

In-situ Measurement Technique for Thermal Performance of Building Wall Excluding Surface Heat Transfer Resistance

표면 열전달 저항이 배제된 건물 벽체 열성능 현장 측정 기법

Seungchul Kim, Sangbong Kim, Hwanseon Nah
김승철, 김상봉, 나환선

Abstract

In this paper, a new experimental method to determine the thermal resistance of building wall was proposed by improving the heat flow method (HFM) based on the air-surface temperature ratio theory. This technique measures the thermal resistance of the wall excluding the inner and outer surface heat transfer resistance. Unlike conventional HFM, this value can be compared directly with the theoretical reference value. Its performance was verified using three mock-up structures with a theoretical thermal transmittance of 0.5, 3.3, and 0.18 W/m²·K respectively. After measuring the variations in the temperature and heat transfer rate of the mock-ups for 383 hours, the thermal transmittances were determined to be 0.47, 3.10, and 0.18 W/m²·K, which corresponded to errors of 5.2, 6.2 and 0.5%, respectively, compared to the theoretical values. It was concluded that this technique can directly compare the thermal resistance of the wall between the existent stage and initial stage after construction.

Keywords: Heat Flow Method, HFM, Building Energy Efficiency, Building Wall, Thermal Transmittance, Thermal Resistance

Nomenclature

R_T	Total thermal resistance (environment to environment) [m ² · K/W]
R_C	Total thermal resistance (surface to surface) [m ² · K/W]
R_{si}	Internal surface resistance [m ² · K/W]
R_{se}	External surface resistance [m ² · K/W]
Λ	Design thermal conductivity [W/m · K]
d	Thickness. [m]
U_{design}	Thermal transmittance [W/m ² · K]
T_{in}	Interior ambient temperature [K]
T_{out}	Exterior ambient temperature [K]
T_{si}	Internal surface temperature [K]
T_{se}	External surface temperature [K]
q	Heat flux [W]

소비의 20%를 차지하고 있기 때문에 주요한 에너지 수요관리 요인으로 간주된다. 국내의 경우, 총 705만 동의 건축물 중 약 36% 이상이 30년 이상 경과된 노후 건물이기 때문에 에너지 효율이 낮은 기존 건축물에 대한 에너지 성능 향상이 절대적으로 요구된다. 기존 건축물의 에너지 성능을 나타내는 주요 인증기준에 사용되는 지표는 초기 설계단계에서의 이론적 계산에 근거한 시뮬레이션 결과값으로 산정한다. 문제는 건축물의 완공 후 실제 에너지 성능은 이론적 계산과 크게 다를 수 있다는 것이다 [1]. 이는 건축물의 시공상 발생할 수 있는 열교, 부재간 유격 등에 의해 나타날 수 있으며 이로 인해 벽체의 열관류율은 최대 300% 이상 [2], 대상 체적 또는 공간의 총 에너지 열손실은 200% 이상 차이가 발생할 수 있다 [1]. 물론 재실자의 행동 및 시스템의 운영방법에 따라 실제 에너지 성능에 영향을 줄 수 있으나 근본적으로는 건축물의 에너지 성능에 크게 영향을 미치는 건물 외피에 주목해야 한다 [3]. 결국 건물 준공 전에 건물에너지 인증이 필요한 신축건물의 경우 초기 설계단계의 이론적 계산에 근거한 외피의 열성능을 기준으로 에너지 소요량을 구할 수밖에 없다. 준공 후, 시공 및 경년열화에 의해 발생할 수 있는 성능저하를 고려하여 현장에서 실측한 외피의 열성능을 기준으로 에너지 소요량을 구해야만 실제 건물에 사용되는

I. Introduction

건축물은 국가에서 배출하는 총 온실가스의 25%, 총 에너지

Article Information

Manuscript Received January 2, 2020, Revised January 29, 2020, Accepted February 12, 2020, Published online June 30, 2020

Seungchul Kim and Sangbong Kim are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea. H. Nah was with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: Seungchul Kim (sc_kim@kepco.co.kr)

ORCID: 0000-0001-6323-9658 (Seungchul Kim); 0000-0001-7994-0801 (Sangbong Kim)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepco.co.kr>.

에너지 소비량을 정확하게 산정할 수 있다.

벽체는 실의 에너지 성능에서 매우 민감한 변수이며 [4] 오래된 건축물의 경우 설계도서가 아예 없거나, 구성 재료의 물리적 성질을 알 수 없는 경우가 대부분이므로 벽체의 이론적 열성능을 산정하기가 쉽지 않다. 따라서 현장에서 벽체의 열관류율을 측정하는 방법이 많이 개발되었는데 대표적으로 ISO9869-1 [5]이 있으며, 그 외 ASTM C 1155-95 [6]과 ASTM C 1046-95 [7] 등이 있다.

하지만 이런 방법으로 측정된 현장 벽체 열성능에는 벽체의 표면에서 발생하는 대류 및 복사열전달이 포함되므로, 같은 재료 구성으로 이루어진 벽체라도 현장 조건에 따라 열성능 결과가 상이할 수 있으며, 대류 및 복사열전달 상수값을 이용하는 이론적 벽체 열성능 계산방법과 직접적인 비교가 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 표면 열전달 저항을 배제하고, 순수 벽체 구조 자체의 열성능을 측정할 수 있는 기법을 정립하고, 해당 기법의 Mock-up 실험을 통해 신뢰도 수준을 평가하였다.

II. Theoretical Study

A. 연구동향

1990년을 기점으로 건물 외피의 열성능에 대한 관심이 높아지면서 관련 연구가 많이 수행되었으며, 측정기법에 대한 정립이 많이 이루어 졌다. 국내에서는 현장에서 기존 건물 벽체의 열성능을 평가하는 연구가 수차례 수행되었으며, 허은지 등 [8]은 벽체의 구성에 따라 오차율을 낮출 수 있는 온도차 범위에 대해 연구하였고, 김서훈 등 [9]은 ASTR (Air-Surface Temperature Ratio)법을 이용한 정량적 분석방법을 통해 새로운 측정방법을 제시하였으나 그 오차율이 17-20%에 달하는 것으로 분석했다. 노상태 [10]는 다수의 열류센서를 이용한 실험을 통해 기존 실험방법들이 실내·외 온도차에 따라 신뢰도가 하락할 수 있다는 문제점을 제기하였다. 마지막으로 고명진 등 [11]은 벽체의 축열 효과를 위한 보정계수를 산정하여 측정시간을 단축할 수 있는 방법을 제시하였다.

하지만 현재 국내·외로 수행되고 있는 대부분의 현장 벽체 열성능 측정방법에 대한 연구는 기존에 정립되어 있는 실험방법의 오차율을 줄이거나 신뢰성을 높이는 방법에 대한 연구가 대부분으로, 현장에 있는 벽체와 설계 및 인증에 계산되는 이론값과의 의미 있는 비교를 수행한 연구는 미진한 실정이다.

B. 기존의 벽체 열성능 평가 방법

1) CAM (Calculation Method)

CAM은 ISO-6946[12]에서 규정하고 있으며 정상상태에서 표면 열전달저항과 구성 재료의 열저항을 합산하여 그 역수로 열관류율을 산출하는 방법이다.

$$R_T = R_{si} + \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{se} \quad (1)$$

$$U_{design} = \frac{1}{R_T} \quad (2)$$

CAM을 적용하기 위해서는 구조체의 구성 및 재료의 물리적, 열적 특성을 정확히 알아야 하며, 표면 열전달 저항은 국가 표준에서 정해지고 있으므로, 실제 건물에서의 표면 열전달저항과 차이가

날 수 있다. 이렇게 계산된 값은 그 수치만으로 열관류율의 척도로 사용될 뿐 실제 현장에서의 열관류율을 나타내는 것은 아니다.

2) ASTR Method

ASTR법은 구조체가 정상상태일 때 구조체를 통한 열류량과 실내 공기층에서 실내 구조체 표면으로 전달되는 열류량과 동일하다는 가정에 기반을 두어 제안되었다.

$$U_{design}(T_{in} - T_{out}) = \frac{1}{R_{si}}(T_{in} - T_{si}) \quad (3)$$

$$U_{design} = \frac{1}{R_{si}} \left[\frac{(T_{in} - T_{si})}{(T_{in} - T_{out})} \right] \quad (4)$$

분석을 위해 실내공기온도, 실내표면온도, 실외온도만을 측정하므로 필요한 측정기기는 온도센서밖에 없는 매우 간단한 방법이다. 하지만 현장의 구조체 표면 열전달을 또는 구조체 표면 열전달 저항을 정밀하게 측정할 수 있는 방법이 없기 때문에 표준값을 기준으로 계산하며, 일반적으로 현장과 표준의 표면 열전달율의 차이로 인해 오차가 발생한다.

3) HFM Method

HFM 실험방법은 ISO-9869-1에서 규정하고 있는데 일반적으로 실내의 온도 및 열류량을 장시간에 걸쳐 측정한다. 구조체가 정상상태를 가정해야 하므로 최소 72 시간 이상의 측정 기간을 요하며, ISO-6946에서 규정하고 있는 CAM이론적 방법을 실험으로 그대로 옮겨 놓은 방법으로, 현재 세계적으로 건물 구조체의 현장 열관류율 평가에서 대표적으로 사용되고 있다.

$$U_{design} = \frac{q}{(T_{in} - T_{out})} \quad (5)$$

하지만 이 실험방법은 현장 벽체의 열관류율을 비교적 정확하게 산정할 수 있으나, 실험 결과에 이미 측정되어 있는 표면 열전달저항 계수 때문에 이론적 값과 비교할 수 없게 된다.

C. 본 논문에서 제안하는 벽체 열성능 평가 방법

본 논문에서는 구조체가 정상상태일 때 구조체를 통한 열류량과 실내·외 표면 열전달 저항을 제외한 구조체 자체를 통한 열류량이 같다는 ASTR방식의 기본 이론과 세계적으로 가장 대표적으로 사용되고 있는 HFM방식을 이용하여 현장에서 가장 큰 변수가 되고 있는 실내·외 표면 열전달 저항을 배제하고, 구조체 자체의 열전달 저항만을 측정할 수 있는 제안한다.

$$R_c = \frac{T_{si} - T_{se}}{q} \quad (6)$$

$$R_T = R_{si} + R_c + R_{se} \quad (7)$$

$$U_{design} = \frac{1}{R_T} \quad (8)$$

이때 실제 현장에서 측정하여 산출할 수 있는 값은 Thermal Conductance 값이 되므로, 이 값과 에너지절약 설계기준에서 제시하고 있는 실내·외 열전달저항 상수를 조합하여 최종적으로 벽체의 열관류율을 산정하게 된다.

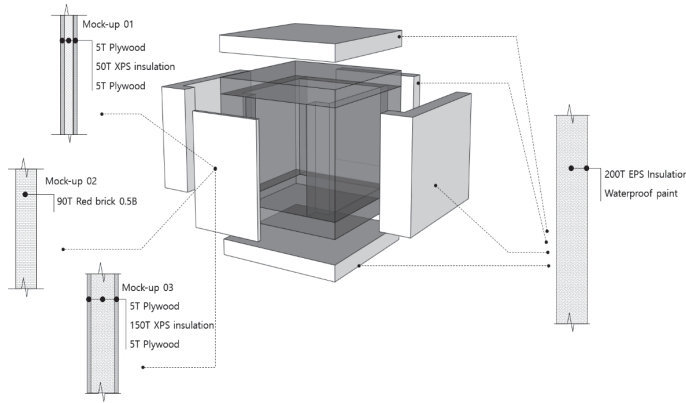


Fig. 1. 현장 Mock-up의 부위별 상세.

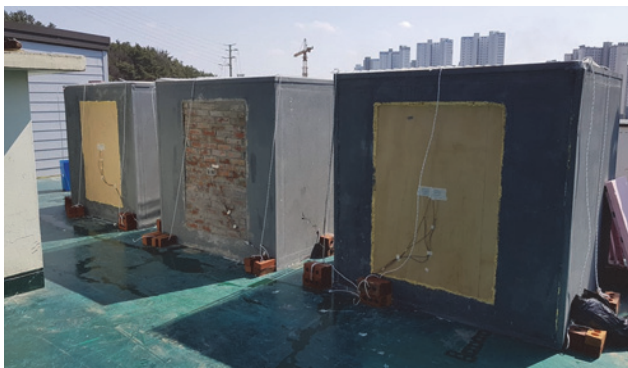


Fig. 2. 현장 실험오차 분석을 위한 Mock-up의 전경.



Fig. 3. 현장 실험오차 분석을 위한 센서 및 장비.

이를 위한 실험조건은 다음을 만족하여야 한다: 1) 실내를 실험 시간동안 항상 실외보다 10°C 이상 높게 유지하여야 한다; 2) 벽체 실내표면에 열류센서를 적용하고, 벽체와 비슷한 방사율을 갖는 재질로 마감한다; 3) 실내·외 표면에 온도센서를 적용하고, 복사 영향을 최소화 하기위해 방사율이 낮은 재질로 마감 후 대류에 의한 직·간접 영향권에서 벗어날 수 있도록 조치한다; 4) 벽체 내부 온도구배가 정상상태에 이를 때까지 실험을 지속하고, 그 결과를 실시간으로 확인할 수 있는 경우 값에 수렴할 실험을 지속한다.

TABLE 1
현장 검증용 Mock-up에 적용된 구조체의 구성 및 물성치

구성 재료	두께 [mm]	열전도율 [W/m·K at 20°C]	밀도 [kg/m ³]	비열 [J/kg·K]
Plywood	5	0.130	500	1,600
XPS insulation	50	0.028	30	1,000
XPS insulation	150	0.028	30	1,000
Red brick	90	0.600	1,350	840

TABLE 2
Mock-up에 적용된 센서 및 장비 제원

	Product name	Specification	Error range
T type T/C sensor		-250 to 400°C	±1.0°C
Data Logger	GRAPHTEC GL 840	Voltage	±0.05%
		Temperature	±0.6°C
Heat flux sensor	EKO MF-200	-	±2 %
Heater	HSR-1500GH	1.5 kW	-
Heating controller	UT55A	PID 제어 컨트롤러 (온도센싱 자동제어)	

TABLE 3
CAM에 의해 계산된 각 구성 재료의 열저항 및 구조체의 R_c값

Mock-up 01		Mock-up 02		Mock-up 03	
구성 재료	열저항	구성 재료	열저항	구성 재료	열저항
Plywood 5 mm	0.038 m ² ·K/W	Redbrick 90 mm	0.150 m ² ·K/W	Plywood 5mm	0.038 m ² ·K/W
XPS 50 mm	1.786 m ² ·K/W			XPS 150mm	5.357 m ² ·K/W
Plywood 5 mm	0.038 m ² ·K/W			Plywood 5mm	0.038 m ² ·K/W
R _c	1.863 m ² ·K/W	R _c	0.150 m ² ·K/W	R _c	5.434 m ² ·K/W
U-value	0.496 W/m ² ·K	U-value	3.300 W/m ² ·K	U-value	0.179 W/m ² ·K

III. Experimental Study

A. 실험개요

실험은 현장 오차 검증을 위해 실제 외벽과 같이 변화하는 외기온에 노출시킬 수 있고, 실험결과를 CAM과 비교할 수 있도록 재료의 물성과 구성을 계획하여 3개의 Mock-up을 제작하였다.

각각의 Mock-up은 1,700 mm (W) × 1,700 mm (D) × 1,700 mm (H)로 외벽 및 바닥, 천정 모두 200 mm EPS로 이루어져 있으며, 외부에는 방수 페인트가 칠해져 있다. 일사의 영향을 받지 않는 북측 벽체 중앙부 가로 900 mm 세로 1,300 mm에 실험을 위한 3종류의 벽체를 적용하였다. TABLE 1은 Mock-up에 적용된 구조체의 구성 및 열적 물성값을 나타낸다.

Mock-up에 적용된 모든 실험 벽체는 Mock-up과의 유격이 발생하지 않도록 우레탄폼으로 마감하였다. 또한 붉은 벽돌로 구성된 조적조 구조를 제외한 단열재구조는 양 면이 5 mm 두께 합판으로 마감되었다. Fig. 2는 완성된 Mock-up의 전경을 나타낸다. 실험 벽체가 위치한 방향은 일사의 영향을 최소화하기 위해 북쪽을 향하게 계획되었다.

Fig. 3은 Mock-up에 적용된 실험 장비로 Deadband 범위를

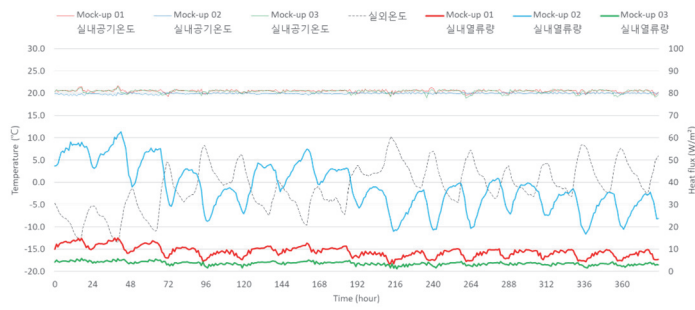


Fig. 4. Mock-up 현장 실험기간 동안의 실내 및 외기온도, 열류량.

TABLE 4

실험 결과에서 도출된 R_c 값 및 최종 계산된 벽체의 U-value 값

구분	Mock-up 01	Mock-up 02	Mock-up 03
R_c [$m^2 \cdot K/W$]	1.97	0.17	5.46
U-value [$W/m^2 \cdot K$]	0.47	3.10	0.18

$\pm 1^\circ C$ 이내로 유지시킬 수 있도록 별도로 제작된 컨트롤러에 연결된 실내 가열기와 T-type T/C 센서, 열류량계 및 데이터 저장용 위한 로거를 나타낸다. 각각 설비의 제원은 TABLE 2와 같으며, 각 센서는 모두 실험 벽체의 정 중앙에 위치하도록 설치되었다.

B. 실험결과 및 분석

a) CAM 분석 결과

먼저 ISO-6946의 Calculation Method를 이용하여 본 구조체의 R_c 값을 산정하였다. 각 부재의 열저항 및 전체 구조체의 R_c 값은 TABLE 3과 같이 계산되었다.

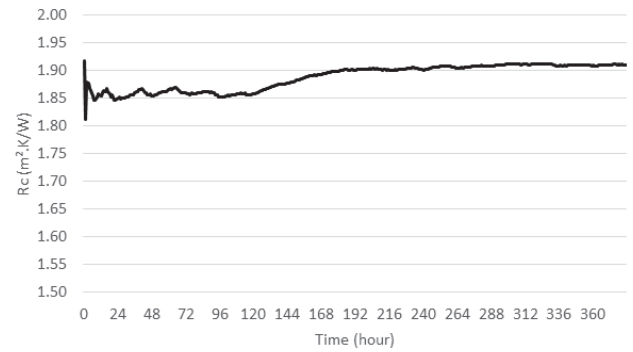
구성 재료의 열전도율은 ISO-10456 [13]의 값을 이용하였다. 50 mm XPS로 이루어진 Mock-up 01의 R_c 값은 $1.86 m^2 \cdot K/W$, 붉은 벽돌 0.5B 길이쌓기로 이루어진 Mock-up 02의 R_c 값은 $0.15 m^2 \cdot K/W$, 150mm XPS로 이루어진 Mock-up 03의 R_c 는 $5.43 m^2 \cdot K/W$ 로 분석되었다. 또한 에너지 절약 설계기준에서 제시하는 실내측 표면 열전달저항 상수 $0.11 m^2 \cdot K/W$ 및 실외측 표면 열전달저항 상수 $0.043 m^2 \cdot K/W$ 를 이용하여 최종 열관류율을 산정한 결과 Mock-up 01부터 03까지 각각 $0.50, 3.30, 0.18 W/m^2 \cdot K$ 의 결과를 보였다.

b) 제안하는 방법에 의한 실험 결과

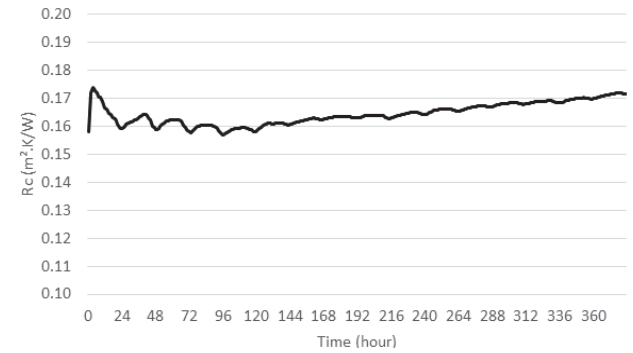
검증 실험은 3개의 Mock-up에 대해 동시에 측정하였고, 실험 방법의 검증 오차를 줄이기 위해 실험기간은 총 383 시간동안 진행되었다. 각 Mock-up은 실험기간동안 동일한 실내온도를 유지하였으며, Fig. 4는 실험기간 동안의 실내온도, 외기온도, 그리고 열류량을 도식한 것이다.

실험기간동안 실내온도는 $20^\circ C$ 로 유지되었으며, 실외온도는 최저 $-15^\circ C$ 에서 $10^\circ C$ 로 실내외 온도차 $10^\circ C$ 이상을 유지시키도록 하였다. 열류량은 일반적으로 실내외 온도차가 커질 때 증가하는 모습을 보였으며, CAM에 의해 계산된 R_c 값이 낮아질수록 큰 열류량이 측정된 것으로 분석되었다.

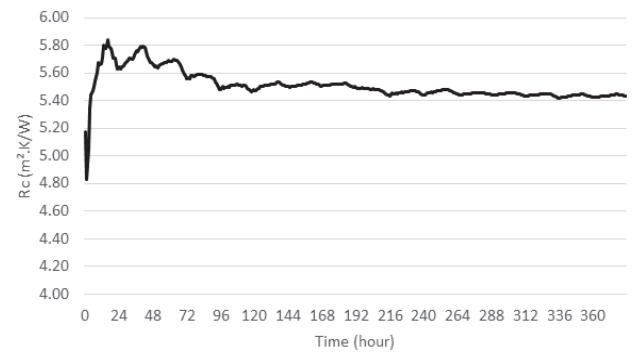
Fig. 5(a)-(c)는 Mock-up 01-Mock-up 03의 누적 시간별 평균 R_c 값을 도식한 것이다. Mock-up 01은 168 시간, Mock-up 02는



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. 각 Mock-up의 실험 결과에 의한 시간별 누적 평균 R_c 값. (a) Mock-up 01, (b) Mock-up 02, (c) Mock-up 03.

120 시간, Mock-up 03은 216 시간 이후를 기점으로 평균값에 수렴하였으며, 최종 산정된 R_c 는 Mock-up 01부터 평균 $1.91 m^2 \cdot K/W$, $0.17 m^2 \cdot K/W$, $5.43 m^2 \cdot K/W$ 로 산정되었다. 이를 이용하여 에너지 절약 설계기준에 명시되어 있는 실내측 표면 열전달저항 상수 $0.11 m^2 \cdot K/W$ 및 실외측 표면 열전달저항 상수 $0.043 m^2 \cdot K/W$ 를 이용하여 최종 열관류율을 산정한 결과 Mock-up 01부터 03까지 각각 $0.47, 3.10, 0.18 W/m^2 \cdot K$ 의 결과를 보였다. 각 Mock-up은 각각 168, 120, 216 시간 후 안정적인 것으로 분석되었지만 실험 개시 후 72 시간이 지난 시점의 데이터와 360 시간 후 데이터가 Mock-up 01-03 각각 3%, 2%, 8% 차이로 72 시간 이후에는 구조체를 정상상태로 가정할 수 있다.

실험에서 구해진 벽체의 열관류율은 현장에서 변하여 산정할 수 없는 외표면 열전달저항이 배제된 결과를 도출하므로 CAM에

의해 구해진 이론적 결과와 직접적으로 비교가 가능하며, Mock-up 01의 경우 이론값에 비해 5.2%, Mock-up 02의 경우 6.2%, mock-up 03의 경우 0.5%의 오차를 갖는 것으로 분석되었다.

IV. Conclusion

본 논문에서는 현장 벽체의 열성능 측정방법에서 ASTR의 이론을 배경으로 HFM실험방법을 변형시켜 현장의 실내·외 표면 열 전달 저항을 배제하고 측정함으로써 실험 결과와 이론적 결과를 직접적으로 비교할 수 있는 실험기법을 정립하여 Mock-up 실험을 통해 오차율을 검증하였다.

한쪽 벽면이 다른 열성능을 갖도록 계획된 3개의 Mock-up을 제작하고, 자재는 물성을 알 수 있는 재료로 구성하여 이론적으로 벽체의 열성능을 알 수 있도록 구성하였다.

검증실험은 3개의 Mock-up에서 동시에 수행되었으며, 총 383 시간동안 진행되었으나 72 시간 이후의 결과값은 72 시간이 지난 시점의 결과와 큰 차이를 보이지 않았다.

실험결과 분석된 벽체의 열관류율은 0.47, 3.10, 0.18 W/m²·K으로 CAM에 의해 구해진 이론적 열관류율인 0.50, 3.30, 0.18 W/m²·K에 비해 각각 5.2%, 6.2%, 0.5%의 오차를 갖는 것으로 분석되었다.

본 연구결과는 3건의 검증만 수행되어 향후 더 많은 조건에서의 검증을 거쳐 현장 벽체의 열화, 시공불량 등에 의한 열성능 저하 여부를 초기 설계단계에서 계획된 열성능과 정밀하게 직접 비교할 수 있는 단계로 발전시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgment

This work was supported by Korea Electric Power Corporation under Grant R16DA08.

References

- [1] Sutton, R., Stafford, A., Gorse, C., "The Co-heating Test: The value of a number, s.l.". Leeds Metropolitan University, Centre for the Built Environment, 2012.
- [2] Hens, H. et al., "Brick cavity walls: a performance analysis based on measurements and simulations," *Journal of Building Physics*, 31(2), pp. 95-124, 2007, <https://doi.org/10.1177/1744259107082685>.
- [3] Rémi BOUCHIE, et al., "Methodologies for the Assessment of Intrinsic Energy Performance of Buildings Envelope, Collaborative Project, Call Identifier," FP7-2013-NMP-ENV-EeB, 2015.
- [4] D. Majcen, L. Itard, H. Visscher, "Theoretical vs: actual energy consumption of labelled dwellings in The Netherlands: discrepancies and policy implications," *Energy Policy*, 54, pp. 125-136, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.11.008>
- [5] ISO, "ISO 9869-1:2014 - Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method," 2014.
- [6] ASTM, "ASTM C1155-95 - Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data," 2013.
- [7] ASTM, "ASTM C1046-95 - Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components," 2013.
- [8] 허은지, 송두삼, "열판법을 이용한 건물단열성능 현장측정 방법에 관한 연구," 한국건축친환경설비학회 논문집, pp. 185-189, 2012.
- [9] 김서훈, 김중훈, "기존 공동주택의 벽체 열성능 현장 측정법에 관한 연구," 한국생태환경건축학회 논문집, 16(4), pp. 71-77, 2018.
- [10] 노상태, "복수센서를 이용한 외단열 건축물의 외피 열관류율 성능 현장 측정 연구," 한국 건축 친환경설비학회 논문집, 11(1), pp. 58-64, 2017.
- [11] 고명진, 최두성, "측열교정법에 의한 공동주택 외벽체 동절기 현장 열 저항과 열관류율 측정 및 분석," 한국생활환경학회지, 24(6), pp. 802-809, 2017.
- [12] ISO, "ISO 6946:2017 - Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods," 2017.
- [13] ISO, "ISO 10456:2007 - Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values," 2007.