

인공열과 land-use가 부산시의 열적 환경에 미치는 영향 연구

A Study on The Effect of Anthropogenic Heat Flux and Land-Use on Thermal Environment in Pusan

김유근 · 이화운 · 홍정혜 · 손은하
부산대학교 대기과학과
(1999년 7월 28일 접수, 2000년 6월 5일 채택)

Yoo-Keun Kim, Hwa-Woon Lee, Jung-Hye Hong and Eun-Ha Son
Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea
(Received 28 July 1999; accepted 5 June 2000)

Abstract

In order to overtake a quantitative analysis of effect of anthropogenic heat and different land-use on urban thermal environment, numerical simulation of surface energy budget was carried out under typical summer synoptic condition. Because the land-use is different for every subdivision in Pusan the mode includes a sub-grid parameterization scheme which can caculate heat budget on the mixture surface of various surface condition. It is beneficial to understand surface temperature of complex urban surface.

The different land-use types are classified of rice field, farm, fruit garden, residential region, forest, water and swamp by using map scaled 1/25,000 of Pusan metropolitan. The model predicts that maximum heat island intensity in the central part of Pusan is 7°C at 2000 LST in summertime. The surface temperature is propotional to the density of constructions. The effect of anthropogenic heat generation on surface temperature is the increase of 0.3°C at 1400LST in the central part of Pusan during summertime.

Key words : urban surface heat budget, land-use type, anthropogenic heat

1. 서 론

19세기 이후 산업의 발전과 도시 인구의 증가에 따라 도시는 교외지역과는 다른 도시 특유의 기후를 형성하게 되었다. 이러한 특유의 도시기후는 고온, 일사량의 감소, 시정의 악화, 운량, 안개일수의 증가, 풍속의 감소와 고유풍계의 형성 및 상대습도의 감소 등을 들 수 있으며, 이 과정에서 나타나는

가장 뚜렷한 변화는 기온의 상승 경향이다.

Lowry (1969)는 열섬의 원인을 인간활동에 의한 대기오염으로 인한 온실효과, 도로포장으로 인한 증발량 감소, 도시 구조물 증가 등으로 들었다. 增原孝明 (1990)는 동경에서의 자동차 배기가스와 열섬과의 관계를 고찰하였는데 도심지로 갈수록 열섬 강도가 커지며 도심에서 CO 농도가 높게 나타나는 시각인 21시에 열섬 강도가 약 4°C 정도임을 보였다. 이외에도 도시기온 분포에 영향을 미치는 요인

은 매우 복잡하므로 최근에는 세부적인 지표면 상태 분포 현황 및 요인별 특색과 분석을 하는 연구와(김종민 등, 1996, 1997) 지표상태에 따른 물리변수를 결정하여 온도 변화를 수치모의하는 등의 연구(김유근과 홍정혜, 1995)가 진행되었다.

Kimura와 Takahashi(1991)는 동경만의 개간사업으로 인한 기후적 영향을 연구하는데 있어서 일일 에너지 소비량을 임의 산정하여 대기유동장 수치실험을 수행한 결과 동경중심에서 기온이 약 1.5K 상승하는 것을 보여주었다. 또한 Saitoh(1996)는 높은 고층건물의 점유가 증가함에 따라 단위면적당 열저장 효과와 냉방부하 그리고 순수 에너지 소비량이 5배로 증가된다고 추정되어지는 2031년의 동경지역의 온도분포를 수치 시뮬레이션하였다. 그 결과 동경중심부의 온도가 15K 높아짐을 보였다. 이러한 온난화는 냉방의 강화를 초래하고 에너지소비의 증대를 요구하여 악순환이 진행될 것으로 예측되었다.

도시의 열적 환경의 원인은 에너지 소비로 인한 인공열 발생 뿐만 아니라 도시화에 따른 지표면 상태의 변화에 따른 증발율이 감소하는 도시구조에도 있다. Ichinose와 Shimodozono(1997)는 10개의 토지 이용을 분류하여 실제적인 지표면 피복 분포 현황을 파악하고 열전도율, 알베도, 증발효율, 토양의 밀도, 토양의 비열 등의 지표면 물성치를 세분화하여 도시 열적 환경을 규명하였다. Kimura와 Takahashi(1991) 역시 다양한 land-use에 따른 지표면 물리변수를 결정하여 실제적인 지표면 열수지 방정식을 완성하였다.

본 연구에서는 도시 열적 환경에 인간활동이 미치는 영향을 정량화하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 부산지역의 1/7,500 축척도를 이용한 용도별 건물현황분포와 차량 교통량 분포, 그리고 에너지소비량 원단위를 바탕으로 인공열의 시·공간분포를 산정하였으며 1/25,000 축척도를 이용하여 100m × 100m의 지표면 피복 상태를 조사하였다. 그리고 인공열 배출량과 피복 상태에 따른 물리 변수, 즉 알베도, 부분 상대습도, 거칠기 길이, 열 전도율을 고려하여 열수지 모델을 수행하여, 인공열과 land-use가 지표면 온도에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. land-use를 고려한 지표면 열수지

2.1 지표면 열수지 모델

도시 영역이 아스팔트, 건물, 녹지 등과 같은 다양한 지표면으로 이루어져 있기 때문에 도시의 지표면에서 에너지 수지를 계산하기란 쉽지 않다. 수치모의에서 거칠기, 수분함유량과 같은 지표면 물리변수는 그 지표면에 적절한 값이 도시 지표면에 적용되어야 한다. 이들 변수는 한 격자에 대해 한가지로 산정되어지므로, 예를 들면 도시 내부에서 한 격자내 식생의 효과를 고려하기란 쉽지 않다.

본 연구에서는 불확실한 지표면에서의 물리변수의 설정을 극복하기 위해서 부산지역을 대상으로 land-use의 공간적 분포 분석을 이용하여 아격자내 지표면 피복 상태를 고려하여 열수지 수치모의를 수행하였다.

이 방법은 주어진 격자내 지표면 현열과 잠열 등의 플럭스는 한 격자당 점유된 각각의 지표면 상태의 면적의 비율에 따라 결정되어지고 격자의 총 열 플럭스는 각각의 지표면 항목의 지표면 열 플럭스의 평균값으로 정의된다(Fig. 1).

본 연구에서 사용되어진 지표면 열수지 방정식은 아래와 같다.

$$R_N + A = LE + H + S_0 \quad (1)$$

$$S + I_1 - I_1 + A = LE + H + S_0 \quad (2)$$

R_N 은 순복사 플럭스, A 는 인공열 플럭스, LE 는 잠열 플럭스, H 는 현열 플럭스 그리고 S_0 는 지중열 플럭스이다. 이중 순복사 $S + I_1 - I_1$ 의 각 항은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$S = (1 - \alpha) T_r R_0 \cos Z \quad (3)$$

$$I_1 = \sigma [E_a (1 - C_i) + C_i] T_a^4 \quad (4)$$

$$I_1 = \sigma T_0^4 \quad (5)$$

$$\cos Z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad (6)$$

$$E_a = 1 - 0.261 \exp(-0.00077(273 - T_a)^2) \quad (7)$$

여기서, I_1 는 하향 지구복사에너지, I_1 는 상향 지구복사에너지, α 는 알베도, T_r 은 대기 투과도, R_0 는 태

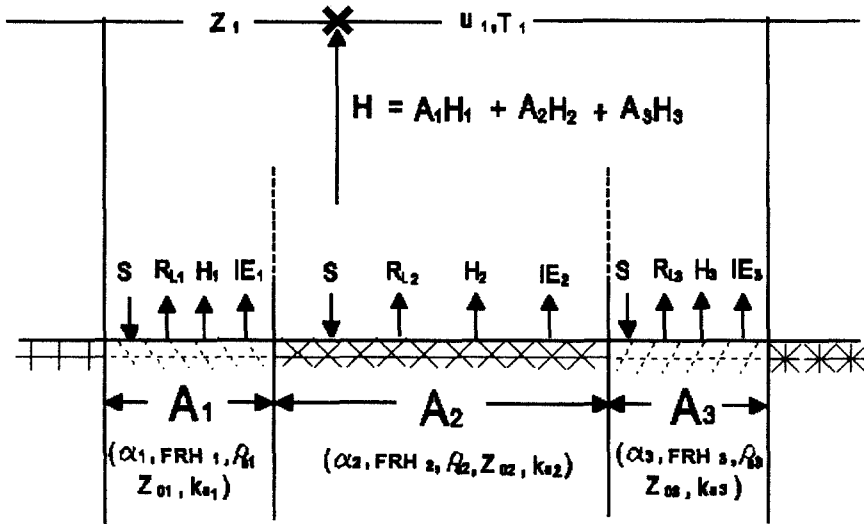


Fig. 1. Schematic representation of the parameterization method for the surface energy balance. (S : solar radiation, R : net longwave radiation, H : sensible heat radiation, IE : latent heat radiation, Z₁ : height, u₁ : velocity at Z₁, A : land-use category, α : albedo, FRH : site fractional relative humidity, ρ_s : soil density, Z₀ : roughness length, k_s : heat conductivity, 1, 2, 3 : land use category number)

양상수, φ는 위도, δ는 적위, h는 태양시, C_l은 구름의 양, T_a는 대기온도, T₀는 지표면 온도이다. 현열 플럭스와 잠열 플럭스는 다음과 같다.

$$LE = \frac{-\rho L \chi^2 U_1}{[\ln(Z_1/Z_0)]^2} (q_1 - q_0) \quad (8)$$

$$H = \frac{-\rho C_p \chi^2 U_1}{[\ln(Z_1/Z_0)]^2} (T_1 - \gamma_a Z_1 - T_0) \quad (9)$$

여기서, ρ는 공기밀도, L은 잠열, χ는 Von-Karman 상수(0.35), U₁는 Z₁에서의 풍속, Z₀는 거칠기, q₀와 q₁는 Z₀와 Z₁에서의 비습, C_p는 비열, T₀는 지표온도, T₁는 Z₁에서의 온도 그리고 γ_a는 건조 단열감율이다.

지중열 플럭스는 다음과 같다.

$$S_0 = -k_s \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (10)$$

여기서, T_g는 토양의 온도, 그리고 k_s는 열 전달계수이다.

위의 식들을 바탕으로 다양한 토지 이용이 혼합되어진 지표면에서의 임의 플럭스는 다음과 같이

주어진다.

$$[F]_G = \sum_i A_i [F]_i / G \quad (11)$$

여기서, G = ∑ A_i이고, [F]_G는 한 격자내 평균되어진 플럭스이며 A_i는 지표면 상태 i에 의해 점유되어진 면적을 나타낸다. [F]_i는 지표면 상태 i에서의 플럭스이다.

격자내 각각의 지표면 온도는 Secant method를 이용하여 반복 수렴시켜 계산한다.

2. 2 부산 지역의 land-use의 공간 분포

본 연구에서는 다양한 지표면 상태가 혼합되어진 도시 지역에서의 열적 환경 이해를 위해서 부산의 land-use 분포를 파악하였다. 이를 위해 부산 지역을 30 km × 30 km로 Fig. 2와 같이 지표면 열수지 수치모의의 영역으로 설정하였으며 수치모의는 1 km × 1 km로 수행되지만 지표면의 상태를 더욱 세밀하게 고려하기 위하여 다시 100 m × 100 m로 격자를 세분화 하여 격자내 토지이용의 비율을 계산하였다. 격자내 토지이용은 Fig. 3과 같이 논, 밭, 과수원, 산림, 건물용지, 수면, 늪의 7가지로 구분하였다.

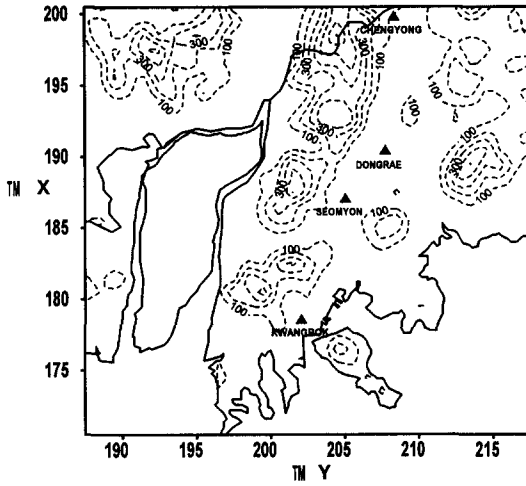


Fig. 2. Topography in Pusan area.

2.3 부산 지역의 인공열 배출량

인공열은 1996년도 자료를 바탕으로 하여 건물에서 배출되는 인공열과 차량으로부터 배출되는 인공열을 더하여 총 인공열 배출량으로 하였다. 건물에서 배출되는 인공열은 부산지역의 1/7,500 축척도를 이용하여 격자(1 km×1 km)내 건물의 종류를 단독주택, 연립주택, 일반 사무실, 공장, 호텔, 백화점, 상점, 학교, 병원으로 9개의 용도별로 분류하여 그 바닥면적을 산정하였다. 건물 용도별 에너지 소비량 통계자료(통산부, 1996)를 이용하여 격자내 건물 용도별 바닥면적과 곱해서 월별 건물로부터의 인공열 배출량을 산정하였다.

차량으로부터의 인공열 배출량은 격자내 차량을 버스, 승용차, 승합차, 대형차로 구분하여 교통량을 조사하고, 도로길이를 조사하여 각 차량의 격자별 에너지소비량을 산정하여 차량별 교통량과 곱하여 차량으로부터의 인공열 배출량을 산정하였다.

시간별 인공열 배출량은 건물에 의한 인공열 배출량의 경우 전력소비 추이계수를, 차량에 의한 인공열 배출량의 경우 차량통행량 감지기의 자료를 이용하여 시간별 차량통행량 비를 이용하여 추정하였다.

인공열 배출량의 입력자료는 각 격자별로 24시간 동안 매시간마다 주어졌으며, 부산지역 하계(6월, 7월, 8월, 9월)의 1,400LST와 2,000LST의 차량과 건

물로부터의 총인공열 발생량 분포도를 Fig. 4에 나타내었다.

2.4 모델의 입력조건 및 경계조건

지표면 상태에 따른 물리변수는 2.2절에서 수행되어진 부산 지역의 다양한 land-use 자료를 통해 지표면 상태에 따라 결정하였다. 거칠기와 열 전달율은 건물 점유면적에 따라 Table 1 (Saitoh, 1996)과 같이 적용하였는데 부산 지역의 건물 점유면적은 Fig. 3의 residence와 동일하다고 가정 하였다.

지표면 온도의 수치모의에서 거칠기 길이는 지표면 온도를 결정하는 중요한 변수이므로 residence에 대해서 동일한 값을 부여하는 것은 수치모의 결과에 오차를 만든다. 하지만 본 연구에서의 지표면 피복상태에 대한 정보는 지도를 이용하여 얻어지므로 residence에 대한 구체적인 높이의 고려가 불가능하여 거칠기 길이를 구분할 수 없었다. 이러한 문제는 GIS (Geographical Information System) 자료를 이용하여 도시내의 건물에 대한 정확한 정보가 바탕이 된다면 해결 가능할 것이다.

그리고 지표 상태에 따른 알베도, 부분 상대습도 (Ichinose와 Shimodozono, 1997)와 비열 (Kimura와 Takahashi, 1991)은 Table 2와 같이 적용하였다.

수치모의는 구름이 없이 맑은 전형적인 하계의

Table 1. Roughness and heat conductivity parameter according to the rate of residence.

Rate of residence (%)	Roughness length (cm)	Heat conductivity (cal cm ⁻¹ s ⁻¹ °C ⁻¹)
70 ~ 100%	150	5.97 × 10 ⁻³
20 ~ 70%	40	4.28 × 10 ⁻³
0 ~ 20%	10	2.60 × 10 ⁻³

Table 2. Surface parameters due to Land-Use type.

Land-Use categories	Albedo	Site relative humidity (%)	Heat capacity (cal cm ⁻³ °C ⁻¹)
Rice field	0.17	100	0.49
Farm	0.17	100	0.49
Fruit garden	0.16	100	0.49
Residential region	0.18	60	0.54
Forest	0.16	100	0.49
Water	0.08	100	1.0
Swamp	0.14	100	1.0

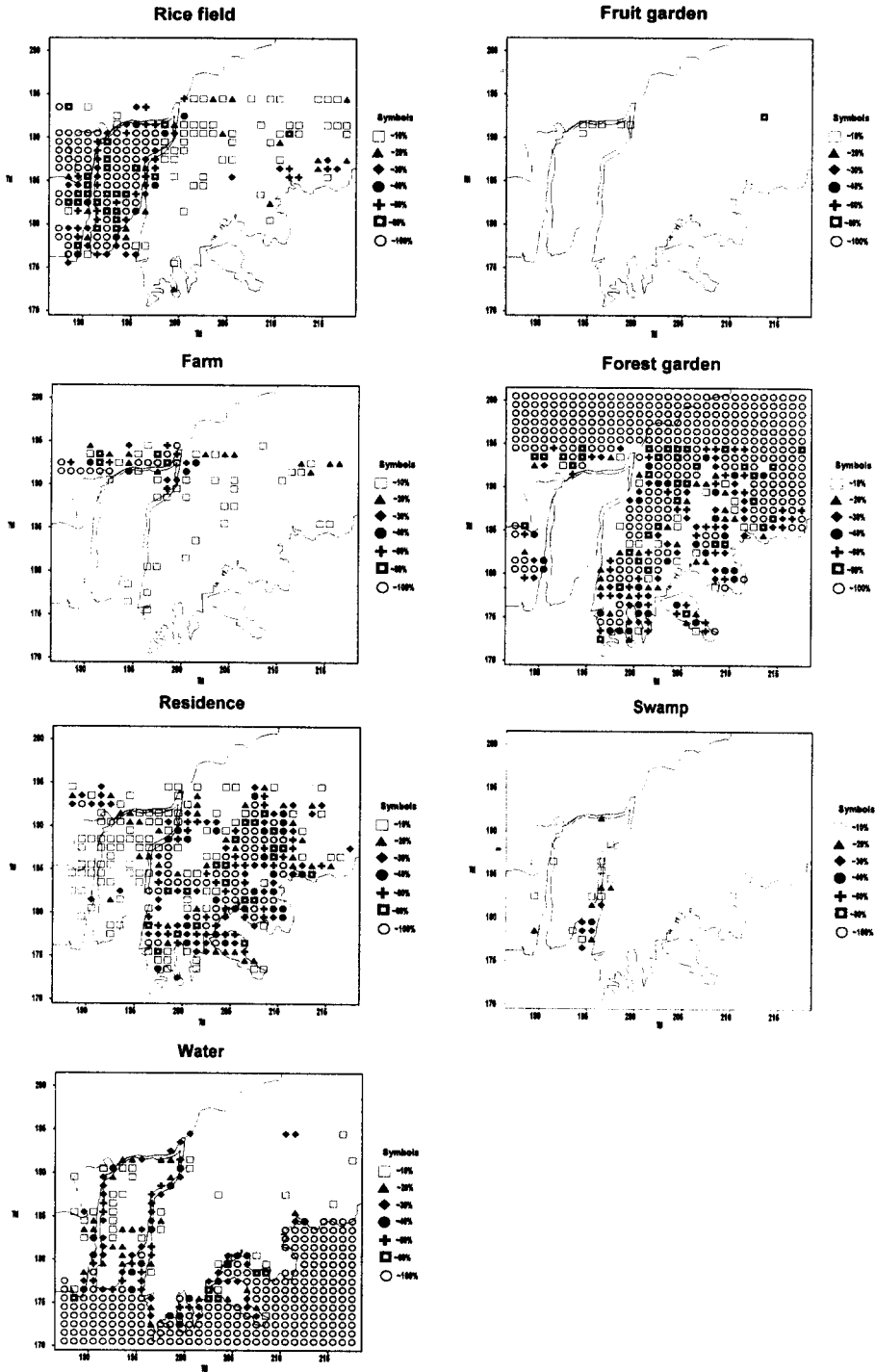


Fig. 3. Rate of Land-Use type in each 1 km² in Pusan. Approximate values of the symbols (%) are given on the right-hand side.

Table 3. Boundary condition for clear summer condition.

Upper boundary (300 m)	
$T_i = T_{sea} + AM \sin((Time - 8)2\pi/24)$	
$T_{sea} = 297.68^\circ\text{C}$	
$AM = 6$	
$U_i = 5 \text{ m/s}$	
$q_i = 0.003 \text{ g/g}$	
Solar factor	
latitude 36.5°	
longitude 129°	

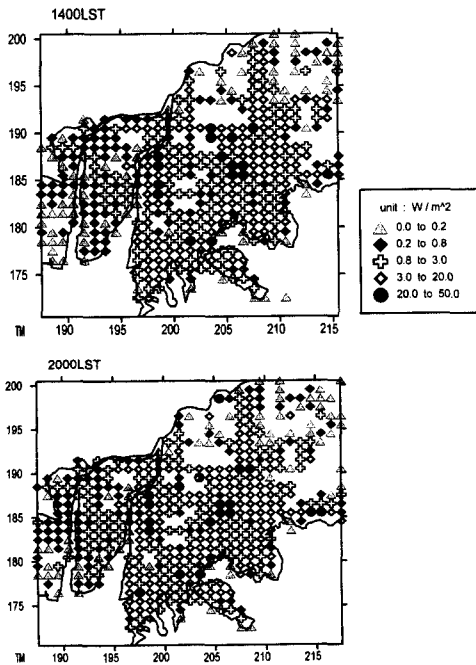


Fig. 4. Total anthropogenic heat generation in Pusan at 1400 LST and 2000 LST during summertime (1996).

종관기상조건에서 수행하였으며, 수치모의의 경계조건은 Table 3과 같다.

3. 부산 지역 도시 열적 환경의 특성

3.1 지표면 온도의 수평구조 특성

부산지역의 하계를 대상으로 지표면 열수지 수치모형을 수행한 결과, 시간별 지표면 온도분포를 Fig. 5에 나타냈다. 1,100 LST에서는 부산 지역 내

건물분포(Fig. 2)와 유사한 유형의 등온선을 가지면서 304K의 영역이 부산 내의 산지를 제외한 지역에 대해서 골고루 분포하고 있다. 오후 1,400 LST부터는 1,100 LST의 304K 영역이 유지되면서 오전의 열원이 도시역에 저장되는 효과와 함께 점차 상대적으로 지표면 온도가 낮았던 지역의 등온선이 깨어지면서 고온화 영역으로 흡수되어진다. 2,000 LST의 밤 시간으로 접어들면서 도심구조와 유사한 등온선이 출현한다. 따라서 지표면의 부등 냉각으로 인하여 도시 내부의 등온선 간격이 좁고 지표면의 온도차가 큰 것을 알 수 있다.

건물 과다지역이면서 인공열의 방출이 많은 부산의 서면을 중심으로하는 지역에서 야간의 고온영역이 발생하고 있는데 한영호 등(1993)은 부산지역의 정점 연속 기온관측을 실시한 결과 서면지역 중심으로 야간의 고온영역이 나타난다고 밝힌 바 있다. 2,300 LST에도 2,000 LST때와 같이 좁은 등온선 간격을 유지하나 낮보다 낮은 온도를 가지면서 다소 진구 중심의 고온영역이 완화되어지고 있다. 이러한 2,000 LST와 2,300 LST에 나타나는 야간의 지표면 온도의 차이는 인간의 에너지 소비 활동과 도시 특유의 지표면 피복을 갖는 도시 구조 특성 때문이다.

3.2 도시열섬의 수평구조 특성

도심은 외곽지역과 구분되는 고온영역을 가지는데 도시 외곽 지역과 도심의 지표면 온도차이를 열섬 강도(ΔT_{u-r})라고 한다. 여름을 대상으로한 본 연구의 시간별 열섬 강도의 변화를 Fig. 6에 나타내었다.

본 연구에서는 부산 지역 청룡동의 지표면 온도를 대표적인 도시외곽의 지표면 온도로 설정하였다. 하계 1,100 LST에서는 건물 과다 밀집 지역인 서면을 중심으로 한 지역과 광복동 일대가 3°C의 최대 열섬 강도 지역이었다. 서면과 광복동은 부산 지역에서 일반주택과 사무실 등이 점유되어진 건물 과다 밀집 지역이다.

2,000 LST에 전형적인 하계 열섬 현상이 뚜렷이 나타나는 서면이나 동래를 중심으로 일부 지역의 열섬 강도가 약 7°C의 높은 값을 나타낸다. 이러한 사실은 한영호 등(1993)에 의한 정점 연속 기온관측을 통해서도 부산지역의 열섬현상이 규명된 바 있다. 2,300 LST에도 열섬 강도는 줄어들지 않고 계

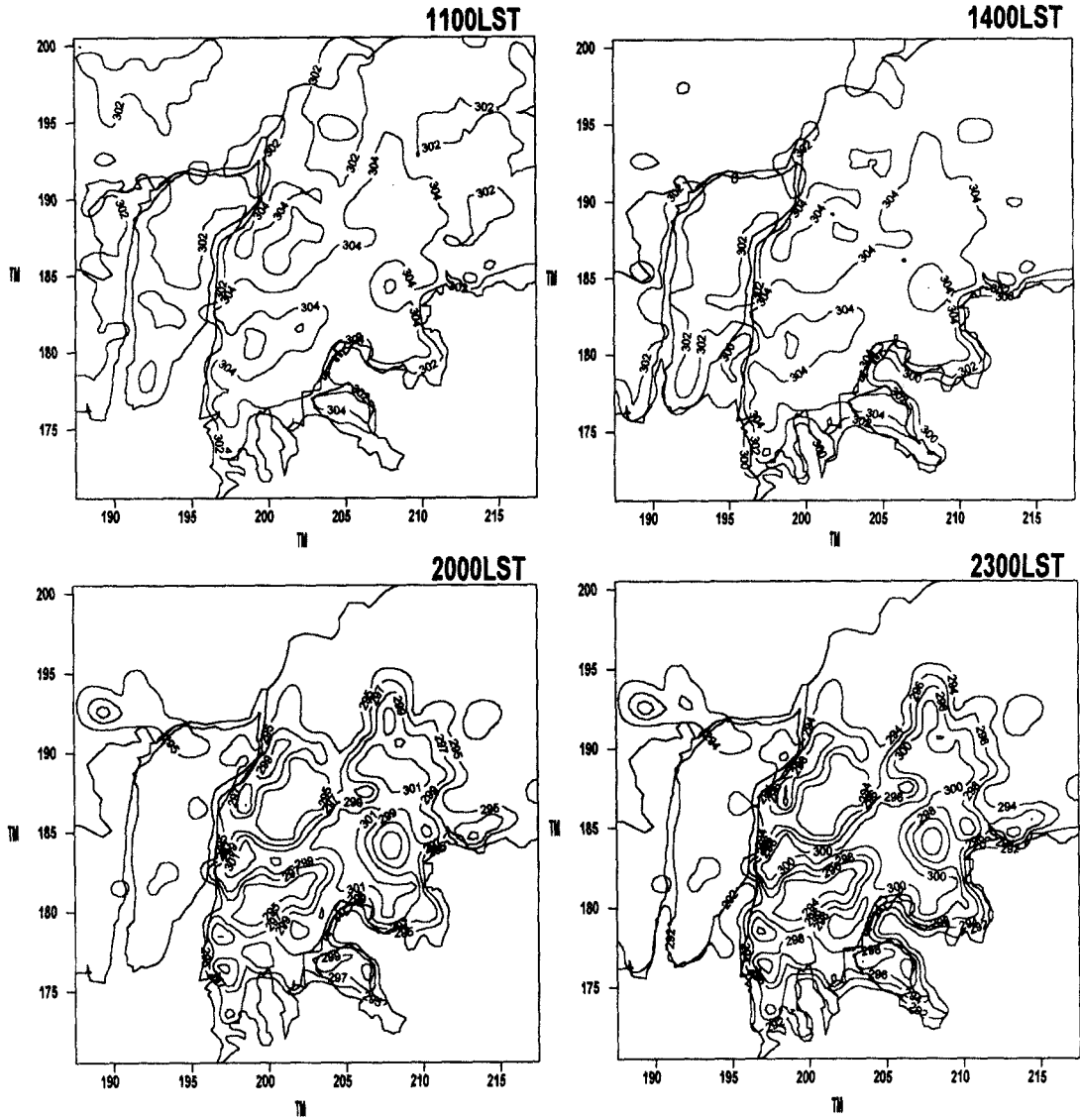


Fig. 5. The simulated surface temperature in Pusan during summertime.

속하여 같은 위치에 같은 지표면 온도를 유지하고 있으나 고온영역인 서면에서 강도가 다소 감소하였다.

위와 같이 부산 지역에 대한 열적 환경을 분석한 결과 대체로 건물 밀집지역에서 land-use에 따른 지표면의 변화에 의해서 온도가 높았다.

3.3 인공열의 효과

건물 밀집 지역에서 특징은 에너지소비에 의한 인공열이 방출된다는 것이다. 인공열이 도시 지표면 온도에 미치는 영향을 조사하기 위해 부산지역을 대상으로 인공열이 발생할 때와 인공열이 발생하지 않을 때로 나누어 지표면 열수지 수치모의를 수행하여 지표면 온도 차이를 계산하였다. 인공열 발생

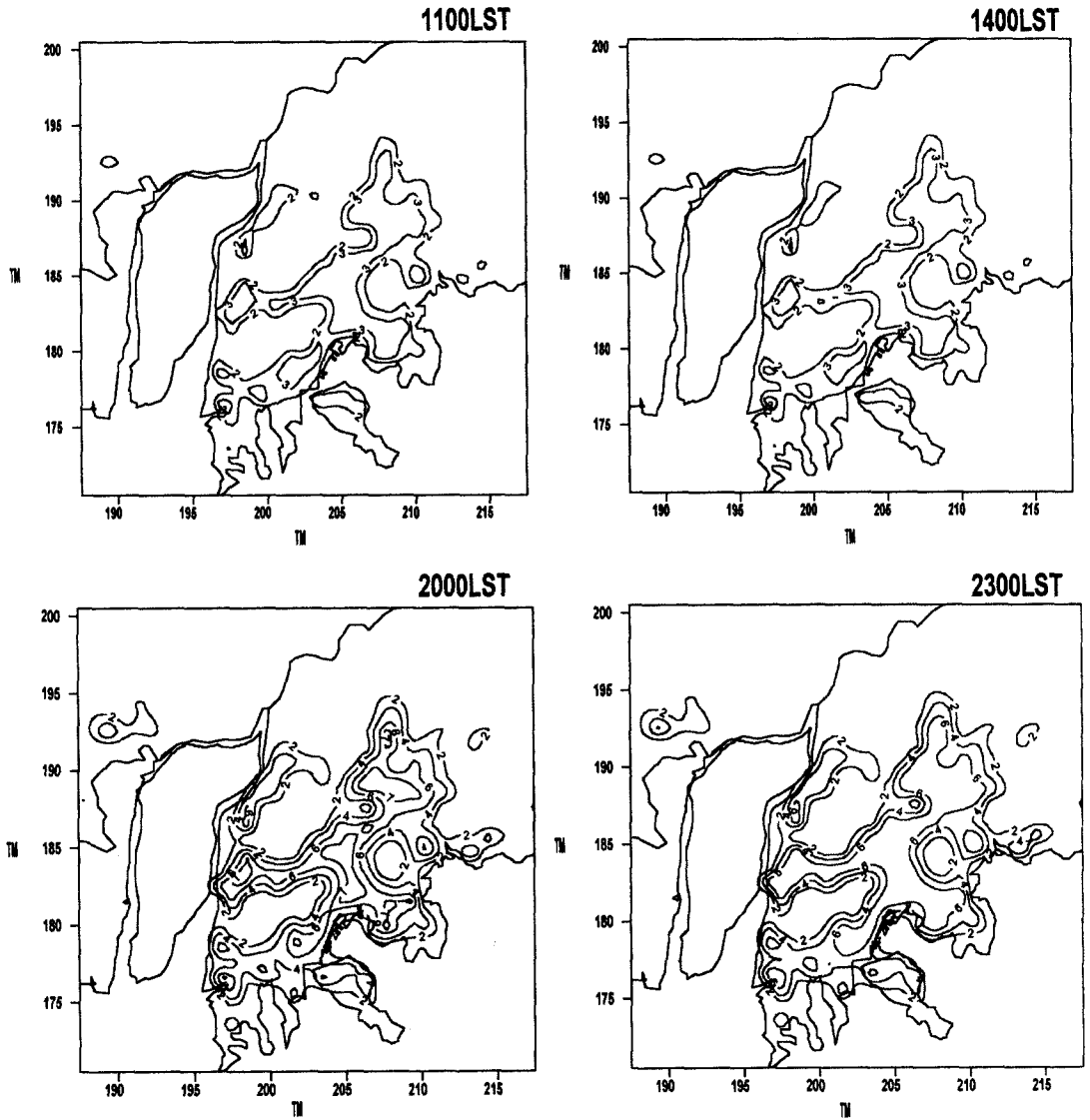


Fig. 6. The simulated heat island intensity in Pusan during summertime.

때와 인공열이 발생하지 않을 때의 지표면 온도차는 인공열이 도시 열적 환경에 미치는 영향을 정량화시켰다는데 큰 의미가 있다.

Fig. 4와 같이 격자마다 시간별 인공열이 주어질 때 Fig. 7와 같이 모든 시간에 걸쳐 도시 중심지역인 서면 지역에서 작은 값이지만 온도 상승이 나타났다. 특히 1,400 LST에 35 W/m^2 의 인공열 방출이 있었는데 이때 온도 상승은 0.3°C 를 나타냈다.

그러나 2,000 LST에서는 부산의 많은 지역에서 0.1°C 의 온도 상승이 보이는데 앞서 밝힌 야간에 에너지소비 분포가 확대됨에 따라 인공열이 야간의 인공적인 열원의 역할을 하고 있기 때문이다. Ichinose와 Shimodozone (1997)는 신주꾸지역을 대상으로 도시 열적 환경에 대해서 인공열의 효과를 수치모의 하였는데, 1,400 LST에 200 W/m^2 의 인공열 방출이 온도 약 1.2°C 을 상승시켰다. 따라서 부산의 도

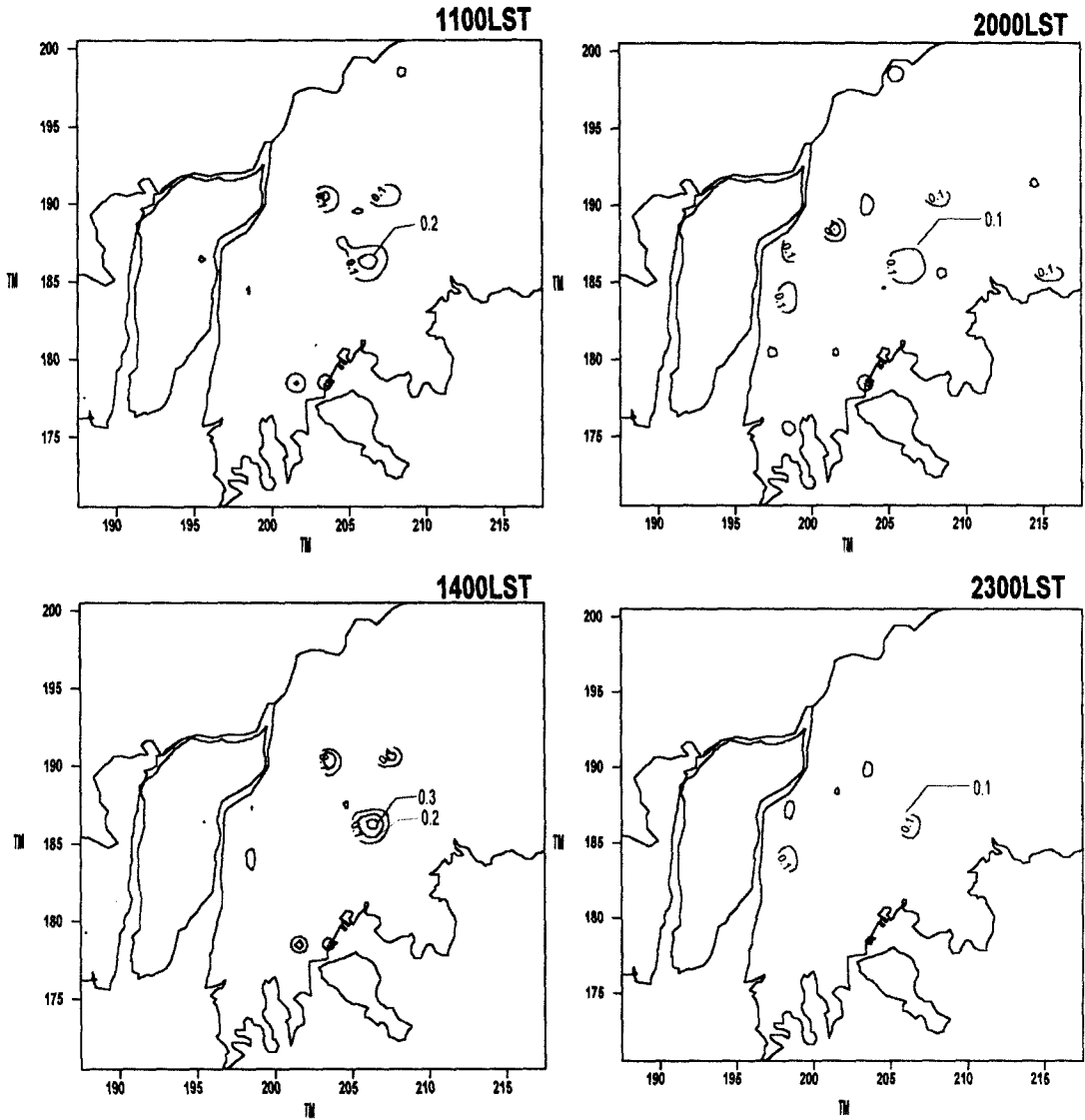


Fig. 7. Increase of surface temperature due to anthropogenic heat generation in Pusan.

시 중심 지역인 서면의 온도 상승폭이 다소 작았지만 에너지 소비 활동이 계속적으로 증가한다면 온도 상승이 높아질 것으로 예상된다.

4. 결 론

도시화에 따른 도시 기후의 원인 인자로서 인공열과 지표면 상태 변화는 중요하다. 이러한 원인 인

자의 정량적인 평가를 위해서는 많은 통계자료와 상세한 지리정보가 필요하다. 특히 인공열은 인간의 활동인 에너지소비에 의해 발생되므로 일정 공간내 시간별 변화추이를 살펴본다는 것은 매우 어려운 일이다. 다양한 종류의 에너지 사용과 에너지 사용장소의 현장 조사가 어렵기 때문이다.

본 연구에서는 부산 지역을 대상으로 에너지 소비구조에 따른 인공열의 시·공간적 분포와 복잡

다양한 도시 지표면 상태를 고려한 지표면 열수지 수치 모의를 수행하여 도시 열적 환경을 이해하고자 하였다.

아격자내의 다양한 land-use 분포를 고려할 수 있는 지표면 열수지 모형을 구성하였고 부산 지역에 대한 100 m × 100 m의 아격자내의 land-use 분포를 구하였다. 이것을 이용한 거칠기 길이, 알베도, 부분 상대습도, 열 전달율과 인공열을 고려하여 하계를 대상으로 하여 지표면 열수지 수치 모의를 수행한 결과

1) 지표면의 등온선은 건물밀집지역의 분포에 비례하여 높게 나타났는데, 서면과 동래, 광복동 등 도심 중심을 중심으로 높았고 야간에 온도경도가 컸다.

2) 도시내 지표면 온도에서 부산 지역내 외곽지역인 청룡동의 지표면온도를 뺀 도시 열섬 강도(ΔT_{u-r})는 서면을 중심으로 2,000 LST에 7°C였다.

3) 인공열이 방출될 때와 방출되지 않을 때 지표면 열수지 모형의 수행 결과, 하계 평균 35 W/m²의 인공열이 방출되는 서면 중심의 지역에서 1,400 LST에 지표면 온도가 0.3°C 상승하였다.

본 연구에서는 부산의 복잡한 지표면 상태의 현황 파악과 도시내 에너지 소비에 의한 인공열 방출이 부산의 열적 환경에 미치는 영향을 고찰하였다. 이전에 생략되거나 상수의 형태로 이용되어졌던 인공열 플러스가 국지기상모델의 지표면 경계조건으로써 적용 가능하여 미래 도시행정계획에 따른 개발과 재개발, 매립 그리고 새로운 도시역의 창출에 따른 에너지소비량의 산정과 지표면 피복상태 변화에 의한 지표 열수지 변화에 따른 대기환경 변화 예측의 기초자료를 제공할 것이다.

사 사

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구

비에 의하여 지원되었음 (과제번호: 1998-015-D00292).

참 고 문 헌

- 김종민, 松尾 陽, 坂本 雄三 (1996) 동경도구부의 인공열 MAP작성에 관한 연구, 대한건축 학회학술발표논문집, 16, 2, 351-354.
- 김종민, 坂本 雄三, 趙敏寬 (1997) 도시표면의 전열현상에 관한 연구, 일본 동경지역에 있어서, 대한건축학회학술발표논문집, 17, 2, 723-728.
- 김유근, 홍정혜 (1995) 도시지표면의 고온화에 관한 연구, 한국대기보전학회, 춘계학술발표회의요지집, 181-182.
- 한영호, 김보현, 이동인 (1993) 부산지역 도심지의 열섬현상과 기온변화에 대한 연구, 한국기상학회지, 29, 3, 205-216.
- 통산부 (1996) 에너지 총조사보고서, 1120pp.
- 増原孝明 (1990) 東京都における自動車排ガス大気汚染に影響お及ぼす都市効果, 天氣, 37, 2.
- Lowry, W.P. (1969) Weather in life, Academic press.
- 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, Atmospheric Environment, 25B, 155-164.
- Ichinose, T. and K. Shimodozono (1997) Upgrade of surface boundary condition for numerical simulation of urban climate based on very precise geographic information, Journal of the Meteorological Society of Japan, 25-35.
- Saitoh, T.S. (1996) Modeling and simulation of the Tokyo urban heat island, Atmospheric Environment, 30, 3431-3442.