

건축물의 단열성능 검증 시스템 구축을 위한 실험적 연구

An Experimental Study to Establish a System for Verifying the Insulation Performance of Buildings

김 현 진¹

최 세 진^{2*}

Kim, Hyun-Jin¹

Choi, Se-Jin^{2*}

Researcher, Korea Land & Housing Corporation, Chungui-ro, Jinju, 52852, Korea¹

Professor, Department of Architectural Engineering, Wonkwang University, Iksan-Si, Iksan, 54538, Korea²

Abstract

Recently, the insulation design standards for reducing the energy use of buildings have been strengthened. Although insulation work is the most cost-effective method for reducing the primary energy consumption per unit area of a building, there are no evaluation criteria for insulation performance at the time of construction and completion inspection. The purpose of this study is to provide objective data by establishing a standard for an analysis method and a method for easily experimenting with the exterior wall thermal transmittance of an apartment house using a thermal transmittance measuring device(TESTO 435). For the exterior wall of the test subject, the specific heat per unit area exceeded $20\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, and the data at the end point suitable for ISO 9869-1 were analyzed by the average method. The measured values of the thermal transmittance for 3 consecutive days converged within +5% of the design value, and the standard deviation of the thermal transmittance by day decreased in the order of 1-Day > 3-Day > 2-Day. The standard deviation of the thermal transmittance by time period decreased in the order of 00:00~24:00 < 19:00~07:00 < 00:00~07:00. The measured value of the thermal transmittance for the time period of 00:00 to 07:00 per day almost coincided with an error of -3% to +2% compare to the design value.

Keywords : thermal transmittance, thermal resistance, thermal conductivity, insulation performance, insulation work

1. 서 론

최근 건축물의 에너지 사용 저감을 위한 설계기준이 강화되고 있다. 1980년 건축법 시행규칙에 건축물 외피에 대한 열관류율(U-value) 설계기준을 제정한 이후 2000년까지 유지되다가, 최근 20여 년이란 짧은 기간 동안 여러 차례 개정을 통해 단열설계 열관류율 기준을 약 4배 ($0.58\text{W}/\text{m}^2\text{K} \rightarrow 0.15\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, 공동주택 외벽(직접, 중부1))

강화했고, 온실가스 절감을 위한 국가적 목표인 제로에너지 건축물을 지향하고 있다. 또한 건축물 단열설계는 국토교통부 고시 (1) 건축물의 에너지절약 설계기준 (2) 에너지 절약형 친환경주택의 건설기준 등을 준수해야 인허가를 통과할 수 있다. 그러나 건설 현장에서 발생하는 여러 요인(시공오차, 자재 물성 변화 등)에 의한 열 성능 저하를 고려하지 않고, 설계값(이론값)과 동일한 열 성능을 발휘한다고 판단하는 오류가 내재해 있다. 이를 해결하기 위한 확실한 검증 방법은 해당 부위에 코어를 뚫고 육안 검사 및 자재 열 성능시험을 실시 할 수 있으나 훼손 및 재시공 등의 난관에 직면하여 경제성 및 효율성 측면에서 타당하지 않다. 이에 본 연구는 건축물 외피에 대한 열 성능 현장시험을 위한 비파괴 방식의 성능 검사

Received : May 14, 2021

Revision received : June 1, 2021

Accepted : June 10, 2021

* Corresponding author : Choi, Se-Jin

[Tel: 82-63-850-6789, E-mail: csj2378@wku.ac.kr]

©2021 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

및 분석 기법 도입을 위한 실증적 방법을 발굴하고자 하였다.

2. 건축물 단열 설계기준 및 기존연구 고찰

2.1 건축물 외피 단열 설계 및 열관류율 산출 기준

건축물 외피 단열설계의 적합성 판단 기준은 건축물 에너지절약 설계기준 제6조의 (1) 지역별·부위별 단열재 등급별 허용두께 이상 설치한 경우, (2) 해당 부위별 전체 구성재료와 동일한 시료에 대해 KS F 2277에 의한 열저항 또는 열관류율 측정값이 설계기준을 만족하는 경우, (3) 구성재료의 열관류율 설계값이 설계기준을 만족하는 경우 등으로 이 중 하나의 조건을 만족하면 되며 일반적으로 (3) 항에 의한 설계값을 산출하여 적용하고 있다[1].

열관류율(U or K) 산출은 수식 (1)과 같이 재료별 열저항 합계(R_T)의 역수가 되며 실내 및 실외 표면 열전달률(α)의 영향을 받는다.

$$U(K) = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} + R_a + \frac{1}{\alpha_o}} \quad \text{-- (1)}$$

R_T : 열저항 합계 ($m^2 \cdot K/W$)

α_i : 실내 표면 열전달률 ($W/m^2 \cdot K$)

α_o : 실외 표면 열전달률 ($W/m^2 \cdot K$)

λ_j : 열전도율 ($W/m \cdot K$)

d_j : 재료 두께 (m)

R_a : 공기층(중공층)의 열저항 ($m^2 \cdot K/W$)

표면 열전달률은 열의 복사와 대류에 의한 전달량으로 풍속의 크기에 따라 비례하고, 열전달 저항값의 역수로 환경 조건¹⁾에 의해 ISO 13788 및 ISO 6946, 건축물의 에너지절약 설계기준 등은 Table 1과 같이 기준값을 상이하게 제시하고 있다[2,3].

본 연구는 건축물 에너지 평가 관련 기준값과 혼동을 방지코자 표면 열전달 저항값을 국내기준($R_{Si} = 0.11$)으로 적용했다.

Table 1. Surface thermal resistance by criteria

Surface thermal resistance, R ($m^2 \cdot K/W$)			
Reference	Interior (R_{Si})	Exterior (R_{So})	
Energy saving design criteria (korean)	External wall (including side wall, windows and door)	0.11	0.043
ISO 13788	Opaque surfaces representing the effect of corners, furniture, curtains of suspended ceilings	0.25	0.04
ISO 6946	Upwards	0.10	0.04
	Horizontal	0.13	
	Downwards	0.17	
Testo 435 (Equipment)	0.13	-	

수식 (2)는 열관류율 열평형 이론식으로 「실내에서 내벽 표면까지의 열전달로 이동된 열량과 구조체 전체를 통해 열관류로 이동된 열량은 같다」란 원리를 적용하여 측정 부위(외벽)의 실내·외 대기온도와 실내 측정부위 표면 온도의 온도차에 의해 열관류율 값을 산출할 수 있다. 이는 중요한 요소로 정상상태 도달 시점과 환경요인을 고려하면 약식으로 열관류율을 추정할 수 있다는 가정이 수립되는 것이다.

$$\alpha_i \times A \times (T_i - T_s) = U(K) \times A \times (T_i - T_o)$$

$$U(K) = \alpha_i \times \frac{(T_i - T_s)}{(T_i - T_o)} \quad \text{-- (2)}$$

$U(K)$: 열관류율 ($W/m^2 \cdot K$)

α_i : 실내표면 열전달률 ($W/m^2 \cdot K$)

A : 면적 (m^2)

T_i : 실내온도 (K)

T_o : 외기온도 (K)

T_s : 실내표면온도(K)

2.2 기존 현장 실험사례 고찰

건축물의 열관류율(U) 현장 측정 방법은 KS F2829 (적외선 촬영법) 및 ISO 9869-1(단열-건축물요소-열저항과 열투과율의 현장측정)이 있다[4,5]. ISO 9869-1은 열류계(Heat-Flow-Meter)를 통해 전달된 열류를 전기

1) 실내온도 20℃, 실외온도 10℃, 외기풍속 4m/s, 실내·실외의 표면 방사율 0.9 적용

신호로 보내는 장치를 활용하여 열관류율을 측정하는 방법으로, 열용량(C_k , 비열 \times 밀도 \times 두께)이 $20 \text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 이하 또는 초과로 구분하여 측정 종료 시점에 대한 적합 여부를 다르게 적용하고 있다. 특히, 측정 소요 시간은 각 선행 연구 별로 상이하게 제시하고 있다. Rye와 Scott(2012)는 최소 7일 이상의 측정시간이 필요하다고 발표 했으며, Asdrubali, D' Alessandro, Baldinelli와 Bianchi(2014)는 안정적인 환경에서 3일이 필요하다고 하였다[6].

Table 2는 준공 후 20~30년 된 노후 건축물의 단열 성능 검증을 위해 TESTO 435로 건축물 외피의 열관류율(U)을 측정한 사례로 준공도서를 기본으로 산출한 설계값과 측정값은 +5% ~ +79%까지 편차가 발생하였다. 이에 대한 원인분석으로 단열재 경시변화로 인한 열 성능 저하를 추정했으나 「20년 이상 경과된 노후건축물의 단열재 성능평가에 관한 실험적 연구」 결과 셀포 폴리스티레 비드법 단열재의 열 성능 저하는 거의 없는 것으로 확인되어 단열재의 경시변화보다는 측정 방법에 원인이 있을 것으로 판단하였다[7].

Table 2. Measurement result old building (U-value)

B.d	Area	Time	Test heat source	U-value ($\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$)		
				Drawing	Actual (ave)	Drawing/Actual(%)
A				0.559	0.588	+ 5
B	Exterior wall	24h ~	Air-conditioner	0.809	0.428	- 47
C	(direct)	48h		0.679	1.105	+ 62
D				0.543	0.977	+ 79

* Measurement period : 2018.07~2018.08, B.d : building

3. 실험 계획

3.1 대상건축물 선정 및 연구 방향

본 연구 대상 건축물은 Table 3과 같이 2019년 입주 예정인 3개 블록과 2015년 입주한 1개 블록으로 구성하였고, 중부2 지역(세종시, 하남시)과 남부지역(울산시)에 해당하며, 연구 방향은 다음과 같이 진행하였다.

- 1) 실험의 적합성 판단 및 열관류율 분석
- 2) 실내·실외 온도차에 대한 열관류율 변화량
- 3) 열원 공급방식에 따른 정상상태의 적합성
- 4) 실험값과 설계값(이론값)의 비교 분석

3.2 실험 방법

실험 장비는 열관류율 측정기(TESTO 435), 온·습도계(TESTO 174H), 열화상 카메라(FLIR E40), 적외선 고온계(TN 425LB) 등을 Figure 1과 같이 사용했고 측정 위치는 아파트 전체를 대표 할 수 있는 주동 외벽 중

- (1) 일사량이 없고, 일조량의 영향이 최소화되는 북향
- (2) 외벽 마감재 표면과 센서의 밀접한 접촉 가능 부위
- (3) 실내 열류계(HFM) 센서와 실외 온도 프로브 사이가 최단 거리 되는 지점 등의 조건을 동시에 만족하는 위치로 선정하고 측정 전 열화상 카메라로 촬영하여 균열, 결로 등의 이상 유무를 확인했다. Figure 2 는 준공검사 후 입주예정인 G BL(세종시)의 전용면적 58m^2 A타입 방3 외벽(북측, 외기 직접면)을 측정하는 사례로 외부 마감은 수성페인트, 내부는 석고보드위 도배 마감면으로 구성돼 있다.

Table 4는 블록별 외벽 구성 자재의 열관류율 산출 값(설계)으로 $0.200\sim 0.326 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 를 보였으며 관련법령에 따른 설계기준에 적합함을 확인하였다.

Table 3. Test plan for thermal transmittance of exterior wall of apartment building (direct face)

Block	Region		Measurement period	Type (direction)	Measurement location	Building area	Heat source supply method	Compleat in date	Experimental method
	City	Group							
G	Sejong	Central 2	'20.01.09~20.01.12	58A (The north)	Room 3		Floor-hot water heating	2019.09	
U	Ulsan	Southern	'19.11.25~19.11.27	84A1 (The north)	Dress room	Exterior wall (direct)	Floor-hot water heating	2019.11	Heat flow method
H	Hanam	Central 2	'19.12.24~19.12.27	59A (The north)	Living room		Electric heater heating	2019.11	(Testo 435)
K	Sejong	Central 2	'19.12.31~20.01.03	84A (The north)	Dress room		Floor-hot water heating	2015.03	



Figure 1. Measurement equipment



Figure 2. Experimental equipment setting example (G BL)

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험의 적합성 및 평균법에 의한 열관류율 분석

본 실험 측정 부위 콘크리트 벽체 두께는 14cm~25cm로 열용량(C_k)은 307 kJ~440 kJ/m²K가 된다. ISO 9869-1에서는 열용량(C_k)이 20 kJ/m²K 초과하는 경우의 측정 종료 조건은 (1) 실험 기간 3일 초과, (2) 실험 말기에 구한 열저항 값(R)은 24H 전에 구한 값에서 ±5% 이내, (3) INT(2×D_T/3)일 동안에 처음 기간의 R 값은 동일 기간의 마지막 시간 기간 값과 ±5% 이내의 3가지 조건을 동시에 만족해야 실험을 종료할 수 있다. Table 5는 블록별 위 조건의 적합 여부를 나타내 것으로 G BL과 K BL은 적합한 결과를 보였다. U BL은 측정 기간이 2일(48H)로 조건에 미흡했고, H BL은 (2) 번과 (3) 번 조건을 충족하지 못했다.

Figure 3~5는 안정된 정상상태²⁾의 측정 일자와 시간대를 확인하고자 일자별³⁾, 시간대별⁴⁾ 열관류율 측정값 평균에 대한 표준편차를 분석한 결과이다.

- 2) 물체 및 주변 온도가 동일한 상태로 열 흐름 조건, 속도, 온도분포가 일정하고 시간에 따른 변화가 없음
- 3) 측정 일자별로 1-day, 2-day, 3-day로 분류
- 4) 시간대별로, 19:00~07:00(다음날), 00:00~07:00(다음날) 00:00~24:00 (다음날)로 분류

Table 4. Thermal transmittance design value by block

Block	Material layer	Thickness (m)	Conductivity (W/m · K)	Resistances (m ² · K/W)
G	1 Interior surface			0.1100
	2 Gypsum board	0.0125	0.1800	0.0690
	3 Insulation(eps) ¹	0.1000	0.0320	3.1250
	4 Concrete	0.2000	1.6000	0.1250
	5 Exterior surface			0.0430
	Sum			3.472
U-value(W/m ² ·K)				0.288
U	1 Interior surface			0.1100
	2 Gypsum board	0.0125	0.1800	0.0690
	3 Insulation(eps) ¹	0.1200	0.0320	3.7500
	4 Concrete	0.2500	1.6000	0.1560
	5 Exterior surface			0.0430
	Sum			4.128
U-value(W/m ² ·K)				0.242
H	1 interior surface			0.1100
	2 Gypsum board	0.0125	0.1800	0.0690
	3 Insulation(eps) ¹	0.1500	0.0320	4.6880
	4 Concrete	0.1400	1.6000	0.0880
	5 Exterior surface			0.0430
	Sum			4.998
U-value(W/m ² ·K)				0.200
K	1 Interior surface			0.1100
	2 Gypsum board	0.0095	0.1800	0.0530
	3 Insulation ²	0.0120	0.0400	0.3000
	4 Insulation(eps) ³	0.0900	0.0370	2.4320
	5 Concrete	0.2000	1.6000	0.1250
	6 Exterior surface			0.0430
Sum			3.063	
U-value(W/m ² ·K)				0.326

(eps)¹ : 2class 2nd, insulation² : soft form, (eps)³ : 1class 4th

Table 5. Test end criteria according to ISO 9869-1

Sortation	3) $(R_{INT(2XDT/3),first} - R_{INT(2XDT/3),last})/R_{INT(2XDT/3),last} \times 100 \leq \pm 5\%$			
	2) $(R_{r-end} - R_{r-24h})/R_{r-24h} \times 100 \leq \pm 5\%$			
1) $D_T \geq 3$				
G	Value	4	-2.0 %	-1.5 %
	Suitability	○	○	○
U	Value	2	-14.0 %	-14.0 %
	Suitability	×	×	×
H	Value	3	-21.4 %	+46.0 %
	Suitability	○	×	×
K	Value	3	-0.9 %	-2.0 %
	Suitability	○	○	○

D_T : Duration of the test (days), 19:00~19:00(next day), INT : Integer
 R_{r-end} : Thermal resistance obtained at the end of the test (m² · K/W)
 R_{r-24h} : Thermal resistance obtained 24h before of the test (m² · K/W)
 R_{INT(2XDT/3),first} : Thermal resistance obtained from the first time period during INT(2XDT/3) (m² · K/W)
 R_{INT(2XDT/3),last} : Thermal resistance obtained from the last time period during INT(2XDT/3) (m² · K/W)

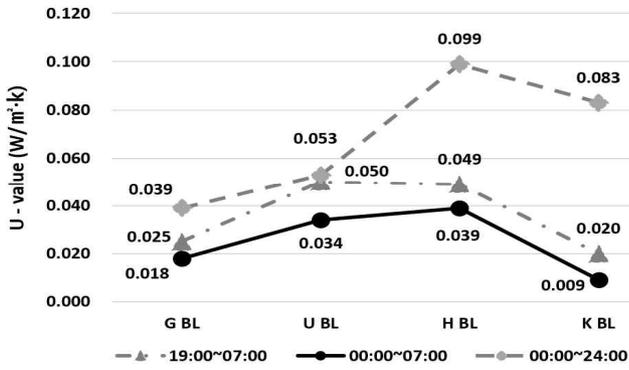


Figure 3. Standard deviation of u-value by time zone (1-day)

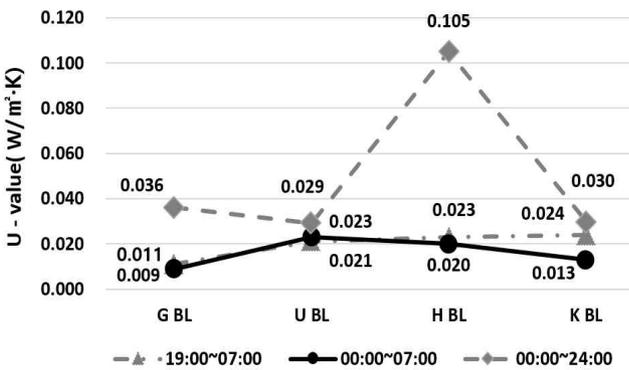


Figure 4. Standard deviation of u-value by time zone (2-day)

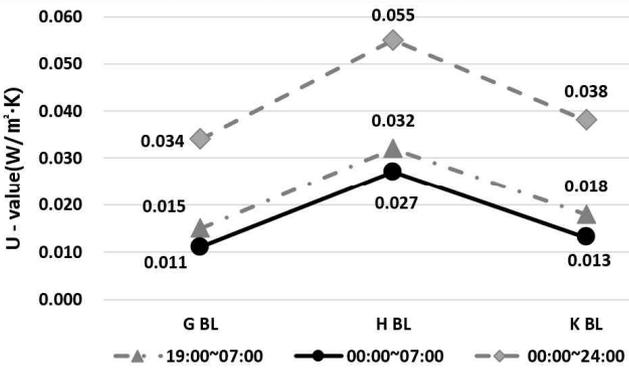


Figure 5. Standard deviation of u-value by time zone (3-day)

측정 일자별 열관류율의 표준편차는 1-Day > 3-Day > 2-Day 순으로 편차가 줄어들어 열류계(HFM)가 측정 2일부터 안정된 상태로 유지됨을 알 수 있다. 특히, 시간대별 열관류율 표준편차는 00:00~24:00(다음날) > 19:00~07:00(다음날) > 00:00~07:00(다음날) 순으로 편차가 줄어들어 심야가 안정된 정상상태를 유지하기에 매우 적합함을 알 수 있다. 실험기간이 동절기임을 고려한다면 00:00~24:00(다음날) 시간대는 일사 및 일조 등이 측정값에 영

향을 준 것으로 보이나 19:00~07:00(다음날)와 00:00~07:00(다음날)은 일사 및 일조의 영향이 거의 없어 측정값의 표준편차가 현저하게 줄어든 것으로 보인다.

4.2 실내·실외 온도차에 대한 열관류율 변화량

건축물 외벽의 열관류율 측정 부위에 대한 실내·외 온도차와 열관류율 변화량과의 상관관계를 확인코자 동일 지역(세종시) 내 위치한 G BL과 K BL의 일자별·시간대별((1) 주간대(12:00~17:00),(2) 야간대(00:00~05:00)) 온도변화를 분석한 결과는 Table 6과 같다.

Table 6. Temperature and humidity by date and time

Sortation	K BL			G BL			
	Min	Max	Ave	Min	Max	Ave	
	Night time (00:00~05:00)						
Temperature	Day time (12:00~17:00)						
	Interior	16.90	18.30	17.70	19.90	22.40	21.33
	Exterior	17.50	19.70	18.09	20.90	22.90	22.04
Humidity	Exterior	-6.70	1.90	-2.02	1.40	4.10	2.49
	Interior	1.10	7.70	4.78	5.70	11.00	8.86
	Exterior	60.40	72.30	68.16	35.60	38.50	36.99
	Interior	50.30	75.50	66.84	35.20	37.20	36.34
	Exterior	60.80	86.50	76.07	68.10	85.10	76.75
	Exterior	44.70	67.80	57.09	43.40	68.50	56.67

Measurement date : 1-day ~ 3-day

G BL과 K BL의 실내·외 온도차(평균)는 야간대가 19℃로 주간대 13℃보다 약 6℃ 정도 높았으며, 이는 ISO 9869-1 및 열관류율 장비(TEST 435) 매뉴얼에서 권장하는 10℃ 이상의 온도차 기준에 적합하였다.

Figure 6~8은 일자별·시간대별(1) 주간대(12:00~17:00), (2) 야간대(00:00~05:00) 열관류율 표준편차 및 실내·외 온도차의 표준편차, 실내·외 온도차(평균)에 대한 분석 자료이다. 측정 일자별 분석에서 주간대 및 야간대 모두 실내·외 온도차(평균)가 클수록 열관류율 표준편차는 작아지며, 실내·외 온도차의 표준편차도 작아짐을 알 수 있다. 또한 시간대별 변화량은 야간대가 주간대 보다 실내·외 온도차(평균)가 크고, 열관류율 표준편차는 작아짐을 알 수 있으며, 주간대의 실내·외 온도차가 약 13℃~15℃인 경우 열관류율 표준편차는 약 0.013 W/m²K~0.030 W/m²K

5) U_value(stdev, W/m²·K) : 열관류율 표준편차
 TD_value(stdev, ℃) : 실내실외 온도차의 표준편차
 TD_value(ave, ℃) : 실내실외 온도차의 평균값

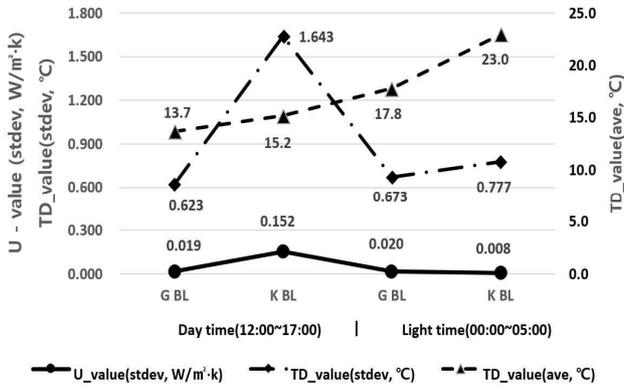


Figure 6. Standard deviation of u-value according to temperature difference by time (1-day)

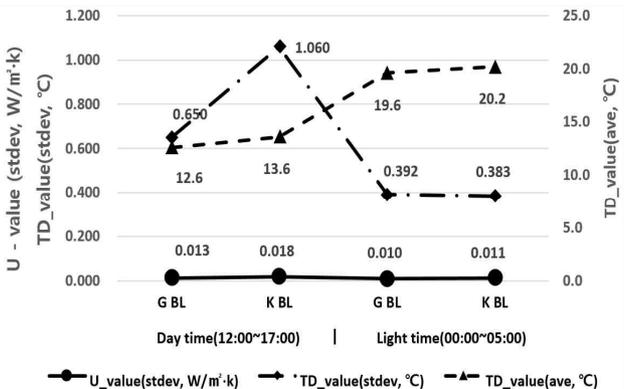


Figure 7. Standard deviation of u-value according to temperature difference by time (2-day)

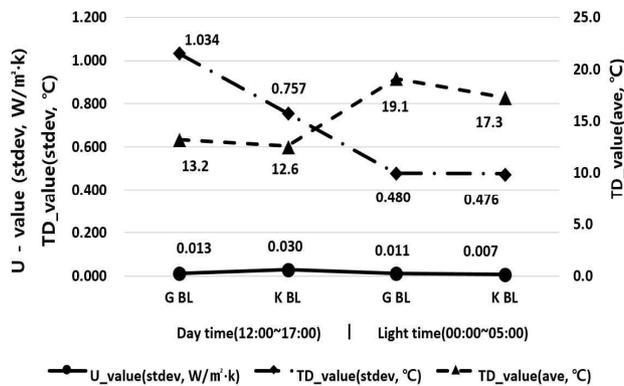


Figure 8. Standard deviation of u-value according to temperature difference by time (3-day)

이나, 야간대의 실내·외 온도차가 약 18~23°C인 경우 열관류율 표준편차는 약 0.007 W/m²·K~0.020W/m²·K로 30~40% 정도 편차가 개선되었다. 이는 실내·외 온도차(평균)가 커지는 야간대에서 열관류율의 변동 폭이 축소됨

을 알 수 있다. 결론적으로 실내·외 온도차(평균)가 클수록 열관류율 표준편차는 작아짐을 알 수 있었고, KS F 2277(건축용 구성재의 단열성 측정방법)에서도 온도차에 따라 열관류율이 변동될 수 있음을 밝히고 있어 지속적인 연구가 필요한 것으로 판단된다[8].

4.3 열원 공급방식에 대한 열관류율 변화량

본 실험에 있어 실내·실외의 온도차를 조성하기 위한 열원 공급방식은 2가지로 나누어 실시했다. 통상적인 공동주택 난방 방식인 바닥 온수난방 방식과 이동식 전기 방열기 방식을 적용하여 측정값의 변화를 알고자 했다. Figure 9와 같이 G BL, U BL, K BL은 바닥 온수난방 방식으로 열원을 공급했고, H BL은 이동식 전기 방열기를 가동하여 실험체 표면에 간접적으로 열원을 공급하였다. Figure 3~5의 평균 열관류율 표준편차 분석 결과 H BL은 측정 일자별·시간대별로 표준편차가 타 블록 대비 크게 작용하고 있었다. 이에 대한 원인으로 실험체 표면의 내·외부 온도차를 유지하기 위해 전기 방열기에 의한 열원 전달이 대류, 복사 등 불규칙적으로 공급되면서 측정 일자별·시간대별 표준편차가 크게 발생하였음을 알 수 있었다.

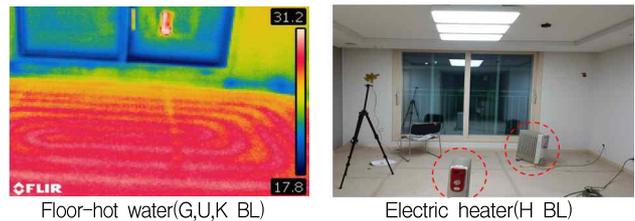


Figure 9. Heat source supply method

4.4 열관류율 설계기준과 현장 측정값 비교·분석

열관류율 설계값과 측정값을 비교·분석한 결과는 Table 7과 같다. ISO 9869-1의 실험 종료 기준을 적용한 시간대(19:00~19:00(다음날))의 열관류율 측정값은 G BL과 K BL이 0.304 W/m²·K와 0.343 W/m²·K로 설계값 0.288 W/m²·K, 0.326 W/m²·K와 비교하여 2개 블록 모두 +5%의 편차를 보였고, U BL은 +13%, H BL은 +49%의 편차를 나타냈다. 특히, 열관류율 표준편차가 가장 작았던 시간대(00:00~07:00)의 분석 결과 G BL과 K BL 측정값은 0.278 W/m²·K, 0.318 W/m²·K로 설계값 대비 편차는 G BL은 -3%, K BL은 +2%를 보여 표준편차가

가장 작았던 시간대(00:00~07:00)의 열관류율 값이 설계 값과의 편차도 작아지고 측정값은 허용오차 $\pm 5\%$ 범위에 있음을 확인하였다. U BL은 실험 기간(3일 초과)을 만족하지 못했으나 실험 2일째 측정값은 설계값과 $+2\% \sim +5\%$ 의 편차를 보여 측정 2일째부터 측정 부위가 정상상태를 조성하였음을 알 수 있었다. 하지만 K BL은 측정 일자별 · 시간대별 모두 일정한 패턴이 없는 결과를 보여, 이에 대한 원인으로 이동식 전기방열기 사용에 따른 불규칙한 열 공급인 것으로 추정된다.

Table 7. Thermal transmittance of change by date and time zone

Sortation	U-value(W/m ² · K)				
	G BL	U BL	H BL	K BL	
Drawing	0.288	0.242	0.200	0.326	
19:00 ~ 19:00	1-day	0.303	0.296	0.403	0.339
	2-day	0.308	0.254	0.276	0.346
	3-day	0.306	-	0.217	0.343
	4-day	0.300	-	-	-
	Ave	0.304	0.275	0.299	0.343
Mea-sured	Rate-c	+ 5%	+ 13%	+ 49%	+ 5%
	1-day	0.266	0.290	0.419	0.311
	2-day	0.277	0.247	0.314	0.329
	3-day	0.273	-	0.238	0.314
	4-day	0.297	-	-	-
00:00 ~ 07:00	Ave	0.278	0.269	0.324	0.318
	Rate-c	- 3%	+ 11%	+ 61%	+ 2%

Ave : Average
 Rate-c : rate of change, (average - drawing)/drawing x100(%)

Figure 10~13은 일자별 · 시간대별(00:00~07:00) 측정값의 분포를 분석한 자료로 열관류율의 표준편차가 가장 작은 시간대(00:00~07:00) 측정값의 열류량 정상상태 도달 시점을 구체적으로 확인하고자 했다. G BL은 측정 기간 동안 열관류율 평균값의 $\pm 5\%$ 범위에 안착하여 안정된 상태를 유지하고 있으며, K BL은 3일째 측정값이 안정된 상태를 유지함을 알 수 있다. G BL, K BL, U BL의 열관류율 측정값은 새벽 시간인 AM 04:00에서 AM 07:00까지 안정된 상태로 실측 평균값의 허용오차 범위인 $\pm 5\%$ 이내로 수렴되고 있음을 알 수 있으며, 일자별 측정값은 측정 1일째는 불규칙한 모습을 보이나, 측정 2일째부터는 안정된 정상상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 측정 2일째의 새벽 시간 (04:00~07:00) 측정값이 가장 안정돼 있음을 확인할 수 있었다.

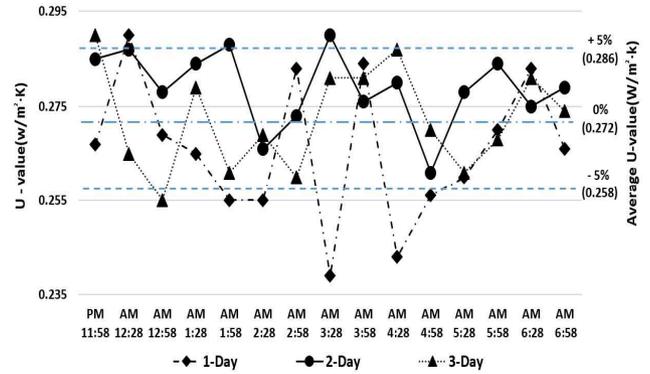


Figure 10. U-value by date and time (00:00~07:00) of G BL

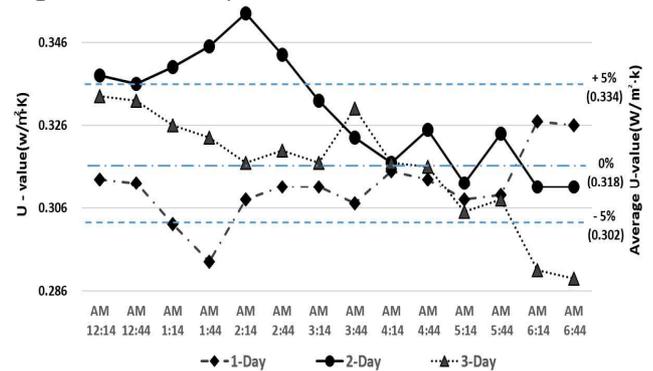


Figure 11. U-value by date and time (00:00~07:00) of K BL

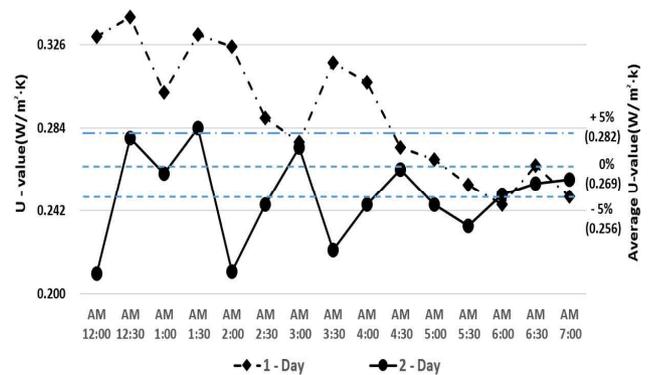


Figure 12. U-value by date and time (00:00~07:00) of U BL

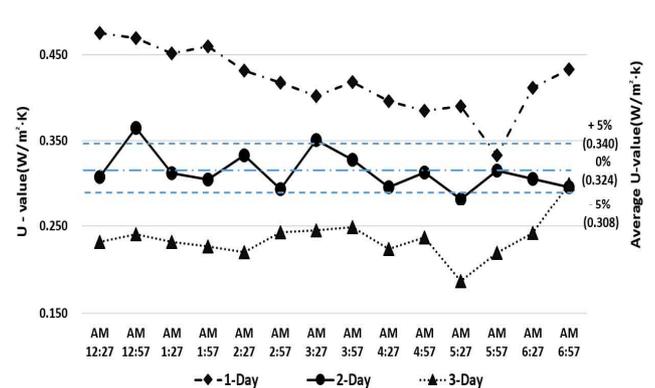


Figure 13. U-value by date and time (00:00~07:00) of H BL

5. 현장 실험시 고려할 사항 제안

본 연구와 동일 또는 유사한 현장 실험을 시행하는 경우 실험값의 오류를 방지하고자 다음과 같이 고려할 사항을 제안하고자 한다. (1) 열관류율 측정기(TESTO 435)의 실내표면 열전달 저항값(R_{Si})은 $0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$ 으로 셋팅되어 Table 1과 같이 설계 기준값으로 변경해야 한다(본 연구는 건축물의 에너지 절약설계기준에 따라 실내표면 열전달저항 계수를 $0.11 \text{ m}^2\text{K/W}$ 으로 변경했고, 이에 대한 열관류율값 편차는 약 $+0.4\% \sim +0.5\%$ 로 산출된다. (2) 열류계(HFM) 센서 부착 위치는 열전달이 원활하도록 봉투 바름 형식의 도배지 시공 부위(뜯 공간)는 제외하고, 석고 보드와 같이 도배지가 완전히 밀착되는 부위를 선택해야 한다. (3) 외벽 구성자재중 석재 및 스톤코트 등 표면이 고르지 않는 부위는 제외하여야 한다. (4) 외부 센서는 환경 요소(일사, 바람, 비 등) 영향이 최소화되도록 은박지로 보양하여 마감면(외벽)에 밀착하고 필요시 종이컵 등으로 덮는다. (5) 열화상카메라 및 적외선 고온계는 측정시 재료별 방사율(도배 마감면 : 0.95, 콘크리트면: 0.9)에 따른 설정값 셋팅을 고려하여 측정해야 한다. (6) 실내 열류계(HFM)는 벽체와 완전 밀착이 되도록 테이프를 여러 겹 부착해야[9] 실험값의 정확성을 향상 시킬수 있다.

6. 결 론

본 연구는 건축물 단열성능을 간편한 측정 장비를 활용하여 정량적이고 정성적인 평가방법을 구축하기 위한 실험적 연구로 진행했으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 측정일자별 열관류율 값 표준편차는 1-Day > 3-Day > 2-Day 순으로 줄어들어 측정 2일 이후로 정상상태의 열류량이 형성됨을 알 수 있었다.
- 2) 시간대별 열관류율 값 표준편차는 00:00~24:00(다음날) > 19:00~07:00(다음날) > 00:00~07:00(다음날) 순으로 작아짐을 알 수 있었다.
- 3) 측정부위(외벽)의 실내 및 실외 온도차(평균)가 클수록 열관류율 값과 실내·외 온도차(평균)의 표준편차는 작아져 상호 반비례함을 알 수 있었다.
- 4) 열관류율 측정값은 19:00~19:00(다음날) 시간대인 경우 설계값 대비 $+5\%$ 편차를 보였으며, 00:00~

7:00(다음날)인 경우는 $-3\% \sim +2\%$ 편차를 보여, 설계값의 허용오차 범위인 $\pm 5\%$ 이내로 나타났다.

본 연구 결과 건축물의 단열성능 평가를 위한 비파괴 약식검사 활용 방법은 결로·단열 등으로 인한 건설사와 입주자 간의 분쟁과 소송을 해소할 방법으로 활용하기 위해 추가 실험이 필요한 것으로 판단되며 특히, 열원 공급 방식에 따라 열관류율 변화가 크게 작용하므로 하절기 실험 시 정상상태를 형성하기 위한 실내·외 온도차(10°C 이상)의 열원 공급 방식(에어컨)에 대해 지속적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

요 약

최근 건축물의 에너지 사용 저감을 위한 단열 설계기준은 강화되고 있다. 단열공사는 건축물의 단위면적당 1차 에너지 소요량 저감을 위한 가장 효율적인 방법임에도 불구하고, 건축 시공 및 준공검사 과정에서 단열성능에 대한 평가(검사) 기준이 없는 실정이다. 본 연구는 열관류율 측정장비(TESTO 435)를 활용하여 공동주택의 외벽 열관류율을 간편하게 실험 할 수 있는 방법과 분석기법에 대한 기준을 구축하여 객관적인 데이터를 제공하는 데 목적이 있다. 실험 대상 외벽의 단위면적당 비열(열용량)이 $20 \text{ kJ}(\text{m}^2\text{K})$ 를 초과하여 ISO 9869-1에 적합한 종료 시점의 데이터를 평균법으로 분석했다. 3일 연속 열관류율 측정값은 설계값 대비 $+5\%$ 이내로 허용오차 범위 내로 수렴했고, 일자별 열관류율의 표준편차는 1-Day > 3-Day > 2-Day 순으로 작아졌고, 시간대별 열관류율 표준편차는 00:00~24:00 > 19:00~07:00 > 00:00~07:00 순으로 줄어 들었다. 특히, 측정일자별로 00:00~07:00 시간대의 열관류율 값은 설계값 대비 $-3\% \sim +2\%$ 편차로 거의 일치하였다.

키워드 : 열관류율, 열저항, 단열성능, 단열공사, 열전도율

Funding

Not applicable

ORCID

Hyun-Jin Kim, <https://orcid.org/0000-0002-8373-0724>

Se-Jin Choi, <https://orcid.org/0000-0002-2142-3745>

References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Design Criteria for Energy Conservation in Buildings. Sejong (Korea): Ministry of Land, Infrastructure and Transport; 2017. 16 p.
2. ISO 13788. Hygrothermal performance of building components and building elements Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation Calculation methods. Switzerland: International standard; 2014. 40 p.
3. ISO 6946. Building components and building elements Thermal resistance and thermal transmittance Calculation methods. Switzerland: International standard; 2017. 5 p.
4. KS F 2829. Thermal performance of buildings Quantitative detection of thermal irregularities in building envelopes Infrared method. Seoul (Korea): Korea Standard & Certification Information Center; 2005. 18 p.
5. ISO 9869-1. Thermal insulation Building elements In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance. Switzerland: International standard; 2014. 37 p.
6. Ko MJ, Lee YJ, Choi DS. Convergence analysis of in-situ thermal transmittance of apartment house opaque exterior wall in winter season by average method of ISO 9869-1. Journal of Korean Living Environment system. 2018 Oct;25(5):603-10. <https://doi.org/10.21086/ksles.2018.10.25.5.603>
7. Kim HJ, i SJ. An experimental study on a performance evaluation of internal insulation of buildings over 20 years old. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2019 Dec;19(6):539-47. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2019.19.6.539>
8. KS F 2277. Thermal insulation Determination of steady state thermal transmission properties Calibrated and guarded hot box. Seoul (Korea): Korea Standard & Certification Information Center; 2005. 31 p.
9. Moon SJ, Chung WJ, Yeo MS. A comparison of exterior wall insulation performance measurement method for retrofits of old house. Proceeding of the Architectural Institute of Korea; 2017 Oct 25-27; Gyeongju. Korea. Seoul (Korea): the Architectural Institute of Korea; 2017. p. 493-6.