

지표면 변화와 인공열이 바람장에 미치는 영향에 관한 수치 시뮬레이션

Numerical Simulation of Effect of Urban Land-use Type and Anthropogenic Heat on Wind Field

홍 정 혜 · 김 유 근

부산대학교 대기과학과

(1999년 10월 6일 접수, 2000년 7월 24일 채택)

Jung-Hye Hong and Yoo-Keun Kim

Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea

(Received 6 October 2000; accepted 24 July 2000)

Abstract

The urban atmosphere is characterized by the differences in surface and atmospheric environment between urban and more natural area. To investigate the climatic effect of land use type and anthropogenic heat of urban on wind field, numerical simulations were carried out under typical summer synoptic condition.

The wind model PNU_MCM (Pusan National University Mesoscale Circulation Model) is based on the three-dimensional Boussinesq equations, taking into account the hydrostatic assumption. Since land-use differs over every subdivision in Pusan, the surface energy budget model includes a sub-grid parameterization scheme which can calculate the total heat flux over a grid surface composed of different surfaces.

The simulated surface wind agrees well with the observed value, an average over 6 days which represent typical summer land-sea breeze days, August 1998, i.e. negligible gradient winds and almost clear skies.

Urbanization makes sea-breeze enhance at day and reduce land-breeze at night. The results show that contribution of land-use type is much larger than that of anthropogenic heat in Pusan.

Key words : urban climate, energy budget model, anthropogenic heat

1. 서 론

19세기 이후 도시의 인구가 급격히 증가되면서 도시화는 자연상태를 변화시켜 도시 특유의 생활환경을 가지게 하고 기상학적·기후학적으로 특성을 가지게 하였다.

특히 우리 나라와 같은 개발 국가에서는 도시 내에서 생활하는 인구가 증가하고 있으므로 생활공간 확보를 위한 토지 개발이 계속 확대될 것이다. 토지 개발은 지표면을 콘크리트와 아스팔트 등으로 포장하여 지표면 피복 상태 변화를 확대시키고 빌딩과 같은 인공구조물을 증가시키며 또한 거주활동, 공단 형성, 교통 수단 등의 증가로 상당량의 인공열을 방

출시될 것이다.

이러한 지표면 피복 상태 변화, 인공구조물의 증가와 인공열의 방출은 대기와 상호작용하여 특유의 도시기상을 나타낸다(Kobayashi, 1994; Kimura와 Takahashi, 1991). 우리 나라의 경우 인구 분포가 농촌보다 도시에 더 많이 집중되어 있고, 모든 산업활동이 도시와 도시근교에서 이루어지므로 인간이 활동하고 있는 생활환경의 이해와 산업기상정보의 측면에서 도시기상의 모의와 예측은 매우 중요하다.

도시기상의 원인으로는 이미 언급한 바와 같이 지표면 상태의 변화, 인공구조물과 인공열 방출을 들 수 있으며 그외 오염물질 또한 하나의 원인이다. 지표면 상태의 변화는 알베도와 함수율 변화를 야기하며 알베도는 상공업지역과 밀집된 주택가에서 평균 12%내외로 주변 시골의 평균범위 16~22%보다 낮다는 연구 결과가 있다(White *et al.*, 1978; Dabberdt와 Davis, 1974).

한편 도시에서의 함수율이 낮은 지표면의 증가는 증발산 영역을 감소시켜 결과적으로 잠열방출을 감소시키고 현열을 증가시킨다(Tapper *et al.*, 1981). 또한 도시의 배수시설은 유입된 강수의 흐름을 시골보다 짧은 기간 머무르게 하여 도시에서 낮은 절대습도를 가지게 한다.

도시의 기상학적 특성을 결정짓는 또 다른 요인은 빌딩과 같은 도시내의 인공 구조물이다. 인공구조물은 저층 대기 흐름에 대해 마찰력을 증가시켜 현저한 대기 흐름의 변화를 가져오고 이것은 도시내의 열적인 요소와 함께 도시 중심 풍하측에서 뚜렷한 수렴 영역을 만든다(Wong와 Dirks, 1978; Kropfli와 Kohn, 1977).

인간활동에 의한 인공열의 증가도 도시 특유의 기상을 형성하는데 기여한다. 인공열은 대도시의 경우 순 태양 복사량의 15% 정도를 차지하는데 도시 중심과 시골의 온도차를 주중과 주말에 대해 살펴보면 주중이 주말의 2배 정도인 것으로 보아 인공열이 도시 기상에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다(Mitchell, 1961).

이러한 인공 구조물들과 지표면의 열적, 기계적 특성에 의해 나타나는 도시에서의 가장 중요한 변화 중 하나는 현저한 도시내 공기 흐름의 변화이다. 특히 연안지역의 해양과 육지 사이의 비열 차이에 의해 형성되는 해륙풍은 연안 도시의 열적 특성에

의해 많은 영향을 받을 것이다. 이것은 연안도시 대기의 환기(ventilation)와 관계가 있으므로 대기오염 농도의 시·공간분포를 결정하는 중요한 역할을 한다.

본 연구에서는 도시화에 의한 지표면 피복 상태 변화와 인공열 방출이 바람장에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하는 것을 목적으로 한다. 특히 연안 도시지역의 지표면 변화와 인공열 방출에 의한 열적 변화가 해륙풍에 미치는 영향은 뚜렷할 것으로 사료되어, 부산을 대상으로 도시의 지표면의 피복 상태를 조사하고 지표면 부근에서 방출되는 인공열을 산정하였고 이를 고려할 수 있는 지표면 열수지 수치모형을 구축하였다. 그리고 바람장 모형과 접합하여 지표면 피복 상태 변화와 인공열 방출에 의한 부산지역에서의 해륙풍의 변화를 수치 시뮬레이션 하였다.

2. 연구대상지역

도시화의 연구대상지역은 인구 400만의 우리나라의 남동연안에 위치한 부산지역으로서 그림 1에 지형의 고도와 도시 중심가의 위치를 나타내었다. 부산은 남북으로 산이 줄이어 있고 산줄기 사이에 광복동, 서면 그리고 동래를 중심으로 시가지가 형성되어 있으며 시가지 왼쪽으로 낙동강과 김해평야가

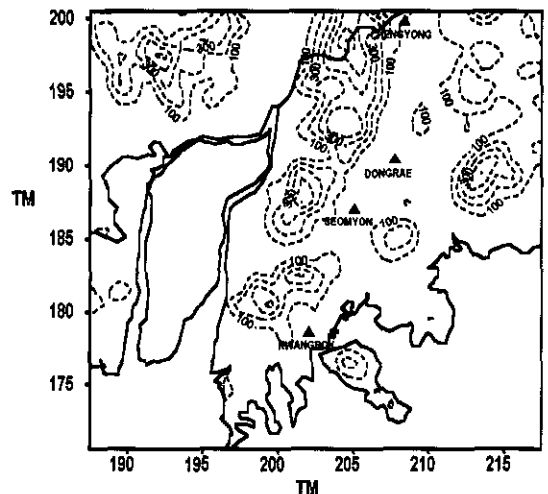


Fig. 1. Pusan area used in the numerical simulation.

있다. 비교적 산이 높고 많으며 바다와 인접하여 해륙풍과 산곡풍등 잘 발달하여 도시화에 의한 열적 특성이 바람장에 미치는 영향을 연구하기 적합한 지역이다.

계산영역은 그림 1과 같이 TM 좌표계로 X방향으로 187.5에서 217.5까지 Y방향으로 170.5에서 200.5까지 30 km × 30 km의 영역이다.

지표면 온도와 바람장의 수평면 계산격자는 1 km × 1 km이지만 지표면 피복 상태의 조사는 100 m × 100 m의 격자에 대해서 이루어 졌다.

3. 열 수 지

3.1 열수지 모형의 방정식

지표면 열수지 방정식은 아래와 같다.

$$R_N + A = LE + H + S \tag{1}$$

여기서 R_N 은 순복사 플럭스, A 는 인공열 플럭스, LE 는 잠열 플럭스, H 는 현열 플럭스 그리고 S 는 지중열 플럭스이다. 이중 순복사 플럭스는 $S_c + I_{\downarrow} - I_{\uparrow}$ 으로 각항은 다음과 같다.

$$S_c = (1 - \alpha) T_s R_0 \cos Z \tag{2}$$

$$I_{\downarrow} = \sigma [E_a(1 - Cloud) + Cloud] T_a^4 \tag{3}$$

$$I_{\uparrow} = \sigma T_0^4 \tag{4}$$

$$\cos Z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cosh \tag{5}$$

$$E_a = 1 - 0.261 \exp(-0.00077(273 - T_a)^2) \tag{6}$$

여기서, S_c 는 태양복사에너지, I_{\downarrow} 는 하향 지구복사 에너지, I_{\uparrow} 는 상향 지구복사에너지, α 는 알베도, T_s 은 대기 투과도, R_0 는 태양상수, ϕ 는 위도, δ 는 적위, $Cloud$ 는 구름의 양, T_a 는 대기온도, h 는 태양시 그리고 σ 는 스테판 볼츠만 상수이다.

현열과 잠열 플럭스는 다음과 같고

$$LE = \frac{-\rho L \chi^2 U_2}{[\ln(Z_2/Z_0)]^2} (q_2 - q_0) \tag{7}$$

$$H = \frac{-\rho C_p \chi^2 U_2}{[\ln(Z_2/Z_0)]^2} (T_2 - \gamma_2 Z_2 - T_0) \tag{8}$$

여기서, ρ 는 공기밀도, L 은 잠열, χ 는 Von-Kar-

man 상수(0.35), U_2 는 Z_2 에서의 풍속, Z_0 는 거칠기, q_0 와 q_2 는 Z_0 와 Z_2 에서의 비습, C_p 는 비열, T_0 는 지표면 온도, T_2 는 Z_2 에서의 온도 그리고 γ_2 는 건조 단열 감율이다.

지중열 플럭스는 다음과 같다.

$$S = -k_s \frac{\partial T_s}{\partial Z} \tag{9}$$

여기서, T_s 는 토양의 온도, 그리고 k_s 는 열 전달계 수이다.

3.2 열수지 모형의 적용

부산과 같은 산지 지형과 연안역을 포함하는 복잡한 도시는 균질한 지표면을 가지고 있지 않다. 따라서 하나의 계산격자를 한 종류의 지표면 피복 상태로 결정할 경우 계산 결과는 많은 오차를 포함한다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 Kimura와 Takahashi (1991)는 동경을 대상으로 지표면 온도를 산정할 때 한 개의 계산 격자내의 지표면 피복 상태를 조사하여 지표 피복 종류별 격자내 점유율을 고려하여 각 플럭스를 계산하였다.

본 연구에서는 열수지 계산 격자간격 1 km × 1 km 를 100 m × 100 m로 세분하여 각 계산 격자내의 임의의 지표 피복 상태의 점유율을 고려하여 각 플럭스를 다음과 같이 계산하였다.

$$[F]_G = \sum_i A_i [F]_i / G \tag{10}$$

여기서, $[F]_G$ 는 하나의 계산 격자내 평균되어진 플럭스이고 $[F]_i$ 는 지표면 상태 i 에서의 플럭스이고 A_i 는 지표면 피복 상태 i 에 의해 점유되어진 면적을 나타내고 G 는 $\sum_i A_i$ 으로 계산되는 한 계산 격자의 면적이다.

4. 실험방법

4.1 바람장모형

바람장 모형은 정역학 가정을 한 비압축성 운동 방정식(3개), 연속방정식(1개), 은위방정식(1개)비습 방정식(1개)로 구성된 PNU-MCM (Pusan National University-Mesoscale Circulation Model, 한한우, 1998; 오은주, 1995; 李和云, 1987) 바람장 모형을 이

용하였으며 위에서 언급한 지표면 열수지 모형으로부터 계산된 온도가 각 계산 단계마다 주어진다.

계산 영역은 수평으로는 그림 1과 같이 30 km × 30 km에 대해서 1 km 간격의 31 × 31의 격자에 대해서 수행되었고 연직으로는 2 km까지 지표부근에서는 밀하고 상부경계에서는 소한 9층의 비균질 격자로 구성되었다.

4.2 입력조건

4.2.1 인공열배출량

인공열은 인간활동에 따른 에너지 소비에 의한 배출열로써 건물과 차량에서 방출되는 각각의 인공열 배출량을 합하여 총 인공열 배출량으로 하였다. 산정 과정에서 필요한 자료와 세부적인 방법은 선행연구(손은하 등, 2000)에서 자세히 다루었다. 연간 및 월별 그리고 시간별 인공열 배출량 산정 방법을 간략하게 정리하면 아래와 같다.

① 연간 인공열 배출량

$$D_i = F_i / M, \quad HB_Y = D_i \times Z_Y \quad (11)$$

여기서, D_i 는 건물 용도별 바닥면적비, F_i 는 용도별 건축물의 바닥면적의 합, M 은 한 격자의 면적, HB_Y 는 연간 건물의 용도별 인공열 ($MJm^{-2} year^{-1}$), Z_Y 는 건물의 용도별 연간 에너지소비 원단위 ($MJm^{-2} year^{-1}$) (통산부, 1997)이고, i 는 건물 용도별 분류번호로써 '상가', '공장', '백화점', '아파트', '단독주택', '병원', '호텔', '사무실', '학교'로 세분하였다.

② 월별 인공열 배출량

$$Z_{mr} = (Z_m / \sum_{m=1}^{12} Z_m) \quad (12)$$

$$HB_n = Z_{mr} \times HB_Y \quad (13)$$

여기서, Z_m 는 건물의 용도별 월별 에너지소비 원단위 ($MJm^{-2} month^{-1}$) (통산부, 1997)이고, Z_{mr} 은 월별 변동계수, HB_n 은 월별 인공열이다.

③ 시간별 인공열 배출량

$$Z_{dr} = (Z_t / \sum_{t=1}^{24} Z_t) \quad (14)$$

$$HB_d = Z_{dr} \times (HB_n / 30) \quad (15)$$

여기서, Z_t 는 건물의 용도별 시간별 에너지소비 원단위 ($MJm^{-2} day^{-1}$), Z_{dr} 는 시간별 변동계수, HB_d 는 시간별 인공열이다.

여름철 부산에서 운행되는 차량과 건물로부터 방출되는 인공열 배출량을 각 시간대별로 산정하여 0300 LST와 1400 LST의 분포도를 그림 2에 나타내었다. 이와 같이 매 시간마다 열수지 수치 모형에

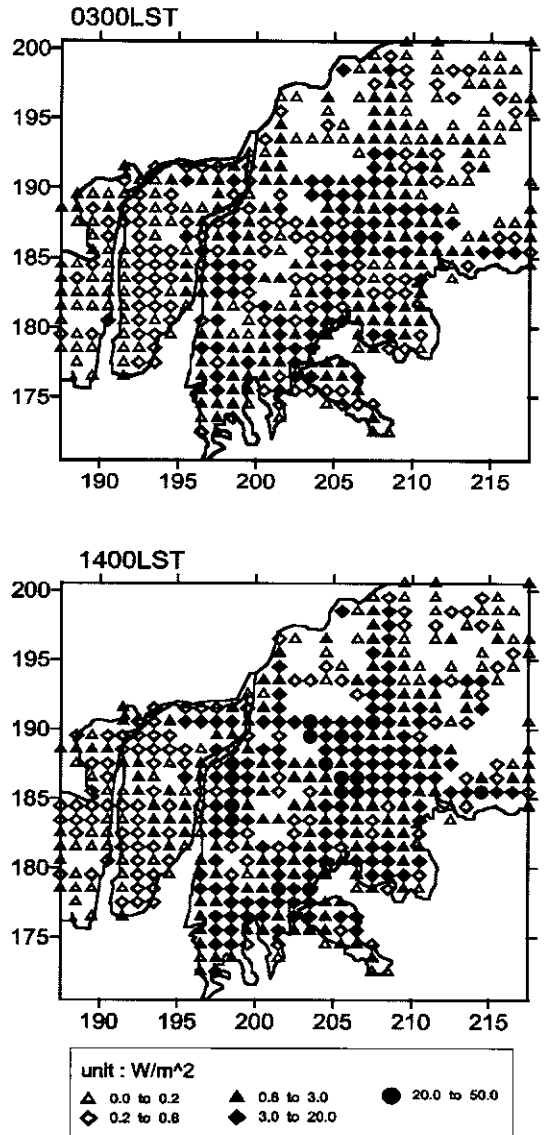


Fig. 2. Mean anthropogenic heat flux (a) 0300 LST and (b) 1400 LST during summertime in Pusan.

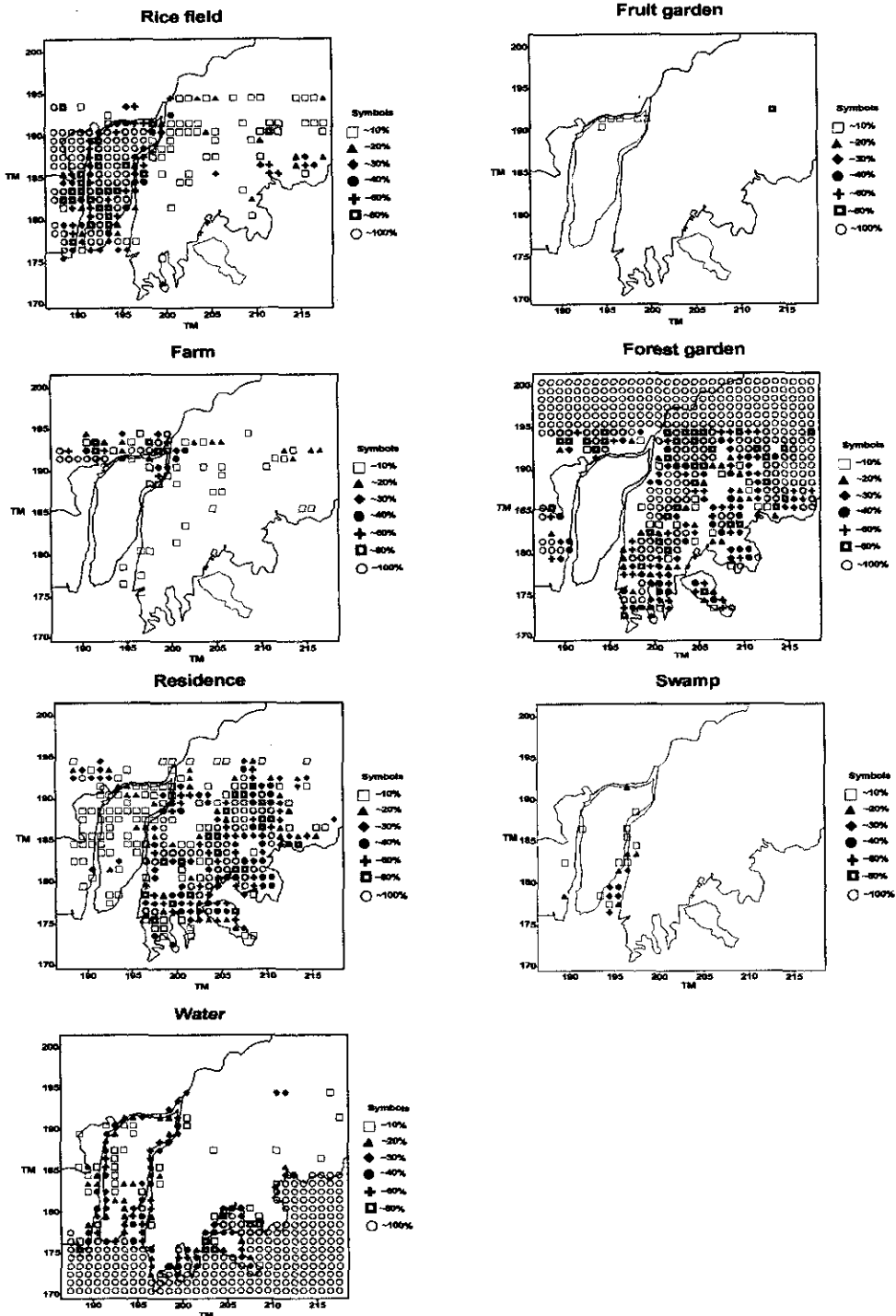


Fig. 3. Rate of land-use type in each 1 km² in Pusan. Approximate values of the symbols (%) are given on the right-hand side.

Table 1. Surface parameters due to Land-Use type.

Land use categories	Albedo	Site fraction relative humidity	Roughness (m)	Heat conductivity (cal m ⁻¹ °C ⁻¹)	Heat capacity (cal cm ⁻³ °C ⁻¹)
Rice field	0.12	100	0.22	0.26	0.49
Farm	0.12	100	0.06	0.26	0.49
Fruit garden	0.15	100	0.035	0.26	0.49
Residential region	0.12	0.0	1.50	0.42	0.54
Forest	0.16	100	0.70	0.26	0.49
Water	0.08	100	0.0001	1000	1.0
Swamp	0.14	100	0.0001	1000	1.0

계산각자별로 입력해 준다.

1400 LST에 서면 지점에서 49.3 Wm⁻²으로 최대의 인공열 방출이 나타나고 동래와 광복동에서도 비교적 높게 나타났다.

4.2.2 지표면 피복 상태

지표면 피복상태는 하나의 격자를 100 m × 100 m로 세분하여 단위 격자내 토지 이용의 비율을 구하였는데 그림 3과 같이 '논', '밭', '과수원', '산림', '건물용지', '수면' 그리고 '늪'으로 7종류의 지표 피복 상태를 구분하였다.

알베도, 부분 상대습도, 거칠기 길이와 토양의 열전도도, 토양의 비열은 토지 이용에 따라 표 1 (Ichinose *et al.*, 1997; Rachele와 Tunick, 1994; Pielke, 1984)과 같이 적용하였다.

5. 결 과

5.1 정확도 검증을 위한 수치 시뮬레이션 결과와 관측 결과의 비교

수치 시뮬레이션 결과를 검증하기 위한 관측값은 1998년 8월 동안 해륙풍이 관측된 6일간의 자료를 이용하였다. 해륙풍일의 선정에는 여러 방법이 있으나 본 연구에서는 전병일(1993)의 방법을 따랐다.

그림 4는 0300 LST, 0900 LST 그리고 1400 LST의 관측 결과와 수치시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 0300 LST에 육풍의 발달과 0900 LST에 해풍의 시작 그리고 1400 LST에 해풍의 발달 등 전체적으로 시간에 따른 풍향과 풍속의 변화 경향과 형태가 일부지점을 제외하고 관측과 수치 수치시뮬레이션 결과가 잘 일치하였다.

시뮬레이션 결과는 고도 50 m 높이에서의 결과이지만 관측 결과는 주로 2~3층 건물의 옥상 위에서 관측한 결과로써 관측 주변의 영향이 있다. 따라서 모든 지점에서 관측 결과와 시뮬레이션 결과가 다 일치하지는 않지만 전체적으로 육풍과 해풍의 발달 그리고 해풍의 유형을 잘 설명하고 하였다.

이 결과 본 연구에서 사용한 모형이 지표면의 특성과 인공열의 방출을 적절히 모사할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

5.2 도시화가 해풍과 육풍에 미치는 영향

도시화에 의한 지표면 피복 상태의 변화와 인공열 방출이 대기경계층내의 바람장에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 부산의 현재 지표면 피복 상태에서의 수치 시뮬레이션 결과(도시)와 '건물용지'의 지표 피복 상태를 '밭'이라고 가정된 지표면 피복 상태에서의 수치 시뮬레이션 결과(시골)의 수평 바람성분의 차이를 구하였다.

그림 5a는 해풍이 발달한 1400 LST의 풍속차이로 도시화에 의해서 전체적으로 풍속이 증가하였으며 최대 1.55 m/s의 증가가 나타났다. 풍속의 증가는 남부 해안선 부근 그리고 서면과 동래 지역의 왼쪽 금정산과 경계를 이루는 지역에서 뚜렷하다. 이러한 풍속의 증가는 도시화에 의한 지표면 온도 상승으로 설명할 수 있는데 그림 6은 부산의 현재 도시 상태에서의 수치 시뮬레이션과 시골 상태에서의 수치 시뮬레이션의 지표면 온도 차이를 나타낸 것이다. 지표면 온도가 도시화에 의해 서면과 동래 중심가에서 최대 6°C 이상 증가하였고 지표면 온도의 정도가 큰 지점과 풍속의 증가가 탁월한 지점이 일치한다.

그림 5b는 육풍이 부는 0300 LST의 풍속차이인데 도시화에 의한 지표면 온도상승 때문에 전체적으로 풍속이 감소하였다. 하지만 감소폭은 해풍의 증가폭보다는 작았고 최대 0.89 m/s의 감소가 나타났다. 그리고 육풍의 감소가 뚜렷한 지역이 해풍의 증가가 뚜렷한 지역과 일치하지는 않았다.

이러한 도시화에 의한 해풍의 증가와 육풍의 감소는 해륙풍의 발생메커니즘을 고려하면 분명해진다. 해륙풍은 육지와 해양의 비열차이에 의한 공기의 이동으로써 일사가 있는 낮에는 비열이 작은 육지에서 따뜻한 공기가 부력을 얻어 상승하고 비열

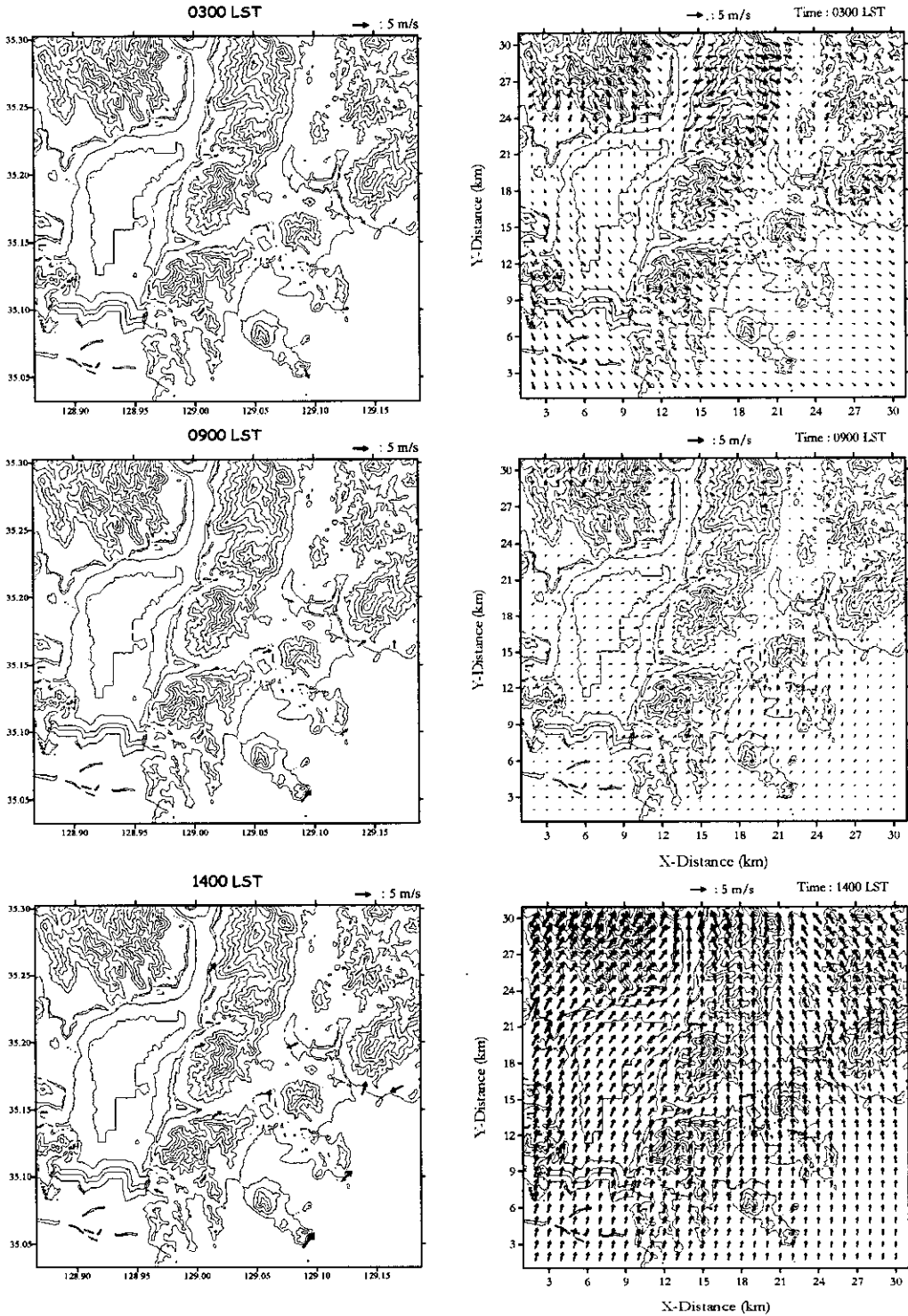


Fig. 4. Wind field observed (left) and calculated (right) around Pusan area.

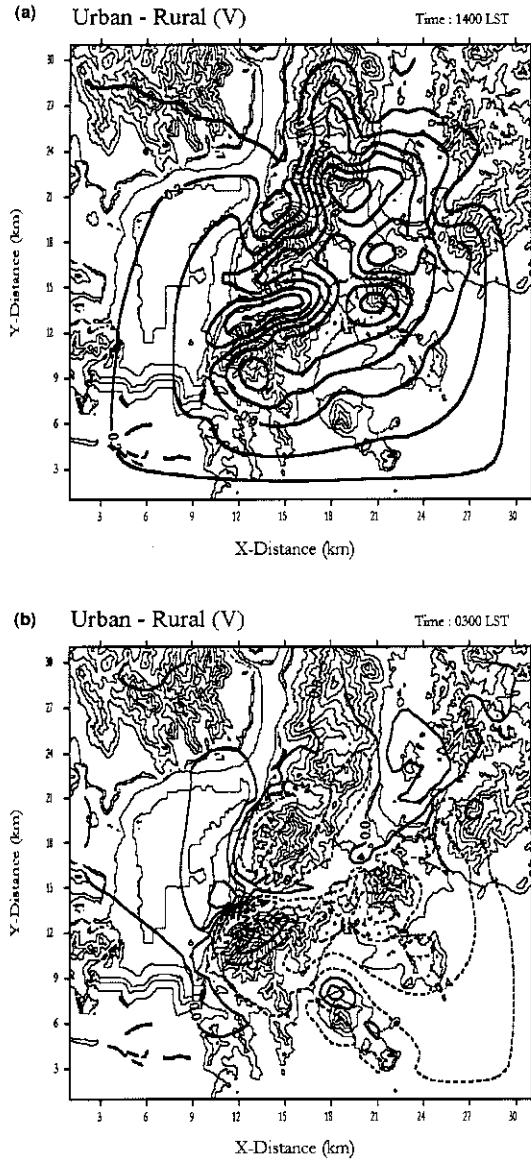


Fig. 5. Difference of wind speed due to urban land-use and anthropogenic heat at (a) 1400 LST and (b) 0300 LST in Pusan (unit: ms^{-1}).

이 큰 해양에서 찬공기가 이것을 보상하기 위해서 육지쪽으로 분다. 반대로 일사가 없는 밤에는 비열이 큰 해양이 따뜻하고 비열이 작은 육지가 더 차므로 낮과는 반대로 육풍이 분다. 그런데 도시화에 의해서 육지가 따뜻해지면서 낮에는 육지와 해양간

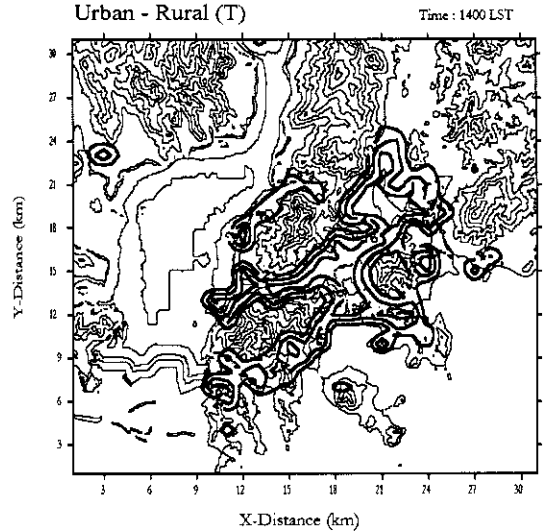


Fig. 6. Increase of surface temperature due to urban land-use type and anthropogenic heat at 1400 LST during summertime in Pusan.

의 온도 경도가 커져 풍속이 강해지고 밤에는 육지와 해양간의 온도 경도가 적어져 풍속이 더 약해지는 것이다.

5.3 인공열이 해풍과 육풍에 미치는 영향

인공열 방출에 의한 지표면 온도 증가가 바람장에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 현재 부산의 지표면 피복 상태에서 인공열이 방출되는 경우와 방출되지 않는 경우에 대해서 각각 바람장을 수치시뮬레이션하였다.

그림 7은 인공열이 방출되었을때와 방출되지 않았을때의 풍속차이를 나타낸 것이다. 그림 7a는 1400 LST의 풍속차이로서 인공열 방출에 의하여 해풍은 최대 0.05 m/s 강해지고 그림 7b는 0300 LST의 풍속차이로써 인공열 방출에 의하여 육풍은 0.01 m/s 약해진다는 것을 나타낸다.

인공열 방출은 도시를 따뜻하게 하므로 5.2절에서 언급한 바와 같이 낮에는 해풍을 강화시키고 밤에는 육풍을 약화시킨다. 하지만 지표면 피복 상태 변화에 의한 풍속차이와 비교하여 풍속의 변화가 매우 작았는데 인공열 방출에 의한 지표면 온도 상승이 최대 0.44°C(그림 8)로 지표면 피복 상태 변화에 의한 지표면 온도 상승과 비교하여 매우 작았

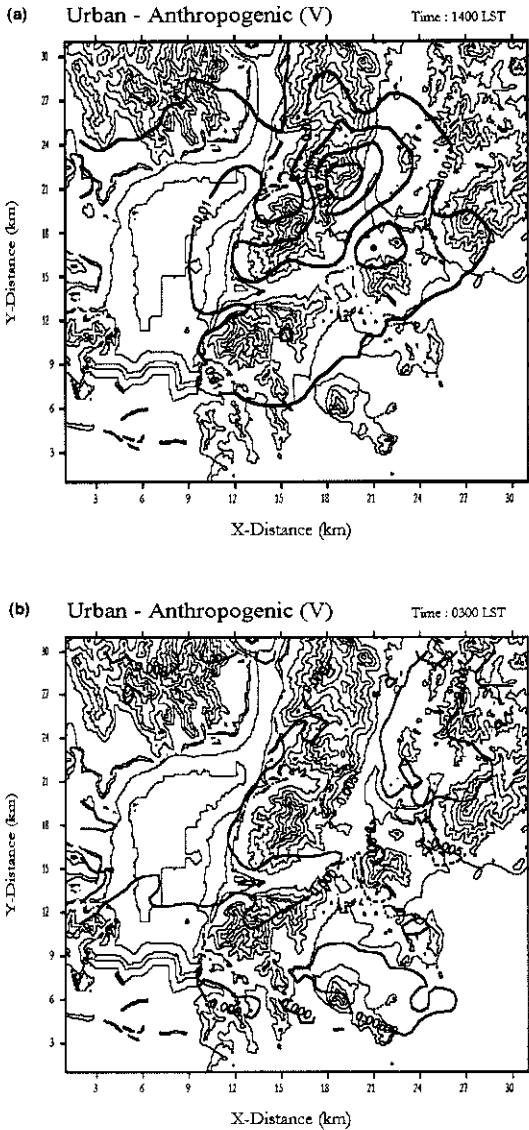


Fig. 7. Difference of wind speed due to anthropogenic heat at (a) 1400 LST and (b) 0300 LST (unit: ms^{-1}).

기 때문이다.

인공열에 의한 해풍의 증가와 육풍의 감소 범위는 풍속 관측의 오차범위 뿐 아니라 시뮬레이션 결과와 관측결과의 오차범위에 드는 작은 값으로 부산에서의 인공열 방출이 바람장에 미치는 영향은 아직까지는 작은 것으로 나타났다.

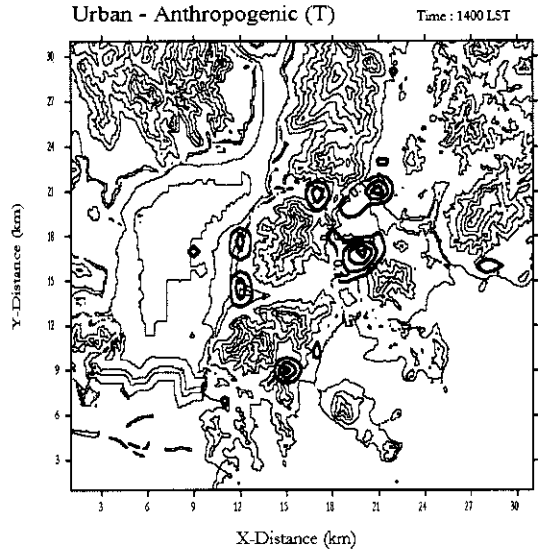


Fig. 8. Increase of surface temperature due to anthropogenic heat flux at 1400 LST during summertime in Pusan

6. 결 론

본 연구에서는 도시화에 의한 지표면 피복 상태 변화와 인공열 방출이 바람장에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하는 것을 목적으로 하였다. 부산을 대상으로 도시 지표면의 피복상태와 지표면에서의 인공열 방출을 고려한 열수지 수치모형을 구축하여 지표면의 피복 상태와 인공열 방출이 바람장에 미치는 영향을 고찰한 결과 다음의 결과를 얻었다.

1) 도시에서 지표면 피복 상태 변화와 인공열 방출은 육지에서의 지표면 온도를 상승시켜 낮에는 육지와 해양의 지표면 온도차이를 증가시켜 해풍을 강화시키고 밤에는 육지와 해양의 지표면 온도차이를 감소시켜 육풍을 약화시킨다. 부산의 현재 지표면 피복 상태와 '건물용지'가 '밭'이라고 가정했을 때의 풍속차이는 해풍이 부는 1400 LST에는 1.55 m/s 강해졌으며 육풍이 부는 0300 LST에는 0.89 m/s 약해졌다.

2) 인공열 방출은 해풍을 강화시키고 육풍을 약화시키는 경향이 있으나 지표면 피복 상태의 변화와 비교하여 해풍과 육풍에 미치는 영향은 작은 것으로 나타났다.

도시화에 의한 바람장의 변형은 도시내의 지표면 피복 상태의 변화와 인간활동에 의한 인공열 방출에 의해서 일어날 수 있고 인공열의 방출보다는 지표면 피복 상태 변화가 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

이러한 연구는 지표면 피복 상태의 변형이 불가피한 그린벨트 해제에 따른 토지개발에 의한 기상변화를 예측하는 기상 영향평가 등에 활용가능할 것이다.

참 고 문 헌

손은하, 김유근, 홍정혜 (2000) 도시의 인공열 산정에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 16, 37-47.
 오은주 (1995) Mesoscale에서의 대기유동과 확산에 관한 Simulation, 부산대학교 석사학위논문, 122pp.
 전병일 (1993) 부산연안에서의 바람의 수치시뮬레이션에 관한 연구, 부산대학교 석사학위논문, 65pp.
 한한우 (1998) 난류 확산에 의한 대기 유동장의 변화에 관한 연구, 부산대학교 석사학위논문, 118pp.
 통산부 (1997) 에너지 총조사 보고서, 1120pp.
 李和云 (1987) 地域大氣環境の數値豫測モデルニ關する研究, 大阪大學校 博士學位論文, 306pp
 Dabbert, W.F. and P.A. Davis (1974) Determination of energetic characteristics of urban-rural surfaces in the greaten St. Louis area. Preprints Symp. Atmospheric Diffusion and Air Pollution, Santa Babara, Amer. Meteor. Soc., 13, 133-141.
 Ichinose, T., K. Shimodozono, I. Uno, and K. Hanaki (1997) Upgrade of surface boundary condition for numeri-

cal simulation of urban climate based on very precise geographic information, Tenki (Bulletin J. Meteor. Soc. Japan), 44, 785-797.
 Kimura, F. and S. Takahashi (1991) The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area : A numerical experiment, Atmos. Environ., 25B, 155-164.
 Kobayashi, T. (1994) Upward longwave radiation from a non-black urban canopy, Boundary layer Meteor., 69, 201-213.
 Kropfli, R.A. and N.M. Kohn (1977) Persistent horizontal rolls in the urban mixing layer as revealed by dual-doppler radar. Preprint Sixth Conf. Planned Inadverdent Weather Modification, Urbana, Amer. Meteor. Soc., 13-16.
 Mitchell, J.M., Jr. (1961) The temperature of cities., Weatherwise. 14, 224-229.
 Pielke, R.A. (1984) *Mesoscale Meteorological Modeling*, Academic Press, 612pp.
 Rachele H. and A. Tunick (1994) Energy balance model for imagery and Electromagnetic propagation, J. Appl. Meteor., 33, 964-976.
 Tapper, N.J., P.D. Tyson, I.F. Owens, and W.J. Hastie (1981) Modeling the winter urban heat island of Christchurch, New Zealand. J. Appl. Meteor., 20(4), 365-376.
 White, J.M., F.D. Eaton, and A.H. Auer. Jr. (1978) The net radiation budget of the St. Louis Metropolitan area. J. Appl. Meteor., 17, 593-599.
 Wong, K.K. and R.A. Dirks (1978) Mesoscale perturbations on air flow in the urban mixing layer. J. Appl. Meteor., 17, 677-688.