

## 춘천지역 도시열섬의 특성과 대기질에 미치는 영향

### Aspects of Urban Heat Island and It's Effect on Air Pollution Concentration in Chunchon Area

이종범 · 김용국 · 김태우

강원대학교 환경학과  
( 원고접수 : 1993. 10. 4 )

Chong-Bum Lee, Yong-Goog Kim and Tae-Woo Kim

Dept. of Environmental Science, Kangwon National University  
( Received 4 October 1993 )

#### Abstract

An observational study of urban heat island was carried out using field data obtained during 6 days in May and August 1992 in Chunchon (population size 180,000). Air temperature was measured at 64 points along two sampling routes by thermistors attached to cars. Both routes cover urban and rural area and across the center of urban area. Continuous observation of air sonde was performed to clarify heights of nocturnal boundary layer (NBL) at the center of urban area. Surface meteorological observations were performed at both urban and rural sites. This study showed that heat island phenomena was obviously observed at the urbanized area during the night time with low wind speed. The average NBL heights extended to about 100 meters, but varied with meteorological conditions. After sunset, the air temperature decreased with time at both sites and cooling rate at the urban site was greater than the rural site. The maximum heat island intensity was 7.5°C at 21 LST, May 4. Using the two meteorological data sets obtained from urban and rural sites, the air pollutant concentration was calculated by Gaussian plume model which can obtain not only horizontal distribution of concentration but also vertical distribution. The result indicated that the concentration resulted from urban meteorological data set was lower than that from rural meteorological data set. It was also calculated that the air pollutant extended to higher level in urban meteorological data set than that in rural meteorological data set.

#### 1. 서 론

도시에서는 주변의 교외지역에 비하여 고온의 공기층을 형성하게 되는 도시열섬(urban heat island) 현상이 자주 나타난다. 일반적으로 도심(u)과 교외 지역(r)의 기온차( $\Delta T_{u-r}$ )로 표현되는 열섬강도(heat island intensity)는 주로 구름이 없고 바람이 약한 날의 야간에 강하게 나타나며, 계절별로는 겨

울에 강하고 여름에 약한 특징이 있다(Oke, 1978). 도시열섬 현상의 요인으로서 도시지역의 인구집중에 따른 난방 및 차량 등에 의한 인공열의 증가, 건물 등 구조물에 의한 거칠기 길이의 변화, 표면의 열적 성질의 차이 및 지표면에서의 증발잠열의 차이 등을 들 수 있다(Ackerman, 1985). 이러한 도시열섬 현상으로 인하여 대도시에서는 강우량의 변화(Hjelmfelt, 1982)가 나타날 수 있으며, 도시지역

내에서 특유한 바람의 순환계가 형성되어 대기오염 물질의 확산특성이 시골지역과 다르게 나타날 수 있다(Draxler, 1986). 이처럼 도시열섬의 규모와 현상은 위의 여러가지 요인에 따라 시공간적으로 다양하게 나타난다(Oke, 1979).

야간에 지표면의 복사냉각에 의해 지표부근에서 형성되는 야간 경계층(nocturnal boundary layer)은 안정한 층이나 이 층 내에서도 난류가 존재하여 대기오염물질의 확산이 일어날 수 있다(Nieuwstadt, 1985). 이러한 특성 때문에 야간 경계층 내의 혼합층을 난류가 존재하는 고도까지 그 높이로 정의하기도 하지만 정확한 난류 측정자료가 없는 경우에는 온위의 경도가 0이 되는 고도까지로 간주하기도 한다(Stull, 1989). 한편 도시지역에서는 도시열섬이 발달하여 야간중에도 비교적 높은 고도까지 난류에 의한 혼합이 일어나므로, 도시지역을 대상으로 대기 확산모델을 적용하는 경우 도시열섬의 수평적인 구조는 물론 연직적인 구조도 고려할 필요가 있다.

한반도의 중부 내륙지역에 위치한 춘천은 인구 약 18만의 중소규모 도시로서 주변은 그린벨트로 둘러싸여 있어 도시화된 지역의 직경은 약 4km 정도이며 도시지역과 교외의 경계가 비교적 뚜렷하다. 이와 같이 제한된 면적에 비교적 인구가 밀집된 지역이므로 열섬효과를 관측하기에 적당하다.

본 연구에서는 춘천지역에서 기상측정을 실시하여 열섬의 시간변화와 공간적인 분포 특징을 밝히고, 오염물질의 공간분포를 계산할 수 있는 Gaussian plume model을 작성하여 측정된 기상자료들을 바탕으로 도시열섬 현상이 대기오염 농도의 분포에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

## 2. 방 법

### 2.1 수평 기온 분포 관측

본 연구에서는 춘천지역을 대상으로 도심과 교외 지역을 포함하는 직경 약 9km 이내의 지역에 대하여 그림 1과 같이 2개의 노선을 따라 총 64개의 측정점을 선정하여 차량에 의한 이동 관측으로 기온을 측정하였다. 이들 2개의 노선은 각각 A지점으로부터 B지점까지의 제 1 노선과 C지점과 D지점을 연결하는 제 2 노선이며, A, B, C, D 네 지점은 모두 교외지역에 해당한다. 또한 각 노선은 도시의 중심을 통과하도록 하였다. 각 측정점의 간격은 약 200-250m 정도로 하였으나 도심에서는 자세한 측정을 위하여 약 50-100m 정도의 간격으로 선정하였다. 이동 관측은 1992년 5월 2일부터 4일까지 봄철의 3일간(1차 관측)과 1992년 8월 4일, 5일 그

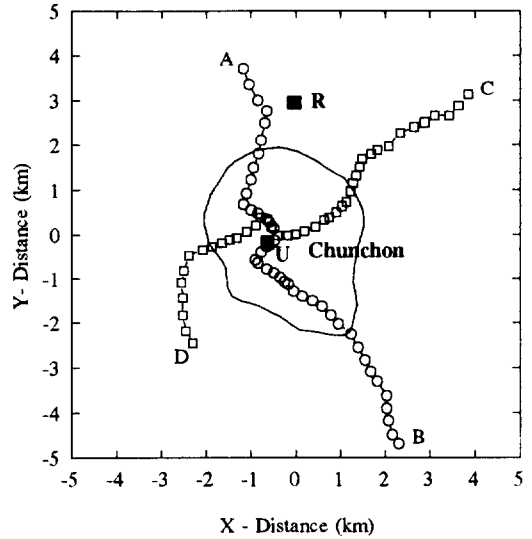


Fig. 1. Observation routes and sites of meteorological towers.

리고 10일의 여름철 3일간(2차 관측)에 걸쳐 실시하였으며 19시부터 24시까지 매시간별로 관측하였다.

기온의 이동 관측을 위하여 감속도가 비교적 빠른 서미스터 온도계를 이용하였으며 이를 두대의 차량에 부착하여 각 노선을 이동하면서 기온을 관측하였다. 도로상에서 측정되는 기온은 차량의 엔진으로부터 배출되는 열에 의하여 직접적인 영향을 받을 수 있고, 포장도로 하층부에서는 고도에 따른 기온 경도가 클 경우 주행에 따른 대기 혼합 정도가 기온에 민감하게 영향을 미칠 수 있으므로(이종범과 김문일, 1979), 서미스터의 부착 위치는 지상 2.2m로 하였고, 주행속도는 평균 40km/hr가 유지 되도록 하였다. 한편 차량을 이용하여 노선을 1회 주행하는 데는 약 25분이 소요되는 바 매 시각별 수평 기온 분포를 분석하기 위하여서는 주행시간 중의 기온의 시간변화를 보정해줄 필요가 있다. 따라서 도심과 교외지역에 설치된 기상탑의 3m 고도에서 측정된 기온자료로부터 두지점의 시간별 기온 변화율을 구한 후, 각 측정지점과 두 기상탑의 거리와 주행 경과시간을 고려하여 각 관측지점에서 측정된 기온을 보정하였다.

### 2.2 기상탑 관측 및 상층기상 관측

도시열섬은 도심과 이를 둘러싸고 있는 교외지역의 기온이 다르게 나타나는 현상이므로 두 지역에서의 시간에 따른 기온 변화율은 매우 중요하다. 또한 도시지역 내에서는 건물이 밀집되어 있으므로

거칠기 길이가 커서 교외지역 보다 풍속이 약하며 풍향 또한 다르게 나타날 수 있다. 이러한 차이를 파악하기 위하여 도심과 교외의 두지역에서 이동관측 기간중 연속적으로 기상측정을 하였다. 그림 1에서 U는 도시의 중심에 해당하는 지역으로 이 지역 내에서 비교적 평탄하고 넓은 국민학교 운동장에 8m 기상탑을 설치하였으며, R은 U지점으로부터 약 3.2km 떨어진 춘천기상대이며 관측노장에 12m의 기상탑을 설치하였다. 기상요소로는 도심에서 3m 고도의 기온과 8m 고도의 기온, 풍향, 풍속 등을 측정하였고 교외지역에서는 3m 고도에서 기온 및 풍속을, 12m 고도에서는 기온, 풍향, 풍속 등을 측정하였다. 이들 각 기상요소의 측정시간은 5초 간격으로 하였으며 평균화 시간은 10분으로 하여 매 10분간의 평균치를 자료수록장치(data logger)에 수록하였다. 기온의 이동관측이 진행되는 같은 시간에는 열섬의 연직분포를 관측하기 위하여 도시 중심부인 U지점에서 air sonde를 이용한 상층기상을 측정하였다. 측정요소는 고도별 기온, 습도, 기압 등이며 3-5m 간격으로 지상 약 800m 고도까지 매시간 관측하였다.

2.3 3차원 Gaussian plume model

본 연구에서는 도시 열섬현상이 대기질에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 3차원 공간에서 각 격자점의 농도를 계산할 수 있도록 모델을 작성하였다. 대기 확산모델의 기본식은 지표면 및 상층반사를 고려한 Gaussian plume equation으로 다음과 같다.

$$C(x,y,z) = \frac{Q \times 10^6}{2\pi u \sigma_x \sigma_z} \left[ \exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right\} \right]_{m=-}^{+} \sum \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H+2jL)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \left[-\frac{(z+H+2jL)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

여기서 C는 x, y, z 좌표상에서의 오염물질 농도 (μg/sec), Q는 배출량(g/sec), u는 풍속(m/sec), σ<sub>y</sub>는 연기의 수평 확산폭(m), σ<sub>z</sub>는 연직 확산폭(m)이며 H는 유효굴뚝 높이(m)로서 Brigg(1972)의 연기 상승식을 이용하여 계산된다. 또한 n은 지표면과 혼합층 고도(L)에서의 반사를 고려하는 항으

로 여기서는 3회 반사하는 것으로 하여 -3부터 3까지의 값을 취하였다. 모델의 계산영역은 x축(동서방향), y축(남북방향), z축(연직방향)으로 각각 40개의 격자망을 구성하였으며 x축 및 y축의 격자점 거리는 400m, z축은 5m로하여 수평거리 16km, 고도 200m 까지를 계산하도록 하였다.

기상자료는 도심에 설치한 기상탑에서 측정된 자료와 교외지역의 기상탑에서 측정된 자료중 1992년 5월 14일 19시 자료를 입력하여 각각 모델에 이용하였으며, 이때 안정도계급은 기상탑에서 측정된 두 고도에서의 기온과 한 고도에서의 풍속자료만으로 Pasquill 안정도계급을 산출(이중범과 김용국, 1990)하여 입력하였다. 야간혼합층 고도는 대상지역 내에서 수평적으로 균일하게 분포한다고 가정하되, 도심의 경우에는 air sonde로부터 측정된 고도를 직접 입력하였으나 교외지역의 기상자료를 이용하는 경우에는 50m로 입력하였다. 이때 풍향은 계산된 농도의 결과를 비교하기 위하여 교외 및 도심에서 측정된 풍향의 평균값을 취하였다. 한편, 배출량 자료는 춘천지역의 1990년 하계를 대상으로 선 오염원을 포함한 면오염원 및 점오염원으로부터의 SO<sub>2</sub> 배출량자료를 조사하였으며 모델링 대상지역의 총 배출량은 17.12g/sec였다. 본 연구에서는 이와같이 도심에서 측정된 기상자료를 입력한 경우와 교외지역에서 측정된 자료를 입력한 각 경우의 결과를 비교, 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수평 기온 분포

도심과 교외지역의 기상탑 측정자료 중 일몰 이후인 19시부터 자정까지 6시간 동안의 풍속 및 풍향의 평균치는 표 1에 제시하였다. 도심에서의 풍속은 교외지역에 비하여 50-87% 정도이며, 풍속의 측정고도가 교외가 다소 높은 것을 감안하더라도 도시에서의 풍속 감소 현상은 뚜렷하게 나타났다. 또한 바람이 약했던 날의 풍향은 도심과 교외지역이 조금씩 서로 다르게 나타났다.

Table 1. Mean wind speed and wind direction from sunset to midnight in urban and suburban.

|                       |          | May 2 | May 3 | May 4 | Aug. 4 | Aug. 5 | Aug. 10 |
|-----------------------|----------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|
| wind speed<br>(m/sec) | urban    | 1.48  | 1.43  | 0.35  | 2.30   | 0.69   | 0.54    |
|                       | suburban | 2.55  | 2.04  | 0.41  | 2.69   | 0.79   | 0.66    |
| wind direction        | urban    | SW    | SW    | SW    | NNE    | NE     | W       |
|                       | suburban | SW    | S     | S     | NNE    | N      | N       |

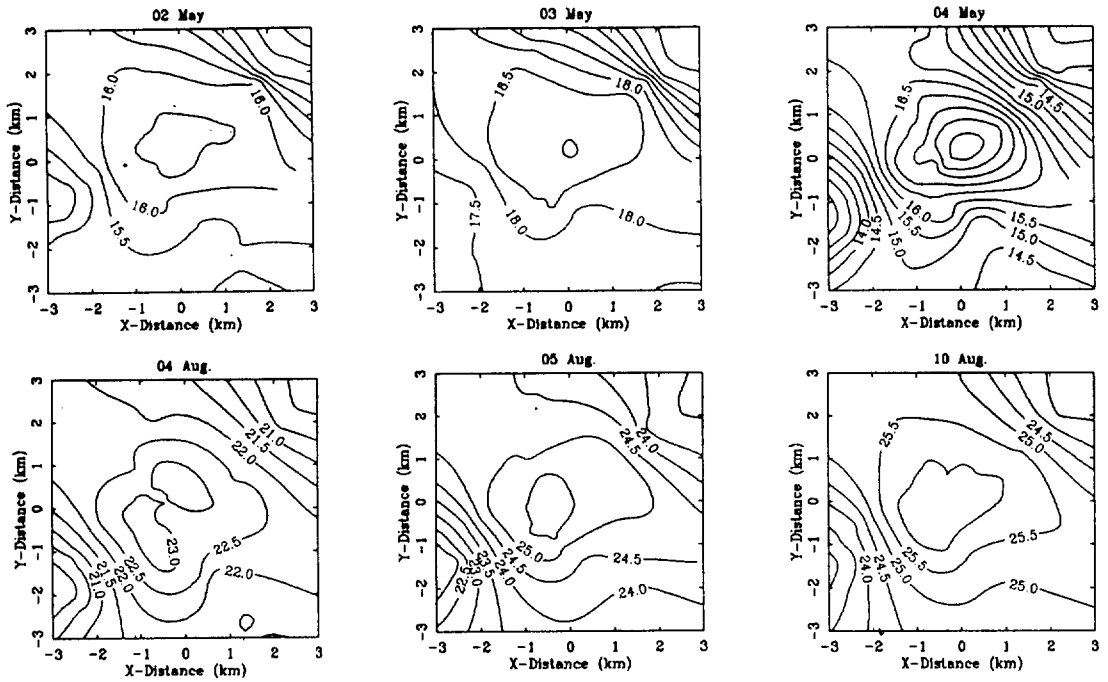


Fig. 2. Horizontal distributions of mean air temperature in Chunchon.

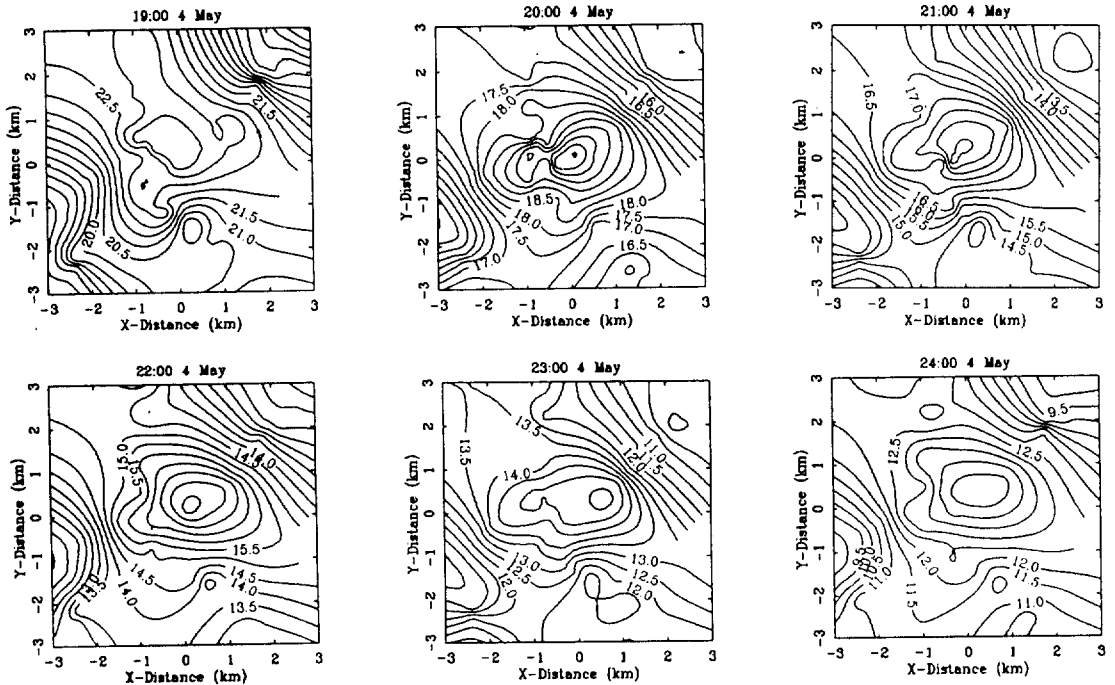


Fig. 3. Horizontal distributions of air temperature in Chunchon on 4 May 1992 during nighttime (19:00-24:00).

이동 관측 지점별로 매시간 측정된 기온을 이용하여 각 날의 평균 기온 분포를 작성한 결과는 그림 2와 같으며 측정일의 기상조건에 따라 조금씩 다른 결과를 보였다. 관측된 열섬은 모두 북동 및 남서방향에서 큰 기온경도와 함께 대체로 도시화된 직경에 해당하는 범위까지 분포하였으나, 작은 기온 경도를 보이는 북서 및 남동 방향에서는 먼 지역까지도 도시열섬이 나타나는 것으로 분석되었다.

봄철중 5월 2일과 3일에는 주간엔 날씨가 흐리고 바람이 다소 불었던 관계로 일몰 이후부터 자정까지 야간의 열섬강도는 약 2.5-3.5℃ 정도로 나타났고, 5월 4일은 맑고 풍속이 약했던 날로서 약 6℃ 정도의 강한 열섬강도를 나타냈다. 한편 여름철 3일간의 열섬강도는 모두 약 2℃ 내외로 관측되었으나 8월 4일과 5일은 남해안 지역으로부터 북상하는 태풍의 영향으로 바람이 다소 강하고 대체로 흐렸으며, 10일에도 비교적 흐린 날을 나타냈으므로 이 기간중의 열섬은 강하게 형성되지 못했던 것으로 사료된다.

3.2 5월 4일의 기온 분포 및 열섬강도

측정일 중 가장 강한 열섬강도를 나타냈던 5월 4일을 대상으로 19시부터 24시까지 매시간 별로 측정된 수평 기온 분포를 그림 3에 나타내었다. 열섬 중심지역에서의 기온은 일출후 자정까지 약 9℃ 하강하였으며, 도시 열섬강도는 20시에 7.5℃로서 가장 강했고 이후 차츰 약해져 21시와 22시에는 6.5℃, 23시에 5.5℃, 24시에는 5℃를 나타냈다.

한편 기상탑에서 측정된 기온자료를 이용하여 도심과 교외지역의 기온 냉각율 및 열섬강도를 계산하여 나타낸 결과는 그림 4와 같다. 두 지역에서 주간동안의 기온은 16시경까지 상승하였으나 일몰 이후 급속히 하강하기 시작하여 18시경에 가장 큰 냉각율을 나타내었고 새벽 5시까지 냉각이 지속되었다. 특히 17시부터 20시까지 관측된 자료중 교외지역에서의 기온 냉각율은 18시부터 19시 사이에 최고 -5.2℃/hr로 도시의 -2.9℃/hr 보다 크게 나타났고, 이 시간 이후 야간중에는 두 지역의 냉각율이 비슷하여 도시열섬은 일몰 직후 교외지역의 급속한 기온하강에 크게 좌우됨을 알 수 있다. 도시열섬은 18시 이후 강화되기 시작하여 21시에 약 3.3℃로 최고를 나타냈으며 다음날 아침 10시 이후에 소멸하는 것으로 나타났다. 그림 3에 나타난 도시열섬 강도는 20시의 최고 7.5℃로서 그림 4의 결과와 다소 차이를 나타냈으나 이는 교외지역에 설치한 기상탑이 도시열섬의 영향을 다소 받았기 때문이며, 특히 열섬은 북서 또는 남동방향으로 발달된 형태

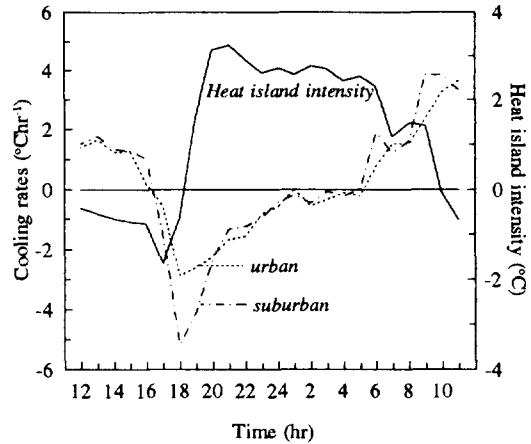


Fig. 4. Diurnal variations of urban heat island intensity and cooling rates for urban and suburban during 4-5 May 1992.

였으므로 차이를 나타낸 것으로 사료된다.

그림 5는 5월 4일의 야간중 도심에서 air sonde를 이용하여 19시부터 24시까지 측정된 연직온위분포도이다. 지상 약 500m 이상에서 상층의 온위는 1℃ 내외의 작은 감소를 나타냈으나 지표부근의 온위는 시간이 경과함에 따라 상층과 큰 차이를 나타냈다. 그러나 야간임에도 불구하고 지표로부터 고도 약 50-150m까지는 약한 불안정층이 존재하는 것으로 나타났으며 그 상층은 강한 안정층이 존재하였다.

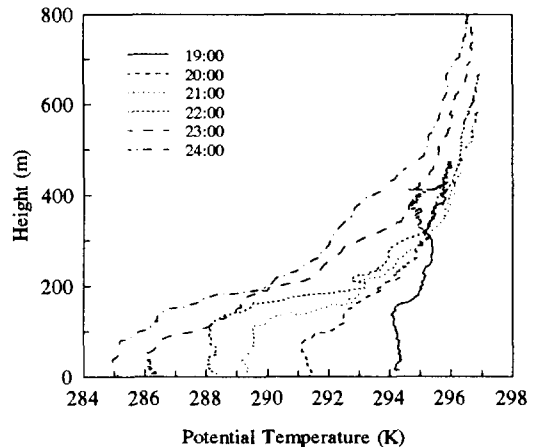


Fig. 5. Potential temperature profiles at the urban site on 4 May 1992. Profile numbers correspond to times.

3.3 3차원 Gaussian plume model의 적용

대상기간 중 가장 강한 열섬강도를 나타냈던 5월 4일의 19시에 측정된 기상자료를 이용하여 3차원 Gaussian plume model을 실행하였다. 그림 6은 도심지역의 기상자료를 이용하여 실행한 모델의 결과로서 야간 혼합층고도는 air sonde로부터 측정된 154m를 입력하였다. 또한 교외지역에서 측정된 기상탑 자료를 이용하여 계산한 결과는 그림 7과 같다. 그림 6과 그림 7의 a)는 도심의 위치를 (0,0)으로 한 지표부근의 수평면상의 농도를 나타낸 것이며, b)는 도시의 중심을 지나는 동서방향을 따라 고도별 농도분포를 도시한 것이고, c)는 도심의 동쪽 2km 지점에서 y축을 따라 고도별 농도분포를 나타낸 결과이다.

도심에서 측정된 기상자료를 이용하는 경우 최대

착지농도는 40ppb로서 교외지역의 기상자료를 이용하는 경우의 80ppb에 비하여 낮은 농도를 나타냈다. 또한 고도에 따른 농도분포를 나타낸 그림 6과 7의 b) 및 c)의 결과를 보면 도심에서 측정된 기상자료를 이용하는 경우에는 도시 야간 혼합층의 영향으로 지표로부터 약 160m까지 오염물질이 확산되었고, 교외지역에서 측정된 기상자료를 이용하는 경우에 오염물질의 확산은 약 70m 이내의 고도에 국한되어 2배 정도의 고농도를 나타냈다.

이러한 농도차를 나타내는 주된 원인은 도심과 교외의 야간 혼합층고도의 차이와 풍속의 차이이므로, 도시지역을 대상으로 대기 확산모델을 적용하는 경우 도시지역 내에서 측정된 기상자료를 이용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

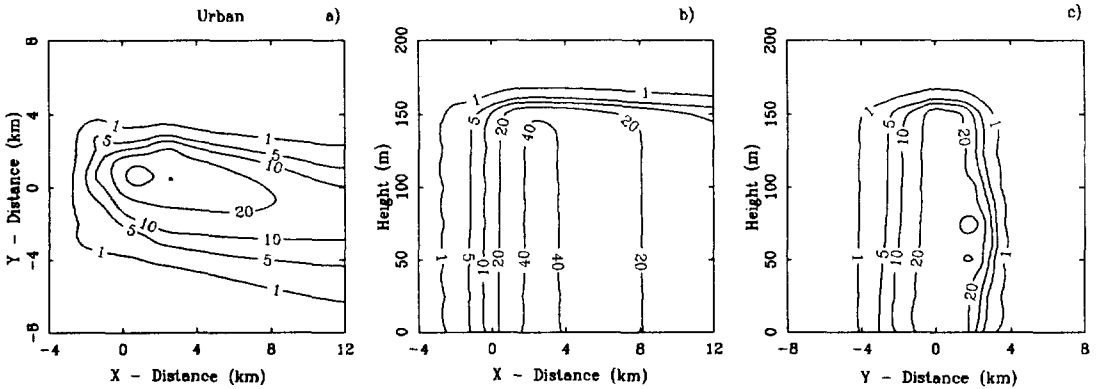


Fig. 6. Horizontal and vertical cross section of calculated SO<sub>2</sub> concentration(ppb) at urban area.

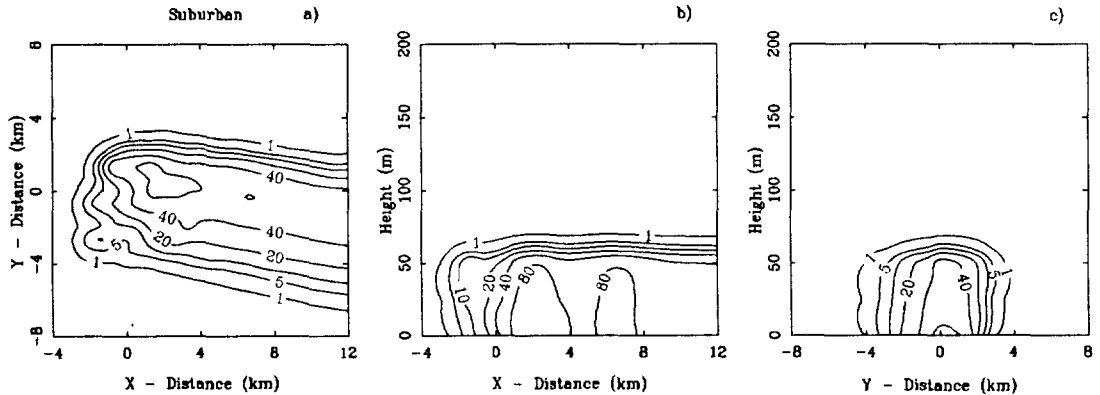


Fig. 7. Same as Fig. 6, except for rural area.

4. 결 론

비교적 중소규모의 도시에 속하는 춘천지역에서

일몰 이후부터 자정까지 관측된 도시열섬의 수평규모는 대체로 도시화된 직경에 해당하는 범위로 형성되었으며, 열섬강도( $\Delta T_{u-r}$ )는 측정일의 기상상태

참 고 문 헌

에 따라 다르나 맑은날 바람이 약한 야간중에 강하게 형성되는 것으로 나타났다. 전체 6일동안 일몰부터 자정까지 야간중의 평균적인 열섬강도는 2-6℃ 내외로 관측되었고 여름철에 비하여 봄철의 측정기간 중에 강하게 나타났으며 5월 4일은 가장 강하여 평균 6℃의 열섬강도를 나타냈다. 특히 일몰 직후 교외지역에서 기온 냉각율은 18시부터 19시까지 한시간 동안 -5.2℃/hr로 도심의 -2.9℃/hr 보다 크게 나타났다. 일몰 이후 형성되기 시작한 도시 열섬은 21시에 최고 7.5℃의 열섬강도를 나타낸 후 차츰 감소하여 다음날 아침 10시 이후부터 소멸하였으며, 주간에는 교외지역의 기온이 더 높게 측정되었다. 도시지역에서 측정된 연직 기온 분포를 분석한 결과 5월 4일의 야간에는 지표로부터 약 50-150m까지 도시열섬이 분포한 것으로 나타났다.

한편, 대상기간 중 가장 강한 열섬강도를 나타냈던 5월 4일을 대상으로 도심 및 교외지역에서 야간에 측정된 기상자료를 입력하여 3차원 Gaussian plume model을 실행한 결과, 도심에서 측정된 기상자료를 이용하는 경우에는 지표로부터 약 160m까지 오염물질이 확산되는 것으로 분석되었으나, 교외지역에서 측정된 기상자료를 이용하는 경우에는 70m 이내의 고도에 국한되어 도시 기상자료를 이용한 경우에 비하여 농도가 약 2배 높게 계산되었다. 이는 기상자료의 측정위치에 따라 야간 혼합층 고도가 다르며 도심에서 풍속이 약하였기 때문에 나타난 결과로 생각된다.

현재 널리 사용되고 있는 대부분의 대기 확산모델은 도시지역을 대상으로 하는 경우 야간의 혼합층고도를 낮게 입력하거나 대기의 안정도 계급을 1계급 변형시키면서 적용(EPA, 1979)하는 등 도시 열섬 현상을 반영시키기에는 다소 불충분하다. 따라서 열섬현상의 충분한 고려와 함께 대상지역 내에서 형성되는 열섬의 범위 및 강도를 규명하기 위한 자세한 기상측정이 필요할 것으로 사료된다.

이종범, 김문일 (1979) 서울지방의 수평기온 분포 특성. 기상연구논문집, 1(1), 57-62.

이종범, 김용국 (1990) Pasquill안정도계급의 평가와 안정도 parameter 추정방법의 개발. 한국대기보전학회지, 6(2), 168-175.

Ackerman, B. (1985) Temporal March of the Chicago heat island. J. Appl. Meteorol., 24, 547-554.

Briggs, G.A. (1972) Discussion on chimney plumes in neutral and stable surroundings. Atmospheric Environment, 6, 507-510.

Draxler, R.R. (1986) Simulated and observed influence of the nocturnal urban heat island on the local wind field. J. of Appl. Meteorol., 25, 1125-1133.

Hjelmfelt, M.R. (1982) Numerical simulation of the St. Louis on mesoscale boundary-layer airflow and vertical air motion : Simulations of urban vs. non-urban effects. J. of Appl. Meteorol., 21, 1239-1257.

Nieuwstadt, F.T.M (1983) A model for the stationary, stable boundary layer. In turbulence and diffusion in stable environments(edited by Hunt, J.C.R.). Clarendon Press, 149-179.

Oke, T.R. (1978) Boundary Layer Climates. Methuen & Co., 372pp.

Oke, T.R. (1979) Review of urban climatology, 1973-1976, WMO Tech. Note No. 169, World Meteorol. Organiz., 100pp.

Stull, R.B. (1989) An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers, 666pp.

U.S., EPA (1979) Users' guide to the Texas episodic model. EPA/DF=80/007c, 215pp.