

노후 건축물의 벽체 단열성능 분석 방법 비교 (열관류율 계산법과 평균 열류계법)

이수인¹ · 최현중^{2†}

¹한국건설기술연구원 건축에너지연구소, 박사후연구원

²한국건설기술연구원 건축에너지연구소, 수석연구원

Comparison of Thermal Insulation Performance Analysis Methods for Walls in Existing Buildings (Calculation Method of U-value and Average Heat Flow Meter Method)

Lee Suin¹ · Choi Hyun-Jung^{2†}

¹Postdoctoral Researcher, Department of Building Energy Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Senior Researcher, Department of Building Energy Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

[†]Corresponding author: mingineu@kict.re.kr

Abstract

The Korean government is implementing a 2050 carbon neutrality initiative to handle the climate crisis; furthermore, is striving to reduce building energy consumption through zero-energy building construction for new buildings and green remodeling projects for existing buildings. The latter is primarily based on the diagnosis of the thermal performance of the existing building envelope, and this diagnosis can lead to the development of rational energy-saving improvement measures. However, in practice the thermal insulation performance value of the envelope is derived based on the calculation values on the blueprint or the legally required thermal transmittance at the time of completion, which is used for building energy analysis. In this study, the thermal transmittance of the wall was measured based on on-site diagnosis using the ISO 6946:2017 “Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods”. The results were compared with those obtained from the calculation method to be utilized as a basis for analyzing the rational effects of green remodeling.

Keywords: 열관류율(U-value), 그린리모델링(Green remodeling), 계산법(Calculation method), 현장실험(Field experiment)

기호 및 약어 설명

R : 설계 열저항[m²·K/W]



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.43, No.2, pp.33-41, April 2023
<https://doi.org/10.7836/kjes.2023.43.2.033>

pISSN: 1598-6411

eISSN: 2508-3562

Received: 19 September 2022

Revised: 6 March 2023

Accepted: 19 March 2023

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- d : 두께[m]
- λ : 설계 열전도도[W/m·K]
- R_T : 총 열저항[m²·K/W]
- R_{si} : 실내 표면 열저항[m²·K/W]
- R_{se} : 실외 표면 열저항[m²·K/W]
- U : 열관류율[W/m²·K]
- U_{AM} : 평균법에 의한 열관류율[W/m²·K]
- q_i : 열류량[W]
- T_{ij} : 실내 공기온도[°C]
- T_{ej} : 실외 공기온도[°C]

1. 서론

기후 변화에 관한 정부관 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 권고에 따라 전 세계 많은 국가들이 탄소 중립을 선언하고 이를 달성하기 위한 노력과 관심을 기울이고 있다. 이러한 국제적 요구에 맞추어 국내에서도 2050 탄소중립 시나리오를 발표하였다. 그 중 국내 온실가스 총 배출량의 7% (2018년 기준, 간접 배출량 포함 시 24.6%)를 차지하는 건물 분야에서는 건물 에너지 효율 향상 및 수요관리 관점의 정책을 지속적으로 추진하고 있으며, 온실가스 감축 목표를 실현하기 위해 신축 건축물의 경우 제로에너지건축물의 단계적 의무화를, 기존 건축물의 경우 그린리모델링을 통해 건물에너지 절감을 위한 노력을 하고 있다¹⁾. 특히 전체 건축물의 57.8%에 달하는 준공 후 20년 이상 경과된 노후 건축물의 건물에너지 성능 개선을 위한 그린리모델링 사업은 지속적으로 확대되고 있다. 그린리모델링 대상 건축물은 사전 현장 진단을 통하여 에너지 성능 취약 부위를 도출하고, 이를 개선할 수 있는 대안 기술의 적용이 매우 중요하다. 그러나 실제 현장에서는 건물 에너지 개선에 주요한 요인으로 작용하는 외피의 단열성능을 도면에 근거하여 이를 예측하고, 도면이 유실된 경우에는 준공 당시의 법적 요구 열관류율 기준으로 가정하여 건물에너지 분석에 활용하고 있다. 정확하지 않은 외피의 단열성능 추정 은 합리적인 그린리모델링 계획 수립을 저해할 뿐만 아니라 그린리모델링이 완료된 후의 경제적인 에너지 소비에도 영향을 미치며, 합리적인 건물 유지관리(개보수)의 기간과 방법 선정에 영향을 미친다^{2,3)}. 따라서 본 논문에서는 벽체 단열성능을 개선하는 그린리모델링을 수행한 건축물의 외벽체를 대상으로 리모델링 후의 열관류율 현장 측정을 실시하고 이를 계산값과 비교하여 그린리모델링 효과 도출의 기초 자료로 삼고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 실증 대상 및 적용 기술

실증 대상은 G시의 소규모 공공건축물로 준공 15년 이상 된 단층의 경로당이다. 동일한 준공년도, 바닥면적, 평면 형태, 재료 구성으로 이루어진 3개의 개소를 대상으로 선정하여 벽체 단열성능을 개선하는 그린리모델링 공사를 수행하였다. 실증 대상의 도면은 Fig. 1, 리모델링 전 외관은 Fig. 2와 같다. 3개의 실증 대상 중 1개소는 외단열을, 다른 1개소는 내단열을 적용하였고 1개소는 대조군으로 남겨두었다. 실증 대상 개요는 Table 1과 같다.

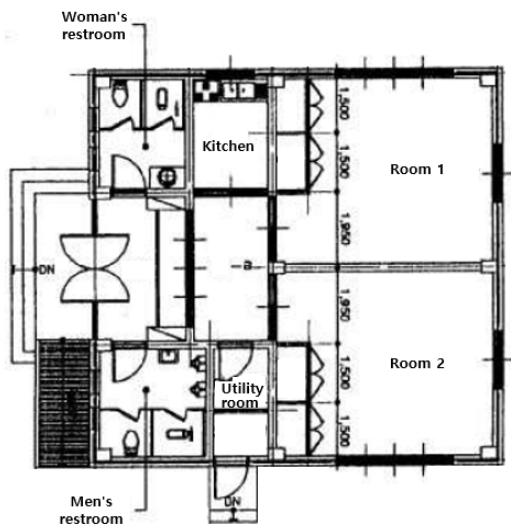


Fig. 1 Floor plan of the experimental buildings



Fig. 2 Exterior of the experimental buildings

Table 1 Experimental buildings overview

	Existing wall	Case A	Case B
Built Year	1997	1997	1997
Floor Area	100.98 m ²	100.98 m ²	100.98 m ²
Section Plan			
Wall Structure	Reinforced concrete 300 mm (ESP 50 mm)	Existing wall + EPS 100 mm	Existing wall + Vacuum Insulation panel 5 mm

2.2 열관류율 산출 및 현장측정 방법

본 연구 대상의 경우 도면이 존재하였으나 약식의 평면도/지붕 평면도만 존재하여 벽체 구성을 확인할 수 없었다. 따라서 현장에서 벽체의 천공부위(에어컨 배관 등)와 틈새를 통한 육안 관찰과 내시경 카메라(Sruton Inskam 112, Pixel: 130 W, Probe diameter: 8.0 mm)로 단열재 종류 파악하고, 두께측정기를 활용하여 단열재 두께를 측정하였다. 측정에 활용된 장비 사진은 Fig. 3과 같다.



Fig. 3 Insulation type and thickness measurement equipment

이후 각 각의 벽체의 이론적인 열저항값 및 열관류율값을 산정하는 방법인 ISO 6946:2017에 따라 열관류율을 산출하였으며, 이는 식(1) ~ 식(3)과 같다⁴⁾. 계산에 활용한 재료별 열전도율은 Table 2와 같다.

$$R = \frac{d}{\lambda} \tag{1}$$

$$R_T = R_{si} + \sum R + R_{se} \tag{2}$$

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum R + R_{se}} \tag{3}$$

Table 2 Thermal conductivity of materials

	Reinforced concrete	EPS (Case A)	EPS (Case B)	Vaccum Insulaion panel
Thermal conductivity (W/m·K)	2.3	0.031	0.037	0.002

벽체의 단열성능 현장측정 방법은 외벽체의 수직 불투명 층에서 측방향 건물 부재로 열전달하는 성질을 이용하여 열류계와 온도 센서를 통해 열류량과 실내·외의 대기온도 및 표면온도를 측정하여 벽체열성능을 평가하는 방법인 열류계법을 선택하였다. 상세 측정 방법 및 조건은 가장 대표적인 ISO 9869-1 : 2014⁵⁾의 평균법을 적용하였다.

평균 열류계법은 실험 측정 시 실내/외 온도차 10°C 이상을 권장하고 있어 동절기(2022.02.18. ~ 2022.03.23.)를 측정 기간으로 선정하였다. 측정 부위는 외기의 영향이 최소인 곳으로 선정하여 T-type 열전대와 온습도계를 설치하였고, 열화상 카메라(Flir E8-XT, 정확도 ±2°C 또는 ±2%)를 통해 해당 벽체의 균질성 확인하여 열교 및 균열이 없고 가열 또는 냉각 장비의 영향이 미치지 않는 부위임을 확인한 후 실내측 벽체에 열류계(Captec Enterprise HFS-50UH, 민감도 0.01092 (mV/(W/m²)))를 부착하였다. 현장에 장비가 설치된 모습은 Fig. 4와 같다.

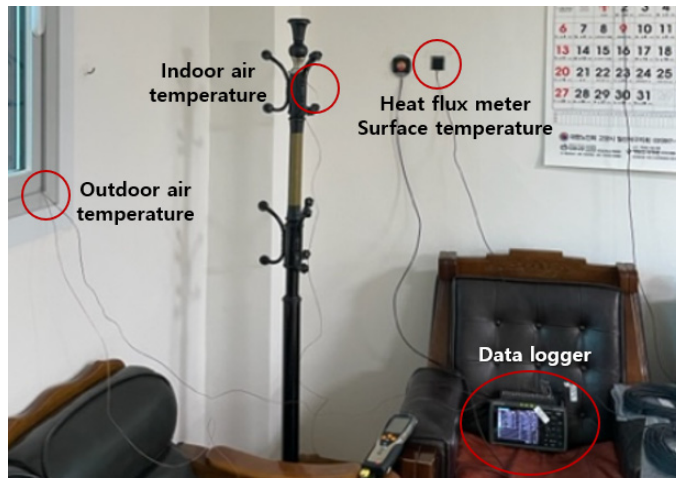


Fig. 4 Installation of measuring equipment

측정 결과를 통해 열관류율을 산출하는 수식은 식(4)와 같다.

$$U_{AM} = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad (4)$$

3. 결과 및 토의

3.1 계산법에 따른 열관류율 산출 결과

ISO 6946:2017에 따라 각 대상별 외벽체의 열저항을 계산하였고, 그 결과는 Table 3과 같다. 이를 바탕으로 열관류율을 산출 결과 기존벽체(Existing wall)는 0.534 W/m²·K, Case A는 0.211 W/m²·K, Case B는 0.135

W/m²·K로 나타났다. 이를 통해 외단열로 EPS 100 mm를 적용(Case A)한 경우 60.2%, 내단열로 진공단열재 5 mm를 적용(Case B)한 경우 58.4% 단열성능이 향상 되는 것으로 계산되었다.

Table 3 Thermal resistance of walls

Thermal resistance (m ² ·K/W)	Internal surface	EPS	Reinforced concrete	External surface	Total	U-value (W/m ² ·K)
Existing wall	0.13	1.613	0.117	0.040	1.874	0.534
Thermal resistance (m ² ·K/W)	Internal surface	Existing wall	EPS (Case A)	External surface	Total	U-value (W/m ² ·K)
Case A	0.13	1.900	2.703	0.040	4.730	0.211
Thermal resistance (m ² ·K/W)	Internal surface	Existing wall	Vacuum Insulation panel	External surface	Total	U-value (W/m ² ·K)
Case B	0.13	1.900	2.500	0.040	7.383	0.135

3.2 평균 열류계법에 따른 열관류율 측정 결과

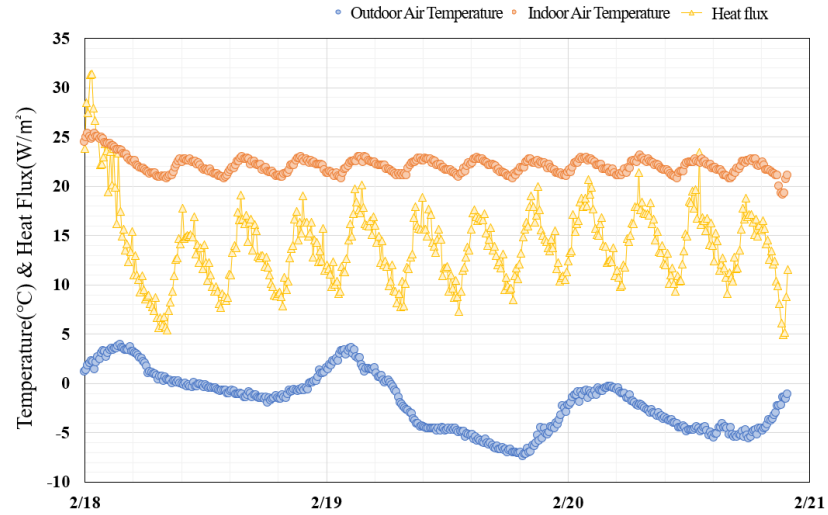
평균 열류계법에 따른 열관류율 산출을 위해 현장측정 결과를 통해 분석기간을 선정하였다. 기존 벽체 (Existing wall)의 측정기간은 4일(2022. 02. 18. ~ 21.)로 외기온도는 평균 -1.9℃, 실내온도는 평균 22.0℃로 나타났다. Case A의 측정기간은 5일(2022. 03. 19. ~ 23.)로 외기온도는 평균 5.7℃, 실내온도는 평균 27.1℃로 나타났다. Case B의 측정기간은 5일(2022. 02. 27. ~ 03. 03.)로 외기온도는 평균 -4.8℃, 실내온도는 평균 21.7℃로 나타났다. 모든 케이스가 열류계법에서 권장하는 실내/외 온도차 10℃ 이상을 만족하여 실험에 적합한 것으로 확인되었다.

ISO 9869-1 (2014)에 따르면 측정기간은 7일 이상을 권장하지만 주변 온도 변화가 안정적일 경우 최소 3일 (72 h)로 기간을 단축할 수 있다. 각 케이스별 전체 측정기간 중 실내/외 온도조건을 비롯하여 열류값의 편차가 적어 측정값이 안정되었다고 판단되는 3일을 선정하여 분석을 수행하였다. Fig. 5은 각 케이스별 실내/외 공기 온도와 열량 측정값을 나타내며, 어둡게 표현된 부분은 열관류율 산출에서 제외된 기간이다.

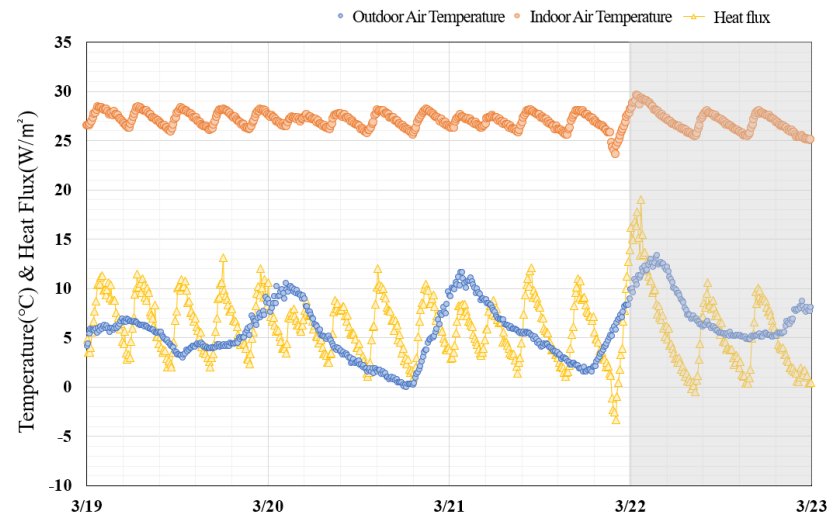
측정값을 바탕으로 열관류율을 산출한 결과 기존 벽체는 0.587 W/m²·K, Case A는 0.299 W/m²·K, Case B는 0.261 W/m²·K로 나타났다. 계산을 통한 예측값과 달리 외단열로 EPS 100 mm를 적용(Case A)한 경우 49.1%, 진공단열재 5 mm를 적용(Case B)한 경우 55.5% 단열성능이 향상되었다.

3.3 계산법과 평균 열류계법에 따른 열관류율 비교

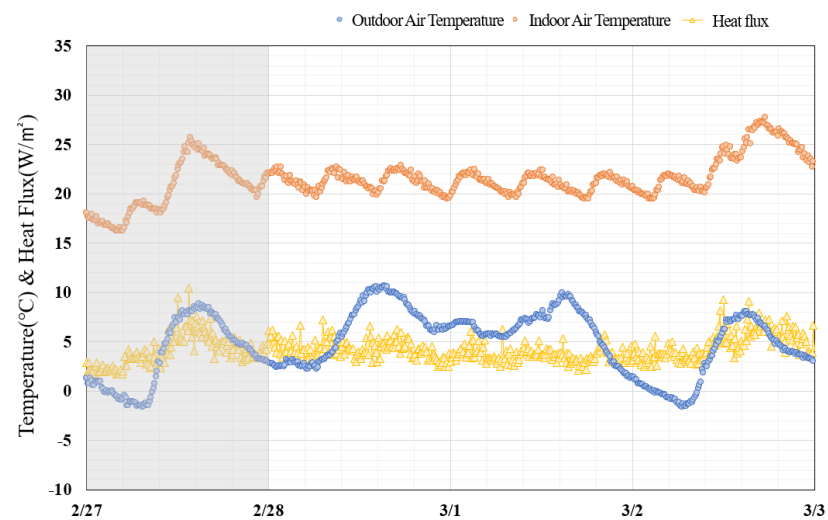
현장진단을 통해 평균 열류계법으로 측정한 외벽체의 열관류율과 계산법을 통해 산출한 열관류율을 비교하였고, 그 결과는 Table 4과 같다.



(a) Existing wall



(b) CASE A



(c) CASE B

Fig. 5 Measurement result (indoor air temperature, outdoor air temperature, indoor surface temperature, heat flux)

Table 4 Thermal transmittance of walls

U-value	Calculation Method (W/m ² ·K)	Heat Fluxmeter method (W/m ² ·K)	Error Rate (%)
Existing wall	0.534	0.587	9.1
Case A	0.211	0.299	29.3
Case B	0.135	0.261	48.1

계산법과 측정법의 오차율은 기존 벽체가 9.1%로 가장 낮았고 Case A가 29.3%, Case B가 48.1%로 나타났다. 오차율 발생의 가장 큰 원인은 계산법이 반영하지 못하는 실제 벽체의 성능 변화(단열재의 경년변화 및 흡습 상태 변화에 따른 물성 변화와 물리적 충격으로 인한 손상, 시공 품질에 따른 불균질성 등)와, 현장 측정 시 주변 환경의 영향(열교, 표면 열전달계수 등) 또한 오차율 발생에 영향을 미친다⁶⁻⁸⁾.

4. 결론

본 논문에서는 외피 열관류율의 측정을 통해 건축물 에너지 성능 분석에 통상적으로 사용되는 계산값과 측정값의 차이를 비교하여 현장측정을 통해 실측한 열관류율값 활용에 대한 필요성을 제시하였다.

G시 경로당 3개소를 대상으로 각 개소별 외단열 EPS 적용, 내단열 진공단열재 적용하는 그린리모델링 공사를 시공하였고 각 케이스별로 평균열류계법을 이용하여 열관류율을 실측한 뒤 계산값과 정량적으로 비교하였다.

그 결과 리모델링 공사를 수행하지 않은 기존 벽체의 경우 계산값이 0.534 W/m²·K, 측정값이 0.587 W/m²·K로 약 9.1%의 오차가 발생하였고, 외단열 EPS를 적용한 Case A의 경우 계산값이 0.211 W/m²·K, 측정값이 0.299 W/m²·K로 29.3%의 오차율이 발생하였다. 진공단열재를 적용한 Case B의 경우 계산값이 0.135 W/m²·K, 측정값이 0.261 W/m²·K로 48.1%의 오차율이 발생하는 것으로 나타났다. 모든 케이스에서 오차율이 발생하였고, 리모델링 후 오차율이 더 커지는 것으로 나타났다. 연구에서 최대 오차율은 48.1%로 나타났지만, Evangelisti (2015)⁹⁾의 선행연구에 따르면 벽체 구성에 따라 계산값과 측정값의 편차는 최대 153%까지 발생할 수 있다.

본 연구에서는 3개의 건물을 대상으로 현장 측정을 수행하여 오차율의 정량적 분석에는 한계가 있다. 그럼에도 불구하고 계산값과 측정값은 편차가 크게 나타나기 때문에, 노후된 건축물의 합리적인 열저항 및 열관류율 예측 방법으로 계산법을 활용하기에 무리가 있을 것으로 판단된다. 현장 측정법 역시 방법으로 활용하기에 무리가 있습니다. 현장 측정법 역시 까다로운 환경조건과 추가적인 비용이 발생하고 오랜 시간이 소요되는 등 여러 한계점이 있지만 현장적용성과 정확도를 높이는 다양한 연구가 수행되고¹⁰⁻¹⁴⁾ 있기 때문에 개선된 현장측정법을 통한 정확한 현황을 반영하고자 하는 노력이 필요하다.

후기

본 연구는 2021년도 국토교통부의 재원으로 도시건축연구 사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(과제 번호 : 21AUDP-B151639-03).

REFERENCES

1. 2050 Carbon Neutrality Commission, 2050 Carbon Neutrality Scenarios, 2021.
2. Majcen, D., Itard, L. C. M., and Visscher, H., Theoretical vs. Actual Energy Consumption of Labelled Dwellings in the Netherlands: Discrepancies and Policy Implications, *Energy Policy*, Vol. 54, pp. 125-136, 2013.
3. Majcen, D., Itard, L., and Visscher, H., Actual and Theoretical Gas Consumption in Dutch Dwellings: What Causes the Differences?, *Energy Policy*, Vol. 61, pp. 460-471, 2013.
4. International Organization for Standardization, ISO 6946:2017 Building Components and Building Elements - Thermal Resistance and Thermal Transmittance - Calculation Methods, 2017.
5. International Organization for Standardization, 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. Lucchi, E., Thermal Transmittance of Historical Brick Masonries: A Comparison Among Standard Data, Analytical Calculation Procedures, and In Situ Heat Flow Meter Measurements, *Energy Build.*, Vol. 134, pp. 171-184, 2017.
7. Albatici, R., Tonelli, A. M., and Chiogna, M., A Comprehensive Experimental Approach for the Validation of Quantitative Infrared Thermography in the Evaluation of Building Thermal Transmittance, *Appl. Energy*, Vol. 141, pp. 218-228, 2015.
8. Albatici, R. and Tonelli, A., On Site Evaluation of U-value of Opaque Building Elements: A New Methodology, *Passive and Low Energy Architecture 2008*, January 2008, Ireland, Dublin.
9. Evangelisti, L., Guattari, C., Gori, P., and Vollaro, R., In Situ Thermal Transmittance Measurements for Investigating Differences between Wall Models and Actual Building Performance, *Sustainability*, Vol. 7, No. 8, pp. 11388-11398, 2015.
10. Siviour, J. B. and McIntyre, D. A., U-value Meters in Theory and Practice, *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, Vol. 3, No. 2, pp. 61-69, 1982.
11. McIntyre, D. A., In situ Measurement of U-values, *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-6, 1985.
12. Doran, S., Safety and Health Business Plan – Field Investigations of the Thermal Performance of Construction Elements as Built, *Building Research Establishment*, 2000.
13. Rasooli, A., Itard, L., and Ferreira, C. I., A Response Factor-based Method for the Rapid In-situ Determination of Wall's Thermal Resistance in Existing Buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 119, pp. 51-61, 2016.
14. Moon, J., Lee, Y., Ko, M., Choi, D., and Kim, Y., Analysis of Convergence Conditions for the Variance of Indoor and Outdoor Temperature Differences of In-site Thermal Resistance by Average Method, *Korean Soc. Living Environ. Sys.*, Vol. 28, No. 1, pp. 95-102, 2021.