

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 20, No. 3, 2000

표면방사율에 따른 복사단열시스템의 열관류성능 평가 연구

김기세*, 이동규*, 윤종호**, 송인춘***

* 한국에너지기술연구소

** 대전산업대학교 건축공학과

*** 충남대학교 건축공학과

Evaluation of U-value for Radiant Barrier Systems in Relation to Surface Emissivity

K.S.Kim^{*}, D.G.Lee^{*}, J.H.Yoon^{**}, I.C.Song^{***}

* *Korea Institute of Energy Research*

** *Dep. of Architectural Engineering, Taejon National University of Technology*

*** *Dep. of Architectural Engineering, Chungnam National University*

Abstract

Radiant barrier systems(RBS) constructed with low emissivity materials bounded by an open air space can be used to reduce the net radiation transfer between two surfaces. To analyze the heat transfer characteristics of the radiant barrier systems which consist of a single-glass and radiation barriers, a simple theoretical model based on energy balances was suggested. And the model was validated by means of the experimental results. Using a guarded hot box, the temperatures of layers in selected RBS and energy use for each cases were measured. The results show that the model well explained the heat transfer characteristics of those RBS. Also, the heat transfer coefficient correlations considering natural and forced convection heat transfer were suggested. It

is found that the heat transfer efficiency of a RBS with aluminium surface improved up to 66.6% over that of a single glazing system.

Noenclature

h_{rs}	고온측에서 Radiant Barrier로의 대류 열 전달 계수
h_{r-rs}	고온측에서 Radiant Barrier로의 복사 열 전달 계수
h_{sw}	Radiant Barrier와 유리 공간 사이의 대류 열전달 계수
h_{r-sw}	Radiant Barrier와 유리 공간 사이의 복사 열전달 계수
k_{glass}	유리의 열전도도
h_{wa}	유리 외부에서 저온측으로의 대류 열전달 계수
h_{r-wa}	유리 외부에서 저온측으로의 복사 열전달 계수
T_r	고온측 내부온도
T_s	복사 차폐체 온도
T_{w1}	유리 내부 온도
T_{w2}	유리 외부 온도
T_{w2k}	유리 외부 절대온도
T_a	저온측 온도
T_{sk}	천공(sky) 절대온도
T_{dp}	노점 온도
\overline{Nu}_L	평균 Nusselt number
Ra_L	Rayleigh number
Pr	Prandtl number
L	모델의 높이
H	Radiant Barrier와 유리 사이의 거리
t	유리의 두께
σ	Stefan-Boltzmann 상수 = 5.6697×10^{-8}
k_{air}	공기의 열전도 계수
ϵ_r	고온측 내부 방사율
ϵ_{sl}	Radiant Barrier의 고온측 표면 방사율

ϵ_{s2}	복사 차폐체 유리측 방사율
ϵ_w	유리의 방사율
A	열전달 면적
U	총괄 열전달계수(열관류율)
R	열관류저항

1. 서 론

일반적으로 열반사 단열재라 함은 알루미늄 증착필름 또는 박판의 형태로 배관재 피복이나 단열테이프와 같이 이미 우리일상생활에 널리 활용되고 있으며, 일부 경우 건축용 단열재로 상용제품이 생산되고 있기도 하다. 특히 저항형 또는 용량형 단열재와는 달리 반사형 단열재는 부피가 작고 가동이 용이하기 때문에 창호나 아트리움의 단열커튼, 자연형 태양열 건물의 야간단열 시스템 등과 같이 가동성 단열재로 널리 활용될 수 있는 장점이 있다.

그러나 열반사 단열재에 대한 이론적 연구 및 성능평가에 대한 연구^{1),2)}는, 기존단열재와 반사형 단열재를 동일규모 실험시설에 각각 설치하고 일정기간 모니터링하여 단열성능 결과를 비교하는 등의 제한적 연구가 수행되었으며, 표면방사율에 따른 열반사 단열시스템의 정량적인 전열특성 해석이나, 열관류성능이 단열에 미치는 영향을 심도있게 분석했던 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 각기 다른 표면 방사율을 가진 재료로 구성된 단열시스템을 구성하여, 측정실험을 통해 각 부위에서의 전열량을 특성별로 해석하고, 표면방사율에 따른 정량적인 열관류성능을 도출하며, 측정실험과 동일한 조건의 이론 해석모델을 개발하여 실측치를 근거로 보정하면

서, 방사성능에 따른 간이 열관류해석 모델을 개발하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 열반사 재료로 구성된 단열시스템의 열관류성능 평가는 AST M, JIS, KS에 제시된 건축자재 열관류율 측정법에 근거한 측정실험을 진행하였다.

2. 복사단열시스템 해석모델 개발

복사단열시스템의 설치에 따른 전열특성을 정량적으로 평가하기 위해서는 재료의 표면방사성능에 대한 복사차단 효과가 반드시 고려되어야 한다. 복사 열전달은 고온측과 저온측으로 구분되는 모든 표면에서 진행되며, 전열되는 면적 비율, 각도, 형상계수 등 상당히 복잡한 변수에 의해 다차원 함수로 표현된다. 즉 3차원공간에서의 복사 열전달을 해석하기 위해서는 방열면으로부터 전면부에 위치하는 모든 면에 대해 표면온도 특성을 고려하여 해석해야 하기 때문에 동적 상태에서의 정량적인 분석은 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 해석모델을 최대한 단순화하여 마주보고 있는 면이 한 면이고 일정한 방향으로만 열이 전달되는 것으로 가정한 1차원 해석모델을 개발하여 분석을 수행하였다

2.1 해석모델 설정

복사단열시스템의 구성에 의한 열관류 특성을 이론적으로 해석하기 위해 그림 1과 같은 해석모델을 설정하였다. 모델은 저온측으로부터 5mm투명단창, 100mm중공층, 0.007 mm의 Radiant Barrier가 설치되는 것으로 하였다. 또한 동일조건에서의 평가를 위해 다음과 같은 세 가지 가정을 설정하였다.

가정 1) 방사를 하는 각 표면들은 일정온도로 유지되고 균일한 방사 및 반사 그리고 복사 특성을 갖는다.

가정 2) 방사를 하는 각 표면들은 투과를 하지

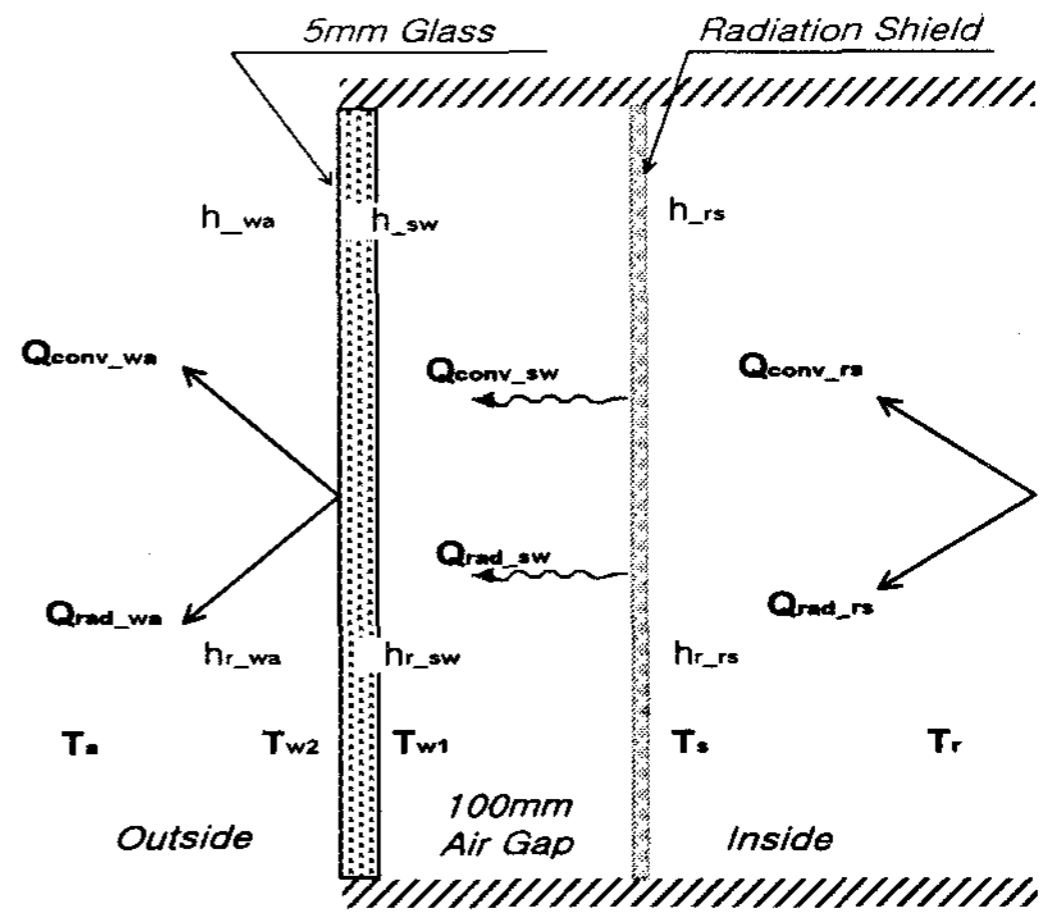


Fig. 1. Analysis model of radiation insulation system

않는 비투명 매질이고, 파장에 대해 무관하며 방사율과 흡수율이 동일한 표면 특성을 가진다.

가정 3) 표면들 사이에 존재하는 매질(공기)에서 흡수 및 방사를 하지 않는다.

그림 1과 같은 조건의 열전달 해석을 위해 해석모델은 4부분으로 분할, 진행하였다. 즉 ①고온측 공간에서 Radiant Barrier까지의 열전달, ②Radiant Barrier와 유리 사이의 공간에서의 열전달, ③유리에서의 전도 열전달, ④유리표면에서 외부로의 열전달로 구분하였다.

2.2 열전달 해석

2.2.1 고온측에서 Radiant Barrier로 열전달

고온측 공간 내부에서 방사 차단재 사이의 열전달은 각 표면의 온도차에 따라 결정된다. 따라서 고온측 내부온도를 T_r , Radiant Barrier의 온도를 T_s , 대류열전달 계수를 h_{rs} 라 할 때 대류 열전달율($Q_{conv-rs}$)은 다음과 같다.

$$Q_{conv-rs} = Ah_{rs}(T_r - T_s) \quad (1)$$

식 (1)에서 대류열전달 계수는 Radiant Barrier와 Radiant Barrier 주위의 온도가 다를 경우, 자연 대류에 의한 열전달이 지배적이다³⁾.

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + 0.670(Ra_L \Psi)^{1/4} \quad (2)$$

$$(Ra_L \leq 10^9)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + 0.670(Ra_L \Psi)^{1/4} \times (1 + 1.6 \times 10^{-8} Ra_L \Psi)^{1/12} \quad (3)$$

$$(10^9 \leq Ra_L \leq 10^{12})$$

여기서, \overline{Nu}_L : 평균 Nusselt number
 Ra_L : Rayleigh number
 Pr : Prandtl number
 $\Psi = [1 + (\frac{0.492}{Pr})^{9/16}]^{-16/9}$ 이다.

또한 유리의 높이를 L , 고온측 공기의 열전도 계수를 k_{air} 라 하면,

$$h_{rs} = \overline{Nu}_L \frac{k_{air}}{L} \quad (4)$$

가 된다.

그러나 고온측에서 환경조건이 자연대류 상황이 아닌 강제송풍에 의한 조건이라면 열전달 계수는 자연대류에 의한 열전달 계수값보다 상당히 크게 된다. 그러므로 자연대류 및 강제대류를 모두 고려한 다음과 같은 실험식 (5)를 제시하여 사용하였다.

$$h_{rs} = \overline{Nu}_L \frac{k_{air}}{L} + 3.043 V_{wind}^{0.170} \quad (5)$$

일반적인 복사해석의 경우 해석의 편의를 위해

고온측 내부의 방사율을 1로 정의하여 해석하지만, 본 논문은 표면 방사율에 따른 복사 열전달 해석이 주 목적이므로 고온측 내부의 방사율을 고려하여 계산하였다. 고온측 내부의 표면 방사율을 고려하면 다음과 같은 관계식으로 표현되고 복사열전달 계수를 식 (6)으로 정의할 수 있다.

$$Q_{rad-rs} = \sigma \frac{(T_r^4 - T_s^4)}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{1}{\epsilon_{sl}} - 1} \quad (6)$$

$$h_{r-rs} = \sigma \frac{A(T_r^2 + T_s^2)(T_r + T_s)}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{1}{\epsilon_{sl}} - 1}$$

여기서, Q_{rad-rs} : 고온측 내부에서 Radiant Barrier로의 복사 열전달을 [W]
 σ : Stefan-Boltzmann 상수 (5.6697×10^{-8} [W/m²K⁴])
 ϵ_{sl} : Radiant Barrier 고온측 표면방사율
 ϵ_r : 고온측 내부 방사율
 A : 열전달 면적(m²) 이다.

그러므로 고온측 실내로부터 Radiant Barrier로의 총 열전달율은 식 (7)과 같이 표현될 수 있다.

$$Q_{rs} = Q_{conv-rs} + Q_{rad-rs} \quad (7)$$

2.2.2 중공층의 열전달율

Radiant Barrier와 유리 사이의 중공층 열전달율은 공간 사이의 거리와 두 표면 사이의 온도차의 함수로 계산될 수 있다. 그러므로 Radiant Barrier와 유리사이 공기층의 대류열전달 $Q_{conv-sw}$ 는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$Q_{conv-sw} = Ah_{sw}(T_s - T_{wl}) \quad (8)$$

여기서, A : 열전달 면적 [m^2]

h_{sw} : Radiant Barrier와 유리사이 공기층의 대류 열전달계수 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

T_s : Radiant Barrier 온도 [$^\circ C$]

T_{w1} : 유리 내부 온도 [$^\circ C$] 이다.

식 8)에서 h_{sw} 에 대한 실험식은 Elsherbiny등이 제안한⁴⁾ 두 평판 사이에서의 대류 열전달은 두 평판 사이의 간격, L 과 두 평판 사이의 온도차, 그리고 기울기 등에 의존하는 실험식을 사용하였다. 여기에서 Radiant Barrier와 유리는 수직으로 세워져 있으므로 다음과 같은 실험식이 성립한다.

$$\overline{Nu}_L = \max(Nu_1, Nu_2, Nu_3) \quad (9)$$

여기서, $Nu_1 = 0.0605 Ra_L^{1/3}$

$$Nu_2 = \left[1 + \left[\frac{0.104 Ra_L^{0.293}}{1 + (6310/Ra_L)^{1.36}} \right]^3 \right]^{1/3}$$

$$Nu_3 = 0.243 \left(\frac{Ra_L}{H/L} \right)^{0.272}$$

Ra_L : Rayleigh Number

이다. 그러므로

$$h_{sw} = \overline{Nu}_L \frac{k_{air}}{L} \quad (10)$$

가 된다.

이런 실험식은 마주보는 두 평판 사이의 온도차가 어느 시점 이하로 줄어들게 되면 순수 전도에 의한 열전달을 설명하고 있다. Radiant Barrier와 유리 공간 사이에서의 복사열전달은 Radiant Barrier의 방사율(ϵ_s), 유리의 방사율(ϵ_w), 그리고 차단재와 유리 온도에 의존한다. 그러므로 두 표면 사이의 복사열교환은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{rad-sw} = Ah_{r-sw}(T_s - T_{w1}) \quad (11)$$

여기서, Q_{rad-sw} : Radiant Barrier와 유리공간 사이에서의 복사 열전달을 [W]

h_{r-sw} : Radiant Barrier와 유리사이 공기층의 복사 열전달 계수 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

Radiant Barrier와 유리의 방사율에 영향을 받는 두 면사이의 복사열전달계수는 다음과 같은 식에 의해 해석된다.

$$h_{r-sw} = \sigma \frac{(T_s^2 + T_{w1}^2)(T_s + T_{w1})}{\frac{1}{\epsilon_s} + \frac{1}{\epsilon_w} - 1} \quad (12)$$

여기서, ϵ_s : Radiant Barrier유리측방사율

ϵ_w : 유리의 방사율

이다. 그러므로 Radiant Barrier와 유리사이 중공층에서의 총 열전달율은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q_{sw} = Q_{conv-sw} + Q_{rad-sw} \quad (13)$$

2.2.3 유리의 열전달

유리의 열전도 계수를 k_{glass} 라고 하고 두께를 t 라 하면 열전도에 의한 열전달율은 다음과 같다.

$$Q_{cond-w} = A \frac{k_{glass}}{t} (T_{w1} - T_{w2}) \quad (14)$$

2.2.4 유리로부터 저온측으로 열전달

유리외부에서 저온측으로 복사열전달은 풍속과 풍향에 의해 의존한다⁵⁾. 즉 유리의 저온측 표면에 바람이 직접 부딪치는 경우와 그렇지 않은 경우에 대해서 유리 표면에서의 대류열전달 계수는

상당한 차이를 보인다.

유리의 저온측 표면에 기류가 직접 닿는 경우라면, 유리의 열전달 계수(h_{wa})는

$$h_{wa} = 8.07 V_{wind}^{0.605} \quad \text{for } V_{wind} > 2$$

$$h_{wa} = 12.27 \quad \text{for } V_{wind} < 2$$

과 같은 상수값을 입력하여 해석이 가능하지만, 유리의 표면에 전달되는 기류의 조건이 위와 같지 않다면 상기의 식 (5)로 해석할 수 있다.

그러므로 저온측 유리표면에서의 대류 열전달율은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{conv-wa} = Ah_{wa}(T_{u2} - T_a) \quad (15)$$

유리 외부에서 저온측으로의 복사열전달은 자연조건의 상황이라면 천공온도에 의해서 평가되어야 한다. Berdahl과 Martin⁶⁾은 광범위한 데이터를 사용하여 유효 천공온도를 노점과 건구온도, 자정으로부터의 시간 ω 에 대해서 다음과 같은 실험식 (16)를 제시하였다.

$$T_s = T_{ak}[0.711 + 0.0056 T_{dp} + 0.000073 T_{dp}^2 + 0.013 \cos(15\omega)]^{0.25} - 273.15 \quad (16)$$

여기서 T_{ak} : 외기온의 절대온도
 T_{dp} : 외기온의 이슬점온도

천공온도로 평가된 복사 열전달(Q_{rad-wa})은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{rad-wa} = Ah_{r-wa}(T_{u2} - T_s) \quad (17)$$

여기서, h_{r-wa} : 유리 외부에서 저온측으로의 복사

열전달 계수[W/m²°C]

T_{u2} : 유리 외부 온도[°C]

이다. 그러므로 복사 열전달 계수(h_{r-wa})는 다음과 같이 해석된다.

$$h_{r-wa} = \sigma \epsilon_w (T_{u2k}^2 + T_{sk}^2)(T_{u2} + T_{sk}) \quad (18)$$

여기서, T_{sk} : 천공 절대온도

T_{u2k} : 유리외부 절대온도

그러므로 총 열전달율(Q_{wa})은 다음과 같다.

$$Q_{wa} = Q_{conv-wa} + Q_{rad-wa} \quad (19)$$

2.2.5 총 열관류성능 해석

이상으로 전개된 식에 의해 복사단열시스템의 전체 열관류율(U)을 구하기 위한 각 노드에서의 열저항 회로도를 구성하면 그림 2와 같이 되고, 이는 식 (20)과 같이 표시될 수 있다.

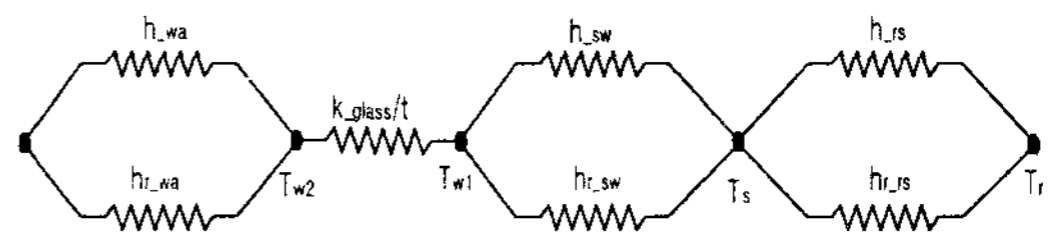


Fig. 2. Heat transfer network model

$$U = \left(\frac{1}{(h_{rs} + h_{r-rs})} + \frac{1}{(h_{sw} + h_{r-sw})} + \frac{t}{k_{glass}} + \frac{1}{(h_{wa} + h_{r-wa})} \right)^{-1} \quad (20)$$

식 (20)로 표현된 U값은 해석모델의 고온측 내부에 Radiant Barrier가 존재하는 경우이므로 Radiant Barrier에 의한 대류열손실과 방사에 의한 복사열손실을 상당히 줄일 수 있다. 반면에 Radiant Barrier가 없는 경우를 가정하면 열관류

을 U 는 다음과 같다.

$$U = \left(\frac{1}{(h_{rs} + h_{r-rs})} + \frac{t}{k_{glass}} + \frac{1}{(h_{wa} + h_{r-wa})} \right)^{-1} \quad (21)$$

그러므로 해석모델의 고온측 내부에서 외기로의 총 열전달율 Q 는 U 값을 사용하여 표현하면 식 (22)과 같다.

$$Q = UA(T_r - T_a) \quad (22)$$

또한 해석의 편의를 위해 분할하여 해석된 공간에서의 열전달율은 열평형 방정식을 만족해야 하므로 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$Q_{rs} = Q_{sw} = Q_{cond-w} = Q_{wa} \quad (23)$$

위 모델을 통하여 열전달율을 계산하기 위해서는 각 부분에서 정확한 열전달 계수 값과 온도를 구하여야 한다. 즉 열전달 계수 값은 해당 영역에서의 온도에 의존하므로 정확한 온도를 구하여야 열전달 계수값들이 정확해질 수 있다. 그러나 일반적으로 실험이나 실제상황에서 측정에 의해 명확히 얻어질 수 있는 조건은 고온측 공기온도, T_r 과 외기 온도 T_a 가 대부분인 경우가 많으므로 이럴 경우 Radiant Barrier 표면온도, 유리벽 내부 및 외부 온도를 구해야만 이론식에 의해 총 열관류율을 계산할 수 있게 된다. 따라서 이러한 온도를 구하기 위해서는 다음과 같은 방정식을 풀어야 하는데, 이는 앞서 전개한 식 (7), (13), (14), (19)를 식 (23)에 적용하면 다음과 같은 방정식들을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} (h_{rs} + h_{r-rs})(T_r - T_s) \\ = (h_{sw} + h_{r-sw})(T_s - T_{w1}) \end{aligned} \quad (24)$$

$$(h_{sw} + h_{r-sw})(T_s - T_{w1}) \quad (25)$$

$$= \frac{k_{glass}}{t}(T_{w1} - T_{u2})$$

$$\frac{k_{glass}}{t}(T_{w1} - T_{u2}) \quad (26)$$

$$= (h_{wa} + h_{r-wa})(T_{u2} - T_a)$$

이렇게 도출된 식 (24), (25), (26)을 이용하여 각 변수에 대한 해를 구하기 위해 다음과 같은 순차적 단계로 계산을 진행한다.

▷ 단계 1

위 식에서 미지수는 T_s , T_{w1} , T_{u2} 이고 방정식은 세 개이므로 위의 연립방정식은 풀 수가 있다.

그러나 열전달 계수도 이러한 온도들의 함수이기 때문에 미지 온도가 변할 때마다 각 열전달 계수 값들도 변하게 되므로 다음과 같은 방법을 사용하여 해를 구하였다.

먼저 T_r , T_a 가 주어지면 이 사이 임의의 값, $T_{s,i}$, $T_{w1,i}$, $T_{u2,i}$ 를 정한다.

▷ 단계 2

이러한 임의의 값에서 각 열전달 계수값을 계산하고 위의 연립방정식을 다음과 같이 정리한다.

$$\begin{aligned} f1 &= (h_{rs} + h_{r-rs})(T_r - T_s) - \\ & \quad (h_{sw} + h_{r-sw})(T_s - T_{w1}) \end{aligned}$$

$$f2 = (h_{sw} + h_{r-sw})(T_s - T_{w1}) -$$

$$\frac{k_{glass}}{t}(T_{w1} - T_{u2})$$

$$\beta = \frac{k_{glass}}{t} (T_{w1} - T_{u2}) - (h_{wa} + h_{r-wa})(T_{u2} - T_a)$$

▷ 단계 3

단계1에서 정한 임의의 T_s, T_{w1}, T_{u2} 값을 단계2의 방정식에 대입한다.

▷ 단계 4

다음과 같은 행렬식을 구성한다.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f1}{\partial T_s} & \frac{\partial f1}{\partial T_{w1}} & \frac{\partial f1}{\partial T_{u2}} \\ \frac{\partial f2}{\partial T_s} & \frac{\partial f2}{\partial T_{w1}} & \frac{\partial f2}{\partial T_{u2}} \\ \frac{\partial f3}{\partial T_s} & \frac{\partial f3}{\partial T_{w1}} & \frac{\partial f3}{\partial T_{u2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{s,i} - T_s \\ T_{w1,i} - T_{w1} \\ T_{u2,i} - T_{u2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix}$$

여기에서

$$A = (h_{rs} + h_{r-rs})(T_r - T_{s,i}) - (h_{sw} + h_{r-sw})(T_{s,i} - T_{w1,i})$$

$$B = (h_{sw} + h_{r-sw})(T_{s,i} - T_{w1,i}) - \frac{k_{glass}}{t} (T_{w1,i} - T_{u2,i})$$

$$C = \frac{k_{glass}}{t} (T_{w1,i} - T_{u2,i}) - (h_{wa} + h_{r-wa})(T_{u2,i} - T_a)$$

여기에서 $T_{s,i}, T_{w1,i}, T_{u2,i}$ 는 임의의 값 (guess value)을 의미한다.

▷ 단계 5

위 행렬식에서 구한 T_s, T_{w1}, T_{u2} 에서 다시 열전달 계수를 평가하고 식 $f1, f2, f3$ 에 대입

한다. $f1, f2, f3$ 가 수렴조건이 만족될 때까지 위의 사항을 반복하여 계산한다.

3. 열관류율 측정실험

본 장에서는 표면방사성능이 다른 각각의 재료와 조합된 복사단열시스템을 구성하여 정량적인 열관류성능을 도출하며, 도출된 열관류율을 근거로 해석모델의 타당성을 검증하였다.

복사단열시스템의 경우 국내외를 막론하고 기존화된 측정방법이 없으므로, 본 연구에서는 시스템의 특성상 유리조합 구조임을 감안하여 창호에 대한 성능평가방법인 KS F 2278 창호의 단열성 시험방법과 건물에 적용되는 단열재의 성능평가 시험방법 ASTM C 1224⁷⁾, JIS A 1420¹⁰⁾, KS F 2299¹¹⁾ 등에 근거하여 실험을 진행하였다.

3.1 사례구성 및 측정장치

복사단열시스템의 측정을 위해 유리와 조합된 복사단열사례를 구성하여 측정하였다. 사례의 구성은 동일한 5mm투명단창과 100 mm중공층, 표면방사성능이 다른 각각의 재료조합으로 구성하였다.

표 1은 각 사례에 적용된 재료의 표면 방사율 (그림 3의 종단면도 좌측부터) 및 조합을 보여주

Table 1. Surface emissivity of each case

Case	표면 방사율(고온측부터)			
	Case 1			0.83
Case 2	0.92	0.92	0.83	0.83
Case 3	0.65	0.65	0.83	0.83
Case 4	0.05	0.92	0.83	0.83
Case 5	0.92	0.05	0.83	0.83
Case 6	0.05	0.05	0.83	0.83

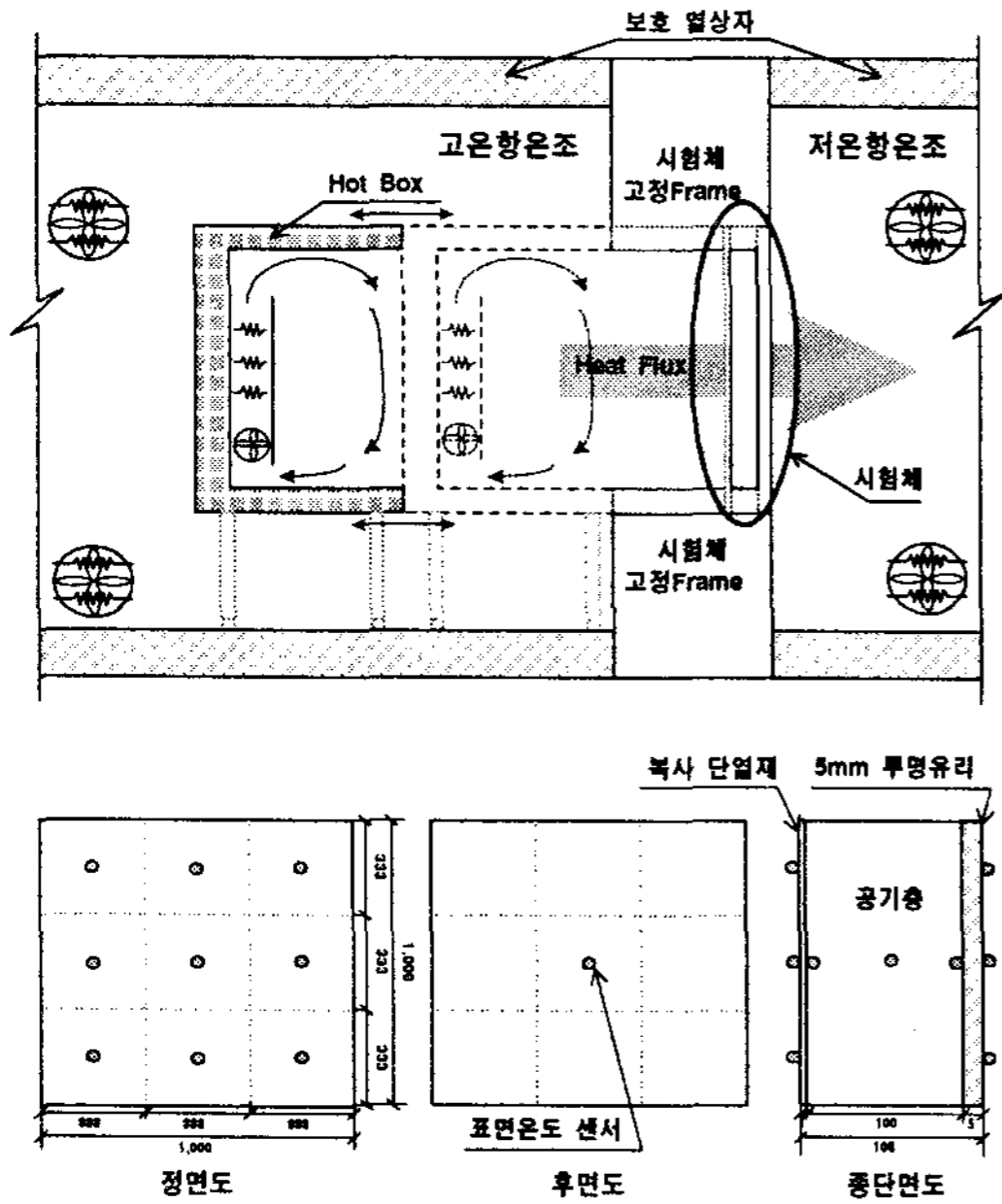


Fig. 3. Schematic of experimental apparatus

Table 2. Description of experimental apparatus

구분	고온항온조	저온항온조	가열상자
외관	1400×2400×2200	1400×2400×2200	1100×1600×550
내부	1300×2000×2000	1300×2000×2000	1000×1000×500
단열처리	내외부단열강판 0.5t 경질우레탄 100mm	내외부단열강판 0.5t 경질우레탄 100mm	내외부단열강판 0.5t 경질우레탄 100mm
사용온도	-30℃ ~ +100℃	-45℃ ~ +60℃	0℃ ~ +100℃
측정범위	±0.1℃	±0.1℃	±0.2℃
온도오차	±0.25℃	±0.25℃	±0.5℃
Chiller	380V, 5HP, 이원냉동, 공냉식	380V, 5HP, 이원냉동, 공냉식, 반폐형압축기	-
Heater	SCREW PLUG type, 6kW/3단	SCREW PLUG type, 6kW/3단	SCREW PLUG type, 500W×2
전원	AC 380V, 3상, 60HZ	AC 380V, 3상, 60HZ	AC 220V 단상

고 있으며, 그림 3과 표 2는 측정원리 및 온도측정을 위한 센서의 위치 및 규격을 보이고 있다.

측정장치는 보호열상자법(Guarded Hot Box)의 원리로 구성된 건축부재의 정상상태 단열성능 측정장치이다. 기기는 크게 고온항온조, 저온항온조, Hot Box로 구성되어 있으며, 측정기기의 특성상 가열상자, 저온항온조 등은 설정온도 조건을 만족하기 위해 공간내의 일정속도의 기류분포를 가지게 된다. 따라서 재료의 일부 표면에서 전열기를 통해 직접 공급되는 기류분포에 의해 표면온도가 달라질 수 있으므로 표면을 9등분하여 면적가중 온도로 계산, 분석하는 방법을 택하였다.

3.2 측정방법

실험 방법은 구성된 사례를 측정장치에 설치하고 양측의 온도조건^{주1)}을 실제 적용조건에 가깝게 고온 항온실 및 가열상자측을 20℃, 저온 항온실측을 0℃로 설정하여 실험하였다.

측정시간은 양측 공간의 온도조건이 정상상태에 도달했다고 판단되는 시점을 기준으로 정확히 2시간을 측정하여 2회 측정결과 오차가 ±1%가 될 때까지 측정, 평균값으로 분석하였다. 또한 단열시스템의 열관류율 계산은 측정된 고온측 및 저온측 표면온도를 기준으로 단열시스템 전체의 표면 열저항을 고려하여 계산하였다.

3.3 측정결과 및 분석

정상상태 도달 후 각 사례의 고온측 표면온도 평균값을 측정한 결과 2시간동안 모든사례에서 온도변화가 ±0.3℃ 이내로 일정한 온도상태를 유지하는 것으로 분석되었다.(그림 4) 이는 모든 사례에서 정상상태 도달 후부터는 구성된 재료의 관류특성에 따라 일정하게 열전달을 행하는 것으로

주) ASTM, JIS, KS규격에 의하면 건축물 부재에 대한 실험을 위해 양측면의 공기설정 온도에 대한 규정은 없으며 단지 구조물의 사용조건에 가깝게 시험조건을 설치하도록 권장하고 있다. 그러나 KS F 2278 “창호의 단열성 시험방법”에 의하면 항온실과, 가열상자측은 20±1℃, 저온실의 경우 0±1℃로 설정하여 실험하는 것을 원칙으로 하고 있으므로 본 실험에서는 후자의 기준에 맞추어 실험을 진행하였다.

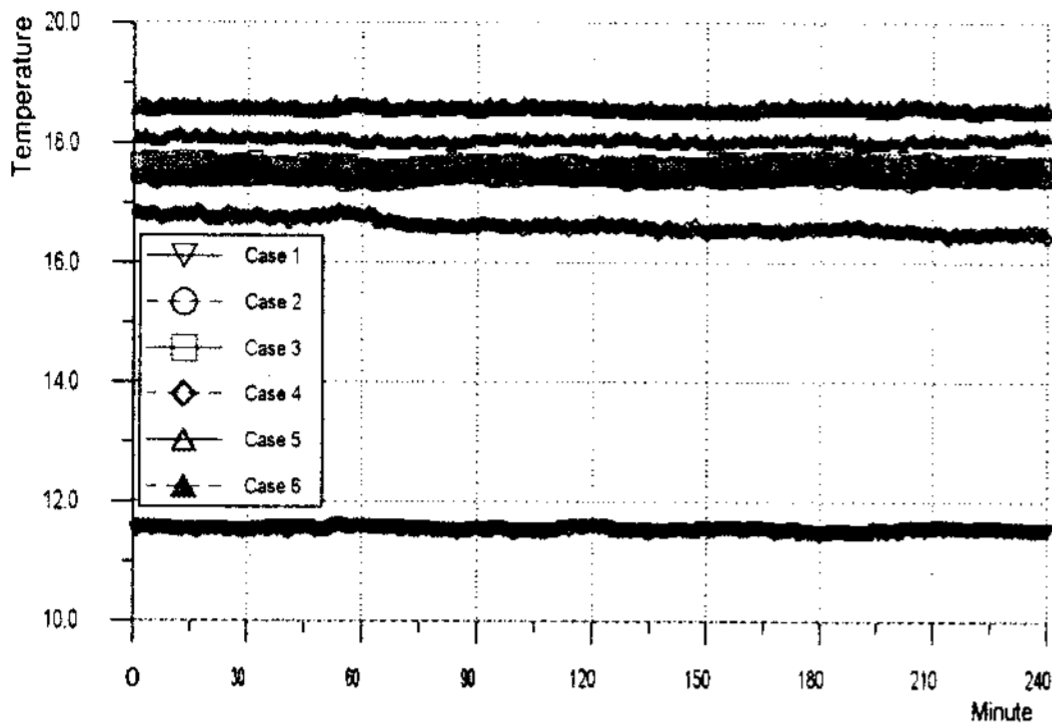


Fig. 4. Hot side surface temperature of radiation shield

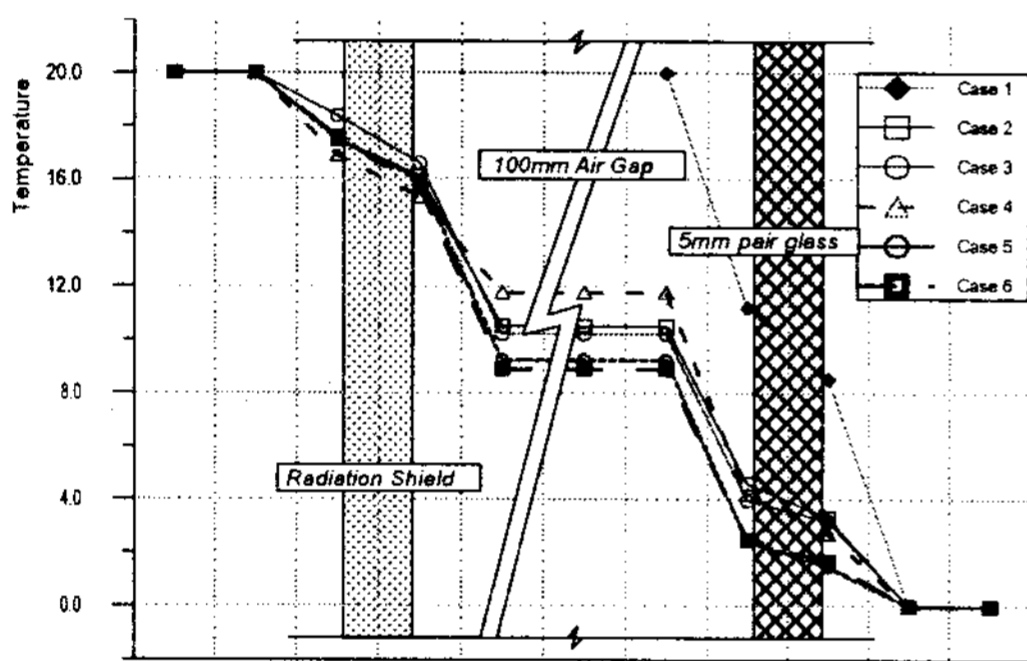


Fig. 5. Node temperature of each case

로 설명된다.

표면방사특성에 따른 열반사 효과와 방사특성을 파악하기 위해서는 단열시스템 구성에 따른 각 절점에서 가지는 온도조건 비교로 분석이 가능하다. 그림 5는 열전달 경로를 따라 각 재료의 표면 및 공기층 온도를 사례별로 도시한 그래프이다.

각 절점에서 온도 분포는 사례에 따라 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 정도의 차이를 보이고 있었는데 이는 표면 방사특성에 따른 열반사 효과인 것으로 분석된다. 고온측 표면에서 비교해 보면, 사례 4에서 가장 낮은 온도를 보이고 있는데 이는 사례 4 경우 고온측 표면방사율이 0.05로 가장 낮아 수열되는 열을 가장 많이 반사했기 때문인 것으로 판단할 수 있다.

중공층에서 온도는 사례 5와 사례 6이 가장 낮은 온도분포를 보이고 있는데 이는 두사례의 경우 중공층으로 향한 표면 방사율이 가장 낮아 수열된 열을 가장 적게 방출하고 있음을 알 수 있다. 사례 4에서 가장 높은온도를 보이고 있는데 이는 전후 정황을 미루어볼 때 측정상의 오차로 보인다.

이렇게 전달된 열은 유리에 전달되는 과정에서 동일하게 나타나 저온측으로 향한 유리 표면 온도를 결정하고 있다. 즉, 전달된 온도가 낮을수록 유리의 표면온도도 낮아지고 이는 유리의 표면 열저항을 증가시켜 저온측으로 전달되는 열을 최소화하는 것이다.

표 3은 각 사례의 표면 온도분포와 표면 열저항을 고려하여 산출된 열관류율 결과를 나타내고 있는데, 사례 1인 5mm 투명단창의 열관류율을 기준으로 각 사례의 관류성능 향상치를 보여주고 있다. 각 사례의 열관류율은 사용재료의 방사특성에 따라 30%에서 최대 약 67%까지 열반사 및 저방사 효과에 의한 열관류저항이 증가하는 것으로 분석되었다.

Table 3. Surface temperature & U-value

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
고온측 공기온도($^{\circ}\text{C}$)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Radiant Barrier 표면온도		17.5	18.4	16.9	17.5	17.6
중공층 재료 표면온도		16.10	16.61	15.34	15.98	15.67
공기층 온도		10.50	10.22	11.77	9.25	8.90
중공층 유리 표면온도	11.2	4.60	3.97	4.20	2.44	2.40
저온측 유리 표면온도	8.35	3.32	3.20	2.72	1.49	1.70
저온측 공기온도	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
열관류율($\text{W}/\text{m}^2\text{Chr}$)	6.028	4.126	3.912	4.013	2.045	2.013
관류율 대비비율(%)	100	68.4	64.9	66.6	33.9	33.4

Table 4. Comparison of analysis model & experiment data

구분 및 방사율 비교항목	측정 실험					해석 모델				
	0.05			0.65	0.92	0.05			0.65	0.92
	고온	저온	양면			고온	저온	양면		
Radiant Barrier 평균온도(°C)	16.1	16.7	16.6	17.5	16.8	14.9	17.5	16.9	16.1	15.9
중공층 유리온도(°C)	4.20	2.44	2.49	4.0	4.6	3.7	2.4	2.3	3.5	4.1
저온측 유리온도(°C)	2.72	1.49	1.70	3.20	3.32	3.4	2.1	2.1	3.2	3.66
열관류율(W/m ² h°C)	4.013	2.045	2.013	3.912	4.126	3.618	2.292	2.183	3.456	3.888
측정치 절감비율(%)	2.8	50.5	51.3	5.2	100	7.0	41.1	43.9	11.2	100
측정실험 대비 오차율(%)						9.9	12.0	8.4	11.7	5.8

4. 해석모델 및 측정실험 비교평가

실험을 통해 측정된 각 사례의 열관류율과, 실험의 경계조건과 동일한 조건으로 구성한 이론해석 모델(본 논문의 2장)로 계산된 동일한 사례의 열관류율을 비교하면 Table 4와 같다.

표에서 알 수 있듯이 전반적으로 측정실험에서 얻어진 데이터보다 해석모델에 의해 계산된 데이터 값이 약 10%정도 낮게 평가되는 것으로 나타났다. 이는 측정실험이 일정한 규모를 가진 3차원 공간에서 실험된 반면, 해석모델은 단차원 열전달만을 고려한 해석을 함으로써 생긴 오차인 것으로 판단된다. 그러나 실험데이터와 해석모델 데이터에서 모두 일정한 유형으로 차이를 보이고 있으며, 실험 및 해석모델 경우 각 사례에서 비교할 수 있는 상대적인 열관류율 값은 유사한 부하절감 경향을 보이고 있다. 또한 각 절점에서의 온도특성 및 방사율에 의한 저항특성이 분명하게 구분되고, 측정실험에서 측정기기의 오차 등을 감안한다면 해석모델에서의 전반적인 열관류성능 평가는 유효한 것으로 검증되었다.

따라서 본 논문에서 제안된 해석모델은 저방사 재료로 구성된 단열시스템의 상대적인 열관류성능 간이 평가모델로 활용될 수 있을 것으로

판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 각기 다른 표면방사율을 갖는 재료로 구성된 복사단열시스템의 열관류성능 해석 연구를 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 유리와 조합된 복사단열시스템의 전열특성 분석을 위한 간이 해석모델 프로그램을 개발하였다.
- 자연대류 및 강제대류가 모두 고려된 표면 열전달계수 도출을 위한 실험식을 제안하였다.
- 유리로 조합된 복사단열시스템의 표면방사특성에 따른 정량적인 열관류율 값을 도출하였다.
- 복사단열시스템의 해석 및 실험 결과, Radiant Barrier의 설치로 열관류 저항을 66.6%까지 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다.

측정 제시된 복사단열시스템의 전열특성 및 열관류 성능은 다양한 단열방식 및 단열시스템 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이며, 복사단열시스템의 성능분석을 위한 평가방법론은 향후 연구되어야 할 과제이다.

참 고 문 헌

1. 강호석 외, "경량외벽에서 반사형 단열재의 전 열특성 평가에 관한 연구(1); 냉방기를 중심으로", 건축학회추계 학술발표대회논문집, 1995, pp.363~366.
2. Harris, D.J., "Use of metallic foils as radiation barriers to reduce heat losses from buildings", Applied Energy v 52, 1995, pp.331~339.
3. Mills, Anthoony. F., Heat and Mass Transfer, 1995. IRWIN, Chicago.
4. ElSherbiny, S. M., Raithby, G. D., and Hollands K. G. T., "Heat transfer by natural convection across vertical and inclined air layers", J. Heat Transfer, v 104, 1982, pp.96~102.
5. Lawrence Berkeley Laboratory, WINDOW 4.0: Documentation of Calculation Procedures, Energy & Environment Division, 1993.
6. Berdahl, P., Martin, M., "Emissivity of Clear Skies", Solar Energy v 32, n 5, 1984.
7. Duffie, John A., Beckman, William. A., "Solar Engineering of Thermal Processes", JOHN WILEY & SONS, INC, New York, 1991, pp.663~664.
8. ASHRAE, ASHRAE Handbook, Fundamental, 1997.
9. ASTM C 1224-99 "Installation and Use of Reflective Insulation in Building Constructions".
10. ASTM C 1158-97 "Installation and Use of Radiant Barrier Systems(RBS) in Building Construction".
11. Japanese Industrial Standards, JIS A 1420, 住宅用斷熱材の 斷熱性能試験方法, 1992.
12. 한국공업규격, KS F 2299, 건축물부재의 정상상태에서의 단열성능 시험방법, 1985.
13. 한국공업규격, KS F 2278, 창호의 단열성 시험방법, 1997.