

하계에 도심지에서 관측된 흑구온도의 특성 분석

박종길 · 정우식* · 김석철* · 박길운*

인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터

*인제대학교 환경공학부/대기환경정보연구센터

(2008년 6월 10일 접수; 2008년 7월 15일 채택)

On the Characteristics of Globe Temperature Variation Observed at Downtown in Summer Season

Jong-Kil Park, Woo-Sik Jung*, Seok-Cheol Kim* and Gil-Un Park*

School of Environmental Sciences Engineering, Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea

**Department of Atmospheric Environment Information Engineering, Graduate school, Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea*

(Manuscript received 10 June, 2008; accepted 15 July, 2008)

Abstract

In order to monitor the impact of high temperature which is seen frequently with climate change, we investigated the monthly change in globe temperature, air temperature, mean radiant temperature and effective radiant heat flow, because the four well reflect thermal radiation from bio-meteorological aspect. Both globe temperature and air temperature showed an increasing trend every month. Compared to air temperature, globe temperature had a wider range of temperature change and was more influenced by meteorological element such as precipitation. Diurnal trends of air temperature, globe temperature and the difference between their temperature had the lowest value before the sunrise and the highest around 1300~1500 LST, showing the typical diurnal trends. Globe temperature and the difference between their temperature had a sharp increase around 1000~1100 LST, maintained high value until 1700 LST and then declined, though varied by month. The difference between globe temperature and air temperature was highly dependent on the amount of precipitation and clouds. The duration in which globe temperature was higher than air temperature was the lowest in July. Therefore the amount of precipitation was the most affecting, followed by the amount of clouds and wind. In order to find out the diurnal trends of temperature in city center and city outskirts, we assumed the roof of a concrete building as a city center, and the grass-covered observatory of the Gimhae International Airport as city outskirts. The diurnal trends of temperature in the two sites showed a strong correlation. The highest and lowest temperature also had the same trend.

Key Words : High temperature, Climate change, Globe temperature, Mean radiant temperature, Effective radiant heat flow, The diurnal trends of temperature

지구의 연평균 기온은 급속히 상승하였으며 한반도도 예외는 아니었다. 일반적으로 대륙성 기후권에 속하는 우리나라의 기온은 지난 30년간 연평균 기온이 10.6~15.9℃의 범위에 있었지만 1990년부터 1996년까지 최근 7년간의 연평균 기온은 12.2~13.5℃의 범위를 나타내었다. 기상청에 따르면 기상 관측을 시작한 1908년 이래 우리나라의 연평균 기온은 불규칙적이거나 꾸준히 상승한 것으로 나타났다¹⁾. 과거 1987년과 1994년 한반도에 하계 이상고온을 나타낸 바 있으며²⁾, 향후 10년간 한반도 기후 변동 시나리오에 의하면 2005년과 2007년경을 중심으로 약 0.5~1℃ 평년보다 높은 기온을 나타낼 것이며 2010년경에 약 1℃ 상승하는 것으로 나타났다³⁾. 그리고 최근 40년간 한반도는 지역별로 대구가 약 0.84℃, 서울이 약 0.68℃, 포항이 약 0.58℃, 울산이 약 0.58℃ 등으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 한반도 지역 평균은 약 0.6℃ 증가하였다. 이 가운데 0.4℃가 도시화에 의하여 증가한 것으로 추정하였다⁴⁾.

기온은 기상이나 지표면의 상태에 따라 일사의 흡수, 장파 복사 등이 현저히 다르므로 맑은 날 도심의 아스팔트와 교외의 녹지에서 기온 차이가 5~6℃ 정도 될 때도 있다⁵⁾. 그런데 현재 우리나라 인구의 대부분이 도시에 집중됨에 따라 하계에 복사열을 많이 방출하는 아스팔트나 콘크리트 등과 같은 환경에 노출되는 시간이 많아지고 있다.

이러한 도시 대기 환경이 인체에 미치는 영향을 복합적으로 표현할 수 있는 온도를 흑구온도라 할 수 있는데, 이는 기온, 풍속, 복사열에 의하여 변화하므로 기온과 풍속, 복사열에 의한 체감온도를 나타내는 일종의 인체에 미치는 열적온도지수라 할 수 있다⁶⁾.

흑구온도계(globe Thermometer)는 태양광에 수직인 면에 직접 도달하는 직달 일사량과 대기 산란에 의한 일사량에 의한 열복사 효과를 측정하기 위하여 영국의 Vernon⁶⁾이 고안한 특수한 온도계로 복사에너지가 검게 칠한 흑구에 흡수되어 구의 벽 온도를 상승시키고, 이것이 구 내부의 물과 공기를 데워 복사열의 복합적인 효과를 온도로 나타낸다. 이 흑구온도계로 관측된 흑구온도와 습구온도, 기온을 이용하여 습구흑구온도(Wet Bulb Globe Temperature, WBGT)를 산출하는데, 이 WBGT는 1950년대에 개

발이 되어 미군들의 일사병 발생을 예방하기 위해 사용되고 있다⁷⁾. 특히 일본과 오스트레일리아에서는 WBGT를 생산하기 위하여 흑구온도 관측이 실시되고 있는데, 우리나라 기상청에서는 흑구온도가 아직 정규 관측 항목에 포함되어 있지 않으며, 군부대에서 훈련시 발생 가능한 재난을 예방하기 위해 사용되고 있는 WBGT 지수를 위하여 관측되고 있다.

흑구온도와 열복사에 대한 국내 선행연구로는 권영국⁸⁾이 하계 무더위 하에 heat stress 재해에 대한 연구를 일반적인 생활환경이 아닌 작업장을 중심으로 시도하였으며, 주 등⁹⁾은 도시 녹음수가 복사열에 미치는 영향에 대하여 실제 관측을 통한 연구가 진행되었지만, 대표적인 도심 환경에서 이루어진 실측 연구는 이루어지지 않았다.

이 외에도 실내 열쾌적성 평가에 관한 연구^{10~12)}와 WBGT를 이용한 근로자의 열피로¹³⁾, 인체 열모델¹⁴⁾, 열환경 측정기기 및 요소¹⁵⁾를 소개하는 연구는 있으나, 실외 환경에서 복사열의 영향을 측정하여 기온과의 상관 및 특성을 밝힌 연구는 없었다.

이에 본 연구에서는 도시대기환경에서의 열복사에 대한 관측적 기초 연구로서, 아스팔트화 되어 있는 도시를 가정하여 경남 김해시 어방동 소재 인제대학교 창조관 옥상에서 흑구온도를 관측하여, 하계 흑구온도의 월별, 일별 변화특성을 분석하고 열복사의 기준이 되는 평균복사온도, 유효복사에너지(effective radiant heat flow) 및 heatwave 해석을 위한 기초 자료를 생산하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 관측 환경

흑구온도계는 열복사 효과를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 황동 재질로 되어있고, 광택이 없이 검게 칠한 둥근 모양의 구 내부에 약 ⅓정도 물을 채우고, 코르크 마개에 주사기 바늘을 꽂아 복사열에 의해 팽창하는 수증기를 배출하도록 되어있다. 태양복사에너지 및 지구복사에너지는 주변 공기에 의해 검게 칠한 흑구 주변으로 흡수되어 구의 벽 온도를 상승시킴에 따라 잠열과 현열의 복합적인 영향이 온도로 나타난다⁵⁾.

실험장치는 Fig. 2에 제시하였듯이 주변 환경의 영향을 잘 받을 수 있도록 통풍이 잘되게 하였으며,

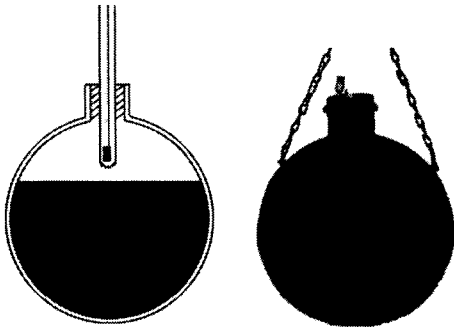


Fig. 1. The inside and outside structure of a globe thermometer.

직사광선과 지면의 열복사를 잘 흡수할 수 있도록 흑구를 대기 중에 노출시켰고, 지면으로부터 약 1.5 m 높이에 위치시켜 인간이 지면의 영향을 받는 것을 고려하였다¹⁶⁾. 최근에는 약 3 inch 크기의 소형 흑구가 많이 사용되고 있으므로 사용할 때는 대형인지 소형인지를 구별해야 한다. 소형일 경우 대형보다 흑구온도가 낮게 나타나며, 특히 바람이 강한 경우 그 경향이 뚜렷하게 나타나, 실내 온열환경 지표를 조사할 때 많이 사용되어진다. 그러나 검증용으로 사용되는 흑구는 대형으로, WBGT 관측을 위한 표준장비이므로^{7,17)} 본 연구에서는 대형 흑구를 사용하였다. 그리고 흑구온도 측정에 사용한 센서는 Thermo Record 사의 제품으로 측정범위는 -40~110℃이며 측정오차는 ±0.1℃이다.

도심환경에서 흑구온도와 기온을 비교하기 위해 온도계는 Fig. 2와 같이 설치하였는데, 백엽상과 같이 직사광선을 피할 수 있도록 지붕을 덮고 바람이 잘 통할 수 있도록 하였으나, 콘크리트 지면의 영향은 고려할 수 있도록 하였다. 일사량 관측을 위해 실험장치가 설치된 인근에 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)를 설치하였고 고려하는 환경은 도심을 나타낼 수 있도록 건물 옥상에 설치하였다.

2.2. 자료검증 및 연구 방법

흑구온도와 기온 및 일사량은 2005년 6월 1일부터 8월 31일까지 건물 옥상에 설치된 관측기기로부터 1분 간격으로 관측하고 data logger에 자료를 저장하였으며, 도심 외곽의 기온과 비교하기 위해 남동쪽으로 약 9.6 km의 직선거리에 위치한 김해 공항 기상대에서 관측된 1시간 관측자료를 사용하였다. 이곳은 주변에 높은 지형지물이 없어 흑구를 관측하고 있는 지점과 종관적으로 같은 공간내에 있다고 볼 수 있으며(Fig. 3 참조), 사용된 기상요소는 동일 기간의 기온, 강수량, 바람, 운량이다.

관측된 자료들 가운데 유효자료를 선정하기 위하여 관측된 자료의 일변화 분석을 통해 이상치 자료를 제거하였으며, Larsen¹⁸⁾의 통계적 유효자료 선정 방법에 따라 실측 자료의 수가 전체 자료의 2/3 이상 (1일 평균치는 16시간, 1개월 평균치는 20일 이상)

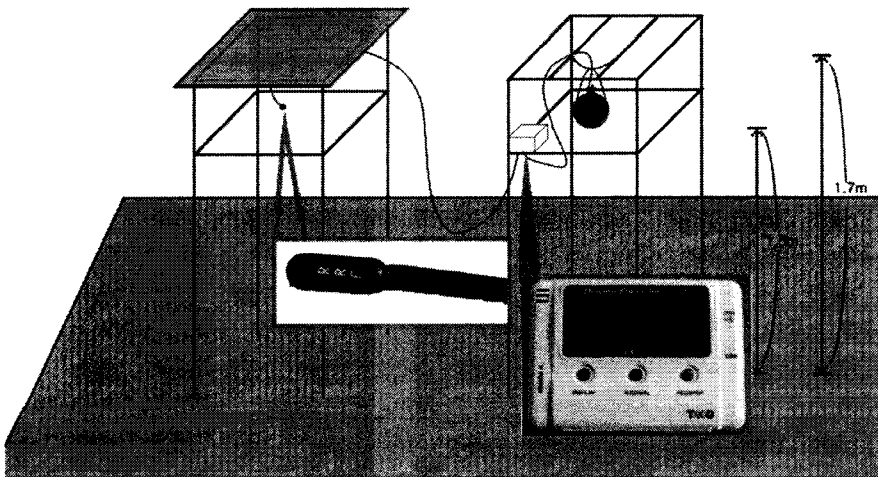


Fig. 2. An experimental device of globe thermometer and air temperature sensor.

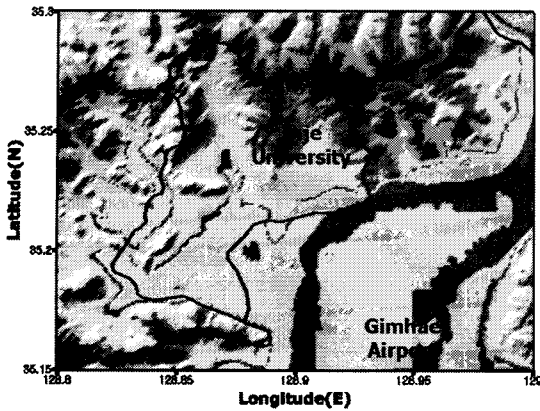


Fig. 3. Locations of globe temperature and automatic weather system observation sites.

일 때 유효하며, 그 이하일 때는 통계적 의미를 상실한다고 하였으므로, 본 연구에서는 관측 자료 가운데 70%이상(24시간 관측 자료 중 결측이 8시간 미만)으로 측정된 날을 선정하여 일평균 자료로 구하였으며, 월 평균자료는 일 평균자료가 70%이상 구해진 달의 평균값을 통계 분석 자료로 선정하였다. 이들 월별 유효자료 수와 백분율을 Table 1에 나타내었다.

측정되어진 흑구온도와 기온 및 공항기상대 자료는 연구기간동안 월별로 97.4~100%의 유효자료율을 나타내었으며, 요소별로도 97.9~100%의 유효자료율을 나타내었다. 또한 전체적으로는 97.17%의 유효자료율을 나타내어 측정 자료에 대한 신뢰성이 매우 높았으며 통계분석에 사용하는데 이상이 없음을 알 수 있다.

유효자료를 선정한 이후, 도심에서의 기온과 흑구온도의 하계 변화특성을 알아보기 위하여 기온과 흑구온도의 월변화, 일변화 및 시간변화를 분석하였으며, 열복사 평가의 기준이 되는 흑구온도와 기온의 차($T_g - T_a$), 평균복사온도(mean radiant temperature), 유효복사에너지(effective radiant heat flow)의 일변화와 흑구온도와 기온의 차가 양의 값을 갖는 일중 지속시간을 분석하였다.

평균복사온도와 유효복사에너지는 Forsthoff과 Neffgen¹⁹⁾와 같이 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$t_r = [(t_g + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 v_a^{0.6} (t_g - t_a)]^{0.25} - 273 \quad (\text{식 1})$$

$$E_{\text{eff}} = 5.67 \times 10^{-8} \times 0.95 [(t_r + 273)^4 - (32 + 273)^4] \quad (\text{식 2})$$

여기서 t_r 은 평균복사온도(°C)이고, t_g 는 흑구온도(°C), v_a 는 풍속(m/s), t_a 는 기온(°C), E_{eff} 는 유효복사에너지(W/m²)로 5.67×10^{-8} 의 Stefan-Boltzmann 상수(W/m² · K⁴)와 복사율을 0.95로 사용하였다. 유효복사에너지는 인체와 주변사이의 복사에 의한 열교환량으로 정의할 수 있으며, 인체의 표면온도는 Forsthoff과 Neffgen¹⁹⁾와 같이 32°C로 설정하였다.

그리고 이들 흑구온도와 기온 및 그들의 차가 기상조건에 따라 어떠한 특징을 갖고 있는 지 알아보기 위하여 흑구온도와 기온의 차가 양수의 값을 나타내는 경우의 지속시간을 일별로 분석하였고 기상조건을 강수 현상이 있는 날과 강수 현상은 없으나 흐린 날(전 운량이 4/8이상인 경우), 날씨는 맑으나

Table 1. The effective data number and percentage of the weather elements observed at each site from June 1 to August 31, 2005

Variables	Month			Total	Mean	%
	June	July	August			
Globe temperature(T_g)	674	744	744	2162	720.67	97.92
Air temperature(T_a)	674	744	744	2162	720.67	97.92
Solar radiation(S_r)	674	744	744	2162	720.67	97.92
Wind speed(W_s)	720	744	744	2208	736	100
Rainfall(R_f)	720	744	744	2208	736	100
Cloud cover(C_c)	720	744	744	2208	736	100
Total	3508	3720	3720	10948		
%	97.44	100	100	99.17		

(전 운량이 3/8 이하) 풍속이 월평균 풍속(6월 3.0 m/s, 7월 3.2 m/s, 8월 3 m/s)²⁰⁾보다 낮은 경우와 높은 경우로 구분하여, 이 4가지 경우를 대상으로 기온과 흑구온도에 미치는 영향과 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기온(T_a)과 흑구온도(T_g)의 월변화 특징

하계의 기온과 흑구온도의 월변화 특징을 살펴보기 위하여 일중 기온과 흑구온도를 각각 Fig. 4와 5에 box-plot으로 나타내었다. box-plot은 일중 기온이나 흑구온도의 평균값(mean), 중앙값(median), 각 percentile 은 물론 일중 그들의 범위를 파악할 수 있다.

Fig. 4와 같이 하계 기온은 관측기간 동안 최고기온이 36.69℃, 최저기온은 14.67℃, 평균기온은 25.74℃로 나타났으며, 월별로는 6월이 최고 35.06℃, 최저 14.67℃, 평균 23.81℃로 나타났고, 7월은 최고 35.68℃, 최저 19.71℃, 평균 26.2℃로, 8월이 최고 36.69℃, 최저 20.81℃, 평균 27.04℃로 나타나 매월 상승하는 추세를 보였으며 강수가 있었던 장마기간에는 일중 기온의 변화폭이 작게 나타났는데, 이는 강수를 동반한 구름으로 인해 주간에 지표에 도달하는 일사량이 크게 감소하여 최저기온이 상대적으로 낮게 나타났고, 야간에는 구름에 의한 지구복사로 인해 최저기온이 전날보다 더 낮아지지 않았기 때문이다. 이를 통해 강수량이나 구름은 하계 기온의 월변화에 직접적인 영향을 주지 못하는 것을 알 수 있다.

이에 비해 복사열의 복합적인 물리적 영향을 나타내는 흑구온도(Fig. 5 참조)는 관측기간 동안 최고 45.37℃, 최저 14.3℃, 평균 27.93℃로 나타났으며, 월별로 6월은 최고 43.55℃, 최저 14.3℃, 평균 26.13℃, 7월은 최고 44.6℃, 최저 19.1℃, 평균 28.28℃, 8월에는 최고 45.37℃, 최저 20.24℃, 평균 29.22℃로 나타나 일변화는 크게 나타나지만, 월별로는 기온과 같이 매월 조금씩 상승하여 8월이 가장 높게 나타났는데, 이는 태양복사에 의한 지표면 가열과 그로 인한 기온상승으로 흑구온도 역시 기온과 같이 지연효과가 나타났으며, 장마와 같이 강수가 있는 날에는 기온과 마찬가지로 흑구온도의 범위도 작게 나타나, 적달일사량에 크게 영향을 미치는 강수의 유무가 흑구온도에 크게 영향을 미침을 알 수 있었다. 그리고 하계 기간인 6~8월 모두 일 평균값이 중앙값보

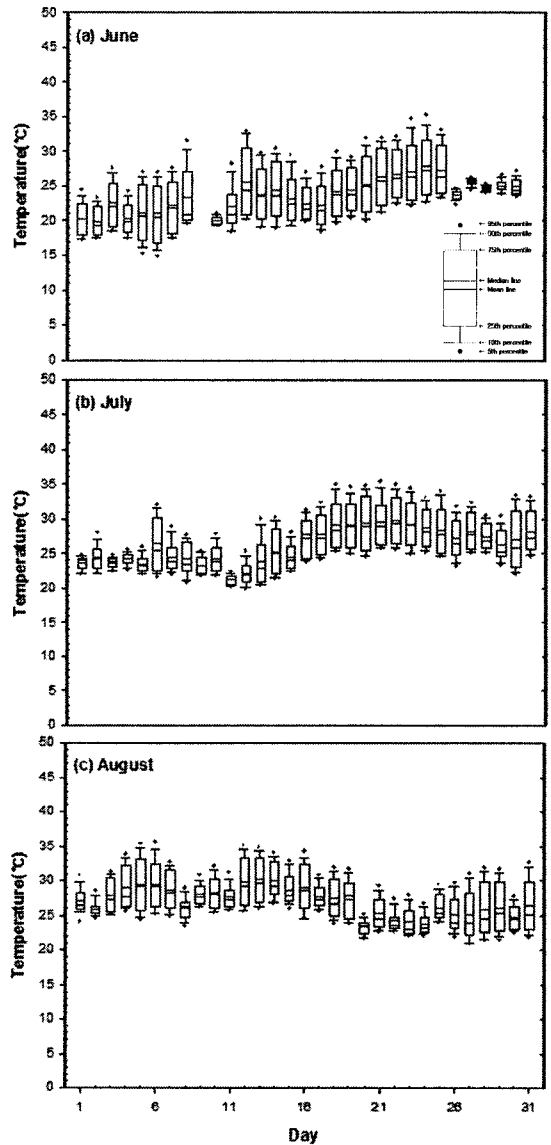


Fig. 4. Daily variation of air temperature observed on (a) June, (b) July, and (c) August, 2005 at Gimhae site.

다 다소 높게 나타나 흑구온도가 평균 이상의 높은 값을 보이는 경우가 많았으며 날씨가 맑을수록 이러한 경향은 더욱 뚜렷하였다.

따라서 흑구온도는 기온과 같이 월별로 조금씩 증가하여 8월이 가장 높은 지연효과를 잘 반영하고 있으며, 복사열의 복합적인 물리적 영향까지 나타내어 기후변화로 인한 폭염의 영향을 평가하는데 좋은 자료가 될 것으로 판단된다. 아울러 canopy의

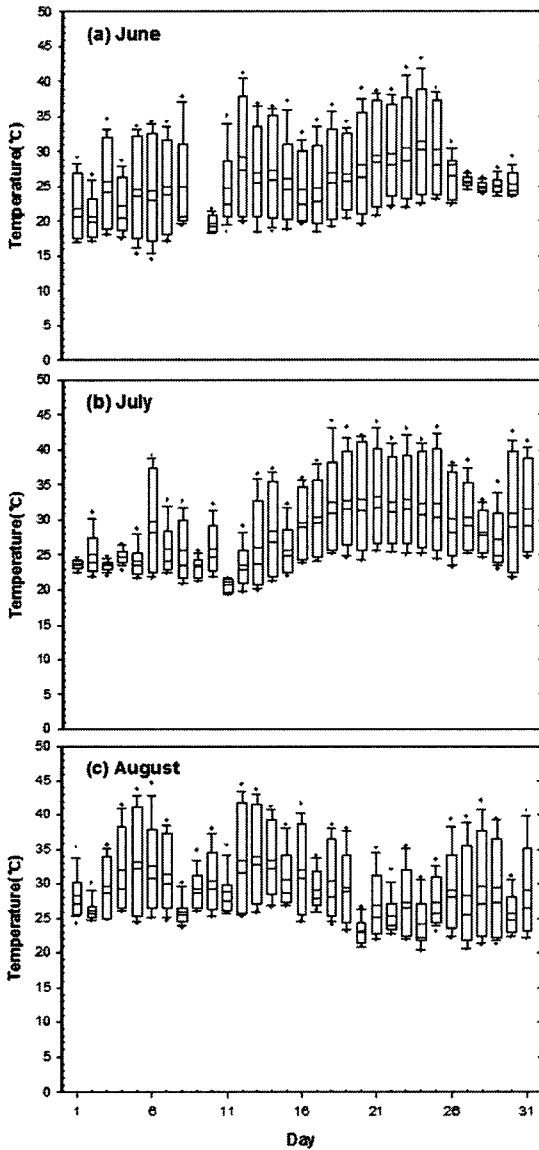


Fig. 5. Daily variation of globe temperature observed on (a) June, (b) July, and (c) August, 2005 at Gimhae site.

변화가 심한 도시의 경우 흑구온도를 정규 관측 항목으로 규정하여 관측함으로써 폭염의 영향을 최소화하는 데 필요한 자료로 사용될 수 있을 것이다.

3.2. 기온(T_a), 흑구온도(T_g), 흑구와 기온차($T_g - T_a$)의 일변화 특징

하계 도심에서의 기온과 흑구온도 및 흑구와 기온의 차의 일변화 특징을 알아보기 위하여 관측기

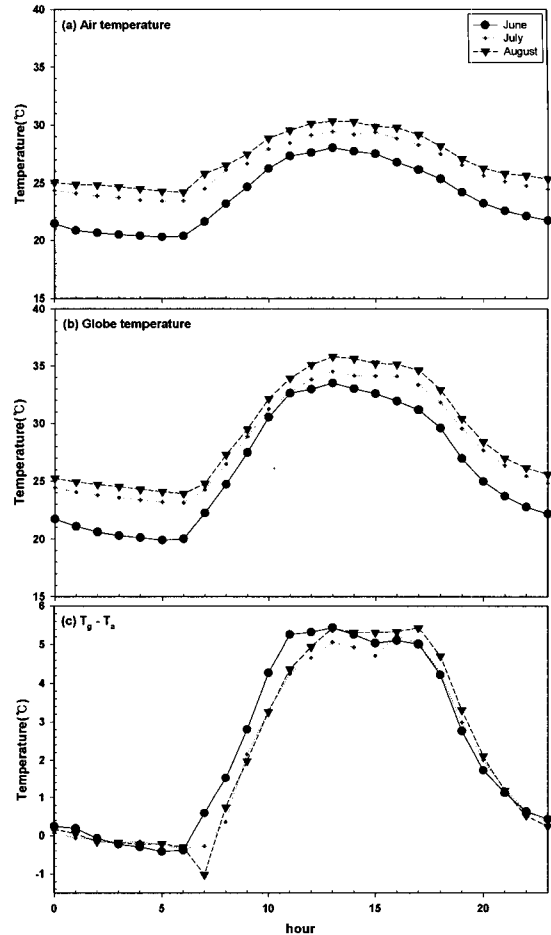


Fig. 6. Monthly variation distribution of diurnal mean (a) air temperature(T_a), (b) globe temperature(T_g), and (c) the difference between globe temperature and air temperature ($T_g - T_a$).

간 동안의 시간별 평균을 Fig. 6에 나타내었다. 기온(T_a)의 일변화 경향은 일출 무렵인 5000~6000 LST에 최저 기온을 나타내었으며, 1300 LST에 최고 기온을 나타내는 등 전형적인 일변화 경향을 잘 나타내었으며, 월별로는 6월이 가장 낮게 나타났고 7월, 8월 순으로 높게 나타났다. 일 최저 기온은 6월이 20.3°C, 7월은 23.4°C, 그리고 8월은 24.2°C로 월별로 상승하였으며, 일 최고 기온도 각각 28.1°C, 29.5°C, 30.4°C로 나타났다. 또한 6월의 경우 다른 두 달에 비해 시간별 기온의 차가 크게 나타났는데, 이는 일사량의 증가에 따른 가열효과가 지연되어 나타나는 것을 잘 반영하고 있다고 할 수 있다.

흑구온도(T_g)의 일변화 경향은 기온과 비슷한 양상을 나타내었으나, 일교차가 기온에 비해 크게 나타났는데 이는 현열과 잠열의 복합적인 효과가 반영되어 나타난 것으로 생각된다. 흑구의 최저온도가 6월에는 0500 LST에 19.9°C, 7, 8월은 0600 LST에 각각 23.1°C, 23.9°C로 나타나 기온과 비슷하거나 약간 낮게 나타났으며 그 시간 이후 1000~1100 LST까지 급격한 증가를 나타내었고 1700 LST까지 높은 상태를 유지하다가 급격히 감소하여 기온과 같은 일변화 경향을 나타내었다. 기온에 비해 높은 상태를 유지하는 시간이 긴 이유는 흑구온도는 현열과 잠열 외에 직달일사의 영향이 복합적으로 나타나기 때문으로 생각되며 7월과 8월로 갈수록 그 경향을 뚜렷하였다.

흑구온도와 기온의 차(T_g-T_a)의 일변화 경향은 일출이전에는 거의 차이가 없었으며 일출이후 급격히 증가하였다. 이들은 하계에 5.1~5.4°C 정도로 높은 값을 나타내었으며, 1300 LST 전후로 높게 나타났으며 일정시간 지속됨을 알 수 있다. 흑구와 기온의 차가 최대로 나타나는 시점은 월별로 다소 차이가 있는데, 이는 월별 기온 변화와 직달일사량에 영향을 주는 강수일과 흐린 날과 같은 기상 현상의 빈도가 월별로 다르기 때문으로 사료되며 본 연구기간 동안 실제로 흑구온도와 기온 차가 8월 오전 7시의 자료에서 -1.0°C의 수치를 나타낸 것은 8월이 6, 7월에 비하여 3000, 4000 LST 무렵부터 강수 현상을 보

이는 경우가 많았기 때문이다.

따라서 기온과 흑구온도 및 그들의 차는 일출 전에 최저값을 나타내었고 1300~1500 LST에 최고값을 나타내어 전형적인 일변화를 나타내고 있으며 흑구온도는 1000~1100 LST경 급격히 증가하였고, 월별로는 다소 차이는 있으나 1700 LST까지 높은 상태를 유지하였다가 그 이후 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 경향은 흑구온도와 기온 차의 일변화에서도 잘 나타나고 있다.

3.3. 흑구온도와 기온 차(T_g-T_a)의 지속시간

흑구온도와 기온의 차는 지구복사에 의한 현열외에 잠열과 직달일사량에 의한 현열과 잠열의 영향이 반영되어 나타나는 온도로 인간이 도심속에서 복사에너지에 의한 영향을 받는 정도를 나타내는 온도라 할 수 있다. 이들이 양의 값(+)을 갖는 일중 시간(지속시간)을 6월부터 8월까지 시계열로 나타내었다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 일별과 월별 매우 다른 양상을 보이고 있는데, 이는 매일의 날씨 상태, 즉 흐리거나 강수가 있는 날, 맑은 날은 물론 바람의 강약에 따라 달라지는 것으로 생각된다.

흑구온도와 기온의 차가 양의 값을 갖는 시간은 매일 다르게 나타나고 있으나, 관측기간 동안 전체적으로 최고 23시간, 최저 1시간으로 나타나, 일별 차이가 많음을 알 수 있으며 평균적으로는 16.62시간을 나타내었다. 월별로는 6월이 최고 23시간, 최저 5시간, 평균 16.9시간을 나타내었고, 7월은 최고

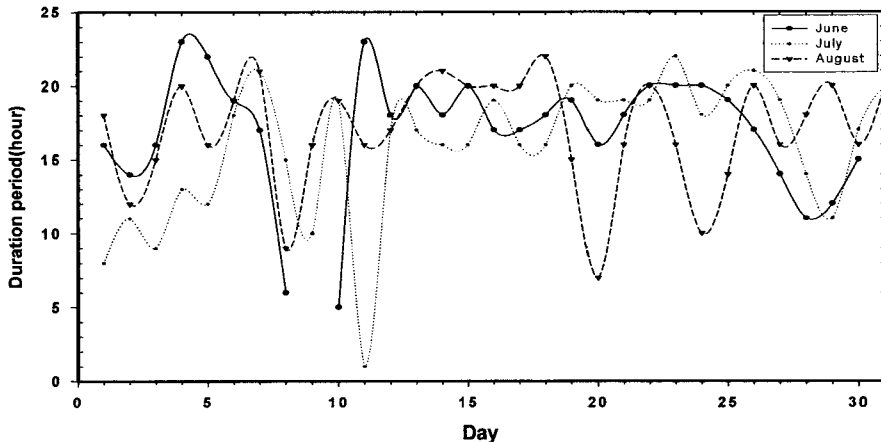


Fig. 7. Monthly distribution of daily duration hour when the difference between globe temperature and air temperature has a positive value at Gimhae site.

22시간, 최저 1시간, 평균 15.9시간, 8월이 최고 22시간, 최저 7시간, 평균 17.06시간을 나타내어 7월이 가장 짧은 지속시간을 나타내었는데, 이것은 흑구온도와 기온 차의 일변화에서도 7월이 가장 낮은 온도범위를 나타낸 것과 일치한다고 볼 수 있다.

흑구온도가 기온보다 높은 시간의 지속시간이 이처럼 월별로 차이를 나타내는 것은 강수, 운량 등의 기상 현상에 의한 것으로 추정된다. 본 연구기간동안 실제로 강수 현상이 있는 날은 7월은 14일, 8월은 11일, 6월은 7일 순으로 나타났으며, 바람이 강한 날도 7월은 16일, 8월과 6월은 12일로 나타났다.

따라서 흑구온도와 기온의 차가 양의 값을 나타내는 지속시간은 8월이 가장 길었으며, 6월, 7월 순으로 나타났다. 이는 그날의 강수의 유무나 운량에 따라 달라지며 흑구온도가 기온보다 높은 시간의 일별 지속시간도 7월이 가장 작았으며 이는 강수와 바람에 의해 크게 달라짐을 알 수 있다.

3.4. 기상 조건에 따른 기온과 흑구온도의 일변화 특성

앞 절에서 흑구온도 및 흑구온도와 기온의 차는 강수의 유무나 바람에 의해 차이가 나타난다고 하였으므로, 이들 차이가 얼마나 나타나며, 어떠한 특징을 갖고 있는지 알아보기 위하여 강수가 있는 날과 강수는 없었으나 흐린 날(전 운량이 4/8이상인 날), 전 운량이 3/8이하로 맑은 날씨를 보이며 풍속이 월평균 풍속보다 강한 날과 약한 날의 4가지 기상조건에 따라 흑구온도와 기온의 일변화를 살펴보았다.

관측기간 동안 강수일은 7월이 가장 많은 14일이었으며 8월이 12일, 6월이 8일 순으로 나타났으며, 흐린 날은 8월이 가장 많은 11일, 6월이 8일, 7월이 5일로 나타나 본 연구기간동안 강수일이 흐린 날보다 많았다. 또한 날씨가 맑으며 바람이 평균 풍속

이상으로 나타난 날이 관측기간 동안 13일이었으며 약한 바람이 부는 날은 21일로 나타났다.

Fig. 8은 기상조건에 따른 기온과 흑구온도의 일변화를 나타낸 것으로 Fig. 8(a)는 강수일의 경우를 나타낸 것이다. 일출 이전에는 최저 기온에 비해 흑구온도가 1.35℃ 더 낮게 나타났으며 일출이후 온도는 상승하여 1500 LST경에 흑구온도와 기온의 차이가 최고 높게 나타났는데, 0700~0800 LST경부터 2200 LST까지 흑구온도가 기온보다 다소 높은 값을 유지하였다. 또한 그들의 온도 차이(최고 2.51℃, 최저 -1.35℃)는 다른 기상조건에 비해 가장 낮게 나타나 강수의 유무가 직달일사량에 크게 영향을 주어 흑구온도 변화에 크게 기여함을 알 수 있다.

Fig. 8(b)는 강수는 없었으나 구름이 많아 흐린 날로 전 운량이 4/8이상인 날의 기온과 흑구온도의 일변화를 나타낸 것이다. 0600 LST경 기온과 흑구온도가 최저를 나타내었으며, 0700~0800 LST 사이에 온도가 급상승하였다. 그리고 강수일에 비해 흑구온도와 기온의 차가 크게 나타났으며(최고 6.85℃, 최저 -0.49℃) 야간 2400 LST 까지 흑구온도가 높게 나타났다. 또한 이들의 차이는 강수일에 비해 최고 2배 이상 높아 강수에 비해 운량은 직달일사량을 완전 차폐시키지 못하므로 흑구기온의 변화에 영향을 적게 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 8(c)는 날씨가 맑고 운량이 적으며(전 운량이 3/8이하) 풍속이 평균이상으로 강한 날의 경우로 흐린 날에 비해 기온과 흑구온도 모두 높게 나타났으며, 그들의 차이도 최고 8.82℃, 최저 -1.01℃로 변화 폭이 크게 나타났다.

Fig. 8(d)의 경우는 전 운량이 3/8이하이고 풍속이 평균미만의 약한 바람이 부는 경우로서 일출이후 급격히 온도가 상승하여 기온과 흑구온도의 차이는 크게 나타났다. 그러나 흑구온도가 peak를 나타내는

Table 2. The number of rainy day, cloudy day, clear and strong and light windy day from June to August, 2005 at Gimhae site

Month	Situation	Rainy day	Cloudy day	Clear and strong windy day	Clear and light windy day
June		8	8	5	9
July		14	5	6	6
August		12	11	2	6
Total		34	24	13	21

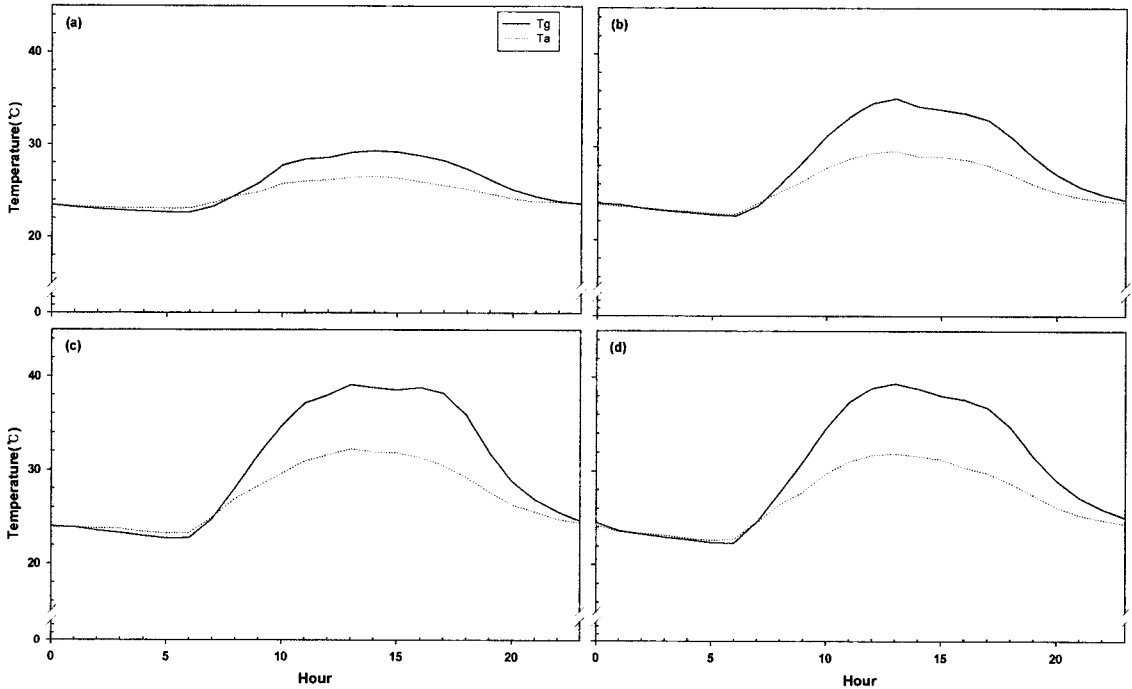


Fig. 8. Diurnal variation of air temperature(T_a) and globe temperature(T_g) under (a) rainy days, (b) cloudy days, (c) clear and strong windy days, and (d) clear and light windy days at Gimhae site.

시점이 다소 다르고(c의 경우 : 1700 LST, d의 경우 : 1200 LST), 온도 차이는 최고 9.11°C, 최저 -1.47°C로 나타나 운량이 적은 맑은 날에는 바람이 복사에너지를 희석시킴으로서 상대적으로 강풍이 부는 날에 비해 변화 폭이 0.75°C 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

따라서 기상조건에 따른 기온과 흑구온도의 차이는 직달일사량의 차폐가 가장 크게 나타나는 강수 유무가 가장 크게 기여하였으며 그 다음이 운량, 바람 순으로 기여하고 있음을 알 수 있다. 그리고 기상조건에 관계없이 4가지 경우 모두 야간에는 기온에 비하여 흑구온도가 다소 낮게 나타나고 주간에는 상대적으로 높게 나타날 일변화 폭이 기온보다 크게 나타나고 있었다. 이와 같이 관측되는 이유는 흑구온도가 기온보다 직달일사 및 주변으로부터 산란·반사된 복사와 같이 복사환경에 민감하게 반응한 것²¹⁾으로 판단되며, 흑구온도를 이용할 경우 우리가 체감하는 온도를 나타내는데 더욱 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

3.5. 평균복사온도 및 유효복사에너지의 일변화

평균복사온도는 주변 환경과 복사 열교환이 이루어졌을 때 나타나는 가상의 균일한 주위 온도를 나타낸다²²⁾. 식(1)에서 알 수 있듯이 평균복사온도는 흑구온도와 기온의 차에 주변의 풍속의 영향을 고려한 흑구온도라 할 수 있다.

Fig. 9는 평균복사온도와 인체의 표면온도를 32°C로 설정하였을 때 복사에 의한 열교환량을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 평균복사온도의 일변화는 월별로 차이는 있으나 1100~1200 LST에 최고 값을 나타내었고, 유효복사에너지 역시 평균복사온도와 마찬가지로 1100~1200 LST와 같은 결과를 나타내고 있다. 그리고 월별로는 8월, 7월, 6월 순으로 높은 값을 나타내어 흑구온도와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 평균복사온도는 실내의 온열환경 및 쾌적성 평가시 활용되는 변수이나 직달일사량을 고려하지 못하며, 풍속의 영향은 다른 변수에 비해 그 영향이 미약하므로 실외 대기의 평가시 흑구온도를 관측하여 활용하는 것이 보다 효

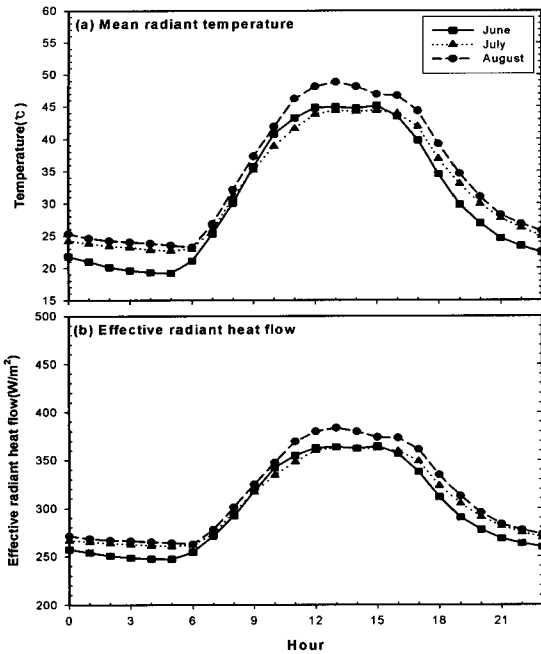


Fig. 9. Monthly variation distribution of diurnal (a) mean radiant temperature and (b) effective radiant heat flow at Gimhae site.

과적이라 할 수 있다.

Fig. 9(b)는 복사에 의한 열교환량을 나타내는 유효복사에너지로 하계 도심의 환경에서 일중 250~380 W/m²의 범위를 나타내고 있으며, 주간에 높고 야간에 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 월별로는 평균복사온도와 같이 8월이 가장 높으며 7월, 6월 순으로 나타났다. 또한 평균복사에너지에 비해 일 변화 폭은 크지 않으나, 인체 표면에서의 열교환량을 나타내므로 직달일사를 차단할 경우 인체에 미치는 열부하를 구할 수 있을 것이다.

따라서 평균복사온도와 유효복사에너지는 모두 8월이 가장 높게 나타났으며, 그 다음이 7월, 6월 순으로 나타나 기온이나 흑구온도와 유사한 경향을 나타내었으며, 일중 높고 야간에 낮아지는 경향을 나타내었다. 특히 유효복사에너지는 일중 250~380 W/m²의 범위를 나타내 평균복사에너지에 비해 일 변화 폭은 적었다. 실내의 온열환경 평가지수로 활용되는 평균복사온도보다 흑구는 기상조건에 따라 복사의 복합적인 물리적 영향을 잘 나타내고 있으므로 기후변화에 따른 폭염 피해를 최소화하고 대

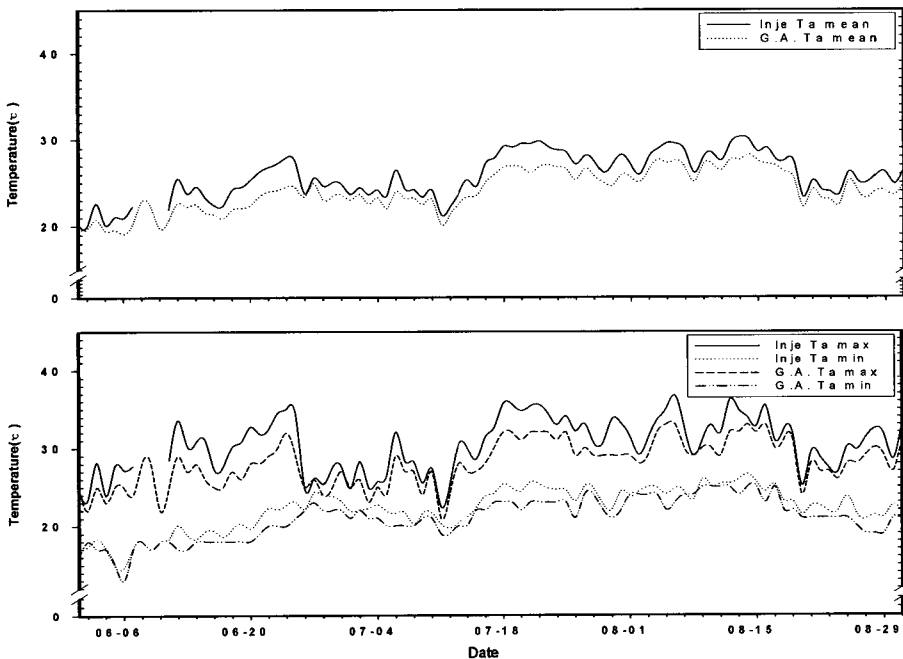


Fig. 10. Time series of daily (up) mean temperature and (down) maximum, and minimum temperature observed at Inje University and Gimhae airport site.

기환경의 평가를 위해 도시지역의 경우 관측을 실시하는 것이 바람직 할 것으로 생각된다. 아울러 열적 스트레스 평가에도 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

3.6. 도심과 교외지역의 기온변화

도심과 교외의 일 기온 변화 특성을 알아보기 위하여 경남 김해시 어방동 소재 인제대학교 창조관 옥상을 도심으로 가정하여 관측한 기온과 잔디로 덮여 있는 근교의 김해공항기상대 노장을 교외지역으로 고려하여 측정된 기온의 시계열을 Fig. 10에 나타내었다.

통계 분석 프로그램인 SAS 9.1을 이용하여 도심지 와 교외지역의 기온에 대한 상관관계 분석 결과, 이들 두 지점의 일평균 기온의 상관계수는 0.97로 높게 나타나 매우 밀접한 상관이 있음을 알 수 있으며, 일 최고기온과 일 최저기온도 각각 0.93, 0.95로 높은 상관계수를 나타내었고 그들의 시계열 분포도 유사한 패턴을 나타내, 종관적으로 유사한 공간내에 두 관측 지점이 존재하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이 기온은 도심과 교외에 따라 차이가 있음을 알 수 있으며, 정량적으로 일최고기온과 일평균기온 및 일최저기온은 각각 평균 2.0℃, 0.9℃, 0.9℃정도 차이를 나타내어 아스팔트, 콘크리트화 되어 있는 도심이 외곽에 비해 높게 나타남을 알 수 있으며 흑구온도는 더욱 높게 나타날 것으로 추정할 수 있다.

따라서 도심에 잔디와 같은 녹지공간을 조성할 경우 도시 기온은 물론 더운 여름날 체감기온이라 할 수 있는 흑구온도도 낮아져 쾌적한 도시환경으로 복원할 수 있을 것으로 사료된다. 아울러 도시 내의 바람장을 고려한 녹지대 조성은 친환경적 도시설계에 있어 매우 중요하며 대기오염은 물론 지구온난화를 촉진하는 이산화탄소량을 줄이는데 크게 기여할 것으로 사료된다.

4. 결 론

하계 기온과 흑구온도의 월변화 특징을 살펴본 결과 흑구온도와 기온은 매월 증가하여 8월에 가장 높은 경향을 나타내었는데, 이는 태양복사에 의한 지표면 가열과 그로 인한 기온상승으로 지연효과가

나타났으며, 흑구온도가 기온에 비해 일변화폭이 크게 나타나 강수나 다른 기상요소의 영향을 크게 받음을 알 수 있다.

기온, 흑구온도 및 흑구온도와 기온의 차의 일변화는 일출전에 최저값을 나타내었고 1300~1500 LST에 최고값을 나타내어 전형적인 일변화를 나타내고 있으며 흑구온도와 그들의 차는 1000~1100 LST경 급격히 증가하였고, 월별로는 다소 차이는 있으나 1700 LST까지 높은 상태를 유지하였다가 그 이후 감소하는 것을 알 수 있었다. 그리고 흑구온도와 기온의 차는 그날의 강수 유무나 운량에 따라 크게 달라지며 흑구온도가 기온보다 높은 지속시간도 7월이 가장 작아 강수의 유무가 가장 크게 기여하였으며 그 다음이 운량, 바람 순으로 나타났다. 또한 흑구온도가 기온보다 주변으로부터 복사환경에 민감하게 반응하고 있어, 흑구온도를 이용하면 우리가 체감하는 온도를 나타내는데 더욱 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

도심과 교외의 일 기온 변화 특성을 알아보기 위하여 콘크리트 건물 옥상을 도심으로 가정하고 잔디로 덮여있는 근교의 김해공항기상대 노장을 교외 지역으로 고려한 결과 두 지점의 일평균 기온의 변화는 밀접한 상관을 나타내고 있으며, 최고기온과 최저기온에서도 같은 양상을 나타내고 있다. 아울러 도시 내의 바람장을 고려한 녹지대 조성은 친환경적 도시설계에 있어 매우 중요하며 대기오염은 물론 지구온난화를 촉진하는 이산화탄소량을 줄이는데 크게 기여할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-3303)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) <http://crlweb.metri.re.kr>
- 2) 김해구, 민경덕, 윤일희, 문영수, 이동인, 1998, 1987년과 1994년에 일어난 한반도 하계 이상고온의 특징, 한국기상학회지, 34(1), 47-64.
- 3) 김맹기, 박정규, 2003, 향후 10년간 한반도의 기후변동 시나리오, 한국기상학회보, 13(1), 318-319.
- 4) 김맹기, 강인식, 광종흡, 1999, 최근 40년간 한반도

- 도시화에 따른 기온 증가량 추정, 한국기상학회지, 35(1), 118-126.
- 5) 박종길, 이대근, 김석철, 2005, 하계 혹구온도의 특성분석, 한국기상학회 가을 학술대회 논문집, 364-365.
 - 6) Vernon H. M., 1932, The globe thermometer, Proc. Inst. Heating and Ventilating Engineers, 39, 100 - 104.
 - 7) Budd G. M., 2008, Wet-bulb globe temperature (WBGT)—its history and its limitations, Journal of Science and Medicine in Sport, 11(1), 20-32.
 - 8) 권영국, 1994, 무더위 속에서의 열압박(Heat stress) 재해의 예방, 대한산업공학회 94년 추계학술대회 발표논문집, 87-108.
 - 9) 주민진, 이춘석, 류남형, 2004, 도시 녹음수의 체감 온도(WBGT) 조절 효과, 한국조경학회지, 32(3), 51-59.
 - 10) 김세현, 노광철, 오명도, 2004, 태양 일사를 고려한 실내 열쾌적성 평가 연구, 설비공학논문집, 16(12), 1140-1148.
 - 11) 박종일, 김경훈, 홍희기, 민병일, 김창주, 1998, 하계 인공환경실험에서의 온열쾌적 특성, 공기조화 냉동공학회, 10(3), 368-377.
 - 12) 배귀남, 1995, 실내 온열환경의 쾌적성 평가, 한국 온열환경학회지, 2(3), 145-157.
 - 13) 마성준, 이내우, 설수덕, 이진우, 2000, WBGT지수를 이용한 온열작업장 근로자의 열피로특성에 관한 연구, 한국안전학회지, 15(1), 112-120.
 - 14) 송두삼, 김태연, 2005, 인체의 열이동과 인체열모델, 대한설비공학회 설비저널, 34(4), 28-35.
 - 15) 김상진, 2005, 열환경 측정기기 및 측정요소, 대한설비공학회 설비저널, 34(4), 36-41.
 - 16) 環境省, 2007, 熱中症保健指導マニュアル, 55pp.
 - 17) 기상청, 2006, 보건분야 산업기상정보 산출기술개발(Ⅲ) 한국형 활동지수 예측기법개발, 31.
 - 18) Larsen R. L., 1973, An air quality data analysis system for interrelating effects, standards and needed source reductions, JAPCA, 23, 933.
 - 19) Forshoff A., Neffgen H., 1999, The assessment of heat radiation, International Journal of Industrial Ergonomics, 23, 407-414.
 - 20) 박종길, 2004, 대기오염 모델링에 의한 김해 지역의 장래 대기오염도 예측, 김해발전연구, 7(1), 101-166.
 - 21) 최동호, 이부용, 2006, 하절기 단일 수목의 열 환경 관측을 통한 서열완화 효과 해석, 한국태양학회 논문집, 26(4), 109-118.
 - 22) 이춘식, 배귀남, 이철희, 최창철, 명현국, 1993, 실내 환경 쾌적성 평가방법에 관한 연구(1) - 온열 및 공기질에 대해서, 한국과학기술연구원, 과학기술처, 204pp.