

# 흑구온도계를 통한 평균복사온도 추정방식 검증

임현우\*, 최유리\*, 박수국\*\*

\*제주대학교 일반대학원 원예학과 박사·석사과정, \*\*제주대학교 생명자원과학대학 생물산업학부 원예환경전공 조경학연구실 부교수

## 1. 서론

도시공간에서 인간이 느끼는 열환경을 분석할 때, 가장 중요한 기후요소 중 하나는 평균복사온도(mean radiant temperature, MRT)라고 할 수 있다 (Park, 2012). 복사에너지의 직접적인 측정을 기반으로 하는 방식이 직관성, 정확성 측면에서 우수하지만, 비용적인 측면에서 아직까지 많은 연구에서 흑구 온도계를 통해 추정된 평균복사온도를 활용하고 있다. 본 연구에서는 정밀도가 검증된 순복사계를 이용하여 여름철 옥외환경에 대한 150mm 지름의 흑구 온도계의 정확성 검증을 목표로 하였다. 또한, 흑구온도계의 활용가능성을 탐색하고, 활용가능 환경을 확인하고자 하였다.

## 2. 연구방법

도시근린공원인 경기도 수원시 효원공원(2016년 8월 10-11일 9:00-21:00)과 장애물이 거의 없는 제주특별자치도 구좌읍 월정리 해변(2016년 8월 23-24일 9:00-17:00)을 연구대상지로 선정하여, 순복사계 CNR4 Net-radiometer와 흑구온도계 Black-Globe-L34(직경 15.24cm)를 1.2m 높이의 이동식 거치대에 온습도(HMP155A within a radiation shield)와 풍향·풍속(Met One 034B-L Windset) 측정 장치와 함께 설치하였으며, 모든 기후 자료들은 매 1분 단위로 CR1000 datalogger에 저장되었다. 순복사계의 평균복사온도( $MRT_{CNR4}$ )는 Eq. 1을 이용하여 계산하였으며(Park, 2011), 흑구온도계의 평균복사 온도( $MRT_{BG,ISO}$ )는 Eq. 2를 이용하여 계산해주었다(ISO 7726, 1998).

$$MRT_{CNR4} = \left[ \frac{f_p K_b (1 - \alpha_k) + 0.5(K_a + K_r)(1 - \alpha_k) + 0.5 \epsilon_p L}{\epsilon_p \sigma} \right]^{0.25} - 273.15 (\text{°C}) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$MRT_{BG,ISO} = \left[ (T_g + 273.15)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 u^{0.6}}{\epsilon D^{0.4}} (T_g - T_a) \right]^{0.25} - 273.15 (\text{°C}) \quad (\text{Eq. 2})$$

$K_a$ ,  $K_r$ ,  $K_b$ 는 태양직사광선, 태양분사광선, 태양반사광선을 뜻하며( $\text{Wm}^{-2}$ ),  $L$ 는 지구복사에너지를 뜻한다( $\text{Wm}^{-2}$ ).  $f_p$ 는 인체 투영면적계수(projected body area factor)를 뜻한다(Park, 2011).  $\alpha_k$ 와  $\epsilon_p$ 는 인체의 태양복사에너지 반사율(an albedo of the human body surface, 0.3)과 지구복사에너지 방사율(an emissivity of the human body surface, 0.97)을 뜻한다.  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzman constant( $=5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ )이다.  $T_g$ 는 흑구온도( $\text{°C}$ )를 뜻하며,  $u$ 는 풍속( $\text{ms}^{-1}$ ),  $\epsilon$ 는 흑구의 지구복사에너지 방사율(0.95),  $D$ 는 흑구의 지름(0.15m)을 뜻한다.

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3.1 평균복사온도 추정 방식별 1분 단위 데이터 비교

10:00-17:00 동안의 두 방식의 1분 간격 데이터를 비교해 본 결과 평균 5.3 $\text{°C}$ 의 차이값을 보였으며, 최대 차이는 29.3 $\text{°C}$ 로 매우 큰 차이를 보였다.  $R^2$  값은 0.3523으로 상관성이 매우 낮은 것으로 나타났다. 측정일별로 나누어 보았을 때, 상대적으로 흐렸던 8월 10일과 11일은 각각 평균 5.1 $\text{°C}$ , 1.4 $\text{°C}$ , 최대 28 $\text{°C}$ , 29.3 $\text{°C}$ 의 차이를 보였으며, 상대적으로 맑았던 8월 23일과 24일은 평균 6.4 $\text{°C}$ , 8.3 $\text{°C}$ , 최대 22.1 $\text{°C}$ , 25.4 $\text{°C}$ 의 차이를 보였다. 평균 차이값을 보면 흐린 날씨에 더 적게 나타났지만, 편차가 더 크며, 상관성도 더 낮게 나타났다.

이전 연구들에서는 Eq. 2의 풍속계수를 수정하는 방식으로 정확성을 높이고자 하였다(Coutts et al., 2015). 본 연구에서도 이와 같은 방식으로 풍속계수를 조절하여 측정된 데이터에 적용하여(Eq. 3) 본 결과 두 방식 간 평균 차이값은 0.6-2.1 $\text{°C}$ 까지 줄어들었지만, 최대 차이가 15.6-29.3 $\text{°C}$ 로 여전히 큰 값을 보였다. 편차와  $R^2$ 값은 크게 변하지 않았다.

$$MRT_{BG,New} = \left[ (T_g + 273.15)^4 + \frac{0.65 \times 10^8 u^{0.53}}{\epsilon D^{0.4}} (T_g - T_a) \right]^{0.25} - 273.15 (\text{°C}) \quad (\text{Eq. 3})$$

Figure 1을 보면  $MRT_{BG,ISO}$ 에서  $MRT_{CNR4}$ 보다 순간적인 변화량이 매우 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 흑구온도의 센서는 흑구 중심에 위치해

흑구표면에서 받은 에너지가 흑구온도계의 센서까지 도달하여 안정화되는 시간이 필요한 반면, 흑구외부에서 측정되는 기온, 풍속은 측정 환경에 즉각적으로 반응한다. 이로 인해 계산식에 대입하는 흑구온도와 기온, 풍속의 오차가 발생하기 때문에 위와 같은 계산 오류가 나타나는 것으로 보인다. 따라서 평균복사온도 추정에 있어 흑구온도계를 활용할 시 1분 단위 데이터를 활용하는 것은 적합하지 않다. 이전 연구들에 따르면, 이러한 문제점은 이전 시간들의 측정값의 평균을 활용하는 식으로 개선할 수 있다고 언급하고 있다(Thorsson et al., 2007).

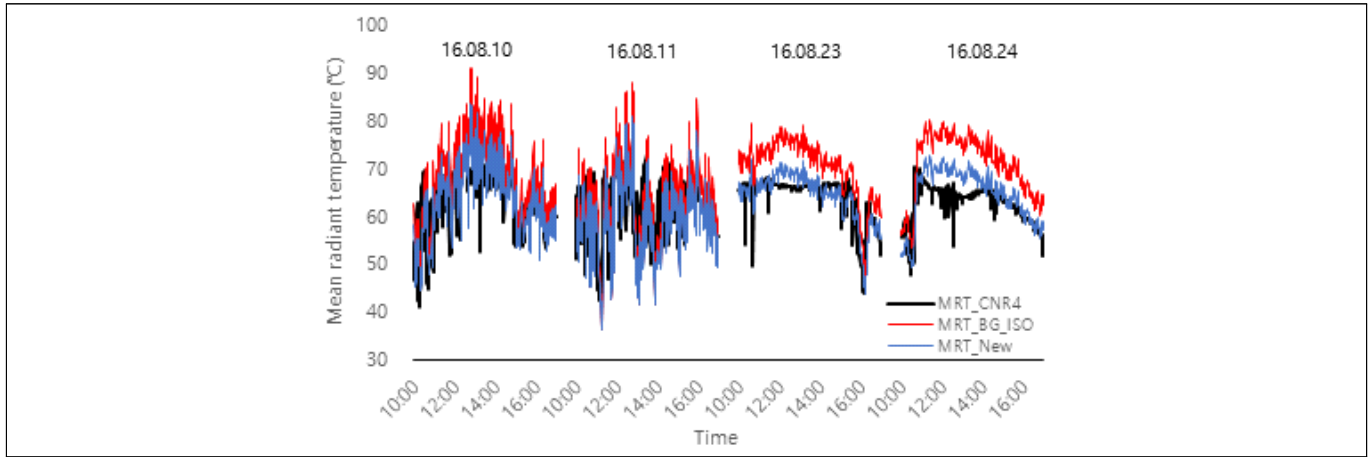


Figure 1. Mean radiant temperature within 1 minute

### 3.2 시간 평균데이터 비교

3.1에서와 같이  $MRT_{BG\_ISO}$ 의 문제점을 완화하고자 이전 측정값들의 평균값을 계산식에 적용하여 비교해 보았다. 그 결과 약 30분 이상의 평균자료를 계산에 적용했을 때  $MRT_{BG\_ISO}$ 와  $MRT_{CNR4}$ 간 차이값의 표준편차가 모두  $4^{\circ}\text{C}$  이내로 감소하였고,  $R^2$ 가 0.6939–0.9439까지 향상되는 결과를 보였다 (Figure 2). 그러나, 평균 차이값은  $2.3\text{--}8.1^{\circ}\text{C}$ 로 1분 자료를 활용한 결과와 큰 차이를 보이지 않았다. 또한, 최대 차이값은  $8.4\text{--}13.3^{\circ}\text{C}$ 로 줄어들었지만, 여전히 큰 값을 보였다. 이전 30분 평균자료의  $MRT_{BG\_New}$ 에서 최대 차이는  $4.4\text{--}7.8^{\circ}\text{C}$ 로 줄어들었다.

Figure 3에서 주로 최대 차이가 나는 시간대는 13:00 전후로 보인다. 특히, 상대적으로 맑은 날씨를 보인 8월 23일, 24일 그 특징이 더 두드러지는 것을 볼 수 있다. 큰 차이를 보인 13:00 부근 시간대에 하루 중 직접단파복사량(direct beam shortwave radiation)이 가장 큰 시간대이지만, 태양 고도각이 높아 직접단파복사가 인체에 투영되는 면적이 가장 좁아지게 된다. 이러한 부분은  $MRT_{CNR4}$ 에서는 인체 투영면적계수를 통해 계산될 수 있지만,  $MRT_{BG\_ISO}$ 에서는 고려되지 않는다. 따라서  $MRT_{BG\_ISO}$ 에 있어 보다 정확성을 높이기 위해서는 태양 위치에 따른 직접단파복사의 인체투영면적에 대한 고려가 필요하다.

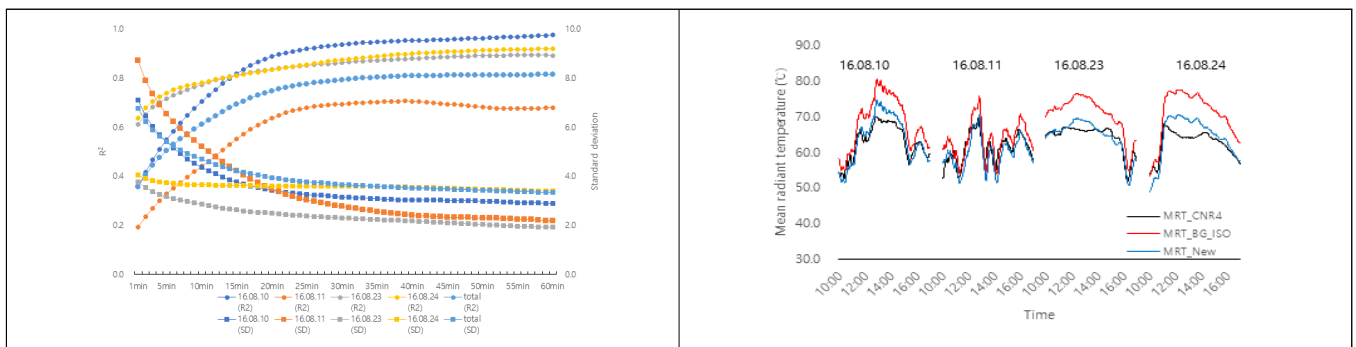


Figure 2.  $R^2$  and standard deviation by time average

Figure 3. Mean radiant temperature calculated from 30-minute averaged data

## 4. 결론

본 연구에서는 평균복사온도를 구하기 위해, 순복사계(CNR4 Net-radiometer)와 흑구온도계(지름 150mm)를 통한 평균복사온도 추정 방식을 비교하여 흑구온도계의 활용성과 정확성을 확인해 보았다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 흑구온도계를 활용하여 평균복사온도를 추정할 때 30분 측정자료를 평균하여 계산식에 적용하면 보다 안정된 데이터를 얻을 수 있다.

- 2) 기존 보정방식과 같이 계산식에서 풍속에 대한 계수를 현장에 맞게 조절하여 변경해줄 때 전체적인 차이의 평균값은 줄어들 수 있다.
- 3) 하지만 흑구온도계를 통한 평균복사온도 추정 방식에 있어 태양 고도각에 따른 직접단파복사의 인체투영면적에 대한 계산이 불가능하여 13:00 전후로 큰 차이가 발생하게 된다. 따라서 추정방식에 있어 이에 대한 보정이 필요한 것으로 보인다.

### 참고문헌

1. Coutts, A. M., E. C. White, N. J. Tapper, J. Beringer and S. J. Livesley(2015) Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology* 124: 55-68.
2. ISO 7726.(1998) Thermal environments: Instruments and methods for measuring physical quantities. International Standard Organization, Geneva.
3. Park, S.(2011) Human-Urban Radiation Exchange Simulation Model. PhD Dissertation, University of Victoria, Victoria, BC, Canada.
4. Park, S.(2012) Landscape planning and design methods with human thermal sensation. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 40(1): 1-11.
5. Thorsson, S., F. Lindberg, I. Eliasson and B. Holmer(2007) Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology* 27: 1983-1993.