

# 진공 및 이산화탄소 삼중유리 시스템의 최적 두께 및 열관류율 분석

## Analysis of the Optimal Thickness and the Heat Transmission for the Triple Glazing System with Vacuum and Carbon Dioxide Gaps

백상훈\*

Sang-Hoon Baek

### Abstract

Advanced glazing systems with excellent heat transmission values (Ug-Value) have been developed to reduce the energy consumption and the greenhouse gas emission. This study proposes a triple glazing system consisting of gaps with a vacuum and a carbon dioxide gas layer which is one of greenhouse gases. As a fundamental stage, this study is focused on calculating the optimal glazing thickness and the Ug-Value via a computer simulation, Therm & Window package. As the results, it was presented that the optimal thickness of the proposed triple glazing system is 22.2 mm, and the Ug-Value is 0.273 W/m<sup>2</sup>·K. If this glazing system is to be applied to buildings, it could not only reduce building energy consumption but could also contribute to the treatment of carbon dioxide gas which is one of greenhouse gases.

**Keywords:** Triple Glazing System(삼중유리시스템), Carbon Dioxide(이산화탄소), Vacuum(진공), Heat Transmission(열관류율)

### 1. 서론

건물에서 창호의 유리 시스템은 외벽과 비교하여 열관류율(Heat transmission: Ug-Value)이 다소 높기 때문에 이를 향상시키기 위해 수년 동안 다양한 연구들이 지속되어 왔다. 그 결과 현재에는 외벽보다 현저하게 낮은 열관류율을 갖는 초 단열 유리 시스템들이 다수 개발되었으며 이는 표 1과 같이 대표적인 8종류로 구분될 수 있다(Erdem and Saffa, 2015).

지금의 초 단열 유리 시스템은 전통적인 다층유리 시스템에서 벗어나 매우 얇은 유리 두께와 더불어 열관류율을 벽체보다 낮게 유지시키는 것에 초점을 맞추고 있다. 이를 위해 저 방사 필름, 진공, 에어로젤과 같은 새로운 단열 재료들이 활용되고 있다. 또한 단지 단열 성능에 중점을 두지 않고 태양전지, 상변

화물질(PCM, Phase Change Material), 이산화티타늄과 같이 에너지 생산, 일사 조절, 유지보수 등을 함께 수행할 수 있는 다목적 유리 시스템들로 개발되고 있다.

이러한 흐름에 맞춰 본 연구에서는 새로운 초 단열 및 다목적 유리 시스템으로서 온실가스인 이산화탄소(Carbon Dioxide: CO<sub>2</sub>)를 활용한 삼중 유리 시스템을 제안하고자 한다. 이산화탄소는 지구온난화를 일으키는 주요 온실가스로서 배출이나 사용이 통제되고 있다. 그러나 최근 이산화탄소의 포집 및 저장 기술이 발전하여 이를 인위적으로 조절할 수 있는 수준까지 도달하면서 이산화탄소를 건자재화하려는 연구가 활발히 수행되고 있다(Mar et al., 2014). 특히, 순수 이산화탄소 가스의 단열 성능은 비활성 기체 중 아르곤(Argon) 가스와 유사하기 때문에 건물에서 단열 재료로서 활용이 가능하다.

\* 국립한경대학교 건축학부 연구교수(shbaek2018@hknu.ac.kr)

**Table 1.** The Advanced Glazing Systems Introduced in the Previous Studies

No.	Type	Main purpose	U <sub>g</sub> -Value (W/m <sup>2</sup> · K)
1	Multi-layer glazing	Insulation	0.70
2	Suspended glazing	Insulation	0.28
3	Vacuum glazing	Insulation	0.24
4	Electrochromic glazing	Insulation shading	0.62
5	Photovoltaic glazing	Insulation shading Energy Supply	1.10
6	Aerogel glazing	Insulation	0.40
7	PCM glazing	Insulation	0.50
8	Self-Cleaning glazing	Insulation maintenance	1.20

한편 건물에서 순수한 가스 자체를 단열 재료로 적용하기 위한 요소들은 많지 않다. 그러나 창호의 다층 유리 시스템은 단열 가스를 활용하면서 이를 간봉(Edge Sealing) 기술로 밀폐시킬 수 있기 때문에 대기 중으로 이산화탄소를 재 배출시키지 않으면서 안전하게 사용하는 것이 가능하다. 또한 유리와 이산화탄소 자체만으로는 열관류율이 1.0W/m<sup>2</sup>·K이하인 초 단열화가 거의 불가능하다. 그러나 0.2mm 정도의 매우 얇은 두께만으로도 열관류율을 급격하게 떨어뜨릴 수 있는 진공 기술이 접목된다면 전체 유리 두께를 크게 증가시키지 않으면서 열관류율이 0 점대인 초 단열 유리 시스템으로의 구현이 가능할 것이다 (Yueping et al., 2009).

만약 본 기술이 개발된다면 크게 3가지 장점을 가질 수 있으며 첫째, 비교적 가격이 높은 기존 유리의 단열 가스 대신 값싼 이산화탄소를 활용하기 때문에 창호 전체의 경제성이 향상될 수 있다. 둘째, 온실가스인 이산화탄소가 건물에 삽입되기 때문에 건물 자체가 산림과 같은 이산화탄소 흡수원으로 전환됨으로써 온실가스 감축에 기여할 수 있다. 셋째, 현재 포집 및 저장된 이산화탄소를 처리하는 과정에는 많은 비용이 소요되지만 이러한 이산화탄소를 지하에 매장시키지 않고 저장 단계에서 건자재로 활용되기 때문에 이산화탄소 처리 비용을 절감시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이산화탄소 가스와 진공을 이용하여 열관류율이 0점대인 초 단열 삼중 유리 시스템을 개발하는 것에 목적이 있다. 이를 위한 초기 단계 연구로서, 우선 제안된 삼중 유리 시스템의 개요와 구조 및 특징을 설명하였다. 이후, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 가스층 및 유리의 두께 변화 별 열관

류율을 분석하여 삼중 유리 시스템의 최적 두께와 이에 대한 열관류율을 제시하였다. 이러한 결과를 도출하기 위해 창호 분석 프로그램으로서 2차원 열전달 해석이 가능한 LBNL의 Therm & Window가 이용되었다(John et al., 2013). 아울러 도출된 열관류율의 단열 수준을 비교하기 위해 현재 국내외에서 제시한 8종류의 차세대 유리 시스템들의 열관류율과 본 시스템의 열관류율을 비교하여 도출된 결과를 고찰하였다.

## 2. 연구 방법

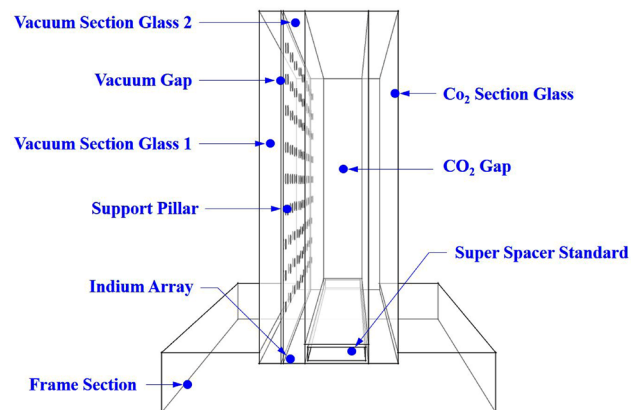
### 2.1 시스템 개요

#### 2.1.1 구조 및 특징

본 연구에서 제안한 진공 및 이산화탄소 삼중유리 시스템의 개념도는 그림 1과 같다. 제안된 시스템은 2장의 유리와 진공 및 필러(Pillar)로 구성된 진공 섹션(Vacuum section)과 한 장의 유리 및 이산화탄소를 포함한 이산화탄소 섹션(Carbon dioxide section)으로 구분된다. 진공 섹션은 실내 측, 그리고 이산화탄소 섹션은 실 외측에 각각 위치하며 이산화탄소 층의 밀폐는 흡습제를 포함한 에틸렌(Ethylene) 간봉(Edge sealing)인 반면, 진공 층은 인듐 어레이(Indium array)가 적용된다(Yueping et al., 2014). 특히, 진공 섹션은 선행연구에서 제시한 최적 두께인 유리 3mm 및 진공 0.2mm로서 총 6.2mm의 두께가 적용되었으며 (Yueping et al., 2009), 본 연구에서는 이산화탄소 섹션의 가스 층 및 유리의 최적 두께를 분석하여 삼중 유리 시스템의 총 두께를 제시하는 것에 중점을 두었다.

#### 2.1.2 열관류율 산정

그림 2는 삼중 유리 시스템에서 열관류율 계산을 위한 섹션별 열전달 과정을 도식화한 것이다.



**Fig. 1.** The Structure and Characteristics of the Proposed Triple Glazing System

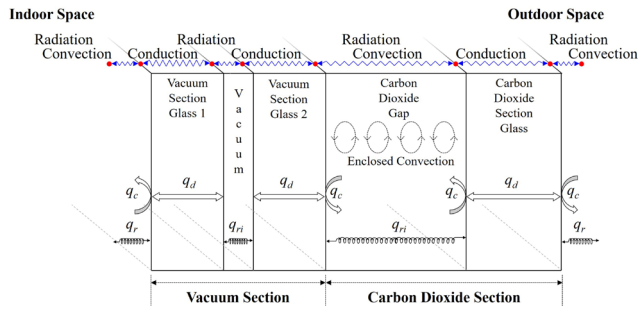


Fig. 2. Heat Transfer Process to Calculate the Heat Transmission (Ug-Value) in the Triple Glazing System

본 삼중 유리 시스템은 고체인 유리와 기체인 가스로 구성 되기 때문에 표면과 공간 사이에서 전도, 대류, 복사의 모든 열 전달 과정을 통해 열관류율이 결정된다. 특히, 대류 및 복사의 계산에서는 대기 중에 노출된 유리 표면에서 일어나는 개방계와 진공층 및 이산화탄소 가스층과 같은 밀폐계로 구분하여 계산된다. 아울러 진공 층은 고체나 기체가 존재하지 않기 때문에 오직 유리 표면에서의 복사만을 고려하여 열전달을 산출할 수 있다. 이러한 각각의 열전달은 푸리에의 법칙(Fourier's Law)과 뉴턴의 법칙(Newton's Law)에 의해 정의될 수 있으며 모든 계산은 정상상태라고 가정할 때 다음의 일반식들로 표현될 수 있다 (Carli Inc., 2006).

우선 대기 중에 노출되는 유리 표면에서의 대류는 다음의 식 (1)에 의해 계산될 수 있다.

$$q_c = h_c(T - T_c)[W] \tag{1}$$

여기서  $q_c$ 는 대류 열전달을 나타내며  $h_c$ 는 유리 표면에서의 대류 열전달계수를 의미한다. 또한  $T$ 는 유리의 표면온도이며  $T_c$ 는 유리 주위의 공기온도를 나타낸다.

반면, 이산화탄소 가스가 삼입된 밀폐계에서 가스에 의한 대류는 다음의 식 (2)를 통해 산출될 수 있다.

$$q_c = kANu \frac{T - T_r}{\delta}[W] \tag{2}$$

여기서,  $k$ 는 가스의 열전도율,  $A$ 는 유리의 표면적을 나타내며  $Nu$ 는 무차원수인 Nusselt Number를 의미한다. 또한  $T$ 는 유리의 표면온도이며  $T_r$ 는 밀폐공간에서 가스의 온도를 나타낸다. 아울러 특성길이  $\delta$ 는 가스층의 두께를 의미한다. 또한 무차원수인 Nusselt Number는 다음의 식 (3)에 의해 계산될 수 있다.

$$Nu = CRa^m \left( \frac{H}{\delta} \right)^n \tag{3}$$

여기서,  $Ra$  무차원수인 Rayleigh Number,  $H$ 는 유리의 수직 높이를 나타내며  $C, m, n$ 은 특성길이  $\delta$ 에 따른 실험 상수를 나타낸다. 아울러 Rayleigh Number는 다음의 식 (4)를 통해 계산될 수 있다.

$$Ra = \frac{g\beta(T - T_r)\delta^2}{\nu^2} Pr \tag{4}$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도,  $\beta$ 는 가스의 체적팽창계수를 나타내며,  $\nu$ 는 가스의 동점성계수이고  $Pr$ 은 무차원수로서 가스의 Prandtl Number를 나타낸다.

한편 대기 중에 노출되는 유리 표면에서의 복사  $q_r$ 는 다음의 식 (5)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$q_r = \epsilon\sigma A(T^4 - T_r^4)[W] \tag{5}$$

여기서,  $\epsilon$ 는 유리의 표면 방사율,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수를 나타내며  $A$ 는 유리의 표면적을 의미한다. 또한  $T$ 는 유리 표면에 대한 절대온도, 그리고  $T_r$ 은 유리 주변 공기에 대한 절대온도를 의미한다.

이와 대조적으로 진공 및 이산화탄소 층의 밀폐된 공간에서의 복사는 다음의 식 (6)을 통해 계산된다.

$$q_{ri} = \epsilon\sigma AT^4 - \alpha_i H_i[W] \tag{6}$$

여기서  $\alpha_i$ 는 유리 표면의 복사 흡수율을 나타내며,  $H_i$ 는 유리 표면에 방사되는 복사율을 의미한다.

아울러, 유리에서의 전도는 다음의 식 (7)를 이용하면 계산될 수 있다.

$$q_d = -kA \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{L}[W] \tag{7}$$

여기서,  $k$ 는 유리의 열전도율이며,  $T_{s,1}$  및  $T_{s,2}$ 는 고온 측 및 저온 측 유리의 표면온도, 그리고  $L$ 은 유리의 두께를 나타낸다. 따라서 제안된 삼중 유리 시스템에서 유리의 단위면적( $A$ ) 및 실내외 단위 온도차( $\Delta T$ )당 이동되는 열량인 열관류율(Ug-Value)  $q$  혹은 일반적으로 표현하는  $K_{Ug-Value}$ 는 다음의 식 (8)을 통해 계산될 수 있다.

$$q = \frac{\sum q_c + \sum q_r + \sum q_{ri} + \sum q_d}{\Delta T}[W / m^2 \cdot K] \tag{8}$$

## 2.2 분석 조건

앞서 언급한 바와 같이, 삼중 유리 시스템의 최적 두께와 열관류율을 도출하기 위해 창호 해석 프로그램인 Therm & Window가 이용되었으며 모델링 결과는 그림 3과 같다.

제안된 삼중 유리 시스템의 시뮬레이션 모델링의 경우, 진공 섹션은 이전 연구에서 제시한 최적 두께로서 두 장의 3mm 유리와 0.2mm의 진공층을 포함하여 총 6.2mm 두께가 적용되었다(Yueping et al., 2009). 반면, 이산화탄소 섹션의 최적 두께를 결정하기 위해서는 6.2mm의 진공 섹션은 그대로 유지하면서 표 2와 같이 유리 및 이산화탄소 가스층의 두께를 순차적으로 증가시켜 일정 두께 이상에서 열관류율이 변화되지 않는 변

곡점(Changing point)을 찾아내야 한다. 즉, 이산화탄소 섹션의 유리 두께를 최초 1mm부터 10mm까지 1mm씩 점진적으로 증가시켰으며, 이산화탄소 가스층의 두께 역시 1mm부터 12mm까지 1mm씩 증가시켰다. 따라서 유리와 이산화탄소 가스층이 융합된 서로 다른 두께의 삼중 유리의 수(시뮬레이션 case)는 총 120가지이다. 예를 들어 시뮬레이션 case 1의 경우, 진공 섹션 6.2mm+이산화탄소 가스층 1mm+유리 1mm를 포함하여 삼중 유리의 총 두께는 8.2mm가 되며 최종 경우의 수인 case 120의 경우, 진공 섹션 6.2mm+이산화탄소 가스층 12mm+유리 10mm로서 총 두께는 28.2mm가 된다.

또한 모델링 과정에서 삼중 유리 시스템을 구성하는 재료들의 열적 및 광학적 물성치가 입력되어야 하며 이에 대한 세부적인 내용은 다음과 같다.

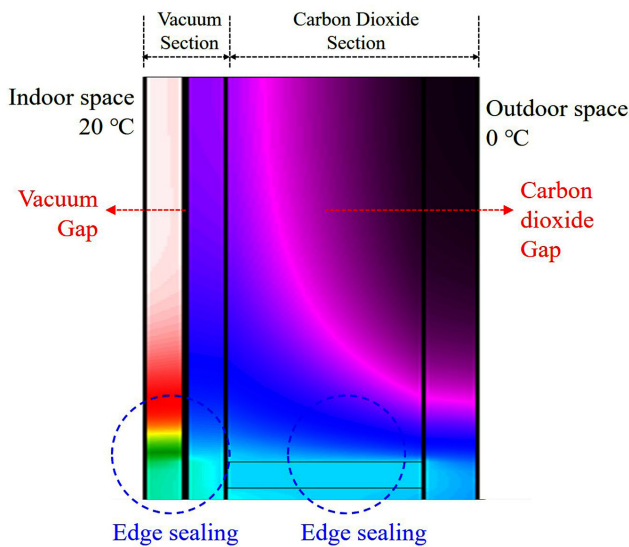


Fig. 3. The Triple Glazing System Designed by the Simulation Tool

### 2.2.1 유리

표 3은 진공 및 이산화탄소 섹션에 적용된 유리의 열적 및 광학적 특징을 보여준다(Berkeley, 2020).

실내 측 유리 표면에 저방사 코팅(Low-emission coating)이 적용되었으며 열전도율은 0.14 (W/m·K)이다. 그 외, 광학적 특징에서  $T_{sol,1}$  및  $T_{sol,2}$ 는 유리의 전면 및 후면에서의 일사 투과율을 나타내며,  $R_{sol,1}$  및  $R_{sol,s}$ 는 유리의 전·후면에서의 일사 반사율을 의미한다. 또한  $T_{vis,1}$ 와  $T_{vis,2}$ 는 유리 전·후면에서의 가시광선 투과율이며,  $R_{vis,1}$  및  $R_{vis,2}$ 는 가시광선 반사율을 나타낸다. 아울러,  $E_{mis,1}$ 과  $E_{mis,2}$ 는 유리 전·후면에서의 표면 방사율을 의미한다.

Table 2. The Simulating Cases by Changing Thicknesses of Glass and Carbon Dioxide Gap

		Thickness of glass (mm)									
* C: Case		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CO <sub>2</sub> gap (mm)	1	C,1	C,13	C,25	C,37	C,49	C,61	C,73	C,85	C,97	C,109
	2	C,2	C,14	C,26	C,38	C,50	C,62	C,74	C,86	C,98	C,110
	3	C,3	C,15	C,27	C,39	C,51	C,63	C,75	C,87	C,99	C,111
	4	C,4	C,16	C,28	C,40	C,52	C,64	C,76	C,88	C,100	C,112
	5	C,5	C,17	C,29	C,41	C,53	C,65	C,77	C,89	C,101	C,113
	6	C,6	C,18	C,30	C,42	C,54	C,66	C,78	C,90	C,102	C,114
	7	C,7	C,19	C,31	C,43	C,55	C,67	C,79	C,91	C,103	C,115
	8	C,8	C,20	C,32	C,44	C,56	C,68	C,80	C,92	C,104	C,116
	9	C,9	C,21	C,33	C,45	C,57	C,69	C,81	C,93	C,105	C,117
	10	C,10	C,22	C,34	C,46	C,58	C,70	C,82	C,94	C,106	C,118
	11	C,11	C,23	C,35	C,47	C,59	C,71	C,83	C,95	C,107	C,119
	12	C,12	C,24	C,36	C,48	C,60	C,72	C,84	C,96	C,108	C,120



**Table 3.** The Thermal and Optical Characteristics of the Glass for the Triple Glazing System

Type	Clear glass	
Thickness	3 mm &	
Conductivity	0.14 (W/m · K)	
Solar radiation	$T_{sol,1}$	0.362
	$T_{sol,2}$	0.362
	$R_{sol,1}$	0.553
	$R_{sol,2}$	0.543
Visible rays	$T_{vis,1}$	0.652
	$T_{vis,2}$	0.652
	$R_{vis,1}$	0.260
	$R_{vis,2}$	0.288
Emissivity	$E_{mis,1}$	0.038
	$E_{mis,2}$	0.760

**2.2.2 진공 및 이산화탄소**

표 4는 진공층에서 진공 및 필러 (Pillar)의 열적 및 물리적 특징을 나타낸다.

이론적으로 진공층의 진공률은 100%이며 유체가 존재하지 않지만 기술적으로 이를 완벽하게 만족시키지 못하는 것이 현실이다. 이에 현재까지 진공률은 약 99.9%로 유지되고 있으며 약간의 미세 공기와 수증기 등 기체를 포함하고 있다. 이로 인해 이론과 달리 실제 진공에서는 이러한 기체로 인한 미세 대류가 발생한다. 이와 더불어, 진공층은 진공 공간과 대기압 사이에 약 102kPa 정도의 압력차가 발생된다. 만약 이러한 진공이

**Table 4.** The Characteristics of the Vacuum Gap

Thickness	0.2 (mm)	
Pressure	0.1332 (Pa)	
Gap Heat Transfer	0.107 (W/m <sup>2</sup> · K)	
Support pillar	Type	Circular
	Radius	0.2 (mm)
	Spacing	30 (mm)

**Table 5.** The Thermal Characteristics of Carbon Dioxide Gas

Molecular weight	44,010 (mol/g)
Prandtl number	0.7808
Conductivity coefficients	0.00037(W/m · K)
Viscosity coefficients	0.00000116(kg/m · s)
Specific heat coefficients	558.8(J/kg · K)

유리와 유리 사이에 적용되어 별다른 조치가 취해지지 않을 경우 큰 압력차로 인한 유리의 파손이 발생될 것이다. 이를 방지하기 위해 진공층에 진공 간격을 유지하면서 압력차로 인한 유리 파손을 방지하기 위해 서포트 필러(Support Pillar)가 적용된다(Yueping et. al., 2014). 따라서 유리표면과 필러의 접촉으로 인해 미세한 열전도 또한 발생된다.

한편 표 5는 온실가스인 이산화탄소 가스의 열적 및 물리적 특성을 나타낸다. 시뮬레이션 상에서 이산화탄소 가스의 열전달 분석을 위해서는 분자량과 프란들 수( $P$ ), 열전도율, 동점성 계수, 그리고 비열이 필요하며 이러한 물리량은 모두 대기압(약 102kPa) 하에서 도출된 값들이다.

**2.2.3 간봉 (Edge sealing)**

진공층과 이산화탄소 가스층을 밀폐시키기 위해 서로 다른 재료의 간봉 기술이 적용되었다. 우선 표 6은 이산화탄소 가스층에 적용된 간봉의 특징을 나타낸다. 국내의 기존 유리 시스템에서 일반적으로 사용되고 있는 간봉의 종류는 흡습제 (Desiccant)를 포함한 알루미늄 기반의 재료이다. 그러나 알루미늄 간봉은 열전도율이 높아 유리 가장자리에서 열손실과 결로가 발생할 확률이 매우 높다. 이를 개선시키기 위해 최근 비금속 재료인 Silicone, Acryl, Polyisobutylene (PIB) 기반의 간봉들이 개발되어 유리 가장자리에서의 열성능이 크게 개선되었다. 이 중, 본 시스템의 이산화탄소 가스층에는 Ethylene 및 Propylene의 화합물로 제조되는 EPDM Form의 간봉을 적용하였다(Sofie et al., 2013).

또한 표 7은 진공층을 밀폐시키기 위한 간봉의 특징을 나타낸다. 초기 진공유리의 밀폐기술은 주로 납땀방식을 이용하였다. 그러나 이러한 방식은 열전도율이 높고 내구성이 낮아 충격이나 진동에 쉽게 파괴되는 단점이 있었지만, 최근 이를 보완하

**Table 6.** The Characteristics of the Edge Sealing Material for the Carbon Dioxide Gap

Type	Material	Height (mm)	Conductivity (W/m · K)
Super spacer standard	Flexible EPDM* form	15	0.18

\* EPDM: Ethylene Propylene Diene Monomer

**Table 7.** The Characteristics of the Edge Sealing Material for the Vacuum Gap

Type	Material	Width (mm)	Hight (mm)	Conductivity (W/m · K)
Solid	Indium	0.2	15	83.7

기 위해 Indium을 활용한 진공밀폐 기술이 개발되어 그 효과가 증명되었다(Yueping et al., 2014). 따라서 본 삼중 유리의 진공층에서도 이러한 Indium Array가 적용되었다.

2.2.4 실내외 경계조건

표 8은 삼중 유리 시스템에서 실내외측에 노출되는 유리의 표면과 공간사이의 경계조건을 나타낸다. 이는 국내 표준 규격 (Korea Standard) 중, KS F 2278 창호의 단열성 시험방법의 기준이 적용되었다(국가기술표준원, 2017).

3. 결과 분석 및 고찰

표 9는 표 8의 120가지 두께를 갖는 진공 및 이산화탄소의 삼중유리 시스템에 대한 열관류율들을 나타낸다.

진공 섹션의 두께가 6.2mm로 고정된 상태에서 나머지 이산화탄소 섹션의 유리 및 가스층의 최적 두께를 찾기 위해 가스층 두께 변화에 따른 열관류율 감소와 더불어 유리의 두께 변화별 열관류율 감소 패턴이 순차적으로 분석되었으며 분석 과정 및 결과는 다음과 같다.

Table 8. The Boundary Conditions for Inside and Outside

Type	Material	Width (mm)	Hight (mm)	Conductivity (W/m · K)
Indoor	20	1.2	9.1	-
Outdoor	0	4.2	21.2	558

Table 9. The Ug-Value (W/m<sup>2</sup> · K) by Changing the Thickness of the Triple Glazing System

		Thickness of glass (mm)									
* C: Case		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CO <sub>2</sub> gap (mm)	1	0,321	0,320	0,319	0,319	0,318	0,317	0,316	0,316	0,315	0,314
	2	0,315	0,314	0,313	0,312	0,312	0,311	0,310	0,310	0,309	0,309
	3	0,309	0,308	0,307	0,307	0,306	0,305	0,304	0,304	0,303	0,302
	4	0,303	0,302	0,302	0,301	0,300	0,300	0,299	0,298	0,298	0,297
	5	0,298	0,297	0,297	0,296	0,295	0,295	0,289	0,293	0,293	0,292
	6	0,293	0,292	0,292	0,291	0,290	0,290	0,284	0,288	0,288	0,287
	7	0,288	0,288	0,287	0,286	0,286	0,285	0,280	0,284	0,283	0,283
	8	0,284	0,283	0,283	0,282	0,281	0,281	0,276	0,280	0,279	0,278
	9	0,280	0,279	0,278	0,278	0,277	0,276	0,273	0,276	0,275	0,274
	10	0,276	0,275	0,274	0,274	0,273	0,273	0,272	0,272	0,271	0,271
	11	0,276	0,275	0,274	0,274	0,273	0,273	0,272	0,271	0,271	0,271
	12	0,276	0,275	0,273	0,274	0,273	0,272	0,271	0,271	0,270	0,271

3.1 이산화탄소 섹션의 가스층 두께별 열관류율

그림 4는 진공 섹션을 6.2mm로 고정한 후, 이산화탄소 섹션의 유리 두께가 1mm에서 10mm까지인 각 경우의 수에 대해서 이산화탄소 가스층의 두께 증가에 따른 열관류율 변화를 보여준다. 모든 유리 두께에서 이산화탄소 가스층의 두께가 증가할수록 열관류율이 급격하게 감소하는 패턴을 보였다. 그러나 이산화탄소의 두께가 10mm인 지점에서 열관류율 감소 패턴이 수평방향으로 변화되는 양상을 나타냈다. 이후, 이산화탄소 두께가 증가됨에도 불구하고 열관류율은 거의 변화되지 않는 것으로 분석되었다. 특히 가스층이 10mm에서 11mm로 변화되는 지점에서 열관류율이 완만하게 감소는 되었지만, 다른 경우와 비교하여 감소율이 매우 작은 것으로 확인되었다. 따라서 이산화탄소 섹션에서 가스층의 최적 두께는 10mm로 결정하는 것이 가장 합리적이라 판단된다.

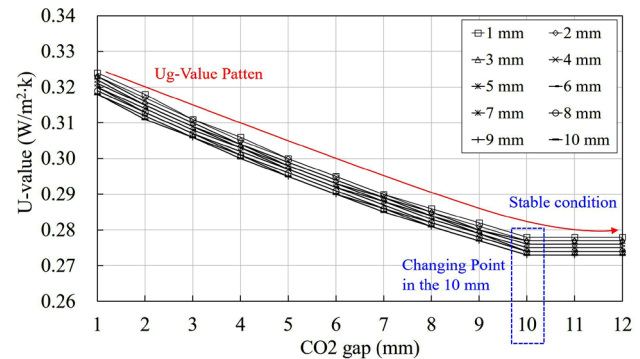


Fig. 4. The Changes of Ug-Values by Changing the Thickness of Carbon Dioxide Gas

### 3.2 이산화탄소 섹션의 유리 두께별 열관류율

그림 5는 앞서 산출된 이산화탄소 가스층의 두께가 1mm에서 10mm까지 증가되었을 때, 1mm에서 10mm까지 유리 두께별 열관류율 감소율을 나타낸다. 우선 진공 섹션 6.2mm 및 이산화탄소 섹션의 유리 두께가 1mm인 상태에서 이산화탄소 가스층을 1mm에서 최적 두께인 10mm까지 증가시켰을 때, 열관류율 감소율은 14.2%인 것으로 분석되었다. 또한 동일한 조건에서 유리 두께가 2mm에서 5mm일 때, 가스층 증가에 따른 열관류율 감소율은 14.42%에서 14.33%인 것으로 나타났다. 특히, 유리 두께가 6mm 및 7mm인 상태에서 이산화탄소 가스층의 두께를 1mm에서 10mm로 증가시킬 경우, 열관류율 감소율은 14.38%로서 가장 큰 감소폭을 나타내었다. 이후 8mm 유리 두께부터는 열관류율 감소폭이 급격하게 줄어드는 양상을 보였다. 이러한 결과로 볼 때, 이산화탄소 섹션에서 유리의 최적 두께는 6mm 및 7mm인 것으로 판단된다. 그러나 6mm에서 7mm로 유리 두께가 증가되어도 열관류율 감소가 거의 발생되지 않기 때문에 경제성을 고려하여 이산화탄소 섹션 중 유리의 최적 두께는 6mm로 결정하는 것이 타당할 것이다.

### 3.3 최적 두께 및 열관류율 결정

이상의 결과를 바탕으로 진공 및 이산화탄소의 삼중 유리 시스템의 최종 설계안은 그림 6과 같다. 진공 섹션은 두 장의 3mm 유리와 0.2mm의 진공층을 포함하여 총 두께 6.2mm이며, 이산화탄소 섹션은 가스층 10mm와 6mm의 유리를 포함하여 총 두께 16mm이다. 따라서 진공 및 이산화탄소 섹션을 모두 포함한 총 두께는 22.2mm로 산정되었다. 아울러, 이에 대한 열관류율은 표 9에서처럼 0.273W/m<sup>2</sup>·K으로 결정되었다.

### 3.4 고찰

그림 7은 본 연구에서 제안한 진공 및 이산화탄소 가스층을

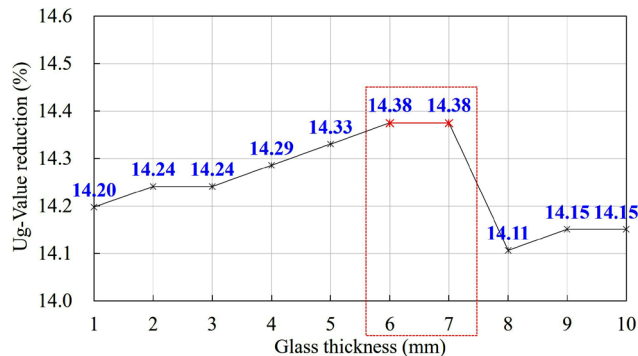


Fig. 5. The Reduction Ratio of Ug-Value by the Glass Thickness in the Carbon Dioxide Section

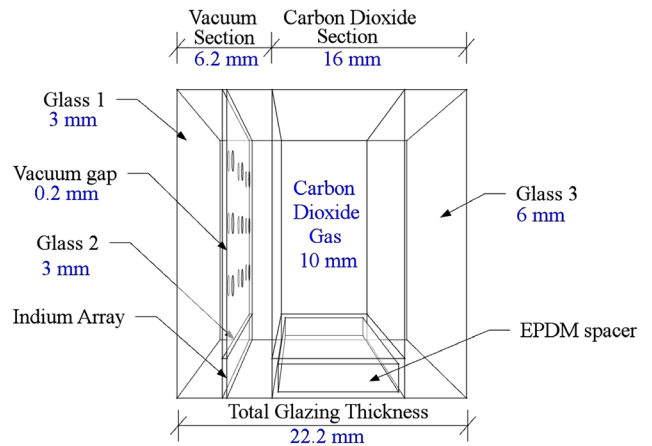


Fig. 6. The Optical Design of the Triple Glazing System with the Gaps of a Vacuum and a Carbon Dioxide

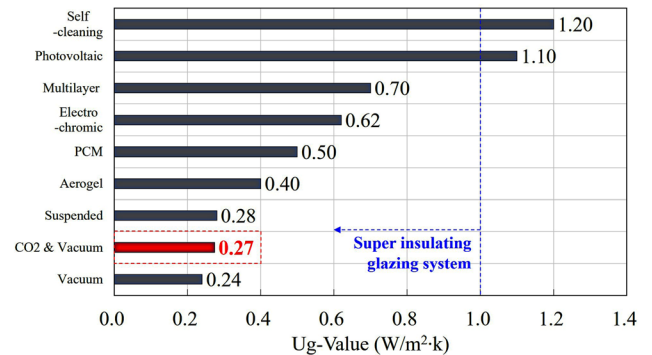


Fig. 7. The Comparison of the Ug-Values Between the Proposed Glazing System and Other Advanced Glazing Systems

가진 삼중 유리 시스템의 열관류율과 표 1에서처럼 현재까지 공개된 초 단열 및 다목적 유리 시스템들의 열관류율을 비교한 것이다. 우선 본 삼중 유리 시스템의 열관류율은 자가 세척 유리 (Self-Cleaning glazing) 및 태양광 유리 (Photovoltaic glazing) 시스템들보다 0.827~0.927 W/m<sup>2</sup>·K 낮은 것으로 분석되었다. 또한 다층 유리 (Multi paned glazing), 변색 유리 (Electrochromic glazing), PCM 유리 (Phase Change Material Glazing), 에어로젤 유리 (Aerogel glazing) 시스템들과 비교하여 열관류율이 0.127~0.427W/m<sup>2</sup>·K 정도 낮게 나타났다. 반면, 본 시스템은 얇은 투명 반사 필름이 유리 사이에 삽입되는 서스펜디드 유리 (Suspended glazing)와의 열관류율 차이가 0.01W/m<sup>2</sup>·K로서 매우 유사한 것으로 나타났으며, 기존 진공 유리 (Vacuum glazing) 와도 단지 0.03W/m<sup>2</sup>·K 정도의 열관류율 차이를 보였다.

이상의 연구결과를 볼 때, 본 연구에서 제안한 진공 및 이산화탄소 가스층을 가진 삼중 유리 시스템은 열관류율이 약 0.2W/m<sup>2</sup>·K 대인 초 단열 유리 시스템으로 구현이 가능한 것으로 확인되었다. 또한 기존의 Air, Argon, Krypton과 같은 유리

의 단열 가스 두께가 일반적으로 10~14mm 정도로 이용되고 있다는 점을 감안할 때, 이들 가스들을 대체하여 10mm 정도의 값싼 이산화탄소를 이용한다면 창호의 생산가격을 낮춰 경제성이 향상될 수 있을 것으로 보인다. 아울러 온실가스인 이산화탄소가 유리의 단열 가스로 활용될 수 있다는 점이 확인되었으므로 건물의 에너지 절감과 더불어 이산화탄소 배출 절감 및 포집된 가스의 처리에도 본 시스템이 상당한 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 진공 및 이산화탄소 가스를 이용한 삼중 유리 시스템의 최적 두께와 열관류율 분석에 중점을 두었으며 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 본 시스템은 3장의 유리와 진공층, 이산화탄소 가스층, 필러(Pillar), EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) 간봉, 인듐 어레이(Indium Array) 간봉으로 구성될 수 있다.

(2) 본 시스템은 진공 섹션과 이산화탄소 섹션으로 구분될 수 있으며, 진공 섹션의 최적 두께는 선행연구를 통해 6.2mm로 적용 가능한 반면, 이산화탄소 섹션의 최적 두께는 본 연구의 분석결과로 결정되었다.

(3) 이산화탄소 가스층의 경우, 두께가 1mm씩 증가될수록 유리 시스템 전체의 열관류율은 감소패턴을 보였지만, 10mm를 기점으로 열관류율의 변화가 거의 없는 것으로 분석되었다. 따라서 이산화탄소 섹션의 가스층은 10mm로 적용하는 것이 가장 합리적이라 판단된다.

(4) 또한 가스층이 1mm에서 10mm까지 증가될 때, 유리 두께별 열관류율 감소폭은 6~7mm에서 가장 큰 것으로 분석되었다. 그러나 거의 동일한 감소폭일 경우, 유리 두께가 좀 더 얇은 6mm를 적용하는 것이 경제적인 것이다.

(5) 결과적으로, 제안된 삼중 유리 시스템은 열 성능과 경제성을 고려하여 총 22.2mm를 적용하는 것이 추천되며, 이에 대한 열관류율은  $0.273\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 이다. 아울러 이러한 열관류율은 앞서 언급한 기존 차세대 유리 시스템의 열 성능과 유사하거나 더 우수한 것으로 확인되었다.

#### 감사의 글

본 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R111A1A01066797).

#### 참고문헌

1. 국가기술표준원(2017), KS F 2278 창호의 단열성 시험방법
2. Berkeley LAB (2020), Window & Daylighting, Overview, Program download, Library, Glass, ID: 19778.
3. Carli Inc. (2006), Conrad 5 & Viewer 5 Technical and Programming Documentation.
4. Erdem, C. and B. R. Saffa (2015), "A state-of the art review on innovative glazing technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41: 695-714.
5. John, C. and H. Charlie (2013), Therm 6.3 / Window 6.3 NFRC Simulation Manual, Lawrence Berkeley National Laboratory.
6. Mar, P. F., B. D. Andrei and T. Evangelos (2014), "CO<sub>2</sub> utilization pathways: Techno-economic assessment and market opportunities", *Energy Procedia*, 63: 7968-7975.
7. Sofie, V. D. B., H. Robert, P. J. Bjorn and G. Arild (2013), "Window spacers and edge seals in insulating glass units: A state-of-the art review and future perspectives", *Energy and Buildings*, 58: 263-280.
8. Yueping, F., H. Trevor, H. Neil, C. E. Philip and N. Brian (2009), "Comparison of vacuum glazing thermal performance predicted using two-and three-dimensional models and their experimental validation", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(9): 1492-1498.
9. Yueping, F., J. H. Trevor, A. Farid, H. Neil, C. E. Philip, N. Brian and M. Seth (2014), "Indium alloy-sealed vacuum glazing development and context", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37: 480-501.