Journal of KIAEBS Vol.14, No.1, February pp. 10-18

RESEARCH ARTICLE

실내 표면온도 측정 방법에 따른 평균복사온도 도출

이동석[1] · 지경환[1] · 조재훈[2*]

[1]인하대학교 대학원 건축공학전공 박사과정, [2]인하대학교 건축학부 건축공학전공 교수

Deriving Mean Radiant Temperatures According to the Methods of Measuring Indoor Surface Temperature

Lee, Dong-Seok[1] · Ji, Kyung-Hwan[1] · Jo, Jae-Hun[2*]

[1]Ph.D student, Department of Architectural Engineering, Graduate School of Inha University, Incheon, Korea
[2]Professor, Department of Architectural Engineering, Inha University, Incheon, Korea

***Corresponding author:** Jo, Jae-Hun, Tel: +82-32-860-7582, E-mail: jhjo@inha.ac.kr

ABSTRACT

Among the physical variables regarding thermal conditions and heat stress, the determination of mean radiant temperature is a classic problem in the thermal environmental field. This study deals with the methods of calculating mean radiant temperature using surface temperatures and angle factors. Two measurement methods using contact thermometer (CT method) and infrared thermographic camera (IR method) have been applied for measuring indoor surface temperatures. The measurement has shown that the difference in surface temperature of the blinds measured by two methods have increased with a high difference of about 5°C. The result of the study reports that it is indecated that the method using a infrared thermographic camera is suitable in order to accurately derive the mean radiant temperature.

주요어 : 평균복사온도, 표면온도, 접촉식 온도계, 열화상 카메라

Keywords: Mean radiant temperature, Surface temperature, Contact thermometer, IR camera

OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2020 February, 14(1): 10-18
https://doi.org/10.22696/jkiaebs.20200002

pISSN : 1976-6483
eISSN : 2586-0666

Received: December 7, 2019
Revised: December 30, 2019
Accepted: January 19, 2020

© 2020 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

재실자의 실내환경을 쾌적하게 유지하기 위해서는 다양한 온열환경 인자를 고려한 종합적인 온열감의 평가가 중요하다. 이 중 주변의 온도와 재실자의 위치에 따라 달라지는 평균복사온도(mean radiant temperature, MRT)는 표준에서 제시된 다양한 방법으로 측정 또는 계산될 수 있다. 평균복사온도는 물리적 인자 중에서 측정 방법 및 사용장비가 가장 다양하며, 현장에서의 적용이 가장 어려운 인자들 중 하나로 여겨진다(Walikewitz et al., 2015).

국제표준인 ISO 7726 (1998)은 평균복사온도를 포함한 다양한 물리적 인자를 측정하기 위한 장비와 측정 방법에 대하여 다룬다. 이에 평균복사온도를 다루는 실내 온열환경의 현장 측정에 관한 다양한 연구에서는 이 규준을 따르고 있다(d'Ambrosio Alfano et al., 2013;

Ruiz et al., 2016; Zampetti et al., 2018, Lee et al., 2019a). 선행 연구에서는 흑구온도 측정법, 표면온도 측정법 등 표준에서 제시된 다양한 측정 방법을 적용하여 평균복사온도를 도출하였다. ISO 7726의 Annex F에서는 표면온도의 측정을 위한 장비로 접촉식 온도센서(contact thermometer, CT)와 적외선 열화상 측정장치(infrared thermographic camera, IR camera)을 제시한다. Annex F에 따른 방법은 표면온도의 측정값과 형상계수(angle factor)의 계산값만을 이용하여 평균복사온도를 도출한다. 각각의 재실자 위치별로 형상계수는 표면마다 고정된 상수값을 가진다. 그러므로 정확한 평균복사온도를 도출하기 위해서는 현장에서의 정확한 표면온도 측정이 중요하다.

본 연구는 평균복사온도 측정 방법 중, 접촉식 온도센서 및 열화상 카메라를 이용한 측정 방법에 대해 논의한다. 이를 위해, 동일한 실내 공간에서 두 가지 측정 방법에 따라 표면온도를 측정 하였으며, 표면온도를 도출하기 위한 과정에서 발생될 수 있는 접촉식 온도센서의 한계점을 분석하였다.

실험 개요

표면온도 측정을 통한 평균복사온도 도출 방법

실내 표면온도는 접촉식 온도센서를 이용한 방법(CT method)과 적외선 열화상 측정 장비를 이용한 방법(IR method)으로 측정 가능하다(Figure 1). CT method는 대상 표면에 직접 센서를 접촉시켜 표면으로부터의 열전도 온도를 측정하는 방법으로 측정 과정이 단순하다. 그러나 전체 표면 영역 내 한 개 또는 몇 개의 지점에서 측정된 온도 평균값을 전체 표면의 온도로 가정하기 때문에(Ruiz et al., 2016), 표면내 불균일 온도 분포가 발생할 경우 정확한 표면온도 측정이 어려울 수 있다. IR method는 비접촉식 방법으로 넓은 면적의 온도분포를 빠르게 측정하는데 용이한 강점을 갖는다(Vollmer and Möllmann, 2010). 그러나 별도로 대상 재료의 방사율 및 반사온도 측정 과정이 필요하며 방사, 반사, 대기 보상의 보정 과정을 통해 정확한 표면온도 측정이 가능하다.

Figure 1. Two different methods for measuring indoor surface temperature

재실자가 실내 공간에 위치할 때, 인체의 표면은 이를 둘러싸고 있는 주변의 표면과 복사열 교환을 한다. 이때, 평균복사온도(mean radiant temperature, MRT)는 재실자가 위치한 지점에 대하여 주변의 표면에서 방사되는 열량과 동일한 열량을 방사하는 흑체의 표면 온도로 정의된다. 재실자의 위치로부터 주변의 표면을 향한 형상계수(angle factor)는 해당 표면이 인체에 전달하는 복사에너지량을 결정한다. 따라서 시간 t에 따른 지점 p에서의 평균복사온도는

표면온도($T_{j,t}$ [K])와 형상계수($F_{p\text{-}j}$)에 따라 다음의 식 (1)을 이용하여 계산 될 수 있다. 여기서, 지점(p)와 표면(j) 사이의 형상계수($F_{p\text{-}j}$)는 시간과 관계 없이 일정한 값을 가지며, 전체 표면을 향한 형상계수의 합은 언제나 1이 된다.

$$\overline{t_{r,t}} = \left\{ \sum_{j=1}^{n} \left(T_{j,t}^{4} F_{p-j} \right) \right\}^{1/4} - 273.15 \tag{1}$$

측정 대상 공간 및 방법

평균복사온도 도출을 위한 대상 공간은 인천에 위치한 대학 강의실로 선정하였다. 공간의 형태는 동쪽 및 서쪽 방향으로 긴 장방형이며, 남쪽에 3개의 창문 및 실내 블라인드가 설치되어 있다(Figure 2). 동쪽 및 서쪽으로 사무실이 위치해 있으며, 북쪽으로는 복도가 위치한다. 실험은 2019년 11월 3일 오전 3시부터 오후 20시까지 측정하였다. 측정 환경은 다른 요인으로 인한 실내 환경 변화를 최소화 하기 위하여, 냉난방기를 가동하지 않았으며 실내 블라인드는 닫힌상태를 유지하였다. 평균복사온도 측정 대상 지점은 공간 내 활동범위를 고려하여 남쪽 및 북쪽의 벽면으로부터 안쪽으로 1 m 이격된 지점과 중앙 지점을 선정하였다.

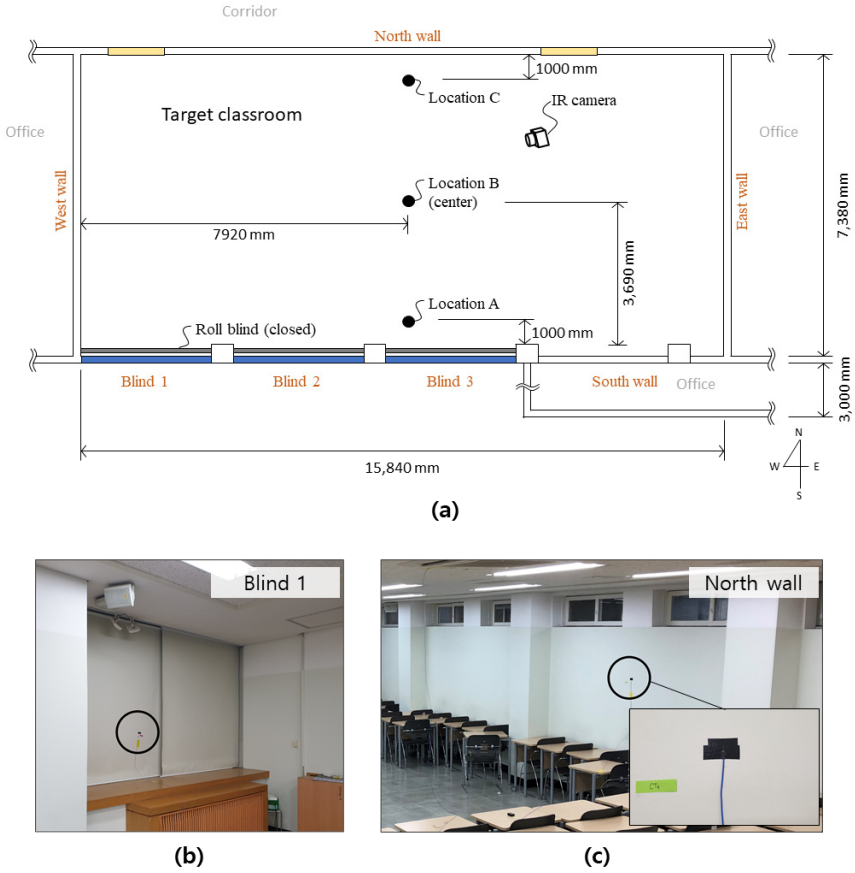

Figure 2. Plan of the experimental set. (a) shows plan of the target classroom with measurement locations A-C. (b) and (c) shows examples of installation spots for CT method

CT method는 접촉식 온도센서와 표면 사이의 열 교환이 센서와 주변 환경 사이의 열 교환보다 상당히 높을 때 정확한 측정이 가능하다. 이를 위해 센서와 접촉된 표면 사이에 큰 압력을 유도하여 밀착시키고, 센서와 주변 환경은 최대한 절연(단절) 되도록 설치하였다. IR method는 적외선 열화상 카메라는 물체의 표면 온도에 따라 방출 적외선이 변하는 원리를 이용하는 방법으로, 본질적으로 열화상 카메라는 온도가 아닌 방사 에너지(radiation power)를 측정하여 물체의 표면온도로 변환한다. 그러므로 방사, 반사, 대기 보상의 과정이 필요하며, 특히 방사율과 반사온도의 정확한 측정이 매우 중요하다. 방사율의 측정은 검정색 테이프(방사율 = 0.95)를 이용하여 측정하였으며, 실내 모든 표면의 방사율은 0.95로 동일하게 측정되었다. 반사온도는 측정 대상 표면을 제외한 모든 표면을 방사율을 1, 거리를 0으로 설정하여 측정한 평균값으로 설정하였다(Lee et al., 2019a).

접촉식 온도센서는 창문의 블라인드와 실내 벽체 표면에 각각 설치하였다. 블라인드의 경우, 창틀 모서리를 피해 창의 중앙부에 센서를 위치시켰다. 열화상 카메라는 표면을 바라보는 각도가 대부분의 표면에서 40° 이내의 예각이 발생하지 않도록 중앙부에 설치하였다. 측정 간격은 6분 간격으로 설정하였다. 이상의 설치 환경과 측정 설정에 따른 실내 표면온도 측정은 Table 1에 제시된 장비를 사용하였다.

Table 1. Specification of thermal environment measurement divices

Method	Measuring devices	Specifications		
CT method		Operating temperatures		0℃ to +50℃
		K type thermocouples Accuracy		-200℃ to +1372℃ ±1℃ (>−100℃) ±2℃ (<−100℃)
IR method		IR camera (FLIR A310)	Meas. range	-20℃ to +30℃
			Accuracy	±2%
			Field of view	45° * 33.8°
			Emissivity range	0.01 to 1.00
			IR resolution	321 * 240 pixels
		Thermometer (THD-W1-T)	Meas. range	-19.9℃ to +60℃
			Accuracy	±1℃
		Hygrometer (THD-W1-T)	Meas. range	0% to 99.9%
			Accuracy	±2%

실험 결과

대상 강의실의 실내 표면은 총 9개의 표면으로, 천정과 바닥, 동, 서, 남, 북의 실내벽면, 그리고 3개의 남향 블라인드 표면으로 구분하였다. 구분된 각 표면에대하여 CT 및 IR method를 적용하여 표면온도를 측정하였다. 열화상 카메라는 IR scanning method를 적용하여, 정해진 시간 간격마다 동일한 표면에 대한 반복적인 표면온도 측정이 가능하도록 하였다

(Lee et al., 2019b). IR scanning system은 벽면, 천정, 바닥 등 넓은 면에 대하여 다수의 촬영 데이터를 연결하는 방식으로 평균온도 측정이 가능하다(See Figure 3).

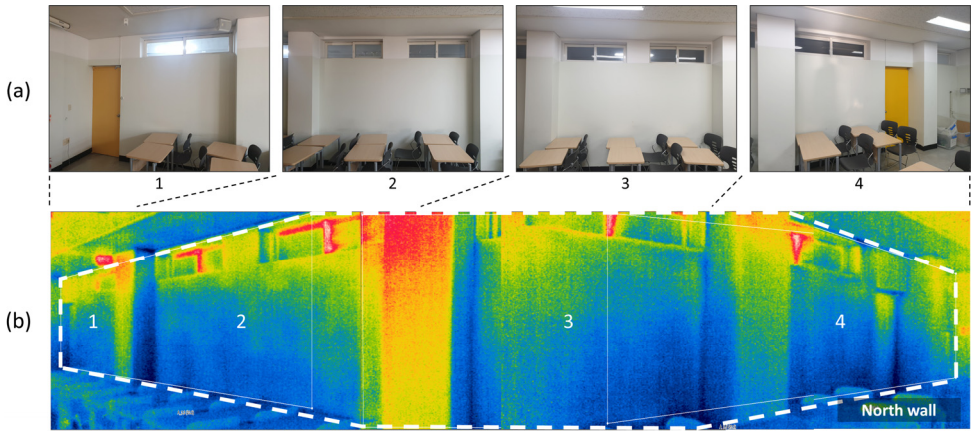

Figure 3. Example of the measuring average surface temperature: The sub-areas of the whole northern surface (a) and the measured average surface temperature (b). The average temperature of the large sized surface has been measured by combining several infrared thermal images

측정 결과 북쪽 벽면을 포함한 벽체의 표면온도는 두 가지 측정 방법에서 비슷한 수준을 가지는 것으로 나타났다(See Figure 4, right). 그러나 블라인드의 경우 CT method의 표면온도 측정 값이 IR method 보다 오후 시간대에 더 높은 값을 가지는 것으로 나타났다(See Figure 4, left). 그래프의 t는 두 방법의 표면온도 측정 값이 유사한 시점(12시 24분)을 나타낸다.

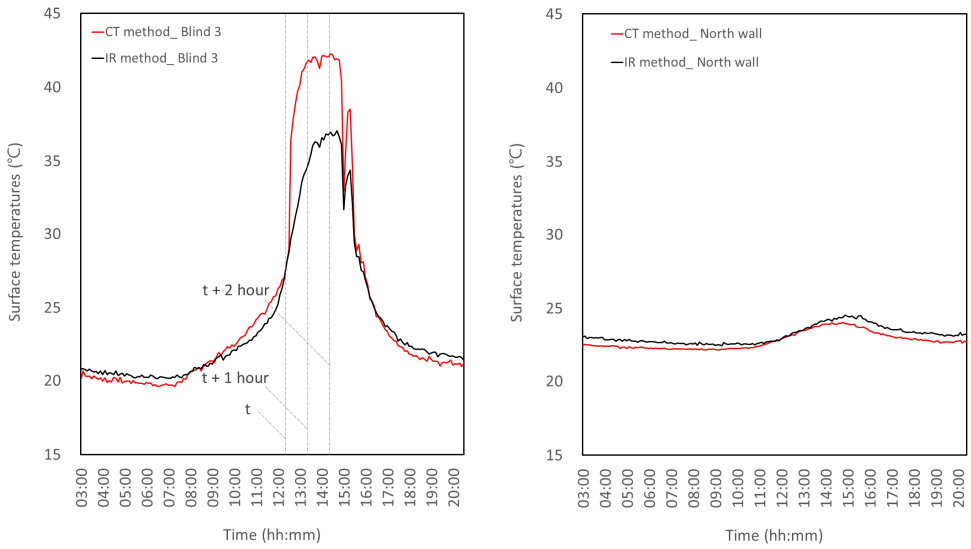

Figure 4. Measured surface temperatures from CT and IR methods

두 방법의 표면온도 측정값이 유사한 시점인 12시 24분(t)을 기준으로 한 시간 단위별로 측정된 열화상 데이터를 분석하였다. Figure 5는 IR method를 통해 측정된 Blind 3의 열화상 이미지 및 측정 영역내 데이터를 기준으로 한 히스토그램을 나타낸다. CT method를 통해 측정

된 표면온도는 열화상 이미지 안에 측정 위치 및 표면온도 값을 표시하였다. 열화상 이미지는 블라인드 표면에 불균일한 온도 분포를 나타내었다. 시간이 지남에 따라 창에 드리워 지는 일사의 입사면적이 달라지면서, 전체 평균 표면온도와 지점에서 측정한 온도와의 차이가 발생됨을 알 수 있었다. 또한, 프레임에 의해 그늘진 부분도 주변과의 온도차이를 발생시켜 전체 표면의 평균온도가 낮아짐을 알 수 있었다. 온도의 불균일한 분포를 보다 객관적으로 검토하기 위하여, 측정 영역의 데이터를 히스토그램으로 나타내었다(See Figure 5, right). 각 시간대별 측정데이터의 수는 39,564개의 표본수를 가지며, 계급의 크기는 2℃로 설정하였다. 20℃부터 46℃까지 계급을 나누어 각 측정 데이터를 분석하였다. 분석 결과 CT method를 통해 측정된 표면온도 값은 전체 시간대에서 가장 많은 빈도수를 가지고 있는 계급 값과 동일한 위상에 위치함을 확인할 수 있었다(즉, t = 28~29℃, t + 1 hour = 42~44℃, t + 2 hour = 42~4

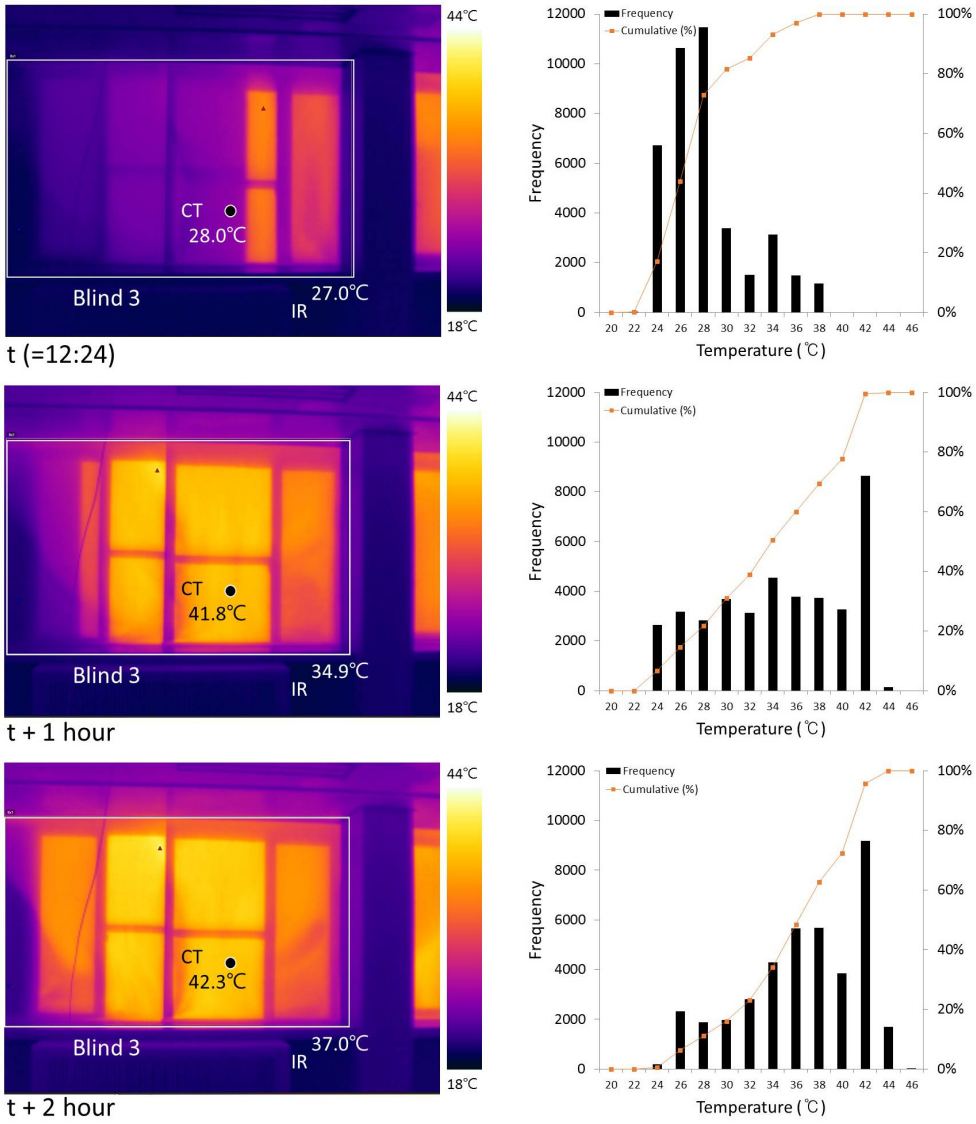

Figure 5. Hourly surface temperatures and histograms

4℃). 그러나 온도범위의 분포를 보면, t 시간의 경우 24~28℃ 사이의 온도분포가 전체 빈도의 72%를 점유하고 있는 반면, 그 외의 경우에는 전체적으로 온도분포가 크지 않은 빈도수 차이를 보였다. 즉, 시간이 지남에 따라 전체 계급 범위의 빈도수가 유사해지기 때문에 CT method의 지점 온도 값이 전체 표면의 평균온도 값과 멀어지는 결과가 나타났다.

Table 2 및 Figure 6는 평균복사온도 도출을 위하여 3개 지점에 대한 형상계수를 계산한 결과 및 CT 및 IR method에 따른 평균복사온도 값을 나타낸다. 재실자는 서있는 상태를 가정하여 인체 중심부의 위치를 바닥으로부터 높이 1m로 설정하였으며, 형상계수의 계산은 Eriksson (1990)이 제시한 입체각(solid angle) 계산방법을 적용하였다(See Table 2). 평균복사온도의 도출 결과, 블라인드에 가까울 수 록 낮 동안에 두드러진 온도 증가를 보였다. 결과적으로 CT 및 IR method에 따른 표면온도 값의 차이는 3개 지점에서의 평균복사온도 값에 큰 영향을 미치진 않았다. 그러나 블라인드에 가까운 A 지점에서는 온도 증가 구간에서 두 방법에 따른 평균복사온도 값에 차이가 발생됨을 알수 있었다. 지점 A에서 전체 블라인드 면의 형상계수 값이 0.15 미만이라는 것을 고려하였을 때, 커튼월 등의 넓은 창이 있는 공간에서는 더 큰 차이가 발생될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2. Calculated angle factors at the target locations

Indoor surfaces	Location A	Location B	Location C
Wall East	0.021	0.024	0.020
Wall West	0.020	0.022	0.020
Wall North	0.052	0.099	0.286
Wall South	0.142	0.057	0.031
Ceiling	0.278	0.345	0.278
Floor	0.343	0.407	0.343
Blind 1	0.002	0.004	0.004
Blind 2	0.022	0.016	0.008
Blind 3	0.120	0.026	0.010

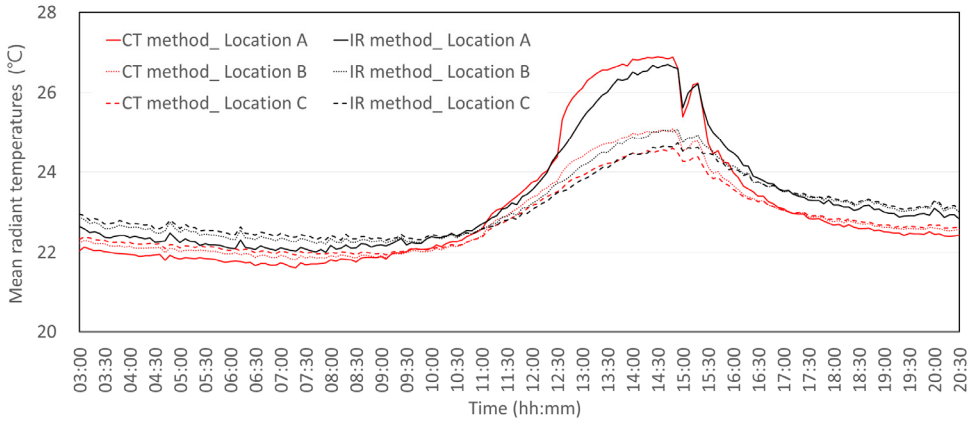

Figure 6. MRT values derived by CT and IR methods

결 론

본 연구에서는 평균복사온도의 측정 방법 중, 표면온도와 형상계수를 이용한 재실자 위치별 평균복사온도의 측정 방법에 관하여 다루었다. ISO 7726에 제시된 표면온도 측정 장비(접촉식 온도센서, 열화상 카메라)를 이용하여, 남향의 실내 공간을 대상으로 실내 표면온도 및 평균복사온도를 도출하였다. 실험 결과, 평균복사온도는 두 가지 방법에서 큰 차이를 보이지는 않았으나, 블라인드의 표면온도는 12시 이후부터 점차 측정 값에 차이가 나타나 2시간동안 약 5℃의 높은 온도차를 유지하는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 접촉식 온도센서는 측정값의 오차를 최소화하기 위한 방법을 준수하였음에도 불구하고 불균일 온도분포를 갖는 블라인드면에서의 평균 표면온도의 측정에는 한계를 보였다. 이로 인하여, 블라인드 면의 복사온도 영향을 가장 크게 받는 지점 A에서는 CT 및 IR method에 따른 표면온도 차에 따라 평균복사온도 값이 다르게 나타났다.

본 연구의 결과를 종합하여 볼 때, 실내 표면이 외기에 면한부분이 넓고 표면 내 불균일한 온도분포가 예측되는 공간에서는 정확한 표면온도의 측정을 위해 열화상 카메라를 이용한 측정방법이 더 적합할 수 있다. 대형 아트리움, 경기장, 음악당 등과 같이 단일 실 공간이 크고 외피에 면한 면적이 큰 건물에서의 실내 평균복사온도를 도출하기 위해서는, 넓은 표면의 평균온도를 도출하는 방법으로 열화상 카메라를 이용한 방법이 효과적일 것으로 판단된다. 향후 지속적인 연구를 통하여, 다양한 용도의 실내 공간과 냉난방 조건, 일사 조건 등에서의 열화상 측정방법의 적용성 검토가 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(20AUDP-B100343-06)에 의해 수행되었습니다.

References

1. d'Ambrosio Alfano, F.R., Dell'Isola, M., Palella, B.I., Riccio, G., Russi, A. (2013). On the measurement of the mean radiant temperature and its influence on the indoor thermal environment assessment. Building and Environment, 63, 79-88.
2. Eriksson, F. (1990). On the Measure of Solid Angles. Math. Assoc. Am., 63, 184-187.
3. Lee, D.S., Kim, E.J., Cho, Y.H., Kang, J.W., Jo, J.H. (2019a). A field study on application of infrared thermography for estimating mean radiant temperatures in large stadiums. Energy and Buildings, 202, 109360.
4. Ruiz, P.A., Salmerón, J.M., Ruiz, Á., Flor, F.J.S. de la, Brotas, L. (2016). The globe thermometer in comfort and environmental studies in buildings. Rev. la construcción, 15, 57-66.

5. Walikewitz, N., Jänicke, B., Langner, M., Meier, F., Endlicher, W. (2015). The difference between the mean radiant temperature and the air temperature within indoor environments: A case study during summer conditions. Building and Environment, 84, 151-161.
6. Zampetti, L., Arnesano, M., Revel, G.M. (2018). Experimental testing of a system for the energy-efficient sub-zonal heating management in indoor environments based on PMV. Energy and Buildings, 166, 229-238.
7. Lee, D.S., Ji, K.H., Jo, J.H. (2019b). Development of Real-time Infrared Measurement Device for estimating Indoor Thermal Environment at Occupant Locations. KIAEBS conference, 14-16 Nov. 2019., Seoul, South Korea.
8. Vollmer, M., Möllmann, K.-P. (2010). Infrared Thermal Imaging: Fundamentals-Research and Applications, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, Germany.
9. ISO 7726. (1998). ISO 7726: Ergonomics of the thermal environment -Instruments for measuring physical quantities.