



RESEARCH ARTICLE

## 알루미늄스틱 커튼월의 열관류율 측정 방법 비교 분석

김다혜<sup>1</sup> · 김하영<sup>1</sup> · 최소라<sup>2</sup> · 박명규<sup>3</sup> · 김성완<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>(사)한국환경건축연구원 주임연구원, <sup>2</sup>(사)한국환경건축연구원 책임연구원,

<sup>3</sup>(사)한국환경건축연구원 수석연구위원

## Comparative Analysis for Determining Thermal Transmittance of Aluminum Stick Curtain Wall

Kim, Da-Hye<sup>1</sup> · Kim, Ha-Yeong<sup>1</sup> · Choi, So-Ra<sup>2</sup> · Park, Myung-Kyu<sup>3</sup> · Kim, Sung-Wan<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Research Engineer, Korea Research Institute of Eco-Environmental Architecture, Seoul, Korea

<sup>2</sup>Senior Research Engineer, Korea Research Institute of Eco-Environmental Architecture, Seoul, Korea

<sup>3</sup>Research Fellow, Korea Research Institute of Eco-Environmental Architecture, Seoul, Korea

\*Corresponding author: Kim, Sung-Wan, Tel: +82-2-6287-0854, E-mail: swankim4016@naver.com

### ABSTRACT

This study evaluated the error rate of thermal transmittance between actual testing and computer-based heat transfer simulation according to ISO 15099 for curtain wall systems. The results showed that the error rate was below 10%, which indicates a high level of accuracy in the simulation results. This demonstrates that computer-based heat transfer simulations according to ISO 15099 can be effectively used to predict thermal transmittance in curtain wall systems. The findings of this study have important implications for the building industry, as they demonstrate the usefulness of ISO 15099-compliant computer simulations in ensuring energy-efficient building design and reducing energy consumption. The results of this study contribute to the ongoing efforts to improve the sustainability of building design and construction practices.

**주요어** : 커튼월, 열관류율, 단열성능, 컴퓨터 전열해석

**Keywords**: Curtain Wall, Thermal Transmittance, Thermal Performance, Heat Transfer Analysis



Journal of KIAEBS 2023 October, 17(5): 245-257  
<https://doi.org/10.22696/jkiaeps.20230021>

pISSN : 1976-6483  
eISSN : 2586-0666

**Received:** September 3, 2023

**Revised:** September 22, 2023

**Accepted:** October 4, 2023

© 2023 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

현재 국내에서는 건물의 에너지 부하 저감을 위해 고단열, 고기밀, 고성능 창호와 같은 패시브(Passive) 기술 개발에 매진해 왔으며, 건축물의 에너지절약설계기준의 제도적 뒷받침을 통해 보급 활성화를 구현하였다. 건축물의 에너지절약설계기준은 녹색건축물 확대와 온실가스 저감을 위해 건물 설계단계에서부터 에너지 저감 기술 적용을 유도하는 제도이다. 건축물의 열손실을 방지하기 위해 외기에 면한 거실의 벽체, 창, 문 등의 부위는 위 제도의 [별표 1] 인 건축물 부위의 열관류율 기준을 만족해야한다. 여기서 창 및 문의 경우 KS F 2278 창호의 단열성 시험 방법에 의한 시험성적서 또는 당해기준 별표4 창 및 문의 단열성능에 의한 열관류율 값 또는 산업통상자원부고시 효율관리기자재 운용규정에 따른 창 세트의 열관류율 표

시값 또는 ISO 15099 Thermal performance of windows, doors and shading devices, Detailed calculations에 따라 계산된 창 및 문의 열관류율 값이 별표 1의 열관류율 기준을 만족하는 경우 적합한 것으로 본다. 이를 위해 대부분의 프로젝트들은 KS F 2278에 의한 시험성적서로 같음한다. 일반적으로 커튼월 시스템도 2 m × 2 m 크기의 시험체를 제작하여 단열성능 측정을 위한 물리적 시험(KS F 2278, 2022)을 수행한다. 이외 ISO 15099 (2003)에 따른 컴퓨터 전열해석 시뮬레이션을 통해 열관류율을 산출할 경우 시험체의 제작, 운반, 폐기의 과정을 생략하여 시간적·경제적·환경적으로 유리하다. 하지만 이에 대한 절차와 방법이 명확하지 않으며, 특히 제출해야하는 보고서, 도면, 시뮬레이션 입력 값 등 관련 증빙 서류와 수행 주체 및 방법의 기준이 정립되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 커튼월의 열관류율 산출을 위한 물리적 시험과 컴퓨터 전열해석 평가 방법의 비교분석을 통해 각각의 활용방안을 모색하고자 한다.

건물의 경량화에 따른 공기 단축 및 세련된 미관이 특징인 커튼월 시스템 입면은 고정창(Fixed), 개폐창(Vent), 불투명 패널(Spandrel), 프레임(Frame)으로 구분할 수 있다. 건축물의 에너지절약설계기준에서 채광 및 조망이 불가능한 불투명 패널 부위는 외벽의 열관류율 기준에 만족해야한다. 따라서 본 연구에서는 불투명 패널을 제외한 커튼월 시스템의 열관류율을 분석하는 물리적 시험과 컴퓨터 전열해석 평가방법의 특성을 파악하고자 한다. 이를 위한 연구 범위 및 방법은 다음과 같다. 첫째, 물리적 시험과 컴퓨터 전열해석과 관련된 국내·외 열관류율 평가 방법을 고찰하였다. 둘째, 국내 친환경건축물과 관련된 기준 및 커튼월 제품의 데이터베이스 분석을 통해 커튼월 시험체를 제작하였다. 셋째, 도출된 커튼월 시험체의 물리적 시험과 전열해석 시뮬레이션을 수행하여 각 평가방법에 대한 특성을 비교·분석하였다.

## 기존 문헌 고찰

건축법 시행규칙 중 하나인 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 제21조에서 건축물의 열손실 방지를 위해 창 및 문의 지역별 열관류율에 대한 설계기준을 규정하였다. 이후 녹색건축물 조성지원법 행정 규칙 건축물의 에너지절약설계기준(MOLIT, 2023) 제2조 건축물의 열손실 방지 등에서 에너지이용 합리화 조치를 위한 건물 외피 단열 설계기준을 제시하고 있다. 때문에 2000년대 이후로 창 및 문의 단열성능을 향상 및 평가방법과 관련된 많은 연구가 수행되었다. 건물 외피에 요구되는 법적 열관류율 기준이 강화되는 2012년 이후로 관련 연구가 활발히 진행된 것을 알 수 있다. 이러한 점에서 커튼월의 단열성능 평가와 관련된 기존 연구의 목적, 방법, 결과 등에 대한 고찰을 수행하여야 한다.

기존연구에서는 커튼월 보다는 주거건물에 주로 적용되는 이중창에 관한 연구가 활발하였다. 측정방법에 관한 분석보다는 창호 및 커튼월의 단열성능 향상을 위한 구성 재료의 프로파일 기술에 관한 연구가 다루어졌으며, 이를 Table 1에 나타내었다.

Kim and Yim (2012)는 3개의 스틸 커튼월의 열관류율을 EN13947를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과를 실험값과 비교하였다. Koo (2015)은 고성능 창호 제품 개발을 위한 성능 평가 기준에 대한 중요성을 언급하고 있다. 국제표준화 기구(ISO)에서 제시하는 두 가지(ISO 15099, ISO 10077 (2017))방법과 NFRC·EN의 평가기준 및 방법에 따른 차이점을

고찰하였다. 그 후 차이점이 열성능 값에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 물리적 시험 및 시뮬레이션 평가를 수행하고 있다. Kang et al. (2015)와 Lee et al. (2016)는 현행 평가 기준에서 제시하는 물리적 시험( $U_w 1.4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  이상의 경우)과 시뮬레이션 평가방법의 오차 범위가 모든 Case에서  $\pm 10\%$  이내로 오차를 나타나고 있음을 증명하였다. Bugarin et al. (2022)는 커튼월 시스템의 열성능을 계산하기 위해 현재 사용되고 있는 방법론 중 NFRC, ISO의 평가기준을 비교분석하였다. 두 평가 방법에서 가장 큰 차이점은 경계 조건으로 ISO는 커튼월 시스템에 적용된 나사를 통한 열전달 및 외관 요소간의 상호작용과 같은 상세한 접근방식을 정의하고 있으며, NFRC의 경우 문, 창문 등과 같은 표준 건물 요소에 따른 열전달 계산을 계절에 따라 U-factor 값을 적용하여 계산하는 방식을 정의한다. 본 연구에서는 커튼월의 열관류율 값을 도출하기 위해 수행되는 물리적 시험과 시뮬레이션 평가 방법을 비교·분석하여 각각의 활용방안을 모색하고자 한다.

**Table 1.** Literature Review

Year	Author	Product	Purpose	Evaluation Method	Note
2022	Bugarin et al. (2022)	CW	U-Value	Simulation	AM
2020	Park and Park (2020)	CW	U-Value	Simulation	PI
2018	Song et al. (2018)	CW	U-Value	Simulation	PI
2016	Koo and Song (2016)	Window	U-Value	Simulation	PI
2016	Lee et al. (2016)	Window	U-Value	Test/Simulation	AM
2015	Koo (2015)	Window	U-Value	Simulation	AM
2015	Kang et al. (2015)	Window	U-Value	Simulation	AM
2014	Jang et al. (2015)	Window	U-Value	Simulation	PI
2013	Kim and Yim (2012)	CW	U-Value	Simulation	AM
2006	Lee et al. (2006)	Window	U-Value	Simulation	PI

AM=Assessment Methodology; PI=Performance Improvement; CW=Curtain Wall

## 커튼월의 열관류율 측정 개요

### 커튼월 시험체

현재 국내 커튼월 시장에서 사용되고 있는 약 200개 커튼월 시스템 DB 분석을 한 결과 24 mm 이중유리 커튼월의 경우 평균 열관류율은  $1.49 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , 프레임 길이는 약 153.03 mm, 프레임 두께는 약 118.38 mm로 나타났다. 시험체 제작은 이를 바탕으로 시험체의 입면형상, 재질, 유리 등을 선정하여 Figures 1, 2와 같이 2가지 시험체를 제작하였다. KS F 2278 기준의  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  크기의 시험체와 국내 물리적 시험에서 적용할 수 있는 최대 크기인  $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  시험체를 제작하여 커튼월의 단열성능을 산출하였다. 커튼월의 경우 건물 입면 전체에 적용되어 유리 면적이 비교적 넓게 적용되므로 이에 대한 고려가 필요하다.

시험체는 알루미늄(Aluminium) 프레임으로 제작되었으며, 유리는 24 mm 복층 Low-E 유리(5LE+14AR+5CL)를 사용하였다. 개폐창 면적은 ‘건축용 고효율에너지기자기재 보급촉진에 관한 규정(MOTIE, 2021)’에 따라 커튼월 전체 면적의 12.5% 이상이 되도록 구성하였고

스윙도어 형태로 구성하였으며, 이는 Table 2에 나타내었다. 시공방식은 트랜섬과 멀리언을 가공하여 현장에서 개별적으로 조립하는 스틱(Stick) 커튼월 방식을 적용하였다.

커튼월 프레임의 입면은 Head Space, Rabbet Space, Cover Space로 구분되며, 이는 Figure 3에 나타내었다. Head Space와 Cover Space 내부에는 실내·외 온도차 발생 시 커튼월 시스템을 통한 열교를 차단하기 위해 폴리아미드(Polyamide) 재질의 열교차단재(Thermal Break)를 설치하였다. Rabbet Space 내부에는 폴리염화비닐(PVC; Poly Vinyl Chloride) 재질의 열교차단재를 설치하여 단열을 강화하였다. 이중 유리의 중공층에는 크립톤(Krypton)에 비해 열전도율은 높지만 공기(Air)보다는 단열능력이 좋은 아르곤(Argon) 가스를 충전하였다. 중공층을 지지하는 단열 간봉(Spacer)은 합성수지 재질을 적용하였고, 간봉 내부에는 습기를 제거할 수 있는 제습제(Desiccant)를 삽입하였다.

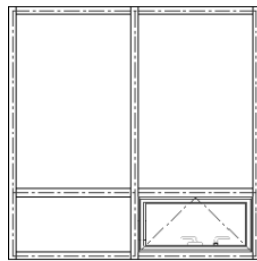


Figure 1. 2 m × 2 m

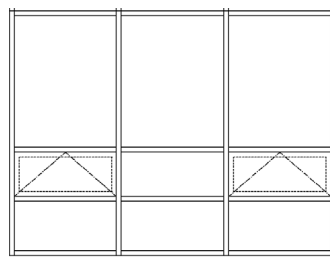


Figure 2. 4 m × 3 m

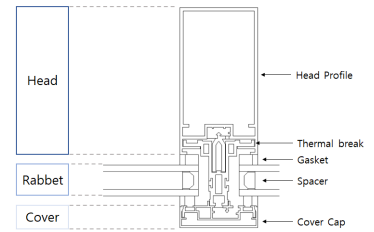


Figure 3. Description of Curtain Wall System

Table 2. Detailed Information of Curtain Wall Specification

Classification	2 m × 2 m	4 m × 3 m
Total Area	4 m <sup>2</sup>	12 m <sup>2</sup>
Glazing Area	3.2 m <sup>2</sup> (80%)	10 m <sup>2</sup> (83%)
Frame Area	0.8 m <sup>2</sup> (20%)	2 m <sup>2</sup> (17%)
Swing to Fix Glazing	0.5 m <sup>2</sup> (12.5%)	1.57 m <sup>2</sup> (13.1%)
Frame Depth × Width	170 mm × 60 mm	170 mm × 60 mm
Glazing Thickness & Layers	24 mm (5LE+14AR+5CL)	24 mm (5LE+14AR+5CL)

LE = Low-E glass, AR=Argon, CL= Clear glass

### 물리적 시험

국내 커튼월 시스템의 단열 성능 평가는 KS F 2278 시험방법을 기준으로 적용하고 있으며 국가공인시험기관의 KOLAS 인정마크가 표시된 열관류율 시험성적서를 제출해야 한다. 이를 위해서는 가열 장치, 기류 교반 장치, 보호 열상자, 복사차단판, 가열·기류 교반 장치용 전력 측정기를 갖춘 항온실과 냉풍 취출 장치가 설치된 저온실로 구성된 시험 장치가 필요하다.

KS F 2278 시험방법은 보호 열상자 내부의 공기 온도를 20°C로 유지하기 위해 공급되는 열량과 시험체를 통해 빠져나가는 열량의 차이(W), 항온실과 보호 열상자 내의 공기 온도차(°C), 시험체 면적(m<sup>2</sup>), 저온실 측과 보호 열상자 측 표면 열전달저항 값(m<sup>2</sup>·K/W)을 통해 열관

류저항을 도출한다. 저온실과 보호 열상자 측 표면 열전달 저항의 설정에서 표준판 양쪽 표면 열전달 저항의 합이  $0.16 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 이 되지 않는 경우 보정한다. 이는 equation 1, 2에 나타내었다. 열관류 현상에서 열이 이동하기 어려운 정도를 의미하는 열관류저항 값의 역수로 열관류율을 구할 수 있으며 equation 3에 나타내었다.

$$R = \frac{(Q_{Ha} - Q_{Ca}) \cdot A}{Q_H + Q_F - Q_I} + \Delta R \tag{1}$$

$$\Delta R (\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}) = 0.16 - (R_i + R_o) \tag{2}$$



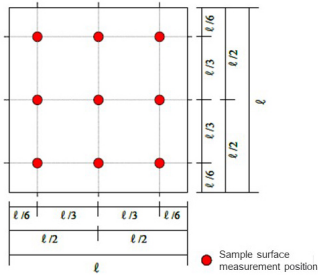
- |  |                                |
|--|--------------------------------|
| $A$ : 시험체 면적( $\text{m}^2$ )   | $Q_{Ha}$ : 가열 상자 내 평균 공기 온도(K) |
| $R$ : 열 관류 저항( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ )                | $Q_{Ca}$ : 저온실 내 평균 공기 온도(K)   |
| $R_i$ : 실내 표면 열 전달 저항( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ )        | $Q_F$ : 기류 교반 장치 공급 열량(W)      |
| $R_o$ : 실외 표면 열 전달 저항( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ )        | $Q_I$ : 교정 열량(W)               |
| $\Delta R$ : 표면 열 전달 저항의 보정값( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ) | $Q_H$ : 가열 장치 공급 열량(W)         |

$$U = \frac{1}{R} \tag{3}$$

$U$ : 열 관류율( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

본 연구에서  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  시험체는 한국토지주택공사(LH)에서 시험을 진행하였으며,  $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  시험체의 경우 한국건설생활환경시험연구원(KCL)에서 수행하였다. 시험체와 시험체 부착틀 사이의 틈새는 우레탄 폼으로 충전하였으며 시험체의 표면온도는 시험체를 9등분한 후 각 영역의 9개의 중앙부 지점에 대하여 T type 열전대를 부착하여 측정하였다. 이는 Table 3과 같다.

**Table 3.** Installation of Test Curtain Wall

2 m × 2 m	4 m × 3 m	Surface Temperature Measurement Location
		

보호 열상자와 향온실의 온도는 가열장치를 이용하여  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하도록 설정하였으며, 저온실의 경우 냉방기기를 사용하여  $0 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 설정하였다. 균일한 내부 온도 분포 및 시

협체의 표면열전달저항을 일정 범위 내에서 유지하기 위해 송풍기의 기류를 평균 2 m/s 속도로 가동하였으며, 이는 Table 4에 나타내었다. 열관류율을 산출에 필요한 각 실의 공기온도는 가열상자 내 9지점의 평균 공기온도와 저온실 내 9지점의 평균 공기온도를 측정하였다. 공기온도 및 열량의 측정은 정상상태가 된 후 30분 간격으로 3회 측정된 온도 및 열량의 평균값을 활용하였다. 이 때 물리적 시험을 통한 시험체 크기, 측정 온도 기준, 보정열량 산출 기준 등과 같은 주요 측정 요소는 시뮬레이션 입력 값으로 고려해야 한다.

**Table 4.** Information on Guarded Hob Box Configuration

Item	Content	Note
Opening of Guarded Hot Box	2 m × 2 m , 4 m × 3 m	-
Temperature Measured (°C)	Air Temperature	-
Temperature of Metering Box (°C)	20 ± 1	-
Temperature of Cold Box (°C)	0 ± 1	-
Total Surface Heat Transfer Resistance (m <sup>2</sup> K/W)	0.16	-
Air Flow (m/s)	2.0	-

### 컴퓨터 전열해석

현재 에너지절약설계기준에서 창 및 문의 단열성능 판정을 ISO 15099에 따라 개발된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 계산된 열관류율 값으로 한다. 일반 창호 시스템의 경우 개폐창, 고정창, 프레임 등으로 구성되어 있으며, 커튼월 시스템의 경우 개폐창, 고정창, 수직부재(Mullion), 수평부재(Transom), 불투명 패널(Spandrel) 부위로 구성되어 있다. 각 부위의 구성 재료와 형상이 다른 부재가 접하는 부위에는 열교가 발생한다.

이에 대한 열류량 계산을 ISO 15099에서는 선형열교에 의한 열관류율 계산 방법과 대체접근법을 제시하고 있다. 대체접근법은 선형열교 길이와 선형열관류율에 따른 열류량의 기준치 대신 모든 프레임에서 63.5 mm이내의 유리 모서리 부분의 열관류율, 유리 중앙 부위의 열관류율, 프레임의 열관류율을 면적으로 가중 평균하여 측정한다. 이는 ANSI/NFRC 100에서 제시하고 있는 면적가중 열관류율 측정방법(U-Factor Area Weighting)과 동일하다. 각 산출 방법의 차이는 아래의 equation 4, 5을 통해 확인 할 수 있다.

$$U_t = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_f U_f + \sum l_{TJ} \Psi_{TJ}}{\sum A_g + A_f} \quad (4)$$

$$U_t = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_f U_f + \sum A_{eg} U_{eg}}{\sum A_g + A_f + \sum A_{eg}} \quad (5)$$

$A_g$  : 유리 중앙 부위 면적(m<sup>2</sup>)

$A_f$  : 프레임 면적(m<sup>2</sup>)

$A_{eg}$  : 유리 모서리 부위 면적(m<sup>2</sup>)

$U_t$  : 총 열관류율(W/m<sup>2</sup>·K)

$U_g$  : 유리 중앙 부위 열관류율(W/m<sup>2</sup>·K)

$U_f$  : 프레임 열관류율(W/m<sup>2</sup>·K)

$l_{TJ}$  : 선형열교 발생 길이(m)

$U_{eg}$  : 유리 모서리 부위 열관류율(W/m<sup>2</sup>·K)

$\Psi_{TJ}$  : 선형열관류율(W/m·K)

커튼월 시스템의 경우, 일반 창호와 달리 수직·수평부재 및 불투명 패널 부위가 추가되며 유리 면적이 비교적 넓게 적용되므로 이에 대한 고려가 필요하다. 또한 지정하는 표준부위가 커튼월 입면 전체의 단열성능을 대표할 수 있어야 한다. 하지만 현재 국내에서 컴퓨터 전열해석을 통한 열관류율 산출 시 이러한 커튼월 시스템의 특성을 반영하지 않고, 일반 창호와 같은 계산방법을 사용하고 있다.

이를 위한 계산방법으로 ISO 12631이 개발되었으며, 불투명 패널을 포함한 커튼월 시스템의 모든 부위와 구성부위의 접합부를 고려한 계산방법을 명시하고 있다. 이 표준에서는 크게 단일 평가 방법(Single Assessment Method)과 구성 요소 평가 방법(Component Assessment Method)으로 구분하고 있다. 단일 평가 방법은 길이 관련 선형열관류율(Length-related Linear Thermal Transmittance)과 면적 관련 열관류율(Area-related Thermal Transmittance)으로 구분한다. 이는 이질 재료 접합으로 열교 발생이 가능한 가장자리의 열류량을 면적과 선형 열교 길이와 관련하여 평가함을 의미한다. 구성 요소 평가 방법은 유닛, 불투명 패널 및 프레임과 같이 열 특성이 다른 요소로 나누어 선형열관류율의 가중치를 부여하여 전체 파사드의 열관류율을 계산한다. 이는 반복되는 커튼월 시스템 입면 중 선정된 표준부위의 열관류율이 전체 커튼월 입면의 열관류율을 대표할 수 있음을 의미한다.

본 연구에서의 시험체의 경우 불투명 패널이 제외되었으며 국내에서 인정되는 기준에 따라 ISO 15099를 적용한 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 커튼월 시스템의 열관류율을 산출하였다. 2차원 열전달 현상 해석은 Window/Therm v7.8, 3차원 열전달 해석은 Physibel Trisco v12을 사용하였다. 가중법을 통해 열관류율 산출하였으며, 3차원 전열해석에서는 선형열관류율에 의한 열류량과 공기온도를 해석하여 열관류율을 산출하였다. 선형열교를 포함한 열관류율의 값은 equation 6 ~ 8을 통하여 구해진다.

$$U_{eq} = \frac{Q}{\Delta T \cdot A} \quad (6)$$

$$U_{eq} = U_i + \frac{\sum_j l_{Tj} \Psi_{Tj}}{A} \quad (7)$$

$$\Psi = \frac{\Phi}{\Delta T} - (U_i \cdot l_i) \quad (8)$$

$U_{eq}$  : 상당 열관류율(W/m<sup>2</sup>·K)

$Q$  : 커튼월 시스템의 총 전열량(W)

$\Delta T$  : 내·외부 온도차(K)

$A$  : 커튼월 시스템의 총 면적(m<sup>2</sup>)

$\Psi$  : 선형 열관류율(W/m·K)

$\Phi$  : 평가대상부위 전체를 통한 열전달량(W/m)

$U_i$  : 열교와 이웃하는 일반부위의 열관류율(W/m<sup>2</sup>·K)

$l_i$  :  $U_i$ 이 적용된 선형 열교의 길이(m)

컴퓨터 전열해석 시뮬레이션 수행 시, 환경설정온도는 KS F 2278의 기준을 따라 실외 측 표면 열 전달율은  $20.0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , 실내 측 표면 열 전달율은  $9.09 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 설정하였다. 각 프로그램에 입력한 커튼월의 재료 물성치에 따른 열전도율 및 방사율은 제조사에서 제공하고 있는 자료를 적용하였으며 Table 5에 나타내었다. ISO 10077-2 Annex A, 건축물에너지절약 설계기준 별표를 통해 제공되는 열전도율 데이터와 비교분석하며 검증절차를 수행하여 입력하였다. 컴퓨터 전열해석 프로그램에 입력한 유리 사양은 Table 6와 같으며 유리의 열전도율은  $1.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , 아르곤의 열전도율은  $0.016 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 이다. 이중유리 중 로이 코팅이 적용된 측면의 유리 방사율은 0.013이며, 이 외의 방사율은 0.837로 동일하다.

**Table 5.** Material Properties of Curtain Wall Specimen

Material	Conductivity (W/m·K)	Emissivity	Material	Conductivity (W/m·K)	Emissivity
Aluminum	160	0.9	Polyurethane Foam	0.05	0.9
PVC	0.17	0.9	Polyethylene	0.5	0.9
Polyamide	0.3	0.9	Gasket	0.25	0.9
Polyurethane	0.25	0.9	Polysobutylene	0.2	0.9
EPS	0.032	0.9	Silica Gel	0.03	0.9
Silicone	0.35	0.9			

**Table 6.** Simulation Input Value of Glazing System

Glazing	5LE+14AR+5CL	Conductivity (W/m·K)	Glass	1.00
			Argon	0.016
Low-E Emissivity (clear glass emissivity)			e1 : 0.837, e2 : 0.013	

## 커튼월의 열관류율 측정 결과 분석

### 물리적 시험 결과 분석

커튼월의 열관류율의 값을 산정하기 위한 변수 중 향온실과 저온실의 공기온도차의 경우  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  시험체 측정 시  $19.67^\circ\text{C}$ ,  $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  시험체 측정 시  $19.51^\circ\text{C}$ 이다. 시험체의 통과열량은  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  시험체 측정에서는  $132.37 \text{ W}$ ,  $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  시험체 측정에서는  $410.35 \text{ W}$ 이다. 이를 통한  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  시험체의 열관류율은  $1.744 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  시험체의 열관류율은  $1.821 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 산출되었으며 Table 7에 나타내었다.  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  시험체가  $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  시험체보다 열관류율이 4.23% 낮게 나타났다.

이 때, 커튼월 시스템의 전체 면적 중 개폐면적의 비율은 Table 2에 따라  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  시험체의 경우 12.5%,  $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  시험체의 경우 13.1%이며 프레임의 면적 비율은  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  시험체의 경우 20%,  $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  시험체는 17%이다. 개폐면적비율의 증가는 개폐창과 이질부위가 접하는 부분이 증가하는 것으로 열교가 발생 가능 부위가 증가한다는 것을 뜻하며, 단열성능 저하 요소가 될 수 있다.



**Table 7.** KS F 2278 Testing Results

Specimen	Temperature			Heat Flux (W)	Thermal Resistance (m <sup>2</sup> ·K/W)	Thermal Transmittance (W/m <sup>2</sup> ·K)
	Metering Box (°C)	Cold Box (°C)	Difference (°C)			
2 m × 2 m	19.62	-0.04	19.67	132.37	0.573	1.744
4 m × 3 m	19.96	0.45	19.51	410.35	0.549	1.821

KS F 2278 시험방법에서 정상상태(Steady-State)란 가열 장치의 설정 전력을 변경하지 않고 공기 온도, 표면 온도가 감소 또는 계속 증가함이 없이 거의 일정하며 가열 상자와 저온실 간의 공기 온도차의 변동이 1시간당 온도차의 3% 이내인 상태를 말한다. 이는 가열상자 내 히터 및 팬의 전력공급량, 시험체 양측의 공기온도 등이 시험체의 단열성능에 영향을 주는 것을 의미한다.

보호 열상자 벽체와 시험체 부착틀 측면을 통해 흐르는 열량을 최소화 시키는 조건(Adiabatic) 하에 가열장치를 통해 공급되는 열량을 측정하고, 커튼월 시험체를 통과한 열량을 산정한다. 즉, 가열장치를 통해 향온실과 보호열상자 내부의 온도가 일치시켜 보호열상자와 향온실간의 열류량과 시험체와 시험체 부착틀 간의 열류량이 발생하지 않게 한다. 이 상태에서 시험체 통과 열량과 보호 열상자에 공급되는 열량은 동일하게 되며, 이 때 커튼월 시험체를 통과한 열량을 산출한다. 실제 측정에서는 보호열상자와 향온실간의 열류량과 시험체와 시험체 부착틀간의 열류량이 발생하므로 이에 대한 보정이 필요하며 equation 9에 따라 측정값을 산출하게 된다.

$$Q_n = Q_t - Q_1 - Q_{s1} \quad (9)$$

$Q_n$  : 보호열상자와 시험체 부착틀의 교정열량(W)     $Q_1$  : 가열상자 교정 열량(W)

$Q_t$  : 가열 장치 공급 열량(W)

$Q_{s1}$  : 시험체 부착틀 교정열량(W)

가열 상자와 저온실을 정상상태로 유지하기 위한 냉풍 취출 장치 및 가열장치의 가동은 내부 공기온도 분포에 영향을 주며, 송풍기의 가동으로 인한 기류 및 습도의 변화가 발생하는 등 자연현상의 개입으로 정상상태 구현이 어렵다. 또한 단열성능 평가 시 시험장비 제어성능 및 정상상태 판단하는 시험을 진행하는 자의 숙련도, 시험 진행을 위해 시험체와 시험체 부착틀 사이에 우레탄폼을 충전하는 시공자의 숙련도도 고려해야 한다.

### 컴퓨터 전열해석 결과 분석

컴퓨터 전열해석에서는 요구되는 환경조건을 명확하게 구현하여 열관류율을 산출하므로 프로그램에 입력하는 변수들은 타당성을 가져야한다. 특히 전열해석 수행주체의 숙련도에 따라 결과 값이 달라질 수 있어 전열해석 수행주체와 검토 방법의 기준이 필요하다. 컴퓨터 전열해석은 고체와 유체에 연결된 열 이동에 따른 모든 열류량을 통한 열관류율 산출을 위해 ISO 10211의 평가기준을 이용하였다.

전술한 바와 같이 컴퓨터 전열해석은 2차원과 3차원으로 진행하였다. Table 8에 따른 면적

가중법(2D)에 의한  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$  시험체의 열관류율은  $1.696\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , 열전달저항은  $0.589\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ 으로 산출되었다.  $4\text{ m} \times 3\text{ m}$  시험체의 경우 열관류율은  $1.645\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , 열전달저항은  $0.608\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ 으로 산출되었다. 한편 Table 9에 따른 선형열관류율(3D)에 의한  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$  시험체의 열관류율은  $1.680\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  열전달저항  $0.595\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ 로 나타났으며,  $4\text{ m} \times 3\text{ m}$  시험체의 경우 열관류율은  $1.660\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , 열전달저항은  $0.602\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ 로 나타났다. 선형열관류율에 의한 시험체를 통과한 열류량은  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$  시험체의 경우  $134.43\text{ W}$ ,  $4\text{ m} \times 3\text{ m}$  시험체의 경우  $398.33\text{ W}$ 로 산출되었으며, Table 9에 나타내었다.

**Table 8.** ISO 15099 Computer Simulation Results (Area Weighting Calculation - 2D)

Component	Part	$2\text{ m} \times 2\text{ m}$			$4\text{ m} \times 3\text{ m}$			
		U-Value ( $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ )	Area ( $\text{m}^2$ )	Heat W/K	U-Value ( $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ )	Area ( $\text{m}^2$ )	Heat W/K	
1	Fix Head	Frame	3.031	0.109	0.33	3.000	0.226	0.68
		Edge	1.618	0.112	0.18	1.912	0.215	0.41
2	Fix Mullion	Frame	4.400	0.088	0.39	4.457	0.288	1.28
		Edge	1.836	0.167	0.31	1.846	0.564	1.04
3	Fix Sill	Frame	2.971	0.055	0.16	3.131	0.226	0.71
		Edge	1.846	0.056	0.10	1.821	0.215	0.39
4	Fix Jamb	Frame	2.958	0.208	0.62	3.013	0.288	0.87
		Edge	1.867	0.197	0.37	1.914	0.282	0.54
5	Fix Transom	Frame	4.400	0.055	0.24	4.526	0.150	0.68
		Edge	1.836	0.099	0.18	1.844	0.286	0.53
6	Vent Transom	Frame	4.031	0.101	0.41	4.198	0.573	2.40
		Edge	1.738	0.093	0.16	1.724	0.542	0.93
7	Vent Mullion	Frame	4.193	0.053	0.22	4.302	0.137	0.59
		Edge	1.743	0.041	0.07	1.733	0.122	0.21
8	Vent Jamb	Frame	3.404	0.053	0.18	3.372	0.137	0.46
		Edge	1.598	0.019	0.03	1.599	0.053	0.09
9	Vent Sill	Frame	3.404	0.101	0.34	-	-	-
		Edge	1.598	0.049	0.08	-	-	-
10	Center of Glazing	1.030	2.346	2.42	1.030	7.698	7.93	
	Sum		4.000	6.78	-	12.000	19.74	
	U-Value ( $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ )			1.696		1.645		
	R-Value ( $\text{m}^2\cdot\text{K/W}$ )			0.589		0.608		

**Table 9.** ISO 15099 Computer Simulation Results (Linear Thermal Transmittance 3D)

Specimen	Heat Flux	Thermal Resistance	Thermal Transmittance
$2\text{ m} \times 2\text{ m}$	134.43 W	$0.595\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$	$1.680\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
$4\text{ m} \times 3\text{ m}$	398.33 W	$0.602\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$	$1.660\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

3차원 전열해석 결과에서 프레임, 유리 중앙, 유리 모서리에 대한 최저 표면온도를 측정하였으며, Figure 4에 나타내었다. 유리 모서리 부위의 표면온도가 프레임 및 유리 중앙 부위에 비해 낮은 온도로 분포하는 것을 확인하였으며 이는 유리 모서리 부위에서 열 손실이 가장 많이 발생함을 알 수 있다.

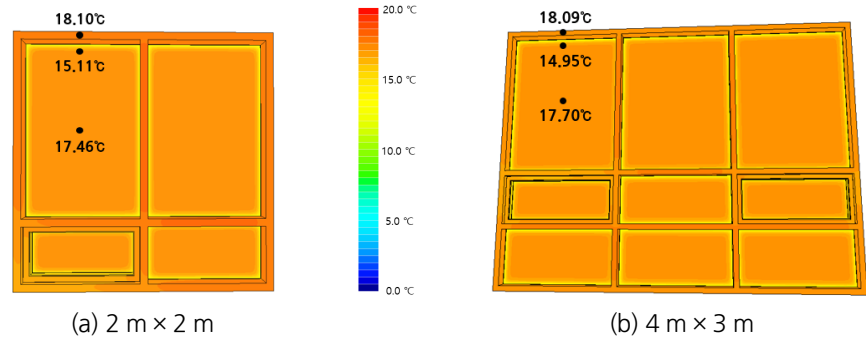


Figure 4. Curtain Wall Profile (3D)

2 m × 2 m 시험체의 경우 물리적 시험과 면적가중법과의 오차율은 2.75%, 선형열관류율과의 오차율은 3.67%로 나타났다. 한편 4 m × 3 m 시험체의 경우 면적가중법과의 오차율은 9.66%, 선형열관류율과의 오차율은 8.84%로 나타났다(Table 10). ANSI/NFRC 100-2020에서는 물리적 시험과 컴퓨터 전열해석의 열관류율 허용 오차율을 10% 이하로 명시하고 있다. 이는 컴퓨터 전열해석을 통해 커튼월의 프로파일 성능분석 및 건물의 외피 열관류율 성능 평가방법 등으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

여기서 유의해야할 점은 컴퓨터 전열해석의 경우 Table 11의 환경조건만을 입력하는 반면 물리적 시험의 경우 이외 저온실과 시험체 양 표면으로부터 방사되는 복사에너지가 반영된다. 또한 시험체 양표면열전달저항 값의 합이 0.16 m<sup>2</sup>·K/W으로 설정하는 점이 물리적 시험과 컴퓨터 전열해석의 결과값의 오차 발생 원인임을 고려해야한다.

Table 10. Error Rate of Thermal Transmittance between Test and Simulation

Determining Method	2 m × 2 m	4 m × 3 m
KSF 2278	(1.744 W/m <sup>2</sup> ·K)	(1.821 W/m <sup>2</sup> ·K)
ISO 15099 2D (Area-related Thermal Transmittance)	2.75% (1.696 W/m <sup>2</sup> ·K)	9.66% (1.645 W/m <sup>2</sup> ·K)
ISO 15099 3D (Length-related Linear Thermal Transmittance)	3.67% (1.680 W/m <sup>2</sup> ·K)	8.84% (1.660 W/m <sup>2</sup> ·K)

Table 11. Boundary Condition (Linear Thermal Transmittance 3d)

Boundary Condition	KS F 2278	Indoor	Temp : 20°C, Surface heat transfer coefficient : 9.09 W/m <sup>2</sup> K
		Outdoor	Temp : 0°C, Surface heat transfer coefficient : 20.0 W/m <sup>2</sup> K

## 결론

본 연구는 물리적 시험 및 컴퓨터 전열해석에 따른 알루미늄 스틱 커튼월의 열성능 평가방법의 활용방안을 모색하기 위해 2 m × 2 m 시험체와 4 m × 3 m 시험체를 제작 및 열성능을 평가하였다.

첫째, 물리적 시험과 컴퓨터 전열해석을 통해 산출된 열관류율 값의 오차율은 각 시험체별로 2차원 해석의 경우 2.75%, 9.66% 3차원 해석의 경우 3.67%, 8.84%로 나타난다. 열관류율 계산 방법 중 면적기중법에 의한 2차원 열전달 해석과 선형열관류율에 의한 3차원 열전달 해석방법에 따른 열관류율 결과값은 미미한 차이가 발생한다. 이 결과값은 오차 허용 범위 내로 나타나므로 본 연구에서 수행된 컴퓨터 전열해석 평가방법의 신뢰성을 확보하였으며 아래에 서술된 각각의 평가방법에 대한 특성을 이해하고 필요에 맞게 선택하여 평가방법을 수행하여야 한다.

둘째, 물리적 시험의 경우 교정열량, 표면열전달저항 값 보정 등 교정 및 보정작업을 한다. 이러한 과정에서 작동되는 송풍기로 인해 기류, 습도의 변화는 컴퓨터 전열해석 결과와의 오차 발생 요인이 된다. 그 외에도 시험체 설치에 따른 시공자와 시험자의 숙련도에도 의존한다. 반면 컴퓨터 전열해석의 경우, 물리적 시험에서 반영하는 복사에너지가 컴퓨터 전열해석에서는 반영되지 않는다는 점이 오차 발생 원인임을 고려해야한다. 또한 전열해석 수행자의 숙련도에 따라 결과 값이 달라질 수 있어 시뮬레이션 수행 주체와 검토 방법의 기준이 필요하다.

셋째, 컴퓨터 전열해석의 경우 시험체 형상 및 구성에 따른 다양한 대안모색이 가능하여 커튼월의 프로파일 성능분석 및 건물의 외피 열관류율 성능 평가방법 등으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 전열해석 방법별 장단점을 인지한 수행자에 따라 프로그램을 선택하여 수행하여야 한다.

본 연구는 불투명 패널(Spandrel)을 제외한 커튼월 시스템의 열관류율 산출하였다. 커튼월 시스템은 창호와 외벽의 연속성을 가지는 구조로써 투명부위와 프레임 부위만으로는 건물 입면에 적용되는 전체 커튼월 시스템의 열관류율을 대표한다고 보기 어렵다. 이에 따라 불투명 패널을 포함하여 ISO 12631에 따른 표면온도와 열관류율 변화에 따른 분석·고찰을 할 필요성이 있다.

## 후기

이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호22DPSC-C163230-02). This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant 22DPSC-C163230-02).

## References

1. Jang, H.I., Ahn, H.J., Kang, H.S., Choi, C.H., Suh, S.J. (2015). Comparison of U-Value on Different Part According to Window-Set Simulation Criterion. Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 9(5), 277-284.

2. Kang, H.S., Yoo, D.C., Lee, K.H., Jang, D.H., Choi, C.H. (2015). Comparative analysis of U-Value in Window System According to Simulation Evaluation Standards and Methods. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 9(5), 285-292.
3. Kim, S.S., Yim, H.C. (2012). Evaluation of the Thermal Transmittance of Curtain Walls according to EN 13947. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 28(11), 401-408.
4. Koo, S.Y. (2015). Comparative Analysis of Window Thermal Performance Calculation Method between Window Certification Systems. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 31(9), 119-127.
5. Koo, S.Y., Song, S.Y. (2016). The Analysis of Relationship of Thermal Performance Between the Whole Window and Thermal Bridging Area. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 32(10), 87-94.
6. Lee, Y.G., Lee, S.H., Lee, S.E. (2006). Effect of Components Assembly and Sizing on the Thermal Performance of Windows. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 22(7), 215-222.
7. Lee, Y.J., Oh, E.J., Kim, S.K., Choi, H.J., Kim, Y.M. (2016). A comparative analysis of the simulation results of total window thermal transmittance according to the evaluation method. *Journal of Korean Institute of Ecological Architecture and Environment*, 16(3), 77-82.
8. Park, H.Y., Park, S.J. (2020). A Study on the Thermal Performance Factors and Effects of Each Part of Curtain Wall Frame for Development of Curtain Wall Frame with Thermal Conductivity 1.0 W/m<sup>2</sup>·K or Less. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 14(5), 484-496.
9. Song, Y.W., Park, J.C., Chung, M.H., Choi, B.D., Park, J.H. (2018). Thermal Performance Evaluation of Curtain Wall Frame Types. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 12(1), 157-163.
10. Bugarin, M., Nizetic, S., Burgarin, M., Bralic, B., Omazic, M. (2022). Innovative approaches in energy efficiency evaluation of glazed facades in nZEB buildings. *Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*.
11. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2023). *Buildings Design Guideline for Energy Saving*.
12. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE). (2021). *Regulations on promotion of high-efficiency energy equipment for construction*. Ministry of Trade, Industry and Energy notice. no. 2021-67.
13. ISO 10077. (2017). *Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 1 : General*.
14. ISO 15099. (2003). *Thermal performance of windows, doors and shading devices – Detailed calculations*.
15. KS F 2278. (2022). *Standard test method for thermal resistance for windows and doors*, Korean Agency for Technology and Standards.