

## 도시의 수목이 기온의 조절에 미치는 영향

김수봉 · 김해동

계명대학교 환경학부

### Influences of Urban Trees on the Control of the Temperature

Kim, Soo-Bong · Kim, Hae-Dong

Faculty of Environmental Studies, Keimyung University

#### ABSTRACT

The purpose of this paper is to discuss the function of microclimate amelioration of urban trees regarding the environmental benefits of street trees in summer, focusing on the heat pollution-urban heat island, tropical climate day's phenomenon and air pollution.

We measured the diurnal variation of air/ground temperatures and humidity within the vegetation canopy with the meteorological tower observation system. Summertime air temperatures within the vegetation canopy layer were 1-2°C cooler than in places with no vegetation. Due to lack of evaporation, the ground surface temperatures of footpaths were, at a midafternoon maximum, 8°C hotter than those under trees. This means that heat flows from a place with no vegetation to a vegetation canopy layer during the daytime. The heat is consumed as a evaporation latent heat.

These results suggest that the extension of vegetation canopy bring about a more pleasant urban climate. Diurnal variation of air/ground temperatures and humidity within the vegetation canopy were measured with the meteorological tower observation system. According to the findings, summertime air temperatures under a vegetation canopy layer were 1-2°C cooler than places with no vegetation. Due mainly to lack of evaporation, the ground surface temperature of footpaths were up to 8°C hotter than under trees during mid-afternoon. This means that heat flows from a place where there is no vegetation to another place where there is a vegetation canopy layer during the daytime. Through the energy redistribution analysis, we ascertain that the major part of solar radiation reaching the vegetation cover is consumed as a evaporation latent heat. This result suggests that the expansion of vegetation cover creates a more pleasant urban climate through the cooling effect in summer.

Vegetation plays an important role because of its special properties with energy balance. Depended on

their evapotranspiration, vegetation cover and water surfaces diminish the peaks of temperature during the day. The skill to make the best use of the vegetation effect in urban areas is a very important planning device to optimize urban climate. Numerical simulation study to examine the vegetation effects on urban climate will be published in our next research paper.

*Key Words : Microclimate Amelioration, Air/Ground Temperatures, Vegetation Canopy, Evaporation Latent Heat*

## I. 서론

도시의 녹지는 현재 식물이 자랄 수 있는 토양을 가진 도시 지역내의 토지와 물, 대기 등으로 이루어지며, 오픈스페이스 중에서 도시 내 부족한 자연과의 접촉을 통하여 도시민에게 심리적 안정감과 삶에 활력을 제공하는 위락적 기능, 아름답고 특색 있는 도시경관을 창조하며 또한 도시형태를 규제·유도하는 도시경관 향상의 기능 등과 함께 기온의 조절효과, 대기오염의 정화 그리고 생물 종 다양성 증진을 위한 야생 동·식물의 서식공간을 제공하는 도시 생태학적 기능과 같은 주요 역할과 아울러 경제적·교육적·사회·문화적 기능 등을 가진 것이라고 할 수 있다(김수봉, 2000; 김수봉, 2002). 하지만 도시의 과밀화·팽창화로 인한 도시녹지의 훼손이 심각해져가고, 또한 도시녹지를 훼손하고 세워진 인공구조물은 지표면의 물 수지, 열 수지 및 풍향 풍속 등이 크게 변화되었고 도시열섬현상과 같은 독특한 도시기후가 형성되었다(Landsberg, 1981). 이러한 도시열섬현상을 완화하기 위한 방법에는 인공열 발생억제와 도시 내 녹지를 증가하는 등의 방법이 있다. 특히, 도시내의 녹지에 의한 효과(윤용환, 1997)는 도시기후의 완화 및 대기질 개선의 기능이 있다고 하겠다. 도시의 수목은 일사과정을 통해 광합성활동이 촉진되는데, 이 때 기공을 보다 많이 열어 대기중의 이산화탄소를 흡수한다. 광합성 시에 열린 기공으로부터 이산화탄소를 흡수함과 동시에 열린 기공으로부터 잎사귀에 포함되어 있던 수분이 증발산된다. 이러한 증산작용은 대기중의 열에너지가 잠열(潛熱, latent heat)로 소비되기 때문에 대기온도를 저하시키는 역할을 하는 것이다

(Nino and Kanda, 1992). 잠열이란 상(相)변화에 수반되는 열로써, 액체의 물을 증발시켜 수증기로 변화하기 위해서는  $2.5 \times 10^6 \text{J/kg}$ 의 열을 필요로 한다.

이에 본 연구는 도시녹지시설의 일부인 가로수가 도시의 온·습도를 조절하여 미기후 개선에 미치는 영향을 알아보는데 그 목적이 있다.

## II. 이론적 고찰

도시의 녹지율 변동을 포함한 토지이용도 변화와 도시기온간의 관련성을 규명한 국내외 연구를 살펴보면 다음과 같다.

먼저 윤용환 등(1998)은 여름철에 공원녹지의 기온저하 역할을 조사한 결과, 공원 내 기온은 주변 시가지보다 저온이며, 토지피복율과 기온에서 수렴지 비율, 초지비율 및 수면비율이 증가하면 기온이 보다 낮아지는 경향이 있음을 지적하였다. 부경운 등(1999)은 자동기상관측자료를 이용한 서울의 기온수평분포 분석 연구에서 도시지역의 기온분포 형성요인으로 토지이용도(landuse map)가 중요함을 지적하였다. 서울의 경우에 최근 영등포와 양천 등에 새롭게 높은 기온영역이 형성되고 있는데, 이는 예전에 비하여 도심지의 고층건물과 도로 포장율의 급증 등으로 지면피복상태가 바뀐 것이 도시고온화의 주요 요인이라고 그들은 지적하였다. 그들은 이를 해결하기 위한 방안으로 도시녹지화와 수변지구의 건설을 제안하였다. 그리고 조현길과 안태원(1999)은 도시녹지에 의한 미기후 개선의 기능을 평가하였다. 그들은 은행나무, 플라타너스 및 단풍나무를 선

정하여 수증별로 잎들에 의한 단위시간 및 단위 엽면적당 증산량을 운반형 적외 가스분석기를 이용하여 현장에서 측정하였다. 관측결과에 의하면, 측정대상 수목의 총엽면적당 증산량과 일장을 곱하여 단목(單木)의 8월 하루 증산량을 산정하면, 플라타너스가 230kg, 단풍나무가 250kg이었다. 이에 소모되는 열량을 계산하면,  $250 \times 1,000 \text{gram} \times 0.6 \text{kcal}$  (증발잠열, 물 1gram을 증발시키는 데에 소모되는 열량) = 150,000kcal이다. 즉, 플라타너스나 단풍나무 한 그루의 8월 하루 증산량은 5,100kcal/h(15평형) 냉방능력을 가진 냉방기 2대를 약 13시간 이상 가동하는 효과에 상당하였다.

한편, Grey와 Deneke(1986)는 도시의 공원은 낮에는 나무의 기온저감 효과로 도시의 건폐지보다 3-5°C 정도 낮고, 밤에는 열손실 속도를 늦추어 기온이 높게 형성됨을 지적하였다. 그들은 독립수 1그루가 하루에 물 400리터를 증산할 수 있다면, 이는 2,500Kcal/hr의 에어컨이 하루 20시간 작동하여 유발하는 냉방효과와 같다고 주장하였다. Kimura 등(1986)은 도시화와 열섬현상이라는 연구에서, 동계와 하계 모두에 있어서, 지표면 물의 증발에 수반되는 잠열의 이동과 난류열의 교환이 지표면 열수지에서 가장 중요한 역할을 하고 있다고 밝혔다. 그들은 증발면적과 거칠기 길이의 변화가 지표면 열수지에 주는 효과가 가장 큼을 수치모델 결과에 근거하여 지적하였다. 여기서 증발면적이란 도시의 녹지대 및 수변 유지수가 차지하는 면적을 말하며, 거칠기 길이는 도시의 경우 고층 빌딩군이 많을수록 크다. 그 중에서도 지표면 고도에서의 도시열섬현상의 주요인은 증발잠열의 감소라고 하였다. 그래서 그들은 도시기후의 완화를 위해서는, 도시에 삼림, 초지, 공원, 하천, 호수 등의 증발면적을 적극적으로 확보하여야 한다고 주장하였다. Aseda 등(1996)은 특별관측자료를 분석하여, 도로포장재질이 토양이나 콘크리트보다도 아스팔트일 경우 지표면온도 및 방출되는 열속이 매우 커짐을 지적하였다. 또, Avissar 등(1996)은 식생 증가가 도시화로 인한 인위적 영향을 완화시킴을 수치모델로 제시하였다. 그리고 Kanda 등(1997a)은 메이지신궁의 숲에 의한 기후완화기능과 대기정화 기능을 평가하는 연구를 수행하였다. 관측자료의 분석으로 얻은 그들의 결론은 다음과 같다.

먼저, 메이지 신궁의 삼림은 1초에 펄트병 100개에 상당하는 수증기를 도시대기 중으로 방출하고 있었다. 또 도심지역의 열수지와 비교하여 본 결과, 메이지 신궁의 숲이 갖는 기후완화효과가 확인되었다. 다음으로 맑은 날 저녁에, 일반풍이 약해지는 시간대에 0.5m/s이하인 약풍이 삼림에서 도심지역으로 불어 나오고 있다는 것이 확인되었다. 마지막으로, 각종 대기오염 물질 흡수력을 평가해 본 결과, 일산화질소는 관측정확도의 문제로 정량적인 평가가 곤란하였지만, 오존과 이산화질소는 일 평균 각각 0.30ppb m/sec, 11ppb m/sec 이었다. 이들 값은 기존의 연구에서 얻어진 식생상의 증가와 비교해서 타당한 값으로, 메이지 신궁 숲의 대기정화기능이 정량적으로 평가되었다.

Nino 등(1990)은 도시기후완화효과를 위한 최적의 녹지대 배치에 관하여 수치모델을 이용하여 조사하였다. 같은 양의 수목을 일정한 구역 내에 자유로운 이식 배치가 가능하다는 가정 하에 기온완화효과를 최대로 발휘할 수 있는 배치를 조사하였다. 이를 위하여 구역 내에 존재하는 전체적인 수목의 양을 일정하게 하고, 식생군락지를 서로 다르게 분할하고 그 사이는 나대지로 하였을 때의 비교계산을 수행하였다. 그 결과에 의하면, 식생 간격이 짧은 쪽이 명확히 기온저하효과가 넓은 영역에 걸쳐서 크게 나타났다. 따라서 하나의 식생 구간을 작게 하더라도 나대지 구역의 구간을 짧게 하는 것이 기온저하에 효과적이라고 주장하였다.

### III. 연구방법론

#### 1. 대상수목의 선정

가로수가 도시기온 저하에 미치는 효과를 정량적으로 평가하기 위하여, 대표적인 가로수 중의 하나인 플라타너스를 대상으로 미기상학적 관측을 수행하였다. 측정대상수목의 종류와 크기는 평균적인 크기의 가로수에 근접한 것으로 하였다. 관측장소는 접근 용이성을 감안하여 대학 구내로 하였다.



위해 기공을 열어 이산화탄소를 흡수하고 있다. 그런데 기공을 열면 식물체 내의 물이 불가피하게 증발하게 된다. 이것을 증산이라 한다. 식물에 있어서는 증산에 의한 물의 손실을 줄이면서, 이산화탄소를 많이 흡입하는 것이 성장의 열쇠가 되기 때문에, 환경조건에 따라서 기공을 적당히 개폐한다. 다만 증산에는, 앞으로 흡수되는 복사에너지를 소비하여 엽면의 이상(異常) 상승을 막는 역할도 있다. 또, 식물은 토양 깊이 존재하는 물도 빨아올리기 때문에, 식생지에서는 토양으로 침투한 물이 효율적으로 대기로 환송되어진다.

차단증발은 강수 중에 나타나는 식생지 특유의 증발 현상이다. 강수의 일부는 지면에 도달하기 전에 수목에 포착되고, 그곳에서 다시 대기로 증발한다. 이것이 차지하는 비율은 대략 연 강수량의 10-30%에 달하는 것으로 알려져 있다. 그래서 효율적인 강수관리를 위해 삼림의 간벌 사업이 중요한 것으로 지적 받고 있는 것이다.

한편, 개개의 잎에 대한 열수지는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_c = 2F\sigma T_c^4 + H_c + IE_c \quad (\text{식 1})$$

$$R_c = (1 - r_p)F(S^{\downarrow} + S^{\uparrow}) + F(L^{\downarrow} + L^{\uparrow}) \quad (\text{식 2})$$

$$H_c = c_p \rho c_h U(T_c - T) \quad (\text{식 3})$$

$$IE_c = l \rho c_e U [q_{sat}(T_c) - q] \quad (\text{식 4})$$

식 1은 엽면에 흡수된 복사에너지( $R_c$ )가 각각 장파 복사( $2F\sigma T_c^4$ )와 현열( $H_c$ ) 및 잠열( $IE_c$ )로 변환됨을 나타내고 있다. 잎에 의한 저열과정은 무시하고 있다.  $F$ 는 잎의 기율기분포를 고려한 값인데, 등방성을 가정하여 0.5로 주었고(Kanda et al., 1997b).  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzman 상수( $5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ ),  $c_h$ 와  $c_e$ 는 각각 현열과 수증기에 대한 엽면 교환계수인데, 잎의 형태, 바람에 대한 각도, 공기의 레이놀즈 수 등에 의존한다. 단  $c_e$ 는 잎의 젖은 정도 기공의 수와 개폐 정도에도 의존한다. 강우직후 등 엽면이 충분히 젖어있는 경우에는  $c_e \approx c_h$ 이다. 증산만이 일어나는 경우는, 기공내의 수증기 확산이 증발속도를 결정한다는, 소위 말하는 “율속단계(律速段階)”로 되기 때문

에  $c_e < c_h$ 로 된다(Watanabe et al., 1994).

여기서는 Watanabe 등(1994)을 따라서, 대부분의 식생의 경우에 해당하는,  $c_d$ (엽면저항계수)=0.2,  $c_h/c_d=0.3$ 이며, 사과 과수원에 대한 값  $c_e/c_h=0.1$ 를 채용하여  $c_h=0.015$ ,  $c_e=0.0015$ 를 계산에 이용하기로 한다. Kanda et al.(1997b)에서도 이와 같은 값이 채용되고 있다.  $q$ 는 대기의 비습이고,  $q_{sat}(T_c)$ 는 엽면온도( $T_c$ )에서의 포화비습인데, 이는 아래와 같은 절차로 구하였다.

$$q_{sat} = 0.622 \cdot e_s / (P - e_s) \quad (\text{식 5})$$

여기서,  $P$  = 해수면상의 대기압(hPa)이고, 포화수증기압( $e_s$ )은, 김해동과 양성기(1995)와 같이 Tetan의 식을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$e_s = 6.11 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T_c}{T_c + 273.16 - 35.86}\right) \quad (\text{식 6})$$

여기서 엽면온도의 단위는  $^{\circ}C$ 이다. 이상의 과정을 통해서 관측목의 개개의 잎에 대한 현열과 잠열을 구한다. 그리고 관측목의 엽면적지수(Leaf Area Index:  $m^2/m^2$ )는 현장에서 Canopy Analyzer로 관측하는 것이 일반적이다. 이를 식 3, 4로 구한 현열과 잠열에 곱하여 단위면적당의 열플럭스를 산출한다. 정의에서 알 수 있듯이, 엽면적지수란 단위면적 위에 존재하는 잎의 편면(片面)의 총면적을 의미한다.

그것의 수학적 정의는 아래와 같다.

$$LAI \equiv \int_0^h a(z) dz \quad (\text{식 7})$$

여기서,  $a(z)$ 는 엽면적 밀도인데, 각 고도  $z$ 에 있어서 단위체적공간에 존재하는 잎의 편면(片面)에 대한 면적이다. 본 연구에서 사용된 엽면적지수는, Welles와 Norman(1991)에 의해 제시된 중위도 지역의 활엽수림에 대한 값인  $7.0 m^2/m^2$ 을 사용하였다.

가로수 영역에서의 에너지 재분배를 논하기 위하여, 식 1을 이용해서 순복사량을 산출하였다. 상·하 방향의 장·단파복사에너지는 나대지에 설치한 자동기상관측장치로부터 측정하였고, 나무에 대한 알베도( $r_f$ )는 Watanabe와 Kondo(1994)를 따라서 0.1로 가정하였다.

나대지에 있어서의 현열과 잠열 교환량은 다음의 식 8과 9로 계산된다.

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T_a) \quad (\text{식 8})$$

$$IE = l_p \beta C_H U (q_{sat}(T_s) - q_a) \quad (\text{식 9})$$

여기서,  $C_H U$ 는 열수송 속도,  $\beta$ 는 지표면의 습윤도(증발효율),  $T_s$ 는 지표면온도,  $T_a$ 는 기온,  $q_a$ 는 대기의 비습,  $q_{sat}(T_s)$ 는 지표면온도에 대한 포화 비습이다. 식피층 내부의 풍속은 식 10과 같은 경험적 관계가 성립된다(Geiger, 1965).

$$U = 0.3 U_a \quad (\text{식 10})$$

여기서,  $U$  = 식피층 내부의 풍속

$U_a$  = 식피층 상부 공기층의 풍속

지표면온도는 적외온도로 나대지면의 온도를 매시간 측정하여 구하였으며, 열수송속도와 지표면의 습윤도는 Sugawara와 Kondo(1995)를 따라서 다음과 같이 가정하였다. 지표면이 아스팔트와 콘크리트로 포장되어 있는 경우,  $C_H U = 0.0095 \text{ m/s}$ (풍속이 2.6m/s인 경우),  $\beta = 0$ 이다. 지표면이 흙인 경우에는,  $C_H U = 0.0095 \text{ m/s}$ (풍속이 2.6m/s인 경우),  $\beta = 0.38$ 이다. 지표면이 잔디인 경우에는,  $C_H U = 0.011 \text{ m/s}$ (풍속이 1.7m/s인 경우),  $\beta = 0.49$ 이다.

위의 방법으로 추정된 수목의 잠열소모량과 지면도달 일사량간의 비를 Hwang, Su Jin(1994)의 에너지재분배기법을 따라서 구하였다. 그리고 본 연구에서 추정된 결과를 Hwang, Su Jin(1994)의 그것과 비교하였다.

## IV. 분석결과

### 1. 관측결과

식피층 내의 온도와 나대지상에서 관측된 기온의 시간변화를 살펴보면, 오전 8시 30분경부터 오후 6시 사이에는 식피층 온도가 기온보다 낮고 그 이외의 시간대에서는 식피층의 온도가 기온보다 높았다(Figure 3 참조). 이처럼 주간에는 식피층 온도가 기온보다 낮게 형성되는 이유는 식생의 오아시스효과와 녹음효과 때문이다. 이 두 가지 요인 중에서 기온을 저하시키는 효과는 오아시스효과가 녹음효과보다 3~5배 큰 것으로 보고되고 있다(Nino, 1992). 일사가 강하지 않은 오후 6시~오전 8시경에 식피층 온도가 기온보다 고온을 유지하는 것은, 나무의 열저장 효과와 관련이 있다. 즉 이것은 주간에는 열을 흡수·저장한 나무가 야간에 현열을 방출하여 주변공기를 가열하기 때문이다. 이는 도시공간을 차지한 건축물이 야간에 열을 방출하여 도시기온을 승온화시키는 것과 유사한 것이다.

엽면온도는 8월 30일 13시부터 24시까지 측정이 이루어졌다. 일사량이 많았던 오후 4시경까지는 엽면의 온도가 식피층의 온도보다 고온을 유지하였는데, 이는

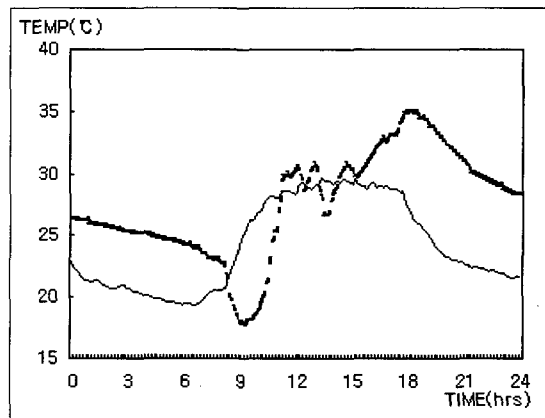


Figure 3. Diurnal variation of air temperature and canopy temperature

범례: - - - AIR TEMP.; — GROUND TEMP.

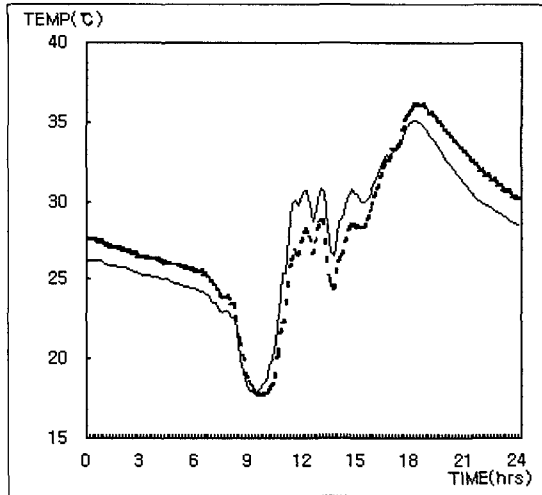


Figure 4. Diurnal variation of air temperature, canopy temperature and leaf temperature  
 범례: — AIR TEMP.; - - - CANOPY TEMP.

나뭇잎이 흑체에 가깝기 때문에 태양복사를 많이 흡수하여 열 에너지로 변환하기 때문이다(Figure 4 참조). 나뭇잎이 많은 양의 태양복사를 흡수함에도 불구하고 엽면온도가 최고 30°C내외로 한정되어 나타나는 것은 나뭇잎이 증산작용 시에 태양복사에너지가 증발잠열로 소모되어지기 때문이다. 나뭇잎의 증산작용 시에는 수관에 도달되어 흡수된 태양복사에너지 뿐만 아니라 주변공기(식피층 내의 공기)로부터도 열을 빼앗아 식피층 내의 기온을 저하시킨다. 그래서 식피층 내의 기온은 나대지상의 기온보다 저온을 유지하게 된다. 이런 결과로 식피층은 인접한 나대지상의 기온에 비하여 상대적으로 저온이 된다.

따라서 열은 고온지역(나대지상의 공기)에서 저온지역으로 이동하게 되므로, 도시의 기온은 식피층 내 뿐만 아니라 주변지역의 기온까지 저하되는 것이다. 일사량이 많은 주간에는 비록 엽면온도가 주변기온에 비하여 고온을 유지하고 있더라도 열수지적으로는 저온의 식피층의 열을 고온인 나뭇잎이 빼앗고 있는 것이다. 또한, 일사량이 줄어든 오후 4시 이후에는 나뭇잎이 일사량 흡수가 격감하기 때문에 엽면온도가 식피층의 온도보다 저온화 된다.

그리고 이때부터 나뭇잎의 증발산작용이 약화되어

증발과정을 통한 에너지 소비가 현저히 줄어들어 이를 증발 잠열이라고 한다. 그리고 태양에너지에 의한 엽면의 가열효과가 약화되어 나무의 온도가 낮아진다. 그래서 나뭇잎과 식피층 내 공기 사이의 열 교환은 여전히 공기에서 나뭇잎 쪽으로 열의 이동이 유지된다. 나무의 에너지 소비는 주로 장파복사에너지를 공간으로 방출함으로써 이루어진다. 오후 6시 이후부터 다음날 태양에너지의 입사가 본격적으로 이루어지는 오전 8시경까지, 식피층 내의 기온이 나뭇잎의 온도뿐만 아니라, 같은 고도의 나대지 상의 공기에 비하여 장파복사에너지 수지관계에서 에너지 지출에 불리한 구조를 이루고 있기 때문에 해석된다. 즉 지면이나 나대지 상의 기온에 비하여 고온인 나무에 에워싸여 현열의 방출이 어렵고, 엽면이 방출하는 장파복사에너지가 수증기가 많은 이곳에 다중 흡수되기 때문에 해석된다.

지표면온도와 지중 10cm깊이에서의 온도를 비교하여 보면, 일중(오전 7시부터 오후 6시경)에는 지표면온도가 지중 온도보다 높고 야간에는 이와 반대의 온도분포를 보였다(Figure 5 참조). 이것은 주간에는 태양복사가 지면에서 흡수되어 열에너지로 변환된 후에 지중으로 흡수됨을 나타내며, 야간에는 지중의 열에너지가 장파복사 방출로 냉각된 지표면으로 이동됨을 알 수 있다.

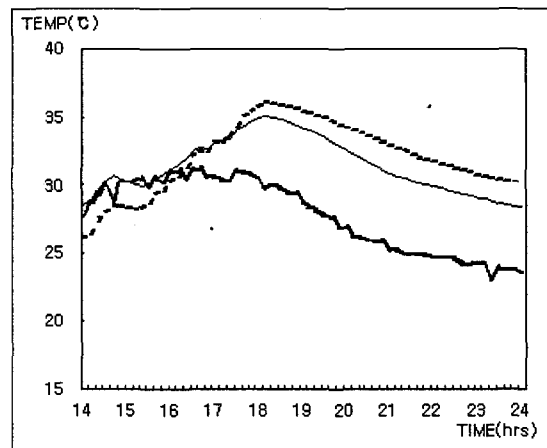


Figure 5. Diurnal variations of soil temperature and ground temperature  
 범례: — AIR TEMP.; - - - CANOPY TEMP.; — LEAF TEMP.

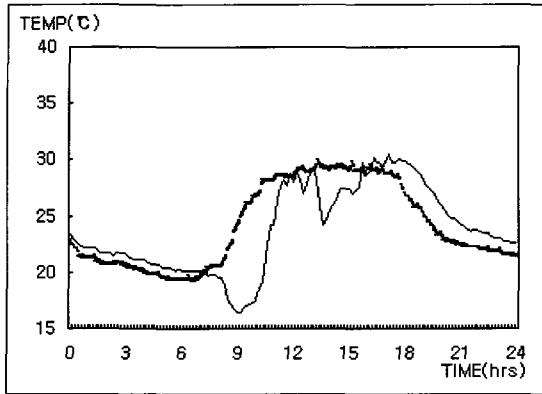


Figure 6. Diurnal variations of air temperature and ground temperature  
 범례: — SOIL TEMP.; - - - GROUND TEMP.

Figure 6에 지면온도와 기온을 비교하여 보았다. 일몰 이후에 기온보다 낮았던 지면온도가 일출을 경계로 기온보다 높아지는데, 이런 상태가 낮 동안에 계속 지속됨을 볼 수 있다. 정오 중에는 강한 응대적운의 출현으로 기온이 불안정하였다. 지표면의 온도는 야간 평균 23.5°C, 주간 최고치 29.5°C로 다른 온도보다 더 낮고, 일교차도 적었다. 이것은 식피층 하부에서 지열이 보존되고, 주간에는 식피층에 의하여 일사가 차단 내지는 반사하기 때문이다.

Figure 7에 제시된 풍속은 지상 2.0미터 상공의 나대 지상에서 관측된 값인데, 대체로 2m/s 이하로 관측되어 비교적 약풍이었다. 바람은 대체로 오후 1-2시경에

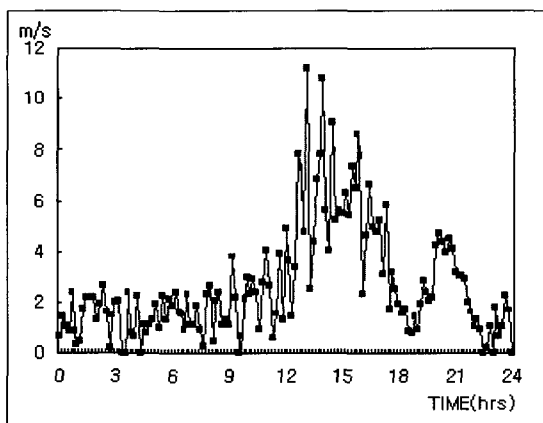


Figure 7. Diurnal variation of the measured wind speed.  
 범례: ■ WIND(m/s)

7m/s로 컸고, 야간에 1m/s로 작았다. 이는 주간동안에 하계지표면 가열에 따른 난류의 기여를 반영하고 있는 것으로 판단된다.

단파복사 및 식피층 내외에서 관측된 기상자료를 기초로 계산한 잠열과 현열 플럭스를 나타내었다(Figure 8 참조). 이것을 살펴보면 태양복사(단파복사)에너지는 2시경에 400 W/m<sup>2</sup>이었다(Figure 9 참조).

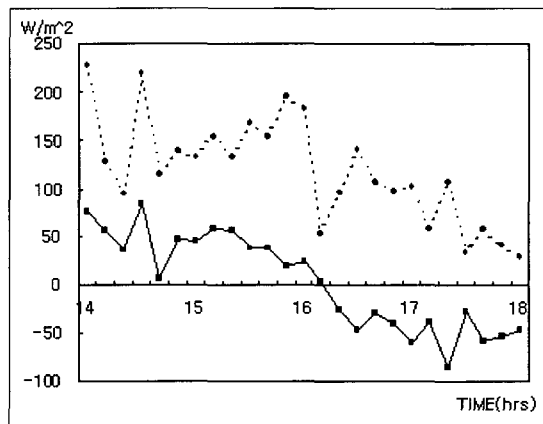


Figure 8. Diurnal variation of sensible heat and latent heat  
 범례: ■ - sensible heat(H); - ● - latent heat(IE)

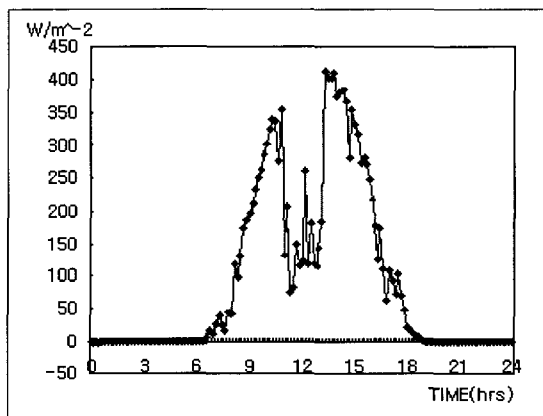


Figure 9. Diurnal variation of the insolation.  
 범례: ◆ INSOLATION

열수지항을 Pilke(1984)의 방법에 의거하여 계산한 결과 현열 플럭스는 최고 80 W/m<sup>2</sup>로 작았으나 낮시간 동안의 잠열플럭스는 최고 230 W/m<sup>2</sup>에 달하였다.



이것은 Taconet et al.(1986)이 1차원 지면-식피층-대기의 결합모델로 최성기의 조밀한 식피층에서 구한 잠열 플럭스,  $310 W/m^2$ 보다 약간 작은 값이다. 관측치로 계산한 열수지 항들은 기존의 연구들과는 연구대상 및 조건의 차이 때문에 그 값 자체를 비교할 수는 없지만 잠열 플럭스가 더 크게 추정되고 현열 플럭스가 그 보다 작게 추정되어 식피층의 특성을 잘 나타내었다.

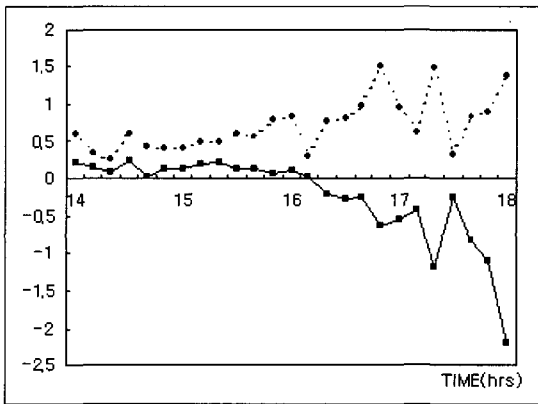


Figure 10. Diurnal variations of the energy redistribution ratio.

범례: ■ H/Sn; ◆ IE/Sn

## 2. 에너지의 재분배

수목의 영역으로 입사된 태양복사에너지는 그곳에는 다른 형태의 에너지로 재분배되는데, Hwang, Su Jin(1994)의 연구방법에 따라 그 비율이 계산되었다. 식피층 내에서 태양에너지가 현열로 재분배되는 비율은 아주 작았지만 잠열로 재분배되는 것은 평균 약 0.7로 대단히 컸는데, 이 같은 값이 주간내 지속되었다. 태양에너지가 현열로 재분배되는 비율이 높으면 높을수록 낮동안에 기온상승이 크게 나타난다. 반면에 잠열로 재분배되는 비율이 높을수록 지상으로 입사되는 태양에너지가 인간이 감지할 수 있는 열로 전환되는 양이 작음을 의미하기 때문에, 낮동안에 지상기온의 상승폭이 작아진다는 것을 의미한다. Hwang, Su Jin(1994)의 방법으로 계산된 식피층의 에너지 재분배 값을 Figure 10에 나타내었다. 이 결과는 습윤토양에서 0.6을 얻은 Hwang, Su Jin(1994)의 비율보다 약간 컸다. 수목이 위

치하는 곳에는, 이처럼 지면도달 일사량의 많은 부분이 현열로 전환되지 않고 잠열의 형태로 대기상층으로 이동하기 때문에 주변지역에 비하여 저온영역이 형성되는 것이다. 이를 수목의 오아시스효과(Oasis Effect)라고 한다. 야간에는 태양복사에너지(단파장에너지)가 지상에 도달하지 않으므로 에너지 재분배해석에는 주간만을 대상으로 하였다. 그림에서 에너지 재분배는 지면도달 태양복사에너지에 대한 현열과 잠열의 비를 각각 sensible heat/net solar radiation(H/Sn), latent heat(IE)/net solar radiation(IE/Sn)으로 나타내었다.

## V. 결론

관측된 자료항목의 일변화 패턴은 비록 정오 중에 강한 응대적운의 출현으로 불안정한 모습을 보이고 있지만 여타의 논문과 교과서에 소개된 것과 일치함을 알 수 있다. 따라서 거리가로수가 도시의 하계기온 저하에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있었다. 그러나 이 자료는 정오에 출현한 응대적운의 영향으로 불안정한 양상을 보이기도 하였고, 관측항목중에서 가장 중요한 엽면온도가 약 반일에 걸쳐서만 관측이 이루어졌기 때문에 나무가 하루 중에 흡수하는 대기중의 열량을 정량적으로 평가하는데는 한계가 있었다. 그럼에도 불구하고 관측항목의 일변화 패턴을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 야외관측결과 일사가 강한 시간동안(2~5시)의 기온은 식피층기온보다  $1^{\circ}C \sim 2.5^{\circ}C$  높았고, 엽면온도는 식피층보다  $1^{\circ}C \sim 2^{\circ}C$  낮은 것을 관찰할 수 있었다. 이는 엽면의 증산작용이 활발하여 식피층 내 저온이 형성되며, 이는 식피층 내의 열을 빼앗아 기온저하를 유발시키기 때문이다.

2. 열수지 및 복사수지 해석을 통하여 태양복사에너지가 식피층 내외에 분배되는 에너지를 분석한 결과, 식피층에서는 지면도달 태양에너지의 대부분이 수증기 증발로 소모되어(약 70%), 태양에너지의 대부분의 온도상승으로 나타나는 나대지에 대하여 저온이 형성됨을 알 수 있었다. 이로부터 가로수의 증산작용으로 소모하

는 에너지가 기온저하에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있었다.

3. 따라서 현대의 새로운 환경문제로 대두된 도시열섬현상을 완화하고 아울러 미기후의 개선을 도모하기 위해서는 앞으로 각 지방자치단체는 다른 환경사업에 비해 재정적으로 부담이 적은 가로수와 같은 수목 식재사업에 역점을 두어야 할 것으로 사료된다. 아울러 지자체의 환경적 특성을 고려한 전략적인 식재계획의 수립이 시급하다고 하겠으며 도시녹지의 환경적·경제적 효과에 대한 조경학적인 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.

차후 연구과제로, 도시수목의 겨울철 열 저장효과 평가와 거리가로수를 대상으로 하여 다양한 외적조건에 따른 도시수목의 기온 저감효과를 평가할 필요가 있을 것으로 판단된다.

#### 인용문헌

1. 김수봉(2000) 도시환경녹지계획론. 대구: 중문출판사. pp. 111-112.
2. 김수봉(2002) 인간과 도시환경. 서울: 누리에. pp. 200-219.
3. 김해동과 양성기(1995) 제주도 북부지역의 표면 열수지 해석 -1993년과 1994년 하계의 경우-. 한국환경과학회지 4(3): 197-206.
4. 부경은, 전영신, 박지용, 조하만, 권원태(1999) 자동기상관측장치자료를 이용한 서울의 기온수평분포분석. 한국기상학회지 35(3): 335-343.
5. 윤용환 등(1997) 공원녹지 내에 있어서 기온 및 상대습도분포와 토지피복상태와의 관련성에 관해서. 환경정보과학논문집, 제11호, pp. 19-24.
6. 윤용환 등(1998) 녹지의 규모와 주변시가지의 기온저하와의 관련성에 관해서. 환경정보과학논문집, 제12호, pp. 275-280.
7. 조현길과 안태원(1999) 도시녹지에 의한 미기후개선의 기능. 한국조경학회지 27(4): 23-28.
8. Hwang, Su Jin(1994) The Effect of Soil Moisture on the Energy Balance at the Bare Soil Surface. Doctoral Thesis. Tsukuba University.
9. Asaeda, T., Ca, V., T. and Wake, A.(1996) Heat Storage of Pavement and its Effect on the Lower Atmosphere. Atmospheric Environment 30(3): 413-427.
10. Avissar, R. et al.(1996) Potential Effects of Vegetation on the Urban Thermal Environment. Atmospheric Environment 30(3): 437-448.
11. Geiger, R.(1965) The Climate Near the Ground. Cambridge: Harvard University Press.
12. Grey, G. W., and Deneke, F. J.(1986) Urban Forestry (2nd ed.). New York: Wiley.
13. Kanda M., Moriwaki R., and Yokoyama M.(1997a) 明治神宮森の氣候緩和効果機能: 大氣淨化機能の評価(1) 1996年夏期集中観測. 天氣, 44(10): 31-40.
14. Kanda M., Moriwaki R., and Yokoyama M.(1997b) 明治神宮森の氣候緩和効果機能: 大氣淨化機能の評価(2) 森林環境氣象モデルによるシミュレーション. 天氣, 44(10): 41-48.
15. Kimura, F. et al.(1986) 都市化とヒートアイランド現象. 日本早稲田大學理學部研究報, 331-337.
16. Sugawara and Kondo(1995) 都市における各種地表面温度の敏感度解釋. 天氣, 42(12): 813-818.
17. Taconet O., Bernard, R. and Vidal-Madjar, D.(1986) Evapotranspiration over an Agricultural region using a surface flux /Temperature model based on NOAA-AVHRR data. Journal of Climate and Applied Meteorology 25: 284-307.
18. Landsberg, H. E.(1981) Urban Climate. 이현영(역). 도시기후학. 서울: 대광문화사.
19. Nino K., and Kanda M.(1992) 植生による氣候緩和効果と都市環境への應用. 地球環境と流體力學. 東京: 朝倉書店. 日本流體力學會.
20. Pilke, R. A.(1984) Mesoscale Meteorological Modeling. Academic Press, pp. 374-420.
21. Watanabe and Kondo(1994) 水環境の氣象學. 東京: 朝倉書店.
22. Welles, J. M. and Norman, J. M.(1991) Instrument for Indirect Measurement of Canopy Architecture. Agronomy Journal 83: 818-825.

원고접수: 2002년 6월 20일

최종수정본 접수: 2002년 7월 26일

3인익명 심사필