



RESEARCH ARTICLE

# 열화상 현장 측정 방법에 따른 벽체 열관류율 계산 결과 비교 분석

김창민<sup>1</sup> · 장향인<sup>1</sup> · 최재솔<sup>2</sup> · 김의중<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>(주)미래환경플랜건축사사무소 건축친환경신기술연구소, <sup>2</sup>인하대학교 건축학부 대학원, <sup>3</sup>인하대학교 건축학부

## Comparisons of Wall U-values according to Existing Measurement Methods for Thermography Field Tests

Kim, Chang-Min<sup>1</sup> · Jang, Hyang-In<sup>1</sup> · Choi, Jae-Sol<sup>2</sup> · Kim, Eui-Jong<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Green Building and New Technology, Mirae Environment Plan, Seoul, Korea  
<sup>2</sup>Graduate school, Department of Architecture, Inha University, Incheon, Korea  
<sup>3</sup>Department of Architecture, Inha University, Incheon, Korea

\*Corresponding author: Kim, Eui-Jong, Tel: +82-32-860-7589-, E-mail: ejkim@inha.ac.kr

### ABSTRACT

Field measurement is necessary for evaluating the insulation performance of existing buildings. As taking the advantage of an infrared imaging system, which is simple and can measure multiple spaces, the wall U-value calculation methods using thermal imaging are suggested in other countries for its accuracy. There are few studies using thermal imaging in Korea and the comparison on exiting methods for calculating the U-value has also barely been attempted. Consequently, no discussion has been made so far to improve the calculation method of U-value using an infrared imaging system. In this respect, this study compares the U-value of walls that are calculated according to the standards and methods for field measurement. For this, the U-value of external walls of an actual building was calculated by applying three methods: (i) heat flow meter, (ii) thermal imaging according to KS F 2829: 2005, and (iii) thermal imaging according to literature. The results showed that the heat flow meter measurement method and the existing thermal imaging method in literature had an error of 8% while that of KS F 2829 was over 100%. The main reason of such a deviation with KS F 2829 is seemingly due to inaccurate calibration coefficients for the field conditions and the surface heat transfer coefficient fixed in the standard.

**주요어 :** 적외선 열화상, 열관류율, 단열성능, 현장 측정, 건물 외피

**Keywords:** Infrared thermography, U-value, Thermal performance, Field measurement, Building envelope

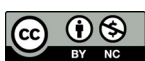
### OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2019 October, 13(5): 384-393  
<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20190033>

pISSN : 1976-6483  
eISSN : 2586-0666

**Received:** September 29, 2019  
**Revised:** October 25, 2019  
**Accepted:** October 28, 2019

© 2019 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.

### 서론

기존 건물의 에너지 효율 향상을 위해서 건물 단열 성능의 정량적 평가는 중요한 작업 중 하나이다. 이는 건물의 단열 성능이 에너지 성능 향상을 위한 리모델링의 기초 자료로 활용되기 때문이다(Kim et al., 2014; Dall'O et al., 2013). 단열 성능을 나타내는 정량적 지표 중 대표적인 지표는 열관류율이며(Nardi et al., 2014), 국내에서는 이론상의 열관류율을 건축물의

에너지절약설계기준에 따라 계산할 수 있다. 그러나 실제 열관류율은 현장시공 품질, 단열재의 경년변화, 구조적 결함에 따라 이론적인 계산 값과 다를 수 있다(Choi et al., 2014; Yun and Song, 2013). 따라서 기존 건물의 실제 열관류율을 계산하기 위해서는 현장 측정을 통한 단열 성능 평가가 필요하다.

열관류율 계산을 위한 대표적인 현장 측정방법은 열류계 측정과 적외선 촬영에 의한 방법이다. 열류계 측정 방법은 실내와 실외의 온도와 벽체의 열류량을 측정하여 열관류율을 계산하는 방법으로, 국제규격인 ISO 9869 : 1994 (1994)가 존재한다. 적외선 촬영법은 적외선 열화상 카메라를 이용하여 획득한 표면 온도로 열관류율을 계산하는 방법이며, 국내에는 적외선 촬영법에 의한 열관류율 계산 방법으로 KS F 2829 : 2005 (2005) 규격이 존재한다. 기존 연구에서는 정상상태가 유지될 경우 적외선 촬영에 의한 방법보다 열류계 측정 방법이 높은 정확도를 보여주는 것으로 보고되었다(Moon et al., 2017; Choi and Ko, 2017; Kim et al., 2014). 그러나 측정이 간편하고, 다수의 공간을 측정할 수 있는 적외선 촬영법의 장점으로 인해 국외에서는 일정 수준 이상의 정확성도 확보할 수 있는 열화상을 활용한 열관류율 계산 방법이 제안되고 있다(Dall'O et al., 2013; Fokaides and Kalogirou, 2011; Albatici and Tonelli, 2010). 아직 국내에는 열화상을 이용한 연구 자체가 적을 뿐만 아니라, 기준과 방법에 따른 열관류율 결과에 대한 비교가 이루어지지 않았다. 이에 따라 적외선 촬영법을 이용한 열관류율 계산 방법에 대한 개선 논의가 이루어지지 못한 실정이다.

이에 본 연구에서는 현장 측정을 위한 기준과 방법에 따라 계산한 벽체의 열관류율을 비교하고자 한다. 이를 위해 열류계 측정 방법, KS F 2829 : 2005 규격에 따른 열화상 측정 방법, 국외에서 제안된 열화상 측정 방법을 적용하여 열관류율을 계산하고, 계산 결과를 비교 분석하여 향후 열화상 기반 방법론의 개발 및 기존 기준의 개선을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

## 문헌연구

국내에서도 적외선 촬영법을 통한 열관류율 계산과 관련한 연구는 일부 수행되었다. 특히 기존에 제안된 방법으로 기존 건물의 외벽에 대한 열관류율을 계산하고, 계산 결과의 오차를 확인한 연구가 중점적으로 수행되었다. 그러나 기존 방법의 한계를 검증하고, 신규 계산 방법을 제안하는 연구는 아직 미흡한 실정이다.

Kim et al. (2014)은 KS F 2829 : 2005 규격에 따라 열관류율을 계산하였다. 모듈하우스를 대상으로 실험하였으며, 열관류율 계산 결과를 남부지역 열관류율 기준과 비교하였다. 실험 결과, 실내외 온도차 10°C 이상, 외부풍속 3 m/s를 만족시킨 경우에 오차율이 0.5% 미만으로 나타났다.

Moon et al. (2017)은 노후주택의 리트로핏을 위한 목적으로 ISO 9869에 따른 열류계 측정 방법과 KS F 2829 : 2005에 따른 적외선 촬영법으로 열관류율을 계산하였다. 실제 노후주택을 대상으로 평평한 부분과 돌출된 부분에 대해 측정한 결과를 비교하였다. 실험 결과, 평평한 부분에서는 열류계 측정 방법과 적외선 촬영법에 약 4%의 오차가 발생하였다. 또한, 평평한 부분과 돌출된 부분에서는 열류계 측정 방법 간에 약 17%의 오차가 발생하였다.

Choi and Ko (2017)는 국외 연구자들이 제안한 열화상을 이용한 세 가지 방법을 적용하여 열관류율을 계산하였다. 세 가지 케이스를 대상으로 각각의 방법을 적용하였으며, 열류계 측정 방법과 계산 결과를 비교하였다. Albaciti and Tonelli (2010)에서 제안한 식은 15% 오차를 나타냈으며, Fokaides and Kalougirus (2011) 그리고 Vollmer and Möllman (2010)에서 제안한 식은 평균 27.9%의 오차를 나타냈다.

이처럼 기존 국내 연구에서는 KS 규격 또는 국외에서 제안된 방법을 적용하여 열관류율을 계산하는 연구가 주로 수행되었다. 현재 KS 2829 : 2005는 비교적 적은 항목으로 계산 가능한 수식과 함께 보정표와 환산표를 제공하여 열관류율을 계산하도록 한다. 이러한 방법의 경우에는 열관류율 계산에 영향을 미치는 측정 환경을 충분히 반영하지 못할 가능성이 있다. 그러나 KS 규격을 포함한 다른 연구들에서 제안된 열관류율 계산 방법과의 포괄적인 비교가 수행되지 않아 KS 규격의 개선 방안에 대한 논의가 이루어지지 못하고 있다.

## 적외선 촬영법을 통한 열관류율 계산 방법

### KS F 2829 : 2005 적외선 촬영법에 의한 건축물 단열 성능 평가 방법

KS F 2829 : 2005에서는 내표면 온도차 비율(Temperature Difference Ratio inside, TDRi)와 외표면 온도차 비율(Temperature Difference Ratio outside, TDRo)에 의한 단열 성능 평가 방법을 제시하고 있다. TDRi는 다음 수식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$TDRi = \frac{T_i - T_{is}}{T_i - T_o} \quad (1)$$

여기서  $T_i$ 는 실내 온도(°C),  $T_o$ 는 외기 온도(°C),  $T_{is}$ 는 벽체의 실내표면온도(°C)이다. TDRi 계산 시, 외기 온도  $T_o$ 는 측정 시점 이전 72시간 평균값을 적용한다. TDRi 계산 후에는 부속서 C의 내표면 온도차 비율의 열관류율 환산 그래프를 참조하여 TDRi를 열관류율로 환산한다.

TDRo는 다음 수식 (2)와 같이 계산할 수 있다. TDRo를 계산하는 외기 풍속은 2 m/s를 기준으로 하며, 풍속이 2 m/s가 아닌 경우에는 부속서 B 외기 기류 속도 변화에 따른 외표면 온도차 비율 보정표를 참고하여 TDRo를 보정한다. 이후 부속서 C의 외표면 온도차 비율의 열관류율 환산 그래프를 참조하여 보정된 TDRo를 열관류율로 환산한다.

$$TDRo = \frac{T_o - T_{os}}{T_i - T_o} \quad (2)$$

여기서  $T_i$ 는 실내 온도(°C),  $T_o$ 는 외기 온도(°C),  $T_{os}$ 는 벽체의 실외표면온도(°C)이다. TDRo 계산 시, 외기 온도  $T_o$ 는 일출 직전 측정된 온도를 적용한다.

외표면 온도차 비율을 적용하여 열관류율을 계산하기 위한 열화상 촬영 방법은 다음과 같다. 열화상 촬영은 최소한 일몰 후 8시간 이후에 촬영되어야 한다. 또한, 열화상 측정 당시 외기 풍속은 3 m/s 이하여야 한다. 그리고 실내 온도와 과거 3일간 실외의 일평균 온도차가 10°C 이상인 날에만 측정해야 하며, 표면 온도의 정밀도가 실제 표면 온도와 0.3°C 이내일 경우에만 정량적 활용이 가능하다.

### 결과 비교를 위한 열관류율 계산 방법

본 연구에서는 KS F 2829 : 2005에 제시된 열관류율 계산 방법과 비교를 위해 국외 연구진에 의해 제안된 방법 중 Albatici and Tonelli (2010)에서 제안된 방법을 사용한다. 해당 연구에서 제안된 방법은 Nardi et al. (2014)과 Choi and Ko (2017)에서 사용되어 정확성이 검증되었다. 특히 Choi and Ko (2017)에서의 결과에 따르면 국외에서 제안된 세 가지 계산 방법 중 해당 방법의 오차가 가장 낮은 것으로 보고되었다. Albatici and Tonelli (2010)에서 제안한 적외선 열화상을 이용한 열관류율 계산 식은 다음 식 (3)과 같다. 식 (1)과 (2) 모두 정상상태 열전달 상황을 가정하고 있으나 식 (3)의 경우 벽체 방사율( $\epsilon$ )에 따른 외부 복사 열전달을 명시적으로 표현함과 동시에 표면열전달계수의 가변성을 내포하고 있다.

$$U = \frac{5.67\epsilon((T_w/100)^4 - (T_{out}/100)^4) + 3.8504v(T_w - T_{out})}{T_{in} - T_{out}} \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon$ 는 방사율,  $T_{in}$ 은 실내 온도(K),  $T_{out}$ 은 외기 온도(K),  $T_w$ 는 벽체의 실외표면온도(K),  $v$ 는 풍속(m/s)이다.

수식 (3)을 적용하여 열관류율을 계산하기 위한 열화상 촬영 방법은 다음과 같다. 직달 태양 복사를 피하기 위해 저녁에 수행되어야 하며, 열화상 촬영에 가장 좋은 시간대는 실내와 실외의 온도차가 최대가 되는 새벽 3시 또는 4시이다. 또한, 열화상 촬영 시 외기 풍속은 반드시 1 m/s 이하여야 한다. 열화상 측정 전 최소 48시간은 난방을 하여 실내 온도를 20°C로 안정화하며, 실내와 실외의 온도차는 10~15°C를 유지해야 한다. 그리고 본 방법론을 적용하기 위한 열화상 촬영은 반드시 겨울에 수행되어야 한다.

## 열관류율 계산을 위한 현장실험

### 측정 대상

본 연구에서의 측정 대상으로 서울시 노원구에 위치한 교육연구시설을 선정하였다. 대상은 Figure 1과 같으며, 창 하단의 벽을 대상으로 하였다. Figure 1(a)와 같이 열화상 측정 대상의 외부에는 캐노피가 존재하여 직달 일사와 풍속의 영향이 적어 안정적인 실험이 가능하였다. 또한, 재실자가 없는 공간에서 실험을 하여 실내 온도의 안정화가 용이하였다. 열화상 촬영을 위한 부위는 Figure 1(c)와 (d)와 같이 동일한 재료로 마감되어 균질한 온도 분포를 나타낼 수 있는 부위를 선정하였다.

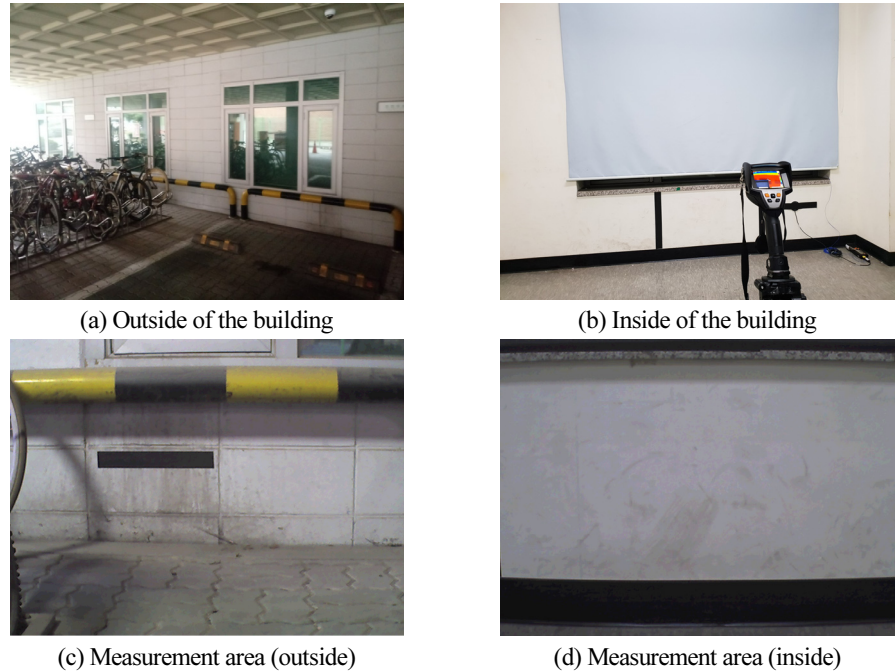


Figure 1. Case study

해당 건물은 2009년도에 준공되었으며, 도면을 기준으로 실험 대상 벽체는 시멘트 벽돌, 그라스울보온판, 석고보드로 구성되어 있다. 측정 대상의 설계 단열 성능은 Table 1과 같으며, 설계 도면 상의 열관류율은  $0.520 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 분석되었다.

Table 1. Designed thermal performance of the external wall

Layer	Thickness (m)	Conductivity (W/m·K)	Thermal resistance ( $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ )
External surface thermal resistance	-	-	0.043
Cement brick	0.190	0.600	0.317
Glass wool 24K	0.050	0.038	1.316
Plaster board	0.025	0.180	0.139
Internal surface thermal resistance	-	-	0.110
Total	0.265	-	1.924
U-value ( $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ )			0.520

### 측정 장치

현장 측정에 사용된 장비와 성능은 Table 2와 같다. KS F 2829 : 2005 규격에 따르면 적외선 열화상 계측 장치는 측정 대상의 표면 온도를  $0.3^\circ\text{C}$  이내 해상도로 재현할 수 있어야 한다. 본 연구에서 사용한 열화상 카메라는  $30^\circ\text{C}$ 에서 열 민감도  $0.05^\circ\text{C}$ 의 성능이기 때문에 기준에 적합한 것으로 판단된다. 또한, 외기풍속 측정을 위한 풍속계와 실내·외 온도 측정을 위한 온도계를 설치하였다. 그뿐만 아니라 촬영된 열화상 온도와 실제 벽면 온도와 차이가  $0.3^\circ\text{C}$  이내가 보장되어야 한다는 기준에 따라 접촉식 온도계로 열화상 온도와 차이를 기록하였다.

**Table 2.** Specification of Equipment

Equipment		Specification
Infrared camera (testo 882)	Measurement range	-20 ~ +550°C
	Accuracy	± 2°C or ± 2%
	Thermal sensitivity	0.05°C at 30°C
	Wavelength range	8 ~ 14 μm
	Emissivity Range	0.01 ~ 1.00
Heat flow meter (testo 435)	IR Resolution	320 × 240 pixels
	Data logger	
	Measurement range	-50 ~ +150°C
	Resolution	0.1°C
	Operation temperature	-20 ~ +50°C
Thermometer (KIMO KH 50)	Heat Flow Meter	
	Measurement range	-20 ~ +50°C
	Measurement range	-20 ~ +70°C
Thermometer (Center-300)	Resolution	0.1°C
	Accuracy	±0.5°C
	Measurement range	-200 ~ +1370°C
Anemometer (TES 1341)	Resolution	0.1°C
	Accuracy	±0.3°C
	Measurement range	0.1 m/s ~ 30.0 m/s
	Resolution	0.01 m/s
	Accuracy	±3%

### 열화상 측정

본 연구에서는 현장 측정을 위한 기준과 방법에 따라 계산한 벽체의 열관류율을 비교하기 위해 열류계와 열화상 측정을 동시에 수행하였다. 측정 당시 실내·외 온도는 각각 27.20°C, -0.10°C로, 20°C 이상의 온도 차이를 유지하였다(Table 3). 또한, 외기풍속 측정 결과 0 m/s로 KS F 2829 : 2005 규격의 3 m/s 이내를 만족하였다. 그뿐만 아니라 KS F 2829 : 2005 규격에서는 촬영된 열화상 온도와 실제 벽면 온도와의 차가 0.3°C 이내가 보장될 경우 정량적인 평가가 가능하다고 규정하였다. 이에 본 연구에서는 열화상 촬영과 함께 접촉식 온도계로 벽체 표면 온도를 측정하였다. 열화상 영역 내 평균 온도는 3.20°C, 접촉식 온도계는 3.50°C로 0.3°C 이내의 온도 차이 조건을 만족하였다.

**Table 3.** Experiment condition

Category	KS F 2829 : 2005	Albatici and Tonelli (2010)	Experiment condition
Experiment date	N/A	Winter	January 24, 2019
Experiment time	8 hours after sunset	Evening	06:30 ~ 08:00
Wind speed	Under 3 m/s	Under 1 m/s	0 m/s
Temperature difference	Over 10°C	10°C ~ 15°C	27.30°C
Indoor temperature	N/A	N/A	27.20°C
Outdoor temperature	N/A	N/A	-0.10°C
Surface temperature	Thermometer	-	3.50°C
	Infrared camera	-	3.20°C
Precipitation	N/A	N/A	-

다음 Figure 2와 3은 본 연구에서 측정 대상을 촬영한 열화상을 나타낸다. 열화상 내에서 균질한 온도 분포를 나타내는 영역의 온도를 사용하였으며, 열화상 내 검은색 사각형으로 표시된 영역이 본 연구에서 열관류율 계산을 위해 활용된 영역을 나타낸다.

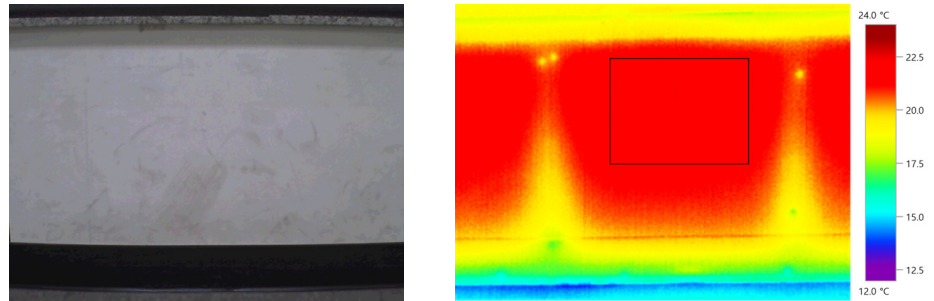


Figure 2. Infrared thermal image (Inside)

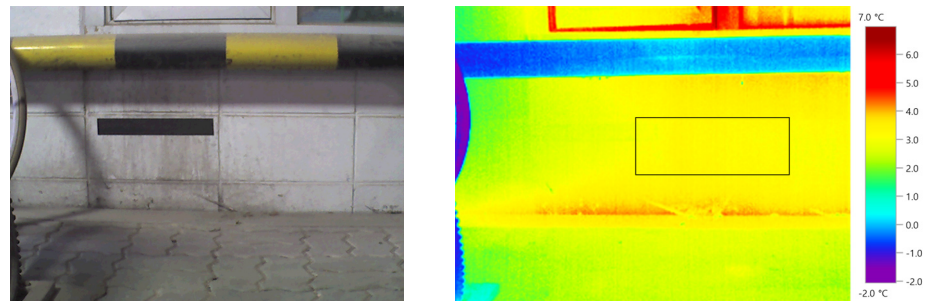


Figure 3. Infrared thermal image (Outside)

## 결과 및 토의

다음 Table 4는 외기 풍속과 온도를 기반으로 하는 국외 연구에서 제안된 적외선 촬영에 의한 방법, 국내 KS F 2829 : 2005 규격에 의한 방법, 그리고 열류계 측정 방법을 통해 계산된 열관류율을 비교한 결과를 나타낸다. 열류계 측정 방법을 적용하여 계산된 대상 부위의 열관류율은  $0.502 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 분석되었다. 본 실험에서  $\text{TDRi}$ 는 0.215로 계산되었으며, 이를 환산표를 통해 열관류율로 환산하면  $1.950 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 이다. 또한  $\text{TDRo}$ 는  $-0.121$ 로 계산되었으며, 기류 속도 보정을 위한 계수 1.7을 반영하고 이를 환산표를 통해 열관류율로 환산하면  $1.185 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 이다. 국외 연구에서 제안된 적외선 촬영에 의한 방법을 적용할 경우  $0.540 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 계산되었다.

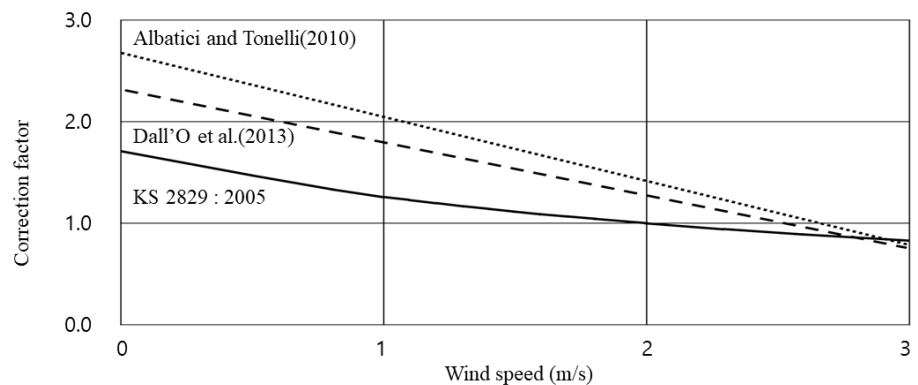
국외 연구에서 제안된 열관류율 계산 방법과 열류계 측정 방법과의 오차는 약 8% 정도이다. 그러나 KS F 2829: 2005 규격에 따른 열관류율 계산 결과는 열류계 측정 결과와 비교할 때 100% 이상으로 나타났다. 특히  $\text{TDRi}$ 의 경우 열관류율이  $1.950 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 으로 288%의 오차로 분석되어  $\text{TDRo}$ 로 계산한 결과보다도 더 높은 오차를 보이는 것으로 나타났다. 설계 도서 상 열관류율  $0.520 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 과 비교하여도 열류계 계산 결과와 기존 문헌의 방법은 5% 이내로 분석되지만, KS F 2829: 2005 기준은 100% 이상의 오차로 분석된다. 측정 환경이 외기

풍속도 작을 뿐만 아니라 측정 대상에 증공층도 포함되어 있지 않아 열류계 계산 결과와 설계 도면 상의 열관류율이 일치하는 경향을 보임에도 불구하고, KS F 2829 : 2005 규격에 따른 열관류율 계산 결과는 큰 오차를 나타냈다.

**Table 4.** Comparison results by U-value calculation method

Method	U-value (W/m <sup>2</sup> K)	Percentage deviation (%)
Heat Flow Meter	0.502	-
KS F 2829 : 2005	TDRi	288
	TDRo	136
Albatici and Tonelli (2010)	0.540	8

KS 2829 : 2005의 기준이 가장 높은 오차를 나타내는 원인은 측정 환경을 반영하지 않는 계수로 인한 오차로 판단된다. 우선 첫 번째로 외기 풍속의 반영하기 위한 계수이다. KS 2829 : 2005 기준에서는 보정표 목록을 통해 보정계수를 반영한다. 반면에, Albatici and Tonelli (2010)에서는 건물 근처에서 발생하는 외기 풍속에 관한 이론을 바탕으로 산출식을 제시하였다. 다음 Figure 4는 각 방법에 따른 외기 풍속과 열관류율 간의 관계를 나타낸다. KS 2829 : 2005에서는 외기 풍속이 2 m/s인 경우를 1로 정의하고 풍속에 따른 계수를 제시한다. 이와 동일한 방법으로 본 연구의 측정 대상에 한정하여, Albatici and Tonelli (2010)의 방법을 적용할 경우 풍속에 따른 열관류율 변화를 계수로 도출하였다. KS 2829 : 2005의 경우 외기 풍속이 0 m/s인 경우에 약 1.7로 보정한다. 그러나 본 연구에서 도출한 결과로는 약 2.7로 보정해야 한다. 본 연구에서 도출한 외기 풍속에 따른 보정 계수를 KS 2829 : 2005에 적용할 경우 기존 1.185 W/m<sup>2</sup>K에서 0.746 W/m<sup>2</sup>K로 열류계 측정 결과와의 오차가 감소 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 KS 2829 : 2005에서 제시하는 보정 계수가 외기 풍속에 따른 열관류율의 변화를 충분히 반영하지 못함을 의미한다. Dall'O et al. (2013)에서도 외기 풍속에 따른 계수를 도출하였으며, 본 연구에서 도출한 결과에 상대적으로 가까운 것을 확인할 수 있다. 따라서 현재 KS 2829 : 2005의 외기 풍속에 따른 계수를 보다 현실적으로 반영하는 방법의 제안이 필요하다.



**Figure 4.** Correction factor by wind speed



두 번째는 고정된 표면열전달계수의 사용이다. TDRi를 이용한 열관류율 계산 시, 표면열전달계수는 약  $9.09 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 고정되어 있다. 표면열전달계수를 상수로 사용했을 때, 위에서 언급한 바와 같이 외기 풍속에 따른 표면 열저항의 변화를 고려하지 못할 뿐만 아니라 표면 온도에 영향을 받는 복사 열손실을 제대로 반영하지 못할 수 있다. 식 (3)에서 보는 바와 같이 표면 온도의 네 제곱에 해당하는 값으로 복사 열손실이 고려되어야 하며 이는 직접적으로 열관류율에 영향을 미친다. 즉 기존 식 (1)과 (2)의 TDR법에서는 벽체 표면 온도 변화에 따른 복사 에너지의 변화를 고려하기가 어렵다. 실제로 현장에서의 표면열전달계수는 제시된 값과 차이가 발생할 가능성이 있다. Moon et al. (2017)에서는 노후 주택을 대상으로 열류계와 TDRi로 계산한 열관류율을 비교한 결과, TDRi로 계산한 열화상 열관류율이 열류계로 계산한 열관류율보다 낮은 것으로 나타났다. 이 원인으로 실제 표면열전달계수보다 작은 값으로 가정된 표면열전달계수를 사용한 결과의 오차라고 판단하였다.

현재 KS 2829 : 2005는 간단한 계산식, 그리고 보정표와 환산표를 이용하여 상대적으로 복잡하지 않게 열관류율을 계산할 수 있는 장점이 있다. 그러나 열관류율 계산에 영향을 미치는 인자들이 측정 환경을 반영하지 못하고 일괄적인 계수로 적용되어 결과에 오차가 발생할 수 있다. 국외의 경우에는 기류와 복사 에너지 등 열관류율 계산에 영향을 미치는 인자들을 측정 현장의 환경에 따라 반영하여 열관류율을 계산하고자 시도하였다(Albaciti and Tonelli, 2010; Vollmer and Möllman, 2010; Fokaides and Kalougirus, 2011). 국내에도 측정 현장에 따라 달라지는 인자들을 반영할 수 있는 열화상 기반의 열관류율 계산 방법의 제안이 필요할 것으로 판단된다.

## 결론

본 연구에서는 현장 측정을 위한 기준과 방법에 따라 계산한 벽체의 열관류율을 비교하였다. 이를 위해 실제 건물의 외벽을 대상으로 열류계 측정 방법과 KS F 2829 : 2005에 따른 열화상 측정 방법, 국외에서 제안된 열화상을 이용한 열관류율 계산 방법을 적용하여 열관류율을 계산하였다. 계산 결과, 열류계 측정 방법과 국외에서 제안한 방법 간의 오차는 8%였으나, KS F 2829 : 2005에 따른 방법은 100%가 넘는 오차를 나타냈다. KS F 2829 : 2005 기준이 높은 오차를 보이는 이유는 외기 풍속을 보정하기 위한 계수, 고정된 표면열전달계수의 사용 때문으로 추정된다. 이는 현재 KS F 2829 : 2005 기준이 상대적으로 간편한 계산 방법으로 인해 각 측정 현장의 환경에 따라 달라지는 인자들을 충분히 반영하지 못함을 의미한다. 따라서 측정 현장에 따라 달라지는 환경 인자들을 반영하는 방법의 제안이 필요하다.

본 연구에서는 하나의 건물을 대상으로 현장 측정을 수행하였다. 향후에는 다양한 건물을 대상으로 측정 방법에 따른 결과 비교를 보다 면밀히 진행할 예정이다. 또한, 본문에서 언급했듯이 풍속에 따른 보정 방법론과 표면 온도에 따른 열관류율 변화 등을 보다 심층적으로 검증하여 새로운 표면열전달계수의 제시 등을 포함한 현장 측정 기준 개선을 위한 연구를 진행할 예정이다.

## 후기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 19CTAP-C152248-01).

## References

1. Albatici, R., Tonelli, A.M. (2010). Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. *Energy and Buildings*, 42(11), 2177-2183.
2. Choi, D.-S., Ko, M.-J. (2017). Prediction and sensitivity analysis of thermal insulation performance of wall using infrared thermograph(IRT). *Journal of the Korean Society of Living Environmental System*, 24(2), 223-231.
3. Choi, D.S., Lee, M.E., Chun, H.C. (2014). Energy consumption characteristics and evaluation of thermal insulation performance in accordance with built year of apartment complex. *Korea Institute of Ecological Architecture and Environment Journal*, 14(3), 79-86.
4. Dall'O', G., Sarto, L., Panza, A. (2013). Infrared screening of residential buildings for energy audit purposes: Results of a field test. *Energies*, 6(8), 3859-3878.
5. Fokaides, P.A., Kalogirou, S.A. (2011). Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-value) in building envelopes. *Applied Energy*, 88(12), 4358-4365.
6. Kim, S.-I., Lee, H.-H., Lim, J.-H., Song, S.-Y. (2014). Field measurement and evaluation of insulation performance of opaque outer walls for green remodelling of old commercial buildings. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 30(7), 237-246.
7. Kim, J.-G., Kim, J., Jang, C.Y., Jeong, H., Song, D. (2014). Insulation performance measurement according to imaging conditions of the infrared camera. *Proceedings of the 2014 Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea Winter Annual Conference*, 169-172.
8. Moon, S.H., Chung, W.J., Yeo, M.S. (2017). A comparison of exterior wall insulation performance measurement method for retrofits of old houses. *Proceedings of the Autumn Annual Conference of Architectural Institute of Korea*, 493-496.
9. Nardi, I., Sfarra, S., Ambrosini, D. (2014). Quantitative thermography for the estimation of the U-value: state of the art and a case study. *Journal of Physics: Conference Series*, 547, 1-8.
10. Yun, H., Song, D. (2013). A study on in-situ measurement of thermal insulation performance. *Proceedings of the 2013 Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea Summer Annual Conference*, 711-715.
11. Vollmer, M., Möllman, K.P. (2010). *Infrared thermal imaging - Fundamentals, research and applications*. WILEY-VCH.
12. ISO 9869 : 1994. (1994). *Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance*. International Organization for Standardization.
13. KS F 2829 : 2005. (2005). *Thermal performance of buildings – Quantitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method*. Korean Standards Association.