

대규모 주택단지내의 인공구조물에 의한 승온화효과에 관한 연구

김 해 동 · 이 송 옥 · 구 현 숙
계명대학교 환경학부 지구환경보전전공
(2003년 2월 15일 접수; 2003년 7월 3일 채택)

On the Warming Effects due to Artificial Constructions in a Large Housing Complex

Hae-Dong Kim, Song-Ok Lee and Hyun-Suk Goo

Department of Environmental Conservation, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

(Manuscript received 15 February 2003; accepted 3 July, 2003)

In mid-August 2002, under clear summer pressure patterns, we carried out an intensive meteorological observation to examine the warming effects due to artificial constructions in a large housing complex. We set an automatic weather system(AWS) at two places in a bare soil surface within a limited development district and an asphalt surface within a large apartment residence area, respectively. As a result of observation, it became clear that the difference of the surface air(ground) temperature between the bare soil surface and its peripheral asphalt area reached about 4°C(13°C) at the maximum from diurnal variation of surface temperatures on AWS data.

Through the heat balance analysis using measurement data, it became clear that the thermal conditions at two places are dependent on the properties of surface material. The latent heat flux over the bare soil surface reached to about 300 W/m², which is more than a half of net radiation during the daytime. On the other hand, it was nearly zero over the asphalt surface. Hence, the sensible heat flux over the asphalt surface was far more than that of the bare soil surface. The sensible heat flux over the asphalt surface showed about 20~30 W/m² during the night. It was released from asphalt surface which have far more heat capacity than that of bare soil surface.

Key words : Heat balance, Heat capacity, Sensible heat, Latent heat

1. 서 론

도시환경 문제에 있어서, 인간활동에 가장 큰 영향을 미치는 것은 대기오염이라는 공해현상이다¹⁾. 2차 대전 후에 급속히 진행된 산업화의 여파로 발생한 도시의 대기오염은 시민들의 생활의 질을 저하시키는 주범으로 인식되어, 선진국가를 중심으로 연구와 대체기술개발사업이 집중적으로 수행되었다. 그 결과, 대기오염에 대한 실태과악, 발생 메카니즘의 규명, 대기환경관리 대책 등에 걸쳐서 상당 부분의 문제가 해결되기에 이르렀다^{2,3)}.

반면에, 도시의 포장화, 건물의 고층화, 냉난방시설의 확대 및 차량과 산업시설의 확대에 따른 도시의 기후환경적 조건은 지속적으로 악화되어 왔다^{4~6)}. 즉, 도시열섬화, 도시의 야간 열대야현상 심화 및 도시건조화가 급속히 진행되어 심각한 사회문제로 대두되고 있다⁷⁾. 이러한 배경에서 1980년대 이래로, 선진 외국에서는 도시생활의 쾌적성(amenity)창조에 대한 연구가 대기환경의 주요부분을 점하게 되었다^{1,2,8)}. 더욱이 도시의 주거환경개선을 위한 도시 기후연구는 최근 도시기후연구에 있어서 중심적인 역할을 담당하게 되었다⁹⁾.

이에 관련된 주요 관심사는, 도시의 승온화에 의한 열섬현상 및 하계 열대야 일수의 증가에 관한 문제이다. 도시와 인접한 교외지역간의 기온차로

Corresponding Author : Hae-Dong Kim, Department of Environmental Conservation, Faculty of Environmental Studies, Keimyung Univ., Daegu 704-714, Korea
Phone : +82-53-580-5930
E-mail : khd@kmu.ac.kr

정의되는 도시열섬 강도는 일반적으로 겨울에 크고, 여름에 작다¹⁰⁻¹²⁾. 일본 동경이나 우리나라의 서울을 포함한 동북아시아 대도시의 열섬강도가 북미대륙이나 유럽보다도 큰 것으로 알려져 있는데, 일최저기온의 월평균치가 여름에 도심이 교외지역보다 2~3℃정도 높은 것으로 알려져 있다¹³⁻¹⁶⁾. 이에 비하여, 동계에는 도심의 온도가 교외의 그것보다 7~8℃나 높은 것으로 보고되고 있다¹⁷⁾. 이처럼 하계에 도시와 교외간의 온도차이가 그다지 크지 않음에도 불구하고, 도시에 사는 사람은 교외에 사는 사람에 비해서 쾌적성이 많이 떨어진다고 느낀다. 이 원인으로는, 도시내 고층건물로 인하여 도시에 바람이 약화된다는 것과 콘크리트 구조물의 벽면이나 아스팔트 도로의 고온 영향이 야간까지도 지속된다는 것 등을 생각할 수 있고, 그 외에 여름 밤의 기온이 교외에서는 25℃ 이하로 내려가지만 도심에서는 25℃를 초과하는 열대야 현상이 많이 나타나 잠들기 어렵고, 그것으로 인하여 생리적 활성도가 떨어지는 탓으로 생각할 수 있다^{7,18)}. 이와 관련된 Kawamura¹⁾, Omoto¹⁹⁾ 등의 조사에 의하면, 1950년대 전반에는 동경의 열대야 일수가 5일 이하였지만, 그후 점차 증가하여 도심에서는 25일을 넘어서고 있다고 한다. 그러나 교외에서는 여전히 5일 미만으로 변화가 없었다. 이와 같이 도시의 환경쾌적성의 저하는 주로 하계 야간기온의 상승과, 그로 인한 열대야현상의 출현에 주로 기인한다.

이러한 도시승온화의 주요 원인은 크게 다음의 3가지로 인식되고 있다.

첫째, 도시의 좁은 공간에서 이루어지는 고밀도의 인간활동에 수반된 인공열 배출이다. 산업화는 좁은 지역에 많은 인구가 집결하여 생활하는 도시화를 촉진한다. 그래서 토지이용에 있어서 도시지역에 큰 변화가 지속적으로 발생하여 왔으며, 앞으로 더 많은 토지가 도시적 이용으로 전용되어 증가하는 인구를 수용하게 될 것이다. 그렇게 되면 도시의 주거지역, 공장 및 교통수단이 증가되어 더 많은 연료가 사용될 것이고, 더 많은 폐열(waste heat)이 방출되어 도시의 기온을 상승시킬 것이다¹²⁾. Ichinose 등¹⁴⁾에 의해 최근에 조사된 일본 동경의 인공열 배출량은 매우 놀라운 것이었다. 낮동안에 동경 중심가에서는 인공방출열이 400 W/m²을 초과하며, 최대치는 사무실 밀집지역인 신주꾸 근처에서 겨울철 오전에 1,590 W/m²에 이르는 것으로 추정되었다. 그가 열수지 모델을 이용하여 평가한 결과에 의하면, 동경에서 방출되는 인공열로 인한 기온상승효과는 약 2~3℃이었다.

둘째는, 녹지와 수변의 감소로 인한 증발열의 감

소이다. 이와 관련하여, Grey and Deneke²⁰⁾는 도시의 공원은 낮에는 나무의 기온저감 효과로 도시의 건폐지보다 3~5℃ 정도 낮고, 밤에는 열손실 속도를 늦추어 기온이 높게 형성됨을 지적한 바 있다. 그들은 20년생 느티나무 한 그루가 하루에 물 400리터를 증산할 수 있다면, 이는 2,500Kcal/hr의 에어컨이 하루 20시간 작동하여 유발하는 냉방효과에 상당한다고 지적하기도 하였다.

셋째는, 열저장 기능이 큰 아스팔트 포장도로와 콘크리트 구조물에 의한 도시의 승온화이다. 이는 한낮에 도시기온을 상승시켜 도시열섬화를 조장하기도 하지만, 보다 큰 문제는 하계에 열대야 일수를 증가시키는 주요 원인이라는 점에 있다. 콘크리트 구조물에 의한 열섬화과정을 Tamiya²¹⁾가 관측을 통하여 제시하였다. 그는 호수(戶數)가 2,900이고, 동수(棟數)가 93인 주택단지의 건물이 완성되었지만 입주에 이루어지지 않은 곳에서 기온관측을 수행하였다. 즉 인공방출열 효과없이, 구조물에 의한 승온화효과만을 관측한 것이다. 10월에 관측을 수행하였는데, 일몰 후에 주택단지의 내외에서 약 1℃의 열섬이 발생하여, 다음 날 일출시까지 지속되었다. 이것은 지표면에 콘크리트 구조물을 만들면, 인위적인 열을 방출하지 않더라도 열섬이 발생할 수 있음을 나타내는 좋은 관측적 사실이다. 그리고, Sugawara 등²²⁾은 도시에 있어서 각종 지표면 온도의 민감도를 열수지적 기법을 이용하여 해석한 바 있다. 그들은 이 연구에서 도시기온에 미치는 영향이 지표면의 습윤도와 지표구성물질의 열물리적 특성이 가장 중요함을 지적하였다.

본 연구에서는, 위에서 소개한 도시열섬화를 유발하는 주요 3가지 요인 중에서 도시구조물의 효과를 관측과 열수지 해석기법을 통하여 조사·연구하고자 한다. 이를 위하여, 하계에 대규모 아파트단지(대구 성서한샘타운)와 인근에 위치한 개발이 유보된 내대지에 고정관측점을 설정하고, 54시간 연속 관측을 실시하여 인공구조물로 포장된 대단지 주택단지 내에서의 승온화현상을 조사하였다. 이를 기초로 열수지 해석을 수행하여, 인공구조물에 의해 승온화가 유발되는 기구(mechanism)를 이해하고자 한다. 이 연구결과는 대구지역을 포함한 우리나라의 대도시에 대한 도시승온화 원인을 이해함으로써, 이를 해결하기 위한 방법론을 제시할 수 있다는 점에서 중요성을 찾을 수 있을 것이다.

2. 자료 및 방법

2.1. 관측

아파트단지 내와 개발이 유보된 지역간의 기온차

대구모 주택단지내의 인공구조물에 의한 승온화효과에 관한 연구

이 및 인공구조물에 의한 승온화 과정을 조사하기 위하여, 성서지역의 대규모 아파트단지의 서쪽 끝에 위치한 아파트(성서한샘타운)내와 그에 인접하고 개발이 유보된 광역의 나대지(향후, 나대지라고 호칭하기로 함)에 각각 자동기상관측장치를 설치하였다(Fig. 1). 관측이 이루어진 대구 성서아파트단지를 포함하는 지역적 특성을 Fig. 2에 나타내었다. 관측이 이루어진 나대지는 와룡산(해발 296미터)의 남쪽에 위치하며, 나대지의 동쪽으로 거대한 아파트단지가 위치하고 남쪽에는 약 1,600세대의 아파트단지와 상가 및 대구 최대의 산업단지인 성서공단이 위치하고 있다. 관측은 성서아파트단지의 서쪽 끝에서 이루어졌다. 측정항목은 기온, 상대습도, 풍향·풍속, 지표면온도, 일사량 등인데 이들 관측센서를 자료기록장치(CR-10, 미국 Campbell)에 연결하고 1시간 평균값이 자동관측되어 저장되게 하였다.

그리고 지면 및 일사조건에 따른 열적조건을 조사하기 위하여 아파트 단지내 아스팔트온도, 단지내의 잔디온도, 아파트주변 도로변에 위치한 가로수 밑의 온·습도, 나대지의 지표온도를 1시간 단위로 측정하였다. 관측장비로는, 온·습도는 아스만 온·습도계를 사용하였고 지표온도 측정은 자료검증을 위해서 적외선 복사온도계와 디지털온도계를 병행하여 사용하였다.

관측은 2002년 8월 19일 24시에서 8월22일 07시

까지 55시간 연속으로 이루어졌으며, 자동기상관측 장치에서 기온측정 고도는 백엽상 높이와 같은 1.5m로 하고, 온도계 센서가 일사 및 지열에 직접 노출되지 않도록 차단용 틀을 설치하였다. 관측이 이루어진 두 지점간의 고도차는 10m내외로 매우 작았기 때문에 고도차에 의한 온도 차이는 없으므로 간주하였다. 관측일의 기상조건을 Table 1에 제시하였는데, 이는 대구지방 기상대에서 관측된 자료이다.

관측일(8월19일~22일)의 대구지역의 날씨는 제 13호 태풍 판폰(PHANFONE)이 일본 도쿄 북동쪽으로 지나갔는데 대구지역에 직접적인 영향을 미치지 않았다. 단지 구름 많음과 구름 조금 상태가 수시로 교차되었고, 평균기온은 23.26℃, 습도는 68.8%이었고 풍속은 2m/s내외로 약했다. 관측일 동안의 기상조건은 운량이 다소 많아, 인공구조물에 의한 낮동안의 에너지 저장효과를 충분히 평가할 수 있는 조건을 만족하지는 않았다. 그러나 관측 3일째(8월 21일)에는 상대적으로 운량이 적고 풍속이 약하여, 인공구조물에 의한 승온화효과를 조사할 수 있는 기상조건을 대체로 만족하였다. 참고로 이 날(8월 21일 00UTC(09LST))의 지상일기도를 Fig. 3에 제시하였다. 열대저기압으로 바뀐 태풍 판폰이 일본 열도의 북동쪽에 위치해 있고, 중국의 화중 및 화남지방에 저기압이 넓게 분포해 있다. 우리나라에는 두 저기압 사이에 고기압이 위치하여 대체로

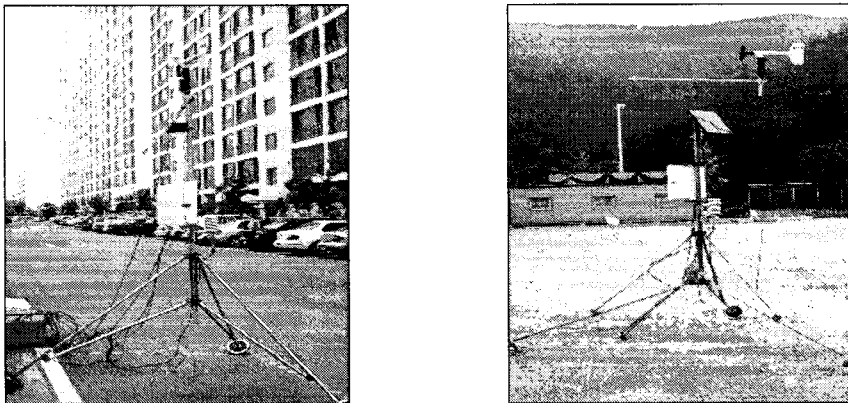


Fig. 1. Automatic weather observation systems used in this study.

Table 1. Weather conditions of observation day in Daegu

observation days	cloud amount(/10)	daily mean temp. (℃)	humidity(%)	wind (16방향)	wind speed (m/s)
19/Aug.	6.12	24.20	69.25	SW	2.56
20/Aug.	6.50	22.92	60.29	W	3.20
21/Aug.	5.50	23.00	69.92	NW	1.84
22/Aug.	9.12	22.90	75.71	N	1.48

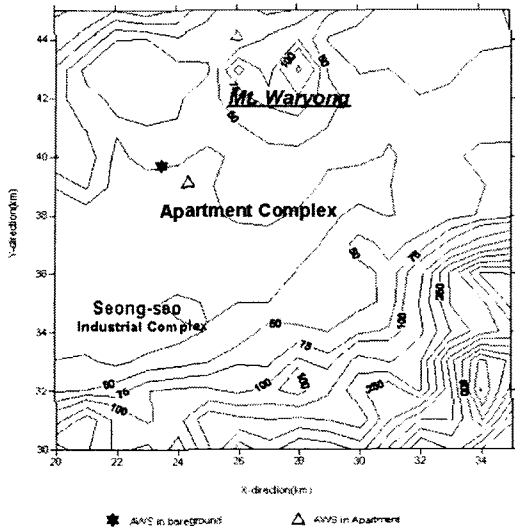


Fig. 2. A topographical map around Seongseo district of Daegu.

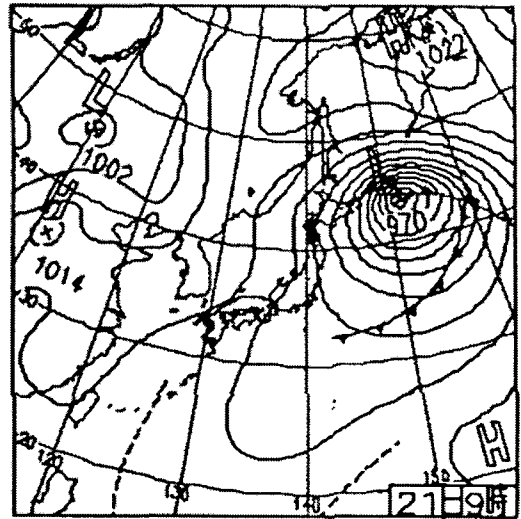


Fig. 3. Synoptic weather chart at 0900LST on 20 Aug. 2002.

맑은 날씨를 보였지만, 가끔 많은 운량이 나타나 일기변화가 많았다.

2.2. 연구방법

Tamiya²¹⁾의 방법을 따라서, 아스팔트도로와 콘크리트 구조물로 구성된 아파트단지과 이에 인접한 개발유보된 나대지 상에서 관측된 기온자료를 비교하여 인공구조물이 기온상승에 미치는 효과를 평가하였다. 그리고 두 지점에서 관측된 기상자료를 이용하여 지면조건에 따른 두 지점의 열적조건 형성의 차이를 조사하기 위하여 다음과 같이 열수지 각항을 계산하였다. 지표면의 열수지 관계는 Fig. 4에 제시한 바와 같이 성립한다. 즉 지표면은 태양복사 에너지와 대기장파복사 에너지를 받아, 현열, 잠열 및 지구장파에너지의 형태로 대기 중으로 에너지를 재방출한다. 그리고 남은(부족한) 에너지는 지중전달열로 저장(방출)한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$(1-\alpha)S + L = H + IE + G + \sigma T_s^4 \quad (1)$$

여기서, α 는 지면의 알베도, S 는 지면도달 일사량, L 은 대기장파복사량, H 는 현열, IE 는 잠열, G 는 지중전달열 그리고 σT_s^4 은 지면에서 대기중으로 방출되는 지구장파복사에너지이다. 대기장파복사량(L)은 Kondo를 따라서 다음과 같이 계산하였다.

$$\frac{L}{\sigma T_a^4} = 1 - (0.49 - 0.066 \times e^{0.5})(1 - n \times C \times h) \quad (2)$$

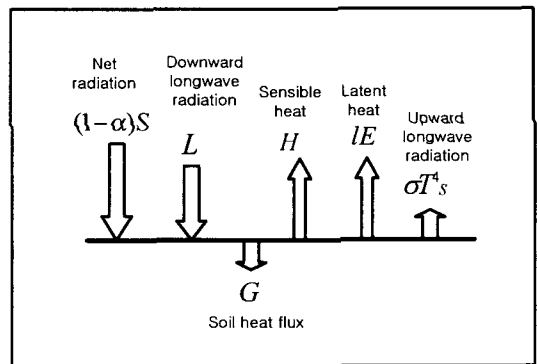


Fig. 4. Conceptual diagram on the heat budget relation over ground surface.

여기서, C 와 h 는 식(3)과 (4)로 주어진다.

$$C = 0.75 - 0.005 \times e \quad (3)$$

$$h = [(n_1 + 0.85 \times n_2 + 0.5 \times n_3) / n] + 0.1 \times N_r / N \quad (4)$$

여기서, e 는 일평균의 수증기압(hPa)인데, 아래에서 제시하는 Tetan의 방법으로 구하였다. 그리고 N_r/N 은 하루 중에서 강수가 지속된 시간, n, n_1, n_2, n_3 는 각각 10분위로 나타낸 전운량, 하층, 중층 및 상층운량이다. 이 연구에서는 대기지방기상대에서 관측된 3시간 간격의 자료를 이용하였다. 또, 중층운과 상층운 자료의 부족을 해결하기 위하여, Ishi and Kondo²³⁾에 의해 제안된 다음의 근사관계를 적용하였다.

$$n_2 = n_3 = (n - n_1)/2 \quad (5)$$

$$N_r/N = 0, \text{ for } n_1 < 1 \\ = 0.5, \text{ for } n_1 = 1 \quad (6)$$

현열과 잠열수송량은 bulk식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T_a) \quad (7)$$

$$IE = l \rho \beta C_H U (q_{sat}(T_s) - q_a) \quad (8)$$

단, $C_H U$ 는 현열의 수송속도, β 는 지표면의 습윤도(증발효율), T_s 는 지표면온도(K), T_a 는 기온(K), q_a 는 대기중의 비습, $q_{sat}(T_s)$ 는 T_s 에 대한 포화비습이다. 비습의 계산은 김과 양²⁴⁾을 포함한 여러 연구에서 널리 사용하고 있는 Tetan의 공식으로 계산된 포화수증기압을 이용하였다.

$$e_s = 6.11 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T_c}{T_c + 273 - 35.86}\right) \quad (9)$$

여기서, e_s 는포화수증기압이고, T_c 는 기온에 대한 섭씨온도(°C)이다. 그리고 실제로 공기가 포함한 수증기가 나타내는 수증기압은 위에서 계산한 포화수증기압에 자동기상관측장치에서 측정된 상대습도를 곱하여 구할 수 있다.

$$e = e_s \cdot RH \div 100 \quad (10)$$

여기서, e 는 수증기압(hPa), RH 는 상대습도(%)이다. 이렇게 구한 수증기압을 이용하면, 비습은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q \approx 0.622 \frac{e}{P} \quad (11)$$

여기서 P 는 대기압(hPa)이다. 열수지계산에 이용된 기상관측자료는 일사량, 운량, 기온, 지표면온도, 대기압 및 대기의 상대습도이다. 그리고 지표면 파라메타로, 알베도(α), 현열의 수송속도($C_H U$), 지표면의 습윤도(β) 및 지중의 열물리계수(비열(c_g)×밀도(ρ_g)×열전도율(λ_g))이다. 이들 지표면 파라메타는 일변화를 하지않는 하루 중의 일정값을 가정하였다. 이를 Table 2에 정리하여 제시하였다. 그리고 지중전달열(G)은 열수지방정식의 잔차항으로

Table 2. Several surface parameters used in the study

	Bare soil	Asphalt
α	0.2	0.12
β	0.3	0
$C_g \rho_g \lambda_g$	0.36×10^6	1.0×10^6

구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 관측결과

3.1.1. 기온변화

성서지역의 아파트 단지과 인접한 나대지상의 기온에 대한 시간변화를 Fig. 5에 나타내었다. 아파트 단지 내에서는 8월 20일 01시부터 22일 07시까지 관측이 이루어졌고, 인접한 나대지상에서는 이보다 늦은 20일 18시부터 관측이 이루어져 22일 07시까지 연속관측이 수행되었다. 또 비교를 위하여 대구 지방기상대의 관측자료를 19일 01시부터 22일 24시까지 나타내었다. 관측결과 아파트단지내의 기온측정값은 인접한 나대지상에서의 값보다 높게 나타났다. 대구지방기상대에서 관측된 기온은 대체로 아파트단지 내보다는 낮고, 나대지상에서의 값보다는 다소 높았다.

한샘아파트와 나대지의 기온일변화를 자세히 살펴보면 대체적으로 나대지상의 기온이 한샘아파트 기온보다 1~2°C 정도 낮았는데, 낮동안에는 두 지역간에 기온차가 상대적으로 작아 1°C 내외에 그쳤으나, 오후 늦은 시간대와 야간동안에 두 지역의 기온차가 커져 약 2°C에 이르렀다. 그리고 예외적으로 21일 06~11까지 한샘아파트의 기온이 나대지상의 기온보다 낮게 관측 되었다. 그 이유는, 구름이 많이 끼어 아파트단지 내에서는 구조물에 의한 태양에너지 흡수효과가 작았던 데에 반하여, Fig. 6의 풍향자료에서 확인할 수 있듯이 나대지의 남쪽에 대단지 아파트단지, 상가, 공단이 위치하여 많은 양의 인공열을 방출할 수 있는 조건에 있는데, 그곳에서 나대지상으로 바람이 유입된 탓으로 사료된다.

또 일사량의 차이에 따른 승온효과를 살펴보기 위하여, 관측기간동안에 아파트단지에 인접한 4차

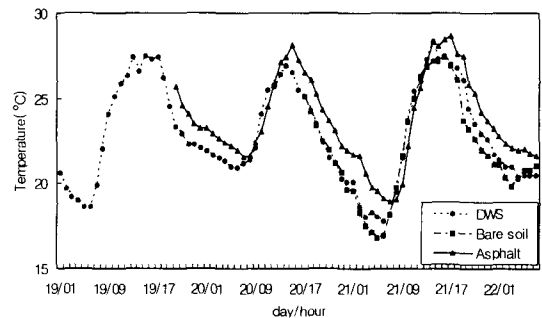


Fig. 5. Time variation of surface air temperature at the bare soil surface, the asphalt surface and the Daegu weather station.

선 도로변의 기온 및 지표면온도변화를 Fig. 7에 나타내었다. 관측이 이루어진 도로변은 약 5~6m 높이의 플라타너스 가로수로 덮여있어 일사량 흡수에 따른 도로구조물의 가열효과가 거의 배제되고 있는 상황이다. 그럼에도 불구하고, 도로변에서 관측된 기온은 대체적으로 한샘아파트내에서 관측된 것보다도 약간 높았는데, 특히 교통량이 많은 낮동안에 높은 값을 보였다. 이는 차량 배기에서 방출되는 인공열의 효과가 잘 반영된 결과로 해석된다. 반면에 도로 아스팔트의 온도는 아파트 내의 지표면온도보다 훨씬 낮은 온도를 나타내었다. 이는 Sugawara 등이 지적한 바와 같이, 지표면온도변화의 민감도에는 일사량이 가장 중요하다는 사실을 입증하는 하나의 사례라고 할 수 있을 것이다. 가로수에 의한 일사차단효과로 낮동안에 토양의 열저장효과를 차단함으로써, 도시의 열환경을 획기적으로 개선할 수 있는 것이다. 이에 관련하여, Hanaki 등은 수치시뮬레이션 기법을 통하여 키가 큰 수목의 식재로 지표면온도를 하계에 10~20°C 낮출 수

있음을 지적한 바 있다.

3.1.2. 지표면온도 변화

아스팔트는 나대지나 초원지에 비하여 일사량에 대한 반사율이 낮아 태양복사에너지를 열에너지로 전환할 수 있는 효율이 높다. 그래서 낮동안에 지면온도가 매우 높아질 수 있다. 이와 관련하여 Kessler²⁵⁾의 측정치에 의하면 아스팔트 노면의 온도가 기온보다 최대 23.5°C, 최하 2.6°C 더 높았다. 초지 표면의 최고온도는 최고기온보다 9.4°C 더 높았고, 최저기온의 경우 2.9°C 더 낮았다. 또 대표적인 도시의 인공구조물질인 아스팔트와 콘크리트는 열의 전도속도가 나대지에 비하여 약 30배 이상 큰 것으로 알려져 있는데, 이로 인하여 낮동안에 지면에서 지중으로 많은 에너지를 전달하여 저장시킬 수 있다. 이렇게 저장된 많은 양의 에너지가 야간에 대기중으로 방출되어 도시의 기온을 상승시키는 역할을 한다. 이를 확인하기 위하여, 한샘APT 단지내의 아스팔트 지표온도와 아스팔트에 바로 인접해 있는 화단의 잔디온도, 그리고 아파트 단지에 인접하여 개발이 유보되어 있는 나대지상의 지표온도를 관측하여 시간변화를 조사하였다(Fig. 8). 지면온도는 종류에 관계없이 정오 ~ 오후 3시에 걸쳐서 가장 높은 온도분포를 보였다.

지면의 종류에 따라서 온도에 차이가 많았는데, 관측기간 중에는 오후 2시경에 아스팔트의 지표온도가 나대지의 지표온도보다 10°C 이상 높게 관측되었다. 이는 위에서 지적하였듯이, 아스팔트가 태양복사에너지에 대한 반사율이 다른 종류의 지표면보다 작아서 태양복사에너지를 많이 흡수하여 쉽게 가열된 탓이다. 또 같은 시간대에서 아스팔트의 표면온도는 잔디에 비해서는 20~25°C나 높게 나타났다. 야간이 되면 아스팔트와 다른 지표면의 온도가

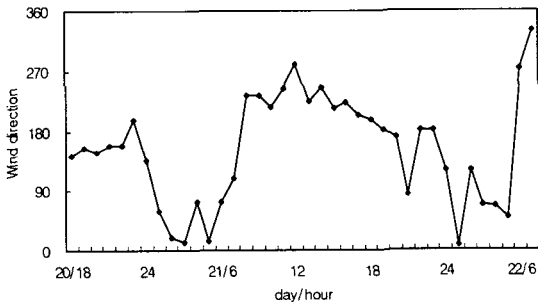


Fig. 6. Time variation of wind direction observed at the bare soil surface within a limited development district.

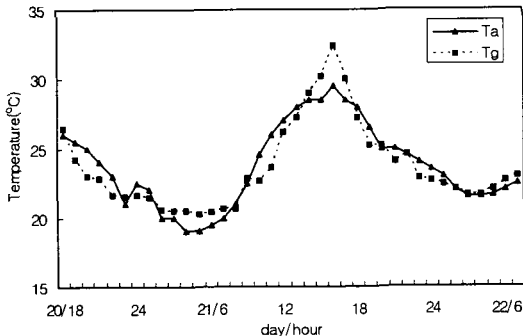


Fig. 7. Time variation of temperatures at the footway closed by the Hansam apartment. T_a , T_g indicate the temperature of the surface air and soil temperature, respectively.

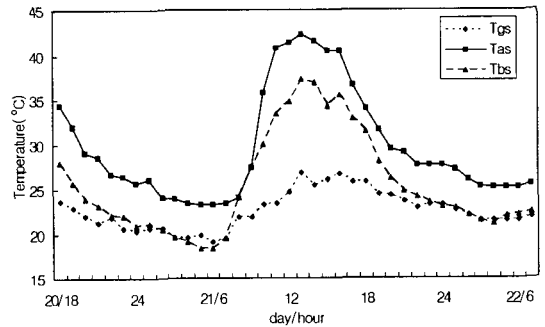


Fig. 8. Time variation of the surface soil temperatures. T_{gs} , T_{as} , T_{bs} indicate the temperature of at the grass, the asphalt and the bare soil surface, respectively.

모두 저하하지만, 아스팔트의 지표온도가 나대지를 포함한 다른 종류의 지표온도에 비해서 높은 상태를 계속 유지하였다. 이는 아스팔트의 열전도율이 다른 종류의 지표물질에 비하여 월등히 크기 때문에 낮동안에 지하로 많은 양의 열이 전달되어 저장될 수 있었기 때문이다. 즉, 아스팔트의 열저장 능력이 가장 크기 때문에 야간동안에도 높은 온도를 유지할 수 있었던 것이다.

반면에, 아파트내의 잔디 온도는 종일 가장 낮은 지표면 온도를 나타내었다. 아스팔트면의 온도가 50℃에 이르는 시기에 도 25℃ 내외에 머물렀다. 이는 주거지의 열섬현상완화를 위해서는 아스팔트 표면을 잔디를 포함한 녹지대로 전환하는 것이 필요하다는 것을 시사한다.

3.1.3. 주거단지의 열섬 강도변화

도시열섬강도의 평가는, 보통 도심부와 인접한 교외 지역간의 기온차이(ΔT_{u-r})를 이용하여 이루어진다. 본 연구에서는, 이를 응용한 Tamiya²¹⁾의 방법을 따라서 아파트 단지내의 온도와 도로포장과 건물에 없는 인접한 나대지 상에서의 온도차이를 이용하여 주택단지의 열섬강도를 정의하였다. 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 전체적으로 살펴보면 복사열이 강한 주간보다는 일몰이후인 야간에 강한 열섬이 나타나고 있다. 낮동안에는 1℃ 내외의 열섬강도를 보였는데, 야간인 21일의 새벽 2시에 3.3℃의 높은 강도를 보였고, 같은 날 19시에도 3.7℃의 최대치를 보였다. 이 결과는, Tamiya²¹⁾가 완성된 되었지만 아직 입주자가 없는 대단지 주택단지를 대상으로 수행한 연구에서 밝힌 결과, 즉 주택단지에서의 열섬강도는 일몰 후에서 일출전까지 높게 나타났고 일출에서 일몰 사이에는 대단히 작았다는 결과와 일치하였다.

8월 21일 오전 8시에서 12경에 걸쳐서는 오히려

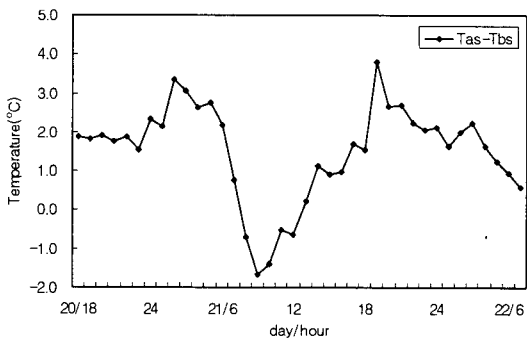


Fig. 9. Time variation of the air temperature difference between the bare soil surface and its peripheral asphalt area.

아파트단지내의 기온이 나대지상보다도 낮게 관측되었다. 이는 나대지의 남쪽에 대단지 아파트단지, 상가 및 공단이 위치하여 기류의 가열효과가 큰 지역이 위치하는데, 이 시간대에 풍향(Fig. 6)이 남풍으로 바뀌어 나대지 상에서도 열적 변질을 받은 공기가 유입되었고, 아파트단지 내에서는 구름이 많이 낀 탓에 인공구조물에 의한 일사량 흡수를 통한 가열효과가 작았기 때문에 해석된다. 와룡산(해발 296m)에 인접해 있는 나대지상에서 관측된 바람의 풍향이 대체로 낮(남풍)과 밤(북풍) 동안에 역전되어, 이 지역의 바람이 교대풍(relief wind)적인 특성을 나타내었다. 관측이 이루어진 지역은, 남쪽에 대구 최대의 산업공단이 위치하고 북쪽으로 와룡산이 자리잡고 있으며, 와룡산자락을 따라서 대규모 아파트주택단지가 위치하고 있다. 이 바람이 산곡풍인지의 여부는 향후 자세한 검증을 필요로 하지만, 만약 와룡산과 산업단지 사이에 형성된 교대풍으로 확인된다면 주택단지의 대기환경관리에 많은 주의가 요구될 것이다.

3.2. 열수지 일변화 해석

아스팔트 포장과 콘크리트 구조물로 이루어진 아파트 단지내의 온도와 도로포장과 인공구조물이 없는 인접한 나대지 상에서 기상관측을 수행한 결과, Tamiya²¹⁾의 보고와 마찬가지로 열섬화 현상이 확인되었다. 그리고 열섬강도는 복사열이 강한 주간보다는 일몰이후인 야간에 강한 열섬이 나타나고 있다. 이 절에서는 지표면 조건에 따른 열적 환경의 시간변화 특성을 이해하기 위하여, 나대지와 아스팔트 상에서 관측된 기상자료를 이용하여 열수지 해석을 수행하였다. 그 결과를 Fig. 10(a), (b)에 나타내었다. 여기서 R_s 는 지면흡수 일사에너지와 방향의 대기장파복사에너지의 합을 의미한다. 따라서 이것과 지면방출의 지구장파복사에너지(σT_s^4 (T_s 는 지면온도))와의 차이는 지표면에서의 순복사량을 나타낸다. 그리고 양의 값은 대기에서 지면을 향하는 것이고, 음의 값은 대기에서 지면으로 향함을 의미한다.

나대지(Fig. 10(a)와 아스팔트(Fig. 10(b)에서의 열수지 시간변화를 살펴보면, 아스팔트 포장면에서 지면방출 지구장파복사에너지가 나대지면보다 다소 많이 방출되기 때문에, 순복사에너지의 크기는 나대지 상에서 조금 크게 나타난다. 그러나 그 차이는 그다지 크지않다. 하지만, 지표면의 차이로 인하여 순복사에너지의 소모형태에 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다. 아스팔트면은 완전히 건조해 있어, 순복사에너지를 잠열(latent heat)의 형태로 소모하지 못한다. 그래서 지중전달에너지를 제외한 모든

에너지를 현열(sensible heat)의 형태로 소모하고 있다. 반면에 나대지상에서는 낮동안에 순복사에너지의 50% 이상을 잠열의 형태로 소모하여 현열에 의한 지면에서 대기로의 에너지전달 비중이 아스팔트면에서의 50% 이하로 나타났다. 그리고 야간에 지중에서 지면상으로 전달되는 에너지(G ; 음의 부호는 지중에서 지상으로의 에너지 흐름을 의미함)량은, 아스팔트 지표면에서의 값이 나대지면의 그것보다 $20\sim 30\text{ W/m}^2$ 정도 크게 평가되었다. 야간에 아파트단지 내에서 높은 지면온도와 기온이 형성되는 주요 원인은 여기에 있는 것이다. 야간에 나대지 상에서는, 현열방출이 거의 없었으나 아스팔트면에서는 $20\sim 30\text{ W/m}^2$ 정도 의 현열방출이 추정되었다.

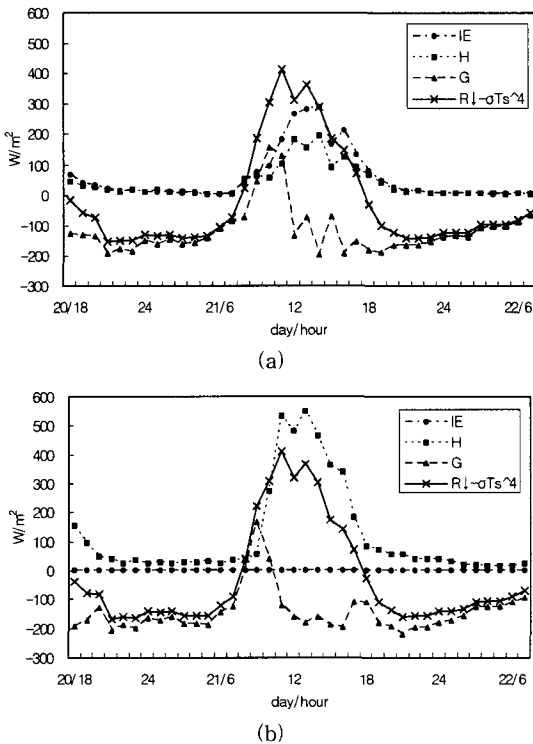


Fig. 10. Time variations of the heat budget terms estimated over (a) the bare soil surface and (b) the peripheral asphalt area.

4. 요약 및 결론

도시의 열섬을 유발하는 여러 가지 요인 중에서 인공구조물이 야기하는 도시열섬화 효과를 조사하기 위하여 성서지역의 대규모 아파트단지를 대상으로 관측을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

첫째, 관측기간 동안에 구름의 일변화가 많았고 일최고기온이 30°C 를 밑도는 대체로 선선한 하계기온에도 불구하고, 인공구조물에 애워싸인 아파트단지내의 기온은 인접한 개발이 유보된 나대지에서의 기온보다 낮에는 1°C 내외, 야간에는 2°C 가까이 높았다.

둘째, 아파트단지내의 아스팔트의 온도는 한낮에 최고 50°C 를 나타내었지만, 나대지는 약 37°C , 잔디면은 약 25°C 내외에 거쳤다. 관측된 기온에는 지열의 효과가 배제되어 관측되지만, 주민들은 지열에 곧바로 노출되기 때문에 사람이 체감하는 더위는 아파트단지가 나대지에 비하여 10°C 이상 높음을 알 수 있었다. 최근, 지상에 차가 통행하지 않는 아파트단지가 건립되고 있다. 기존의 아파트에서도 지상의 아스팔트도로를 잔디와 숲이 있는 공간으로 개조한다면 하계에 주민이 느끼는 체감온도를 10°C 이상 낮출 수 있음을 알 수 있었다.

셋째, 나대지와 아스팔트상에서 관측된 기상자료를 이용하여 열수지의 시간변화를 조사한 결과, 아스팔트 상에서 지표면온도와 기온이 형성되는 원인은 (1)아스팔트면에서 잠열에 의한 에너지소모가 없는 점과 (2)아스팔트의 높은 열저장 능력에 의한 야간동안의 높은 에너지 방출에 있음이 확인되었다. 지표면에서 물이 증발될 때에는, 약 $2.51 \times 10^6\text{ J/kg}$ 의 에너지를 소모한다. 따라서 하계에 지표면온도 상승을 억제하기 위해서는 증발원의 확보가 매우 긴요한 것이다. 그리고 아스팔트와 콘크리트는 나대지나 약간의 식생이 피복되어 있는 곳에 비하여 100배 이상의 높은 열전도율을 보인다고 한다¹²⁾. 그래서 나대지 혹은 약간의 식생이 피복되어 있는 곳에서는 쾌청한 날에도 지중전달열의 출입깊이가 $20\sim 40\text{cm}$ 깊이에 그친다. 이에 반하여, 아스팔트나 콘크리트로 포장된 곳에서는 한낮에 지중전달열의 도달깊이가 $80\sim 100\text{cm}$ 에 이른다. 이 결과로 도시화에 수반되어 지면의 포장이 늘어나면 낮동안에 보다 많은 열이 도시의 지중에 저장되었다가 야간에 오랜시간에 걸쳐 많은 양의 열이 대기중으로 방출되어 기온을 승온시킨다. 이것이 하계에 도시의 열대야를 유발하는 가장 큰 원인으로 작용하는 것이다.

본 연구의 관측기간에 와룡산과 성서의 넓은 평지간에 산곡풍이라는 교대풍(relief wind)의 존재가 능성이 제기되었다. 이와 같은 국지풍이 존재할 경우에는, 대구지방기상대가 위치한 신안동 부근과는 다른 풍계가 성서에 출현하여 낮동안에 산업공단에서 배출되는 대기오염물질이 와룡산자락을 따라서 위치하고 있는 대규모 아파트단지로 운반되어지고

있을 가능성이 있다. 이 지역의 합리적인 대기환경 관리를 위해서는, 향후 이에 대한 세밀한 조사·연구가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2002-000-00020-0)의 지원금으로 수행되었습니다. 재정지원을 해 주신 한국과학재단 및 기타 관계자 여러분에게 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 1) Kawamura, T., 1989, 都市氣候に關する研究動向, 天氣, 36(4), 197-205(in Japanese).
- 2) Yamashita, S., 1988, Some studies of heat island in Japan-with special emphasis of the climatological aspects, Geogr. Rev. Japan, 61 (1), 1-13(in Japanese).
- 3) Yamashita, S., 1995, Heat Island and Amenity, Study group for Climate Impact and Application Newsletter, 11, 66-73(in Japanese).
- 4) Mizukoshi, S. and S. Yamashita, 1993, 氣候學入門, 古今書院, 144pp.
- 5) Park, H. S., 1987, City size and the urban heat island, Atmos. Environ., 7, 769-779.
- 6) Landsberg, H. E., 1979, Atmospheric changes in a growing community(the Columbia, Maryland experience), Urban Ecology, 4, 53-81.
- 7) Kanno, Y. and K. Yamajoe, 2001, 暑い夏, 地理, 549(7), 51-63(in Japanese).
- 8) Katzschner L. and G. Kassel, 1988, Urban Redevelopment under Construction of Climatological Aspects, Environmental Meteorology, Kluwer Academic Publishers, 461-472.
- 9) Sakakibara, Y. and A. Mieda, 2002, Causes of nocturnal heat island and the difference between heat island intensity on fine and cloudy days, Tenki, 49(7), 531-540(in Japanese).
- 10) Oke, T. R., 1973, City size and the urban heat island, Atmos. Environ., 7, 769-779.
- 11) Oke, T. R., 1978, Boundary layer climate, John Wiley and Sons, 324pp.
- 12) Landsberg, L., 1981, The urban climate, Academic Press, New York, 275pp
- 13) Ichinose, T., K. Hanaki and T. Tatsuo, 1994, Analyses on geographical distribution of urban anthropogenic heat based on very precise geographical information, Proceedings of Environmental Engineering Research, 31, 263-273.
- 14) Ichinose, T., K. Shimodozono and K. Hanaki, 1999, Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, Atmos. Environ., 33, 3897-3909.
- 15) 부경은, 전영신, 박지용, 조하만, 권원태, 1999, 자동기상관측장치자료를 이용한 서울의 기온수평분포 분석, 한국기상학회지, 35(3), 335-343.
- 16) 김경환, 김백조, 오재호, 권원태, 백희정, 2000, 한반도 기온변화에 나타난 도시화 효과 검출에 관한 연구, 한국기상학회지, 36(5), 519-526.
- 17) Mikami, K., 1999, 首都圏 ground-monitoringによる Heat-Islandの 實態把握, Monitoring and Management of Urban Heat Island Interim Report, 1-4pp(in Japanese).
- 18) Ackerman, B., 1985, Temporal march of the Chicago heat island, J. Climate Appl. Meteor., 24, 547-554.
- 19) Omoto, K., 1995, 大都市の都市氣候-近年の特徴, Study group for the WCIP and WCAP Newsletter, 9, 1-4(in Japanese).
- 20) Grey, G. W. and F. J. Deneke, 1986, Urban forestry(2nd Ed.). New York : Wiley, 245pp.
- 21) Tamiya, H., 1981, 都市の環境とHeat Island, 地域, 20, 18-23(in Japanese).
- 22) Sugawara, H. and J. Kondo, 1995, Sensitivity test of urban surface temperature, Tenki, 42, 813-820(in Japanese).
- 23) Ishi, T. and J. Kondo, 1993, The seasonal variation of the oceanic heat transport in the East China Sea, Yellow Sea and Sea of Pohai, Tenki, 40, 895-906(in Japanese).
- 24) 김해동, 양성기, 1995, 제주도 북부해역의 표면열수지 해석-1993년과 1994년 하계의 경우-, 한국환경과학회지, 4(3), 197-206.
- 25) Kessler, A., 1971, Uber den Tagesgang von Oberflächentemperaturen in der Bonner Innenstadt an einem sommerlichen Strahlungstag, Erdkunde, 25, 13-20.