



이중 미서기창 창짝간 중공층의 대류 열전달로 인한 상하부 온도차가 결로 방지 성능에 미치는 영향에 대한 연구

The Influence of Top and Bottom Temperature Difference by Convective Heat Transfer on the Condensation Prevention Performance of Double Sliding Window

이용준* · 박지호** · 배민정*** · 오은주** · 최경석*** · 이주희****

Lee, Young-Jun* · Park, Ji-Ho** · Bae, Min-Jung*** · Oh, Eun-Joo** · Choi, Gyeong-Seok*** · Lee, Ju-Hee****

* Corresponding author, BEL Technology, Seoul, Korea (leeyj@beltec.co.kr)

** BEL Technology, Seoul, Korea (salzini@beltec.co.kr), (ohya@beltec.co.kr)

*** Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-do, Korea (baeminjung@kicr.re.kr), (bear717@kicr.re.kr)

**** Dept. of Computer Engineering, Hoseo Univ., South Korea (Juheelee@hoseo.edu)

ABSTRACT

Purpose: In the case of dual window, which is a characteristic window in Korea, the air layer between the window and the window is formed larger than the scale that can be evaluated by the calculation method suggested by the international standard (ISO). Due to the influence of convective heat transfer in the air layer, The upper and lower surface temperatures are measured differently. In particular, the lower temperature formed in the lower part can not reflect the difference in the current evaluation method. **Method:** In this study, the temperature difference between the top and bottom of the air layer was confirmed through real experiments, heat transfer analysis of existing methods, and three-dimensional heat & flow analysis. The surface temperature difference due to the convective heat transfer of the air layer between the windows was analyzed for four types of double-glazing glass assemblies with two types of double glazing. **Result:** As a result, the experimental results showed the lowest surface temperature, and the results of the heat flow analysis showed lower surface temperatures than those of the conventional thermal analysis, so that the analysis method reflecting the convective heat transfer better reflects the tendency of the actual experiment. Therefore, in order to evaluate the dew condensation preventing performance of the dual window more realistically, it is necessary to apply the analytical method which can reflect the temperature difference between the upper and lower parts.

© 2018 KIEAE Journal

KEYWORD

공기층
대류 열전달
전열 해석
열유동 해석
결로 방지 성능Air cavity
convective heat transfer
Heat & flow analysis
Condensation prevention performance

ACCEPTANCE INFO

Received Dec 3, 2017

Final revision received June 18, 2018

Accepted February June 23, 2018

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

공동주택 결로방지 성능평가 대상 부위 중 결로 발생 빈도가 가장 높은 부위인 창호의 결로 방지 성능에 대한 현행 평가 방법은 3차원 전열해석을 통하여 수행하도록 규정되어 있다. 대부분의 공동주택에 적용되고 있는 이중 미서기창(4 track-window, 이후 이중창)의 경우 실물 실험의 경향에서는 하부 프레임 부위(sill section)의 온도가 상부 프레임 부위(head section)의 온도 보다 낮게 나타나고 있으며, 이에 따라 공동주택 결로방지를 위한 설계기준의 부위중 하부 유리 모서리부위(edge)가 가장 결로에 취약한 부위로 나타나고 있다. 이는 이중창의 외창과 내창 사이에 형성되는 창짝간 공기층의 대류 열전달에 의한 영향으로 판단된다.

현재 공동주택에 적용되고 있는 이중창의 외창과 내창 사이의 중공층은 대부분 90 ~ 110mm의 공기층 두께를 형성하며, 이에 따라 기존의 전열 해석에서 공기층에 적용하는 물성을 결정하는

ISO(International Organization for Standardization) 기준의 수식 또는 제시 물성으로는 공기층의 상하부가 동일한 물성으로 반영되기 때문에 대류에 의한 온도차 형성을 반영할 수 없다 [1, 2].

실제로 현행의 방법은 공기층에서의 열전달 특성을 결정하는 유효 열전도율(λ_{eff})을 결정할 때 적용되는 부위가 공기층의 상부인지 하부인지의 여부는 고려하지 않고 동일한 물성이 반영된다. 이는 이중창의 외창과 내창 사이 창짝간에 큰 공기층을 형성하는 국내 창호의 특징에 대한 고려가 현행 기준에는 포함되어 있지 않기 때문으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 국내 특징적인 창호 형태인 이중창의 결로 성능 평가 시 해당 공기층의 대류 열전달이 결로방지성능 평가에 미치는 영향을 분석하고, 향후 시뮬레이션 평가 활용 시 보다 실질적인 해석이 가능한 해석법으로 개선하기 위한 기초 자료 제공을 목적으로 한다.

1.2. 연구 방법

본 연구에서는 해석적 방법에 의한 평가 결과와 실물 실험의 결과를 비교하여 현행 평가 방법 적용 시 나타날 수 있는 결과의 차이를 분석하였다. 이와 함께, 공기층내 대류열전달에 따른 상하부의 열전달 특성의 차이를 반영할 수 있는 열유동해석을 실시

하여 상하부의 열유동 차이를 반영한 유효열전달율을 산출하고, 이를 동일한 시뮬레이션 모델에 적용하여, 실물 실험 결과를 어느 정도 반영할 수 있는 지 비교 분석하였다.

대상 창호는 일반적으로 적용되고 있는 이중창의 프레임에 대상으로 하였으며, 창쪽간 공기층의 실내외측 경계조건을 결정하는 내측 및 외측 유리의 열성능을 다르게 적용하여 공기층에 유입되는 열량의 변화가 대류 열전달에 미치는 영향을 비교하였다.

단, 본 연구에서는 용이한 해석을 위해 현행 방법에서 제시하는 3차원 전열해석이 아닌 1차원 열전달 계산에 의한 유리 및 공기층 부분만 해석을 실시하였으며, 이에 따라, 프레임과 엣지의 영향을 적게 받는 부위를 선정하여 상하부 온도차를 비교하였다. 현행 시뮬레이션 계산법에서도 프레임 및 엣지의 영향을 제외하면 유리를 통한 열전달은 부위에 상관없이 동일한 열전달율을 적용하기 때문에 1차원 열전달과 유사한 경향으로 판단되며, 상하부의 차이는 1차원 계산 모델의 창쪽간 공기층의 물성을 열유동 해석을 통하여 도출한 상하부 물성으로 각각 적용 계산한 결과와 실험에 의한 결과를 비교함으로써 확인하였다.

2. 이중창 실물 실험

2.1. 실물 실험 개요

본 연구에서는 이중창의 실내외 창쪽간 공기층에 의한 창세트 상하부의 온도차를 확인하기 위하여 실물 실험을 실시하였다.

실내외 창쪽간에 형성되는 공기층이 면하게 되는 실내외 조건은 실내외 환경에 면하게 되는 유리의 성능에 따라 변경될 것으로 판단되며, 이에 대한 영향을 비교하기 위하여 실내외 창에 설치되는 유리의 성능을 고성능 유리와 저성능 유리로 구분하여 조합하였다.

다음의 그림은 본 연구에서 실물 실험한 프레임의 형상과 실내외창에 적용된 저성능 및 고성능 복층유리의 구성이다.

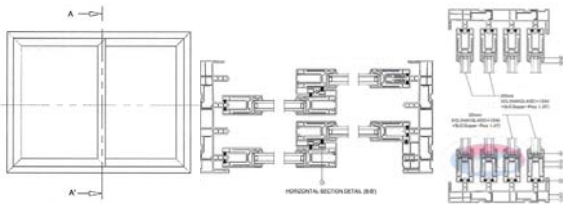


Fig 1. Frames of physical experiment double window (Left: window set type (sliding door), middle: horizontal section, right: vertical section)

Table 1. Composition of glass

Glazing	Glass composition		U _g (W/m ² K)	SHGC	Tvis
Pair-glass 1 (low-performance)	Glass 1	Clear 5mm (IGDB6958)	2.78	0.746	0.804
	Gap	AIR, 12mm			
	Glass 2	Clear 5mm (IGDB6958)			
Pair-glass 2 (high-performance)	Glass 1	Low-E 5mm (IGDB16860)	1.55	0.360	0.581
	Gap	AIR, 12mm			
	Glass 2	Low-E 5mm (IGDB16860)			

상기에 제시한 실험 대상 프레임은 공동주택의 확장형 발코니에 주로 적용되는 이중창 중 일반적인 형상으로 본 실험에서는 하나의 동일한 프레임에 유리의 성능 조합 Case를 적용하여 창쪽간 공기층에 면한 경계조건의 변화에 따른 실내 표면 온도 변화를 비교하였다.

Table 2. Composition of glass of target window

Case	Cool side	Cavity	Hot side
Case 1	Pair-glass 1 (low performance)	AIR	Pair-glass 1 (low performance)
Case 2	Pair-glass 1 (low performance)		Pair-glass 2 (high performance)
Case 3	Pair-glass 2 (high performance)	97mm	Pair-glass 1 (low performance)
Case 4	Pair-glass 2 (high performance)		Pair-glass 2 (high performance)

Table 1.은 본 실험실에서 적용된 실내외측 창 유리 종류 및 구성이다. 유리 구성은 고성능과 저성능의 두 가지 복층유리 (pair glass)를 이용하여 실내외측에 면하는 내외 창에 Table 2.와 같은 유리 조합을 적용하여 4가지 성능의 유리조합을 구성하여 실험하였다.

대상 이중창은 실내외창 사이에 창쪽간 공기층의 두께가 97mm인 형태이다.

2.2. 실물 실험 방법

본 연구에서 실시한 실물 실험은 KS F 2278에 의한 창호의 단열성능 측정 기준에 따른 실내외 환경 조건을 적용하여 실험을 실시하였으며, 이중창 내 창쪽 간 공기층에 대한 열적 특성의 파악을 위해 다음 그림과 같이 9개 지점에 T-type 열전대를 설치 후 표면온도를 측정하였다. 측정 지점은 프레임 및 엣지의 영향을 가능한 적게 받는 상하부로 선정하였고, 이에 따라, 대상 창의 유리 부분을 상하 및 좌우 3등분하여 각 분면 중앙점의 실내외 표면을 측정점으로 하였다.

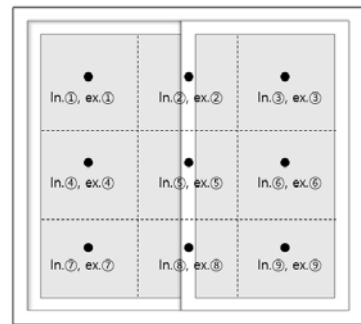


Fig 2. Temperature measurement point

2.3. 실물 실험 결과

Table 3.은 본 연구에서 실시한 실물 실험 결과 도출된 실험 Case별 표면온도 실측 결과로서, 전술한 상하부 온도차의 경향이 모든 부위에서 나타나고 있음을 알 수 있다.

Table 3. Glass surface temperature (Experiment, °C)

point	Case1		Case2		Case3		Case4		
	in.	ex.	in.	ex.	in.	ex.	in.	ex.	
Top	①	16.87	2.55	18.02	2.21	17.61	1.79	18.22	1.55
	②	18.08	1.47	18.36	1.34	18.42	1.47	18.54	1.28
	③	17.09	2.59	18.09	2.29	17.73	1.80	18.30	1.61
Mid.	④	15.83	1.92	17.19	1.62	16.81	1.39	17.56	1.20
	⑤	17.64	1.26	17.65	1.15	18.13	1.41	17.84	1.24
	⑥	16.25	1.25	17.53	1.05	17.25	0.78	17.84	0.69
Bot.	⑦	16.33	1.19	16.99	1.08	16.81	0.92	17.29	0.83
	⑧	17.02	0.70	17.19	0.65	17.67	0.71	17.44	0.65
	⑨	15.79	1.40	17.26	1.25	16.71	1.05	17.54	0.96

3. 이중창 전열 해석

3.1. 이중창 전열 해석 개요

본 연구에서는 이중창 상하부의 표면온도 해석 결과를 비교하기 위해 전열해석 방법과 CFD를 활용한 열유동 해석 결과를 비교하였다. 전열해석 방법은 ISO 15099에 따른 1차원 해석 방법으로 창공간 공기층에 대해서 ISO 기준에서 제시하는 수식에 따라 유효열전도율(Effective Conductivity, λ_{eff})을 산출하여 적용하였다. 이에 따라 3차원 유동 및 열전달이 발생하는 공기층의 실제 물리적 현상을 단일 열전달 현상인 열전도로 간략화하여 계산함으로써 비교적 간단한 수치적 모델링과 계산도구를 통해 전체 창세트의 열전달을 해석 할 수 있도록 규정하고 있다.

본 연구에서는 창호의 유리 부분에 대한 해석만 진행하였으며, 이에 따라 NFRC(National Fenestration Rating Council, 미국)에서 제공하는 WINDOW 프로그램을 활용하였다. 해당 프로그램은 ISO 15099에 따라 공기층의 유효열전도율을 산출하는 프로그램으로 ISO 15099에서 제공하는 계산 공식을 활용하여 복사열 전달이 발생하는 공기층의 열전달 계산에 적용이 용이하다.

본 연구에서는 ISO 15099에 제시된 유효 열전도율 산정 수식을 활용하였으며, 수식을 간략히 정리하면 다음과 같다.

$$\lambda_{eff} = (h_{cv} + h_r) \times d \quad [1]$$

$$h_{cv} = Nu \frac{\lambda_{ai}}{d} \quad [2]$$

여기서,

λ_{eff} : 유효열전도율 h_{cv} : 대류 열전달 계수

h_r : 복사 열전달 계수 d : 열류방향 공기층 두께

N : 너셀 수 λ_{ai} : 공기의 열전도율

유효열전도율은 복사(h_r)와 대류(h_{cv})의 합으로 구분되어 있으며 복사항의 경우 표면의 온도차 및 방사율(Emissivity) 그리고 공기층의 크기에 영향을 받고 대류항 h_{cv} 의 경우 Nusselt Number(Nu)와 밀접한 관계가 있다.

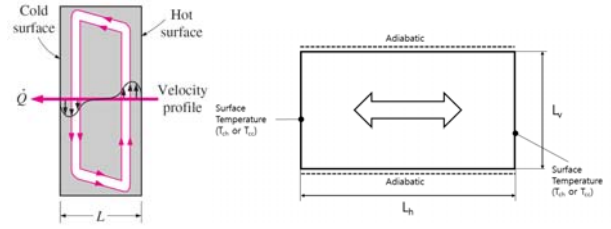


Fig 3. Thermal and Fluid Flow in the Cavity

Nusselt Number는 유체의 열전도율 대비 전체 열전달량의 비로서 온도가 서로 다른 면 사이에 위치한 공기층은 내부에 밀도의 차이에 의한 자연대류가 발생하여 공기의 열전도율보다 큰 열전달이 발생한다. 즉 이 경우 Nu 수는 1 이상의 값을 갖게 되며 프레임 내부의 에어포켓 및 중공층 등에서 발생하는 열전달을 제대로 분석하기 위해서는 이 Nu 수에 따라 공기의 열전도율을 보정하여 공기층 내부에서 발생하는 대류현상에 의한 열전달의 상수를 반영해 주어야 하며 ISO 15099에서는 열류의 방향에 따라 다른 Nusselt Number 산정 공식을 제공한다.

이중창에서 창문의 밀폐에 따라 형성되는 공기층의 경우 대략 높이 2m, 폭 2m, 두께 0.1~0.15m 정도의 공기층이 되며 창호 내에 마주하는 실내외 표면의 온도차에 따라 열류의 방향은 유리면에 수직인 방향의 열흐름이 생성되므로 공기층 내부의 열 흐름은 위의 그림과 같이 수평열류가 된다.

수평방향의 열류에 대한 ISO 15099에서의 대류열전달계수 (h_{cv}) 산정은 다음과 같다 [3].

$$\textcircled{1} L_h/L_v < (1/2) \quad [3]$$

$$Nu = 1 + \left\{ \left[2.756 \times 10^{-6} Ra^2 \left(\frac{L_v}{L_h} \right)^8 \right]^{-0.386} + \left[0.623 Ra^{1/5} \left(\frac{L_h}{L_v} \right)^{2/5} \right]^{-0.386} \right\}^{-2.59}$$

$$\textcircled{2} L_h/L_v > 5 \text{ 인 경우, 아래 3가지 중, 가장 큰 값을 적용한다.}$$

$$Nu_1 = \left\{ 1 + \left(\frac{(0.104 Ra^{0.293})^3}{1 + \left(\frac{6310}{Ra} \right)^{1.36}} \right)^{1/3} \right\} \quad [4]$$

$$Nu_2 = 0.242 \left(Ra \frac{L_h}{L_v} \right)^{0.273} \quad [5]$$

$$Nu_3 = 0.0605 Ra^{1/3} \quad [6]$$

③ $(1/2) < L_h/L_v \leq 5$ 인 경우에는 앞서 제시한 ①, ②형상에 따른 극값에 대하여 보간하여 구한다.

Ra 는 유체의 대류와 관련된 무차원수인 Rayleigh number 이며 다음과 같다.

$$Ra = \frac{\rho_{ai}^2 L_v^3 g \beta_{p,ai} (T_{ch} - T_{cc})}{\mu_{ai} \lambda_{ai}} \quad [7]$$

여기서,

ρ : 유체 밀도 g : 중력 가속도

β : 온도에 따른 체적 팽창률

Cp : 정압 비열 μ : 점성 계수 λ : 열전도율

복사 열전달 h_r 의 산정 수식은 다음과 같다.

$$h_r = \frac{4\sigma T_{av}^3}{\frac{1}{\epsilon_{cc}} + \frac{1}{\epsilon_{ch}} - 2 + \frac{1}{\frac{1}{2} \left(\left[1 + \left(\frac{L_h}{L_v} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{L_h}{L_v} + 1 \right)}}$$

$$T_{av} = \frac{T_{cc} + T_{ch}}{2} \quad [8]$$

여기서, ϵ_{cc} : 저온 측 표면 방사율 ϵ_{ch} : 고온 측 표면 방사율

T_{cc} : 저온 측 표면 온도 T_{ch} : 고온 측 표면 온도

h_r 의 경우 h_{cv} 와 달리 Nu 및 Ra 수와 관련이 없기 때문에 공기층 내부 기체의 물성치에 영향을 받지 않으며 공기층의 형상 그리고, 공기층 열류의 방향과 수직하는 표면의 온도 및 표면 방사율에 영향을 받는다.

3.2. WINDOW 프로그램을 활용한 실내외 이중창 간 공기층의 유효 열전도율 및 유리 표면온도 산출

WINDOW 프로그램의 경우 공기층의 대류 및 복사에 의한 열전달을 반영하여 최종적으로 공기층의 열전달을 일반적인 고체의 열전도 현상으로 가정할 수 있게 하는 유효열전도율 (Effective Conductivity, λ_{eff})을 산정하며, 유효열전달율의 산정은 전술한 ISO 15099를 준용한다. 이중창의 경우 다음의 그림과 같이 복층유리 설정에서 총 4장의 판유리와 각 판유리 사이에 3개의 공간으로 구성되며, WINDOW에서 생성되는 실내외 유리 사이의 공기층에 대한 유효열전도율은 1차원 적인 값으로 유리면의 상하 위치에 관계없이 동일한 유효열전도율값이 적용된다.

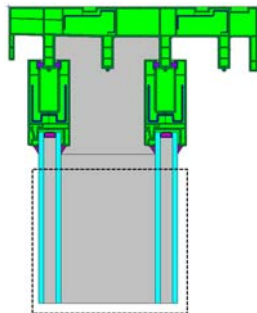


Fig 4. Glazed Heat Transfer Section within Double Sliding Window

본 연구에서는 NFRC 기준의 경계조건 대신 KS기준의 창세트 열성능 시험의 경계조건을 적용하였으며, 창세트의 열관류율 산출을 위한 겨울 환경 조건을 적용하였다 [4]. 적용된 조건은 다음과 같다.

Table 4. Boundary Condition of Heat transfer analysis

temperature	cool side (0°C), hot side (20°C)			
Outdoor / indoor surface heat transfer coefficient	ex. $h_e = h_{re} \times \epsilon_e \times h_{ce}$			
	in. $h_i = h_{ri} \times \epsilon_i \times h_{ci}$			
	summer		winter	
	radiation	convection	radiation	convection
cool side	$h_{re}=6.5$	$h_{ce}=12.2$	$h_{re}=5.1$	$h_{ce}=16.3$
hot side	$h_{ri}=6.3$	$h_{ci}=3.9$	$h_{ri}=5.6$	$h_{ci}=3.3$
Emissivity of glass	0.896			

해당 경계조건은 Table 4.에 제시된 바와 같이 실내외 공간과 유리 표면간 복사열전달을 포함하며, 실내외 공간에 접하는 유리표면에 대한 방사율이 적용되어 산출되었다. 따라서 실내외 공간과 접하는 표면으로부터의 열전달 계산에서 별도의 복사계산을 추가할 필요는 없으며, 온도 및 표면의 열전달율만 반영된다. 반면에, 공기층 내부의 경우 복사열전달이 관련되며 ISO 15099에 따라 공기층 내부의 공기와 접하는 유리 표면의 방사율이 적용된 유효열전도율을 산정하여 적용한다.

모든 복층유리는 5mm 두께의 판유리 사이에 12mm 두께의 공기층을 포함하는 것으로 설정되어 있으며 Low-E 코팅의 유무에 따라 4가지로 구분하였다. Low-E 코팅면에 대한 설정은 현실적인 코팅면 설정 조건을 반영하여 총 4가지의 2중창 복층유리 조합을 구성하였다. 본 연구에서는 실제 제작 창호의 특성을 반영하기 위하여 IGDB에 등록된 판유리를 선정하였으며 그 내용은 Table 5.와 같다.

Table 5. Effective thermal conductivity of pair glass

Case	Position /Layer	Thickness of Layer (m)	Conductivity of Layer (W/m-K)	IGDB no.	Emissivity		
					e1	e2	
Case 1	Ex,	1	0.005	1.000	6958	0.837	0.837
		2	0.012	0.066	AIR	-	-
		3	0.005	1.000	6958	0.837	0.837
	In,	1	0.005	1.000	6958	0.837	0.837
		2	0.012	0.073	AIR	-	-
		3	0.005	1.000	6958	0.837	0.837
Case 2	Ex,	1	0.005	1.000	6958	0.837	0.837
		2	0.012	0.066	AIR	-	-
		3	0.005	1.000	6958	0.837	0.837
	In,	1	0.005	1.000	16860	0.845	0.026
		2	0.012	0.026	AIR	-	-
		3	0.005	1.000	16860	0.026	0.845
Case 3	Ex,	1	0.005	1.000	16860	0.845	0.026
		2	0.012	0.026	AIR	-	-
		3	0.005	1.000	16860	0.026	0.845
	In,	1	0.005	1.000	6958	0.837	0.837
		2	0.012	0.073	AIR	-	-
		3	0.005	1.000	6958	0.837	0.837
Case 4	Ex,	1	0.005	1.000	16860	0.845	0.026
		2	0.012	0.025	AIR	-	-
		3	0.005	1.000	16860	0.026	0.845
	In,	1	0.005	1.000	16860	0.845	0.026
		2	0.012	0.026	AIR	-	-
		3	0.005	1.000	16860	0.026	0.845

Table 6.는 앞서 설정한 조건에 따라 WINDOW 프로그램을 활용하여 해석한 유리 표면온도로서 해당 온도는 현행 평가법 상의 해석과정에서 도출되는 온도와 해석 과정상 차이가 없는 온도로 판단된다.

이중창의 창공간 공기층에 대한 유효열전도율(W/m²·°C)을 WINDOW 프로그램으로 산출한 결과는 0.5132(case 1), 0.4928(case 2), 0.5123(case 3), 0.4959(case 4)로 산출되었으며, 상기의 계산 결과는 창호의 중심 혹은 평균면을 대표하는 값으로 사용되며 NFRC의 시뮬레이션 평가 방법에서는 이 1차원 데이터를 대표값으로 하여 공기층에 적용하여 전열해석을 실시한다.

Table 6. Glass surface temperature(Heat transfer analysis ISO 15099)

Case	Glass surface temperature (°C)				Effective Conductivity (W/m ² ·°C)	
	exterior Glass ex.side	exterior Glass in..side	interior Glass ex.side	interior Glass in..side	Cavity (100mm)	whole layer (144mm)
1	1.3	6.5	11.9	16.7	0.5132	0.2554
2	0.9	4.7	8.6	17.7	0.4928	0.1661
3	0.9	10.4	14.2	17.6	0.5123	0.1691
4	0.7	8	11.1	18.2	0.4959	0.1246

4. 공기층의 3차원 열유동 해석

4.1. 공기층 열유동 해석 모델의 개요

100mmmm 두께의 공기층에 대한 3차원 수치해석 모델을 수립하여 계산을 실시하였으며, 50mmmm를 초과하여 국제 규격 등에서 제시하는 1차원적 해석 방식으로는 오차가 발생 하는 부분에 대하여 3차원 대류 및 복사 열전달 분석을 수행하였다.

창세트의 표준 실물 실험 크기인 폭 2m, 높이 2m 내부를 차지하는 공기층을 대칭(Symmetry) 형상으로 적용하여 폭 1m, 높이 2m의 직육면체 공기층으로 작성하여 시뮬레이션에 반영하였다.



Fig 5. Three Dimensional Heat & Flow Analysis Model

해석을 위한 경계조건은 전열해석 시 적용된 바와 같은 조건을 적용하였으며, KS기준에 따른 경계조건은 표면 열전달율의 산정에서 이미 복사량이 포함되어 있으므로 복사 모델인 S2S Radiation Model은 실내의 공기와 접하는 면의 방사율을 0으로 설정하고 KS 기준의 표면 열전달율을 적용하였다. 복층 유리의 경우 경계조건에 Multi-Layer Conductivity를 적용하여 WINDOW에서 산출한 복층 유리 각 층의 열전달 값 및 두께를

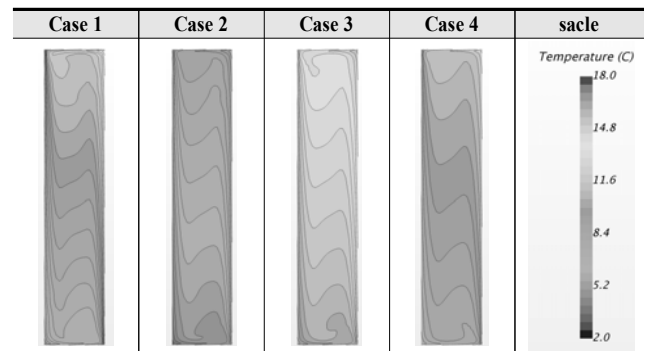
적용하였다.

이 때, 복층 유리 내부 밀폐 공기층의 경우 WINDOW를 통해 산출한 유효열전도율을 CFD에 그대로 적용하였다.

4.2. 3차원 열유동 해석 결과

Table 6. 3차원 열유동 해석의 결과를 제시한 것으로 공기층 내부의 밀도차에 의한 온도 성층화를 확인할 수 있다. (상부: 고온, 하부: 저온) 공기층의 공기온도에 따라 이에 면한 표면의 온도는 높이(중력가속도에 평행한 방향)에 따라 상이한 값을 나타낸다.

Table 6. 3D Heat & Flow Analysis Results of Cavity



또한 Low-E 유리의 적용 여부 및 적용 위치에 따라 공기층 내 온도가 서로 다르며 유리와 접하게 되는 표면의 상하 온도가 Case 설정에 따라 다르게 나타난다.

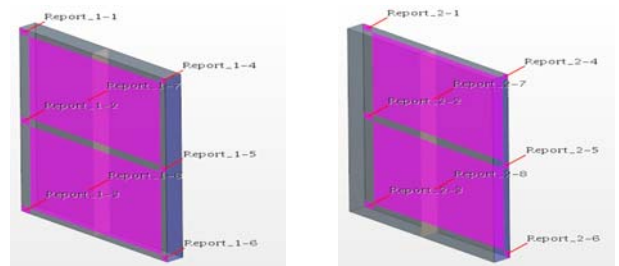


Fig 6. Area of Effective thermal conductivity calculation

상기의 그림은 본 해석에서 활용한 모델에서 유효열전도율을 산출하기 위한 위치 구분을 나타낸 것이다. (전·후 각각 8개 지점: 테두리 상중하, 중심부 상중하, 테두리 및 중심부 제외 상하 2등분 평균)

Table 7.은 열유동 해석 결과 산출된 유효열전도율로서 상부로 갈수록 유효열전도율이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 공기층의 상하부 온도차 발생의 원인을 단적으로 보여주는 결과로서 상하부에서 대류에 의하여 발생하는 유동의 밀도가 중력의 영향으로 상부는 다소 성기고, 하부는 높은 밀도가 발생되기 때문이라고 판단된다.

Table 7. Effective Conductivity By region

Effective Conductivity (W/m·°C)	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
Top	0.3878	0.3703	0.3933	0.3954
Middle	0.4941	0.4731	0.4769	0.4659
Bottom	0.5827	0.5211	0.5521	0.5187
Average	0.494	0.473	0.477	0.466

Table 8.은 해석을 통하여 산출된 표면온도이다. 표면온도는 실험을 통하여 표면온도를 실측하였던 부위에 대하여 산출하였으며, 이중 각 Case별 상하부 1개 지점에 대한 결과를 정리한 것이다.

Table 8. Glass surface temperature (3D Heat & Flow Analysis)

point	Surface Temperature [°C]			
	Case1	Case2	Case3	Case4
ex. ⑦(Bottom)	1.0	0.7	0.8	0.6
ex. ①(Top)	1.6	1.2	1.0	0.8
in. ⑦(Bottom)	16.2	17.5	17.1	18.0
in. ①(Top)	17.4	18.0	18.1	18.5

5. 공기층 상하 표면온도 비교

Table 9.은 앞서 제시한 실험결과와 전열해석 결과, 3차원 열 유동 해석 결과에 따른 부위별 표면온도를 비교한 것이다.

Table 9. Glass surface temperature by evaluation method

Evaluation method / Region		Surface Temperature [°C]			
		Case1	Case2	Case3	Case4
Experiment	top	16.9	18.0	17.6	18.2
	bottom	16.3	17.0	16.8	17.3
3D Heat & Flow Analysis	top	17.4	18.0	18.1	18.5
	bottom	16.2	17.5	17.1	18.0
Heat transfer analysis	top & bottom	16.7	17.7	17.6	18.2

다음의 그래프는 각 분석 방법별 공기층 하부의 실내표면 온도를 비교한 것이다.

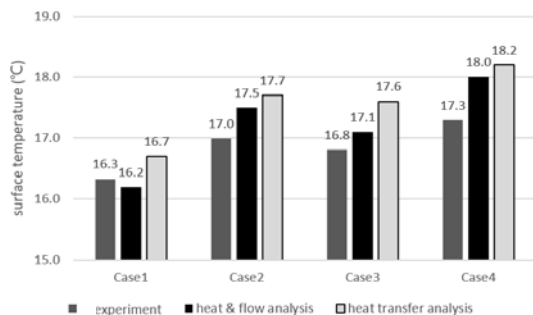


Fig 7. Glass bottom part surface temperature by evaluation method

창호의 결로 성능이 가장 취약한 하부 표면온도를 비교한 결과 2차원 전열해석이 가장 높은 온도로 평가되고 있으며, 실험을 통한

결과가 가장 열악한 표면온도를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

3차원 열 유동 해석 결과는 실내측 유리의 단열성능이 고성능인 경우 2차원 전열해석 결과에 근접하며, 실내측 유리의 단열성능이 저성능인 경우 실험 결과에 근접하게 해석 되었다. 이는 실험 환경과 해석 시 적용되는 실내외 표면열전달 조건의 차이와 실내외 표면의 복사열전달 경계조건의 차이가 해석과 실측의 온도 차이의 영향을 주는 요인으로 작용하는 것으로 판단된다.

Table 10.은 하부 표면온도에 따른 TDR(Temperature Difference Ratio) 변화를 비교한 것으로, 현행 기준 [5]상 1지역 유리 중앙 부위의 TDR 기준인 0.16 기준으로 판단하면 Case1을 제외한 모든 Case가 기준 TDR을 만족하고 있으며, 평가 방법에 따른 만족여부의 변화는 없는 것으로 나타났다.

Table 10. Glass surface TDR by evaluation method

Evaluation method / Region		Case1	Case2	Case3	Case4
Experiment	Surf, Temp.[°C]	16.3	17.0	16.8	17.3
	TDR	0.185	0.150	0.160	0.135
3D Heat & Flow Analysis	Surf, Temp.[°C]	16.2	17.5	17.1	18.0
	TDR	0.190	0.125	0.145	0.100
Heat transfer analysis	Surf, Temp.[°C]	16.7	17.7	17.6	18.2
	TDR	0.165	0.115	0.120	0.090

Table 11.은 실측 결과 도출된 각 Case별 유리 모서리 부위의 온도 및 TDR 결과로서 중앙부에 비하여 낮은 온도와 높은 TDR을 나타내는 것을 알 수 있다.

이는 프레임과 엷지에 의한 열손실의 영향으로 판단되며, 향후 해석 시 상하부의 다른 열전달 특성이 발생하는 이중창의 경우 하부의 열전달 특성을 반영하여 유리 모서리 부위를 합리적으로 해석할 수 있는 유효 열전도를 산출방법의 제시가 필요할 것으로 판단된다.

Table 11. Glass Bottom Edge Part Surf, Temp. & TDR

Evaluation method / Region		Case1	Case2	Case3	Case4
Experiment	Glass Bottom Edge Part Surf, Temp.[°C]	15.3	16.2	16.6	16.1
	TDR	0.235	0.190	0.170	0.195

6. 결론

국내의 특징적인 창인 이중창의 경우 창짝간 공기층의 대류 열전달의 영향으로 실험 시 창호의 상하부 표면온도가 다르게 측정되고 있다. 특히 하부에 형성되는 낮은 온도는 현행의 평가법으로는 차이를 반영할 수 없다. 이에 본 연구에서는 실물 실험과, 기존 방법에 준하는 전열해석, 그리고 3차원 열유동 해석을 통하여 해당 공기층의 상하부 공기온도의 차이를 확인하였다.

이를 위하여, 2종류의 단열성능을 가지는 복층유리를 조합한 4종류의 이중창 유리 구성에 대하여 창짝간 공기층의 대류 열전달에 따른 표면온도 차이를 분석한 결과, 실험을 통한 결과가 가장 낮은 표면온도를 나타내었으며, 열유동 해석의 결과가 기존의 전열해석 결과보다 낮은 표면온도를 나타내어 대류 열전달을 반영하는 해석 방법이 실물 실험의 표면온도 경향을 보다 잘 반

영할 수 있음을 확인하였다.

특히, 실내측에 면한 유리의 단열능력이 낮은 경우 열유동 해석과 실물실험 결과의 오차가 감소하는 경향을 나타내었는데 이는 해석과 실물실험의 경계조건, 특히 복사열전달 경계조건의 차이에서 기인하는 것으로 사료된다. 이에, 향후 복사열전달의 영향을 보다 현실적으로 반영할 수 있는 평가 법의 고찰이 요구된다.

본 연구는 유리에 둘러싸인 공기층만을 대상으로 비교하였기 때문에, 프레임 및 간봉의 영향이 반영된 실제 창호의 모서리 부위에 대한 영향을 확인하지는 못하였으며, 해당 부위에 대한 실물 실험의 결과로 판단할 때, 창쪽간 공기층의 상하 온도차 발생 요인의 영향을 받는 것으로 판단할 수 있었다. 이에 해당 부위 해석 시 적용 가능한 프레임과 엷지에 인접한 공기층의 유효열전달율에 대한 상세한 연구가 요구된다.

그러나, 본 연구를 통하여 대류열전달의 영향을 반영할 수 있는 해석법의 적용이 이중창의 결로방지성능을 보다 현실적으로 평가하기 위한 상하부의 온도차를 반영할 수 있는 해석 방법으로 작용 가능함을 확인하였다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 주거환경연구사업의 연구비지원(17RER P-B082204-04)에 의해 수행 되었습니다.

Reference

- [1] 이용준, 오은주, 김사겸, 최경석, 강재식. 창틀 공기층의 유효 열전도율(λ_{eff}) 산정방법 차이가 창 전체 열관류율(U_w) 시뮬레이션 결과에 미치는 영향에 대한 비교 분석. KIEAE Journal, Vol.16 No.2(통권 78호) (2016-04) // Lee, Yong-Jun, Oh, Eun-Joo, Kim, Sa-Kyum, Choi, Gyeong-Seok, Kang, Jae-Sik, A comparative analysis of the total window thermal transmittance simulation result according to the evaluation method of effective conductivity(λ_{eff}) of frame cavity-Focused on unventilated frame cavity simulation results of single window, KIEAE Journal, Vol.16 No.2, 2016.04
- [2] 장민선, 오은주, 최원기, 이용준. 실험과 전열해석을 통한 창호의 열 성능 평가방법 비교, 한국건축친환경설비학회, 추계학술발표대회, 2014 (2014-11) // Jang, Min-Seon, Oh, Eun-Joo, Choi, Won-Ki, Lee, Yong-Jun, A Comparative Study on Empirical and Numerical Method for the Window Set Thermal Performance Evaluation, Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems fall conference, 2014.11
- [3] ISO 15099:2003(en) Thermal performance of windows, doors and shading devices — Detailed calculations
- [4] KS L 2514:2011 7.1 판유리의 가시광선 투과율, 반사율, 방사율, 태양열 취득률 시험방법 // KS L 2514:2011 7.1 Testing method on transmittance and emittance of flat glasses and evaluation of solar heat gain coefficient
- [5] 공동주택 결로 방지를 위한 설계기준, 국토교통부고시 제2013-845호, 2013.12.27