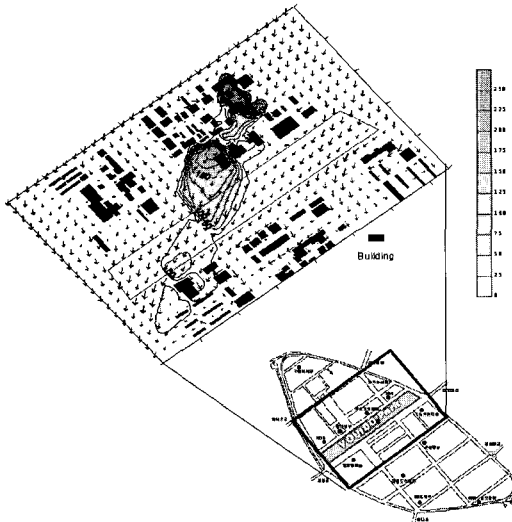


Fig. 6. Wind field and diffusion The buildings distribution in experiment area of Youido.

정할수록 연직으로 확산되는데 걸리는 시간이 증가함을 파악하였다.

또 도시의 구조물들이 바람순환구조에 지면 마찰을 가하여 풍속을 현저히 약화시키고 불규칙한 난류를 발생시키는 것에 대해 더욱 상세히 보기 위해

서는 수십m 이하의 고해상도 미세 국지 바람장 변화 모델 MUKLIMO를 사용하여 미세한 바람장과 가상의 오염원을 대상으로 한 확산장 모의실험을 하였다. 실험대상지역은 최근 공원이 조성된 여의도 공원 지역으로 선정하였고 모델 경계자료로 여의도 지역 10m×10m 해상도의 수치고도 및 건물고도 자료를 제작 사용하였다(Fig. 6).

실험결과 중립대기의 바람 구조가 모의되었는데 지표층의 바람장의 특성과 빌딩으로 인한 바람장의 장애 효과가 잘 반영되는 것을 볼 수 있었다. 그리고 공원조성으로 인해 모델 하층에서는 뚜렷한 풍속의 감속이 일어나는데 이는 풍속과 풍향을 변화시켜도 동일한 결과를 보였다. 즉 공원내 수목을 고려한 경우 수목이 없을 경우의 풍속이 지상 6m 고도에서 최대 47%정도까지 감속되는 것이 공통적으로 모사 되었다(Fig. 7).

5. 결과 요약

도시지역의 상세한 기상정보 생산을 위해 서울시

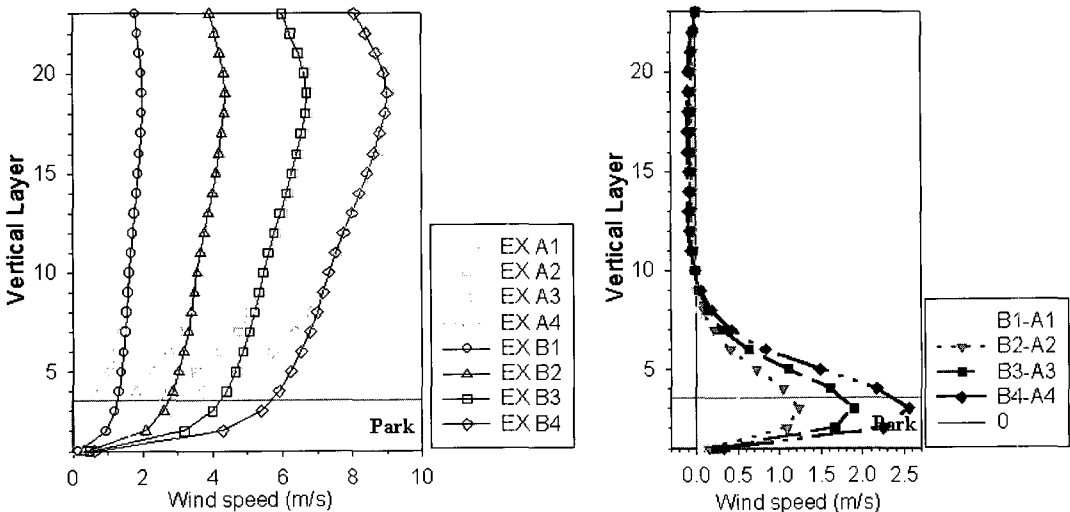


Fig. 7. Vertical distribution of wind speed (m/s) in Youido park and the wind speed difference due to the Youido park establishment.

AWS 관측 자료를 이용하여 도시열섬현상을 분석하고 수치모형을 이용하여 서울시와 여의도 지역의 바람장과 확산장 분포를 살펴보았다. 서울시의 최근 도시 열섬 현상 분포와 강도를 파악할 수 있었으며 기존 연구와 비교하여 볼 때 이러한 현상이 녹지 감소와 연관성이 있음을 알 수 있었다. 서울시 기류의 흐름과 오염물질 확산장 분포 모의 실험에서는 서울시의 지형과 토지이용도의 영향이 매우 중요함을 알 수 있었으며 여의도 지역의 미세 바람 장과 대기오염물질 확산효과를 국지규모 바람장 변화모의에서 성공적으로 모사 하였으며 그 결과 공원조성이 가져오는 바람장 변화 영향을 알 수 있었다.

이 연구의 모델 실험과 AWS 관측자료 분석 및 GIS 결과는 도시환기의 효율화, 바람장 변화의 최소화, 녹지 확보 등에 활용되어 도시호우 예측을 위한 수치모의 및 도시열섬, 대기오염 확산 등의 인위적 영향을 완화시켜 쾌적한 도시 환경 조성을 위한 응용정보로 활용될 수 있다.

〈감사 : 이 연구는 과학기술부 지정 기상연구소 국가지정연구실의 “한반도 배경대기 측정 및 기후변화 감시 기술 개발” 연구과제(접수번호 M1-0001-00-0018)의 지원으로 수행되었습니다.〉

참 고 문 헌

- 조하만, 조천호, 정귀원, 1988: 서울의 도시화에 따른 기온 변화. 한국기상학회지, 30(1), 35-56.
- 부경은, 오성남, 2000: 1999년 서울지역 기온의 시공간 분포 특성. 한국기상학회지, 36(4), 499-506.
- Kerschgens, M., W. Brueher, F. Steffany, 1994: WiTraK, Windfeld, Transport und Klimatologie Programm, Institut fuer Geophysik und Meteorologie der Universitaet zu Koeln.
- Klysik, K. and K. Fortuniak, 1999: Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz. Poland, Atmos. Environ.. 33, 3885-3895.
- Lowry, W. P. and S. C. Lowry, 1991: Atmospheric ecology for designers and planners. Van Nostrand Rein Hold, New York, 106-274.
- Olgay, V., 1973: Design with Climate, Bioclimatic approach to architecture regionalism. Priceton University Press, 14-112.
- Sievers, U., 1995: Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode, Meteorol. Zeitschrift. N.F. 4, 3-15.
- Sievers, U., and W. G. Zdunkowski, 1986: A micro-scale urban climate model, Beitr. Phys. Atmosph., Vol. 69, No 1. 13-40.
- Simpson, J. R., D. G. Levitt, C. S. B. Grimmond, E. G. McPherson, and R. A.
- Rowntree, 1994: Effects of vegetative cover on climate, local scale evaporation and air Conditioning energy use in urban southern California. 11th conference on biometeorology and aerobiology, San Diego, California, March 7-11, 1994, 45-348.
- Stull, R. B., 1988: An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publishers, 666pp.