



육불화황(SF₆) 가스를 주입한 복층유리의 단열 및 에너지 성능 분석

Analysis on the Insulating and Energy Performances for the Double Paned Glazing Filled with Sulfur hexafluoride(SF₆)

백상훈*

Sang Hoon Baek*

* Corresponding author, School. of Architecture, HanKyong National Univ., South Korea (shbaek2018@gmail.com)

ABSTRACT

Purpose: Sulfur hexafluoride(SF₆) is a strong gas which causes the global warming, and has strictly controlled domestically and internationally. However, presently, as the technology for capture, storage, and treatment of SF₆ have been developed to be the level of CO₂ gas, it is possible to utilize the gas as a resource. In order to use SF₆ as a new insulating material in buildings, this study aims to propose a double paned glazing filled with SF₆ gas, and analyze its insulating and energy performances. **Method:** The computer simulation programs, Therm and Window package program modelling windows and glazing systems and EnergyPlus analyzing the environmental and energy performances for buildings were used. **Result:** The results revealed that the inside surface temperatures of the glazing with SF₆ gas are ranged between the cases of air and Ar gas. Moreover, the results presented that the its energy performance is higher than the case of air, and is similar to the case of Ar gas.

KEYWORD

육불화황
복층유리
단열가스
에너지성능Sulfur hexafluoride
Double paned glazing
Insulating gas
Energy performance

ACCEPTANCE INFO

Received Jul 5, 2019
Final revision received Aug 2, 2019
Accepted Aug 7, 2019

© 2019 KIEAE Journal

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

온실가스 중, 육불화황 (Sulfur Hexafluoride: SF₆)은 다른 온실가스보다 대기 중에 극소량으로 존재한다. 그러나 지구 온난화 영향 지수는 이산화탄소 (Carbon dioxide: CO₂)의 약 23,900배 수준이며 그 증가율 또한 6대 온실가스 중 가장 높다. 이러한 가스는 1,200 °C 이상에서 분해되는 매우 안정적인 분자 형태를 가진다. 이로 인해 일단 SF₆ 가스가 대기 중으로 배출되면 자연분해 되는데 걸리는 시간이 매우 길며 인위적인 처리 또한 상당한 기술력을 필요로 한다 [1]. 특히, 최근까지 SF₆에 대한 정확한 농도 측정뿐만 아니라 산업 활동 과정에서 배출되는 SF₆의 포집 및 저장 기술이 타 가스와 비교하여 매우 낮은 수준에 머물러 있다. 따라서 이러한 가스의 사용은 지구 온난화 방지를 위해 국내외적으로 다른 온실가스와 비교하여 더욱 강력하게 통제되고 있다. 그러나 최근 SF₆에 대한 정밀한 농도 측정과 더불어 분리회수, 전기가온, 연소, 산화, 그리고 플라즈마 분해 기술 등 산업으로부터 배출되는 과정에서 이를 포집 및 저장하는 기술들의 수준이 지속적으로 향상되고 있다[2-3]. 만약 SF₆ 가스에 대한 포집 및 저장 기술이 CO₂ 가스처럼 완성단계에 이룬다면, 대기 중의 SF₆ 가스를 포집하여 지구 온난화를 완화시키는데 큰 기여를 할 수 있을 것이다. 동시에 CCU (Carbon dioxide Capture &

Utilization) 분야와 같이, SF₆ 가스를 자원화 시키기 위한 SCU (Sulfur hexafluoride Capture & Utilization) 산업 또한 빠르게 발전할 것으로 보인다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 SF₆ 가스를 자원화하기 위한 연구의 일환으로서 건물에서 SF₆ 가스를 활용해보고자 한다. SF₆ 가스는 절연 성능이 우수하기 때문에 온실가스로 통제되기 이전까지는 전기 및 통신, 그리고 반도체 분야에서 주로 이용되어왔다[1]. 그러나 순수한 SF₆ 가스는 그 자체로도 단열 성능이 우수하기 때문에, 기체 상태의 단열재를 필요로 하는 건축적 요소로의 적용이 가능하다. 건물에서 단열 재료로서 가스층이 이용될 수 있는 요소들은 그리 많지 않다. 그러나 벽체의 중공 층이나 창호의 복층유리에 SF₆을 삽입하는 것은 가능할 것이다. 이 중, 벽체의 중공 층은 완전한 밀폐상태로 유지하는 것이 어렵기 때문에, 이러한 가스를 삽입하더라도 대기 중으로 다시 배출될 위험성이 매우 높다. 반면에, 창호의 복층유리는 단열 가스를 삽입하고 이를 밀폐시킬 수 있는 Edge sealing 기술을 적용하기 때문에, 완전한 밀폐 상태를 유지하면서 SF₆을 주입하는 것이 가능하다.

따라서 본 논문에서는 건물에 적용되는 창호의 복층유리에 단열가스로서 SF₆ 가스를 주입하여 본 가스의 단열 성능에 따른 건물의 에너지 소비량을 검토하고자한다. 이를 위해 현재 복층유리의 단열가스로서 폭넓게 활용되고 있는 air, Argon (Ar), Krypton (Kr) 가스 및 SF₆ 가스의 단열 성능을 서로 비교하였다. 이러한 분석을 위해 컴퓨터 시뮬레이션 방법이 도입되었다. 사용된 프로그램은 유리 및

창호 해석 프로그램인 Therm & Window 프로그램과 건물 에너지 분석 프로그램인 EnergyPlus이다. 시뮬레이션 과정의 경우, 우선 Therm & Window을 이용하여 SF₆ 가스를 주입한 복층유리를 형성한 후, 이를 EnergyPlus에서 모델링된 가상 건물에 적용하였다. 비교 대상인 air, Ar, Kr 가스의 경우도 이와 동일한 과정을 적용하였다. 분석을 위해 도출된 데이터는 (1) 유리의 실내 측 표면온도 (2) 유리에 의한 에너지 손실 (3) 건물의 총 난방에너지 소비량 이상의 3가지 데이터이다. 아울러, 시뮬레이션에서의 모델링 과정과 결과 도출에 관한 전반적인 이론은 Therm & Window의 Technical and Programming과 EnergyPlus의 Engineering Reference를 참고하였다[4-5]. 특히, 에너지 소비의 관점에서 유리 시스템을 개발하기 위해서는 두 가지 측면으로 접근이 이루어져야 한다. 하나는 실내외 온도차와 유리 시스템의 열관류율 (U-value)에 따른 실내의 열손실 및 열취득의 분석이다. 다른 하나는 유리를 통해 실내로 직접 투사되는 유리의 일사투과, 즉 태양열 획득 계수 (Solar Heat Gain Coefficient: SHGC)에 대한 분석이다. 그러나 현재의 연구 단계에서는 SF₆ 가스의 단열 성능을 검증하는 것에 중점을 두었다. 따라서 일사의 직접 획득에 관한 SHGC의 분석은 본 연구의 검증이 마무리된 이후, 수행될 것이다.

2. 선행연구 고찰

최근 국외에서 보고되고 있는 차세대 유리 시스템의 개발은 벽체의 U-value와 유사하거나 혹은 이를 뛰어넘는 초단열 유리 시스템을 개발하는 것에 초점을 두고 있다. 이러한 유리 시스템들은 3장 이상의 판유리, 고단열 가스, 비금속 재질의 Edge-sealing, 그리고 Low-emission 코팅을 결합한 다층유리 시스템이 가장 대표적이다. 이와 더불어 Suspended, Triple vacuum, Phase Change Material (PCM), Photovoltaic, Aerogel, 그리고 Self-clean 유리 시스템 또한 차세대 유리 시스템에 포함될 수 있다[6]. 이러한 차세대 유리 시스템들의 U-value 범위는 최소 0.2 W/m² · K부터 최대 1.2 W/m² · K까지이다. PV 및 Self-clean 유리 시스템을 제외한 나머지 차세대 유리 시스템들의 U-value는 모두 1.0 W/m² · K 이하로서 초단열 성능을 발휘하는 것으로 보고되고 있다.

이와 반면에, 국내의 유리 시스템 개발 현황의 경우, 기존의 전통적인 시스템에서 2장 이상의 유리, Ar 및 Kr 가스, Low-emission 코팅 등 새로운 재료들이 사용되면서 과거보다 U-value에서 큰 발전을 보여 왔다. 그럼에도 불구하고, 최근까지도 대부분의 건물에서 사용되는 유리 시스템은 금속 기반의 edge-sealing 기술과 Low-emission 코팅을 이용하는 다층 유리 개발에 머무르고 있다 [7]. 특히, 최근 국내에서도 진공유리가 소개되었지만[8-9], 진공 층에서 인장강도가 약한 납땀을 이용하는 edge-sealing 기술을 적용하는 것으로 예상된다. 따라서 장기적인 사용 시, 진공 층의 sealing 부분이 진동, 하중, 혹은 외부 충격 등으로 인해 파손될 수 있는 위험성을 내포하고 있다. 아울러, 국외의 현황처럼 유리 시스템의 연구 및 개발에 다양성을 갖는 것이 필요할 것으로 사료된다. 이와 비교적으로, 본 연구는 온실가스의 하나로서 포집 및 처리 과정에서 버려지는 SF₆ 가스를 자원으로 재사용하기 위한 연구의 일환이

다. 비록 초기 단계의 연구임에도 불구하고, 만약 SF₆ 가스의 단열 성능이 유리 시스템에서 사용될 수 있는 수준으로 검증된다면, SF₆ 가스를 주입한 복층유리는 건물의 외피에 설치되는 단열 창호로서 활용이 가능하다. 또한 온실가스로서 포집 후, 버려지는 SF₆ 가스를 건물의 창호에서 활용한다는 점에서 SF₆ 처리에 어느 정도 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 연구 방법

3.1. SF₆ 복층유리의 구성

Fig. 1.은 SF₆을 주입한 복층유리의 구조 및 부위별 세부 사항을 나타낸다. 일반적인 복층유리와 같이, SF₆ 복층유리 또한 두 장의 판유리, 가스 층, 그리고 Edge sealing으로 형성된다. 특히, Edge sealing은 스페이서 바(Spacer bar) 및 흡습제 (Desiccant)를 포함한 1차 Sealing, 그리고 실리콘 재질의 2차 Sealing을 갖는다. 유리의 표면은 외부 측으로부터 내부 측 순으로 4개가 존재한다. 아울러, 유리 표면은 Edge sealing에서 열 손실이 가장 많이 일어나고 결로가 시작되는 부분인 유리의 Edge 부분과 표면 온도 분포가 비교적 동일한 유리의 Center부분으로 구분된다.

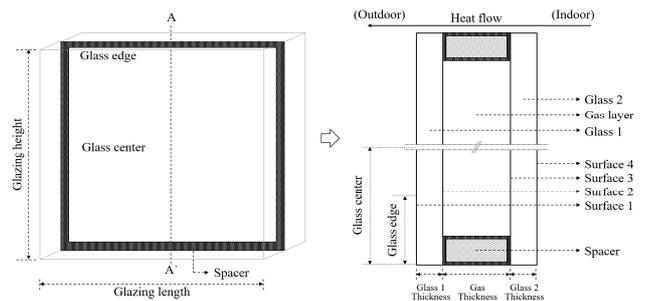


Fig. 1. The structure of the double paned glazing with SF₆ gas

EnergyPlus와 Therm & Window 프로그램에서 복층유리에 대한 계산 알고리즘은 동일하다. 또한 EnergyPlus에서는 Therm & Window의 입력 값들에 대한 'Import'기능을 제공한다. 따라서 이러한 복층유리를 EnergyPlus에서 분석하기 위해서는 Therm & Window를 통해 유리 및 프레임 부분이 우선 모델링되어야 한다. Table 1., 2., 3., 4.는 Therm & Window에서 모델링된 SF₆ 복층유리 및 프레임의 요소별 물성 값들을 나타낸다. 우선, 유리의 선택에서 Therm & Window 프로그램을 배포하는 LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)은 세계 각국의 기업에서 생산되는 유리의 종류 및 특성들을 제공하고 있으며, 주기적으로 변경된 데이터를 배포하고 있다.(Windows & Daylighting, 2017) 본 시뮬레이션에서는 이러한 유리 중, 'Pilkinton Ltd.'에서 생산하는 '5 mm low-emission glass'를 선정하였으며, 유리의 열적 및 광학적 특성은 Table 1.과 같다.

여기서, T_{sol,1} 및 T_{sol,2}은 유리 전후 면에서의 일사투과율이며, R_{sol,1} 및 R_{sol,2}은 일사의 반사율을 나타낸다. 또한 T_{vis,1} 및 T_{vis,2}은 유리 전후 면에서의 가시광선 투과율을 의미하며, R_{vis,1} 및 R_{vis,2}는 가시광선 반사율이다. 아울러, Emis.1 및 Emis.2는 유리 전후 면의 표면 방사율을 나타낸다.

Table 1. The optical characteristics in the front and back surfaces of the glass

Type	5 (mm) Low-emission glass		
Manufacturer	Pilkington Ltd.		
Conductivity	0.14 (W/m · K)		
Thermal Characteristic	Solar radiation	Tsol,1	0.300
		Tsol,2	0.300
		Rsol,1	0.049
		Rsol,2	0.049
	Visible rays	Tvis,1	0.565
		Tvis,2	0.565
		Rvis,1	0.059
		Rvis,2	0.059
	Emissivity	Emis.1	0.340
		Emis.2	0.340

또한 Table 2.는 표준대기압에서 SF₆ 가스 및 비교 가스들에 대한 열적 및 물리적 특성을 나타낸다. SF₆ 가스에 대한 단열 및 에너지 성능의 수준을 평가하기 위해, 기존의 복층유리에서 단열가스로서 폭넓게 이용되어온 air, Ar, Kr 가스를 주입한 복층유리가 비교대상으로서 모델링되었다.

Table 2. The thermal characteristics of air, Argon, Krypton, and SF₆ gases

Type of insulating gas	Air	Argon	Krypton	SF ₆
Thickness (mm)	10	10	10	10
Molecular Weight (mol/g)	28.970	39.948	83.800	146.1
Pressure (Pa)	101325	101325	101325	101325
Prandtl Number	0.7197	0.6704	0.6717	0.4567
Conductivity (W/m · K)	0.024069	0.016349	0.008664	0.013000
Viscosity (kg/m · s)	0.000017	0.000021	0.000023	0.000014
Specific heat (J/kg · K)	1006.103271	521.92852783	248.09069824	418.60000610

아울러, Table 3., 4.는 복층유리의 가스층을 밀폐시키는 Edge sealing과 프레임에 대한 재료 및 특성을 나타낸다. 이러한 조건 하에 형성된 복층유리의 총 두께는 20 mm이며, 프레임의 돌출길이를 포함한 총 두께는 220 mm이다.

Table 3. The characteristics of Edge sealing

Material			
Spacer bar	Desiccant	Primary sealing	Secondary sealing
Aluminum	Silica gel Bulk	Polyisobutylene	Polysulphide
Size			
Thickness		Hight	
10 mm		5 mm	

Table 4. The type and thermal characteristics of the frame system

Type of frame	Fixed
Material	Wood
Thickness (m)	0.08
Projected length (m)	Right 0.1 × Left 0.1
Conductivity (W/m · K)	0.16

3.2. 에너지 성능 평가 방법

1) 건물의 모델링

Table 5.는 모델링된 복층유리의 에너지 성능을 평가하기 위해 EnergyPlus에서 구현된 건물의 개요 및 기본 정보를 나타낸다. 건물은 국내 서울에 위치한 주거용 건물인 것으로 가정했다. 또한 앞서 모델링된 복층유리 및 창호는 건물의 남쪽 벽에 적용되었다. 아울러, 건물의 바닥, 외벽, 지붕의 구조 및 열관류율 등에 관한 정보는 Fig. 2.와 같다[10].

Table 5. Overview and information of the building

Building location	Seoul, South Korea	
Building direction	Corrected south	
Building size	Length (m)	10
	Width (m)	5
	Height (m)	2.5
Glazing size	Length (m)	9
	Height (m)	1.5
Weather data	Seoul region standard wvather data	
Weather type	EnergyPlus Weather file (EPW)	

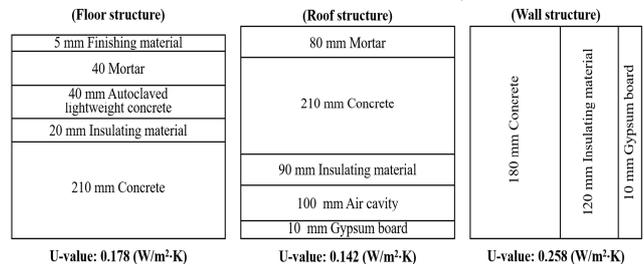
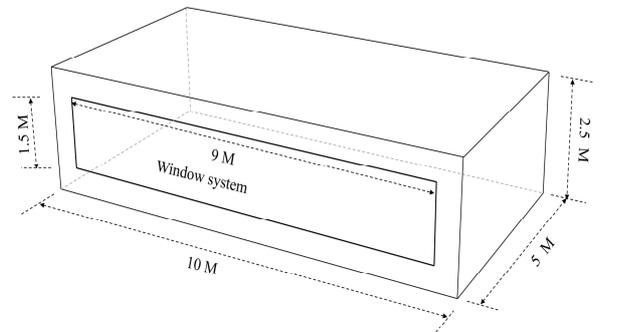


Fig. 2. The building formed by EnergyPlus program

시뮬레이션을 위한 기상데이터는 국내 공인된 기관에서 배포하는 서울지방의 표준기상데이터를 EPW (EnergyPlus Weather) 파일로 변환하여 적용하였다[11]. 시뮬레이션 기간은 난방기에 초점을 맞췄다. 이중, 12월 1일 0:00부터 12월 4일 0:00까지 약 3일간의 데이터가 이용되었다. Fig. 3., 4., 5., 6.은 본 시뮬레이션에 적용된 대

표적인 기상데이터로서 실외의 온도, 절대 습도, 일사량, 그리고 풍속을 나타낸다.

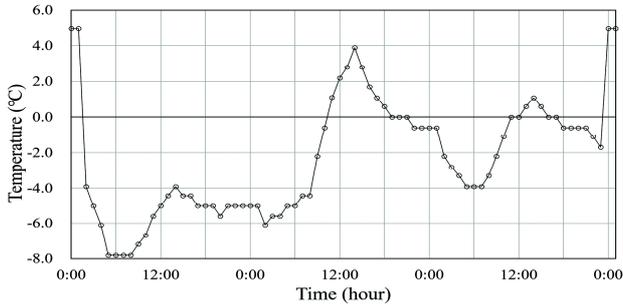


Fig. 3. Hourly outdoor temperature

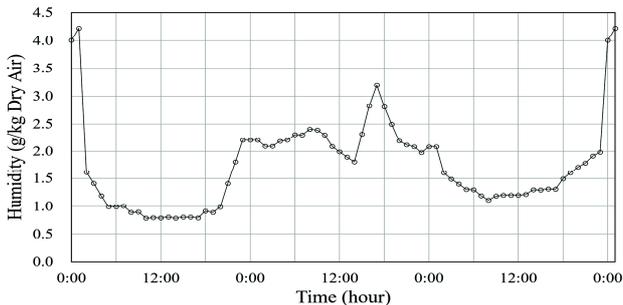


Fig. 4. Hourly outdoor absolute humidity

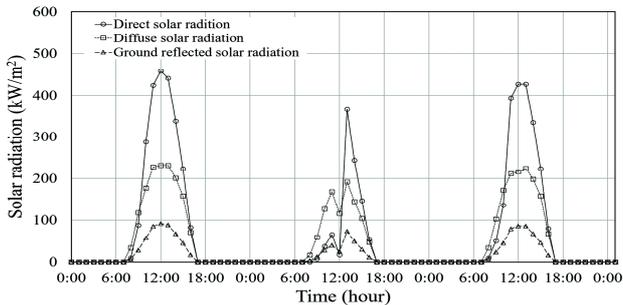


Fig. 5. Hourly solar radiation

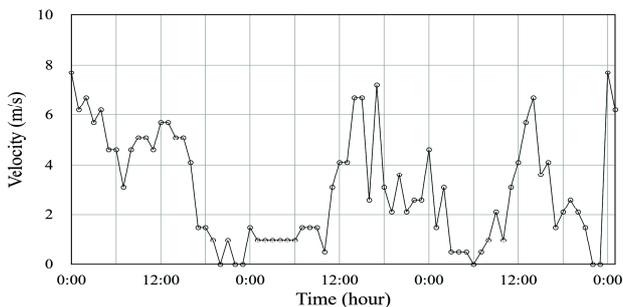


Fig. 6. Hourly wind velocity

2) 실내 열손실 및 열취득 요소

Table 6.은 시뮬레이션에서 모델링된 건물의 실내에서 발생하는 열손실 및 열취득 요소를 나타낸다. 재실자는 총 4인으로 적용했다. 8:00~18:00는 재실자가 없으며 그 외 시간은 최대값인 4인으로 가정하였다. 또한 조명은 비율로서 적용하였다. 18:00~22:00는 최대값인 1이 입력되었다. 또한 22:00부터 익일 06:00까지는 취침시간으로서 최소 조명 사용율인 0.1이 적용되었다. 아울러, 6:00~

8:00는 기상시간으로서 최대 값인 1을 적용하였다. 그 외, 8:00~18:00는 재실자가 없으므로 조명을 사용하지 않는 0을 입력하였다. 또한 침기는 국내 건물의 기밀 등급에 관한 기준 중, 에너지 절약 건물에 적용되는 시간당 1.0회를 적용하였다[12]. 환기 또한 국내 기준에서 권고하는 시간당 0.5회가 입력되었다[13].

Table 6. Indoor thermal environment factors and schedules

Type	Time	Unit	Input value
Occupant	00:00 ~ 08:00	Person	4
	08:00 ~ 18:00		0
	18:00 ~ 24:00		4
Light	00:00 ~ 06:00	Fraction (0.0 ~ 1.0)	0.1
	06:00 ~ 08:00		1.0
	08:00 ~ 18:00		0.0
	18:00 ~ 22:00		1.0
	22:00 ~ 00:00		0.1
Infiltration	00:00 ~ 24:00	ACH50	1.0
Ventilation	00:00 ~ 08:00	ACH	0.5
	08:00 ~ 18:00		0.0
	18:00 ~ 24:00		0.5

ACH: Air change per hour

3) 실내 냉난방 시스템

건물의 난방 시스템은 전공기 방식을 적용하였다. 또한 실내 난방 설정온도는 22 °C이며, 공급되는 공기의 최대 온도는 50 °C로 설정하다. 따라서 난방 성능 및 용량에 제한을 두지 않고 자동계산 되도록 모델링하였다. 그 외, 환기와 외기 상태 등에 관한 입력 값들은 Table 7.과 같다.

Table 7. The characteristics of the HVAC system

Type	All-air method	
	Heating set-point	22 °C
Indoor set-point	Heating limit	No limit
	Maximum heating temperature	50 °C
Supply air	Maximum heating humidity	0.0156 (kg/kg Dry Air)
	Temperature control	Heating set-point
	Air flow rate control	Autosize
Return air	Heat recovery type	Enthalpy
	Sensible heat recovery rate	0.7
	Latent heat recovery rate	0.7
Outdoor air	Outdoor air condition	Weather data
	Flow rate control	Autosize

Table 8.은 난방을 위한 스케줄 및 제어 방법을 나타낸다. 난방 시간은 재실자 스케줄에 따라 18:00부터 익일 8:00까지로 설정하였다. 그 외 시간은 비 난방 시간대로 적용하되, 실내가 10 °C 이상을 유지하도록 입력하였다. 아울러, 공급되는 공기량은 실내 부하와 온도 등을 고려하여 시뮬레이션 상에서 자동 제어 되도록 설정하였다.

Table 8. The heating control and schedule

Type	Time	Temperature	Control type	Supply air
Heating	00:00 ~ 08:00	22 °C	On/Off	Variable
	08:00 ~ 18:00	10 °C		
	18:00 ~ 24:00	22 °C		

4. 결과 분석 및 고찰

4.1. 실내 온도

Fig. 7.은 난방기인 12월 1일 0:00부터 12월 4일 0:00까지 난방 및 비난방 시간대에서 실내 온도변화를 보여준다. 실내 설정온도를 22℃로 적용하였으며, 난방 시간대인 18:00부터 익일 8:00까지 22℃로 제어되는 것이 확인된다. 또한 비난방 시간대인 8:00부터 18:00까지 10℃이상을 유지하도록 설정하였으며, 이 역시 정상적으로 제어되는 것으로 나타났다.

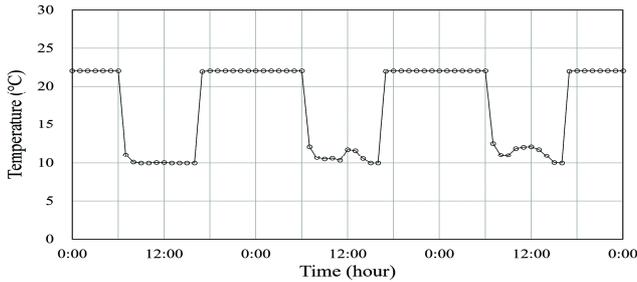


Fig. 7. Hourly changes of indoor temperatures

4.2. 실내측 유리의 표면온도

난방기간 동안 실내에서 복층유리를 통한 에너지 손실 과정은 실내 공기로부터 내측 유리, 가스층, 그리고 외측 유리까지 순차적인 열전달을 통해 이동된다. 이러한 에너지 손실을 줄이기 위해서는 최초의 열전달 과정인 실내 공기와 내측 유리 사이에서의 열전달을 줄이는 것이 중요하다. 만약, 유리 및 실내의 환경 조건이 모두 동일하다면, 실내 공기와 내측 유리의 온도차를 최소화 시키는 것이 필수적일 것이다. 그러나 실내 공기 온도 즉, 난방 설정온도는 난방 시간대에서 거의 동일하게 유지된다. 따라서 유일한 변수인 내측 유리의 표면온도를 높게 유지하는 것이 유리를 통한 에너지 손실을 최소화하는 방법이라 할 수 있다. 특히, 내측 유리의 온도를 높게 유지하기 위해서는 차가운 실외 환경이 내측 유리에 미치는 영향을 최소화 하는 것이 필요하다. 이때 복층유리에 주입된 가스의 단열 성능에 따라 내측 유리에 대한 실외 환경의 영향과 유리의 표면온도가 달라질 것이다. 다시 말해, 가스의 단열 성능이 우수할수록 내측 유리의 표면온도는 높게 유지시킬 수 있다. 이러한 관점에서, 시뮬레이션의 결과 중, 주입 가스에 따른 내측 유리의 표면온도를 비교하는 것은 복층유리 및 전체 창호에 의한 난방에너지 손실을 예측하는데 중요한 요소가 될 수 있다. 이러한 관점에서 내측 유리의 시간별 표면온도를 분석한 내용이 Fig. 8.에 나타나있다.

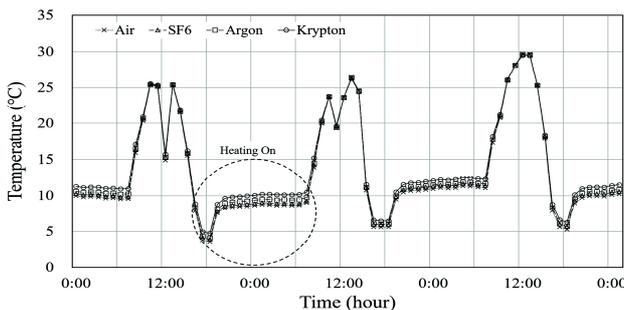


Fig. 8. Hourly changes of the surface temperatures

우선, 12월 1일 0:00부터 08:00까지 air, Ar, Kr 가스가 주입된 복층유리의 표면온도 분포는 각각 9.5~10.0℃, 10.2~10.6℃, 10.9~11.3℃인 것으로 나타났다. 또한 12월 1일 18:00부터 12월 2일 08:00까지는 각각 7.5~9.0℃, 8.1~9.8℃, 8.8~10.5℃로 분석되었으며, 12월 2일 18:00부터 12월 3일 08:00까지는 각각 9.5~11.1℃, 10.0~11.6℃, 10.5~12.3℃로 분포되었다. 마지막으로 12월 3일 18:00부터 12월 4일 0:00까지 표면온도 분포는 각각 9.0~10.0℃, 9.5~10.5℃, 10.1~11.2℃인 것으로 나타났다. 이와 반면에, SF₆ 가스가 주입된 복층유리의 표면온도는 12월 1일 0:00부터 08:00까지는 9.9~10.3℃의 분포를 보였으며, 12월 1일 18:00부터 12월 2일 08:00까지는 7.8~9.3℃, 그리고 12월 2일 18:00부터 12월 3일 08:00까지는 9.8~11.7℃로 분포되었다. 아울러, 마지막 날인 12월 3일 18:00부터 12월 4일 0:00까지의 표면온도는 9.3~10.3℃사이에 분포한 것으로 나타났다. 결론적으로, 시뮬레이션 기간인 12월 1일 0:00부터 12월 4일 0:00까지 3일간의 난방 시간대에서 air를 주입한 복층유리의 표면온도는 최소 7.5에서 최대 11.3℃사이에 분포한 것으로 확인되었다. 또한 Ar 가스가 주입된 복층유리는 최소 8.1℃에서 최대 11.9℃사이에 분포하였으며, Kr 가스가 주입된 복층유리의 경우는 최소 8.8℃부터 최대 12.5℃사이에 분포하는 것으로 분석되었다. 이와 대조적으로, SF₆ 가스를 주입한 복층유리의 표면온도는 최소 7.8℃부터 최대 11.7℃까지의 범위를 나타냈으며, 이러한 온도 분포는 air와 Ar 가스를 주입한 복층유리의 표면온도들 사이에 위치하는 것으로 확인되었다. 따라서 SF₆ 가스의 단열 성능은 air와 Ar 가스의 중간 수준으로 판단할 수 있으며, 미세한 차이지만 air보다 Ar 가스에 좀 더 가까운 단열 성능을 발휘하는 것으로 분석되었다.

4.3. 에너지 성능

Fig. 9.는 SF₆ 및 air, Ar, Kr 가스가 주입된 복층유리에 의한 시간별 에너지 손실량을 나타낸다. 시뮬레이션 기간 중, 모든 난방 시간대에서 각 복층유리의 에너지 손실량은 약 0.3~0.8 kWh의 범위에 분포하였다. 각 가스별 분석의 경우, Kr 가스를 주입한 복층유리의 에너지 손실량이 가장 낮게 분포되었다. 그 외 Ar, SF₆, air 순인 것으로 나타났다. 특히, SF₆ 가스는 앞서 분석된 표면온도의 결과와 같이, air와 Ar 가스의 중간 수준으로 에너지 손실이 발생하는 것으로 나타났으며, Ar 가스의 경우에 좀 더 근접한 분포를 보였다.

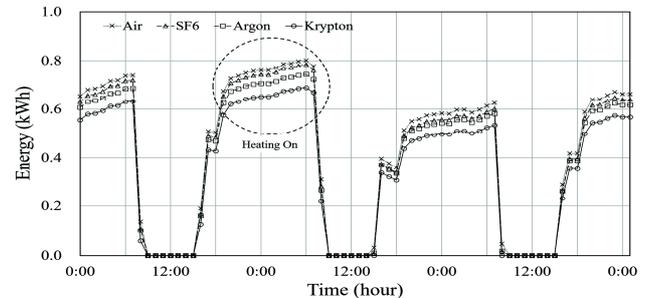


Fig. 9. Hourly energy losses

또한 Fig. 10.은 이러한 4가지 가스의 복층유리가 적용된 건물에서 시뮬레이션 기간인 약 3일 동안 사용된 총 난방에너지 소비량을

나타낸다.

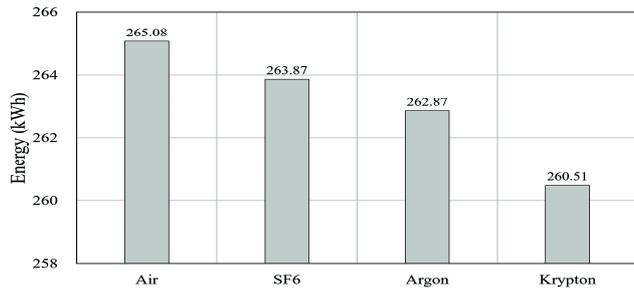


Fig. 10. Total heating energy consumed by the building

우선, air의 복층유리가 적용된 건물의 총 난방에너지 소비량은 265.08 kWh로서 가장 많은 에너지를 소비한 것으로 나타났다. 또한 SF₆의 경우는 263.87 kWh, Ar의 경우는 262.87 kWh, 그리고 Kr의 경우는 가장 낮은 260.51 kWh의 난방에너지를 소비한 것으로 분석되었다. 앞서 분석된 표면온도 및 시간별 에너지 손실의 결과와 같이, 총 난방에너지 소비에서도 SF₆ 가스의 경우는 air와 Ar 가스의 중간 수준인 것으로 확인되었으며, Ar 가스의 경우에 좀 더 근접한 것을 확인할 수 있었다.

이상의 결과를 종합할 때, SF₆ 가스는 단열가스로서 복층유리에 적용이 가능할 것으로 사료된다. 또한 air 및 Ar 가스의 중간 수준 혹은 Ar 가스와 유사한 단열 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다. 만약 SF₆ 가스의 포집 및 저장 기술의 개발 수준이 현재의 CO₂ 가스의 수준으로 향상된다면, 기존 창호에서 이용되어온 air 및 Ar를 SF₆ 가스로의 교체가 가능할 것으로 보인다. 아울러, 이러한 온실가스가 건물의 창호에서 이용된다면, 포집 혹은 저장된 온실가스를 자원으로 활용하는 것이 가능하다. 이와 더불어 산림이 CO₂를 흡수하는 온실가스 흡수체인 것처럼 건물 자체가 SF₆을 흡수하는 온실가스 흡수체로서 활용될 수 있을 것이다. 건물에서 복층유리는 필수적인 요소이다. 현재 보급된 총 건물에서 복층유리의 면적을 고려한다면, 건물이 SF₆ 가스를 흡수한 양이 상당할 것으로 보인다. 아울러 SF₆ 처리를 위한 비용 절감에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 단, SF₆ 가스는 지구온난화 지수가 상당히 높은 가스임으로, SF₆ 복층유리의 생산과 폐기 과정에서 가스가 대기 중으로 배출되지 않도록 완벽한 가스의 주입 및 회수 기술이 확보되어야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구는 온실가스인 SF₆ 가스를 자원으로 활용하기 위한 연구로서 SF₆ 가스를 주입한 복층유리의 단열 및 에너지 성능을 분석하는 것에 목적이 있다. 이에 대한 연구 결과는 다음처럼 요약될 수 있다.

1. SF₆ 가스는 지구온난화를 일으키는 주요 온실가스 중의 하나이다. 현재 국내외적으로 이미 대기 중으로 배출된 SF₆ 가스를 제거하기 위한 기술이나 산업 활동 중 SF₆ 가스가 배출되기 전 단계에서 이를 처리하기 위한 기술들이 개발되고 있다. 이러한 SF₆ 가스

는 일반적으로 포집, 저장, 가공, 매장 및 분리의 과정으로 처리된다. 만약, 저장 및 가공의 단계에서 순수한 SF₆ 가스를 단열 자원으로 이용할 수만 있다면, 새로운 단열 가스 시장을 개척함과 동시에 고가의 기존 단열 가스를 버려지는 온실가스로 대체함으로써 가스의 경제성을 향상시킬 수 있다. 아울러, SF₆ 가스를 자원으로 활용함에 따라 처리되어야 할 SF₆ 가스양의 일정부분을 감소시킬 수 있기 때문에, SF₆ 가스의 처리 비용을 절감시키는 것에도 어느 정도 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 본 저자는 저장된 SF₆ 가스를 건물의 단열 재료로서 활용하기 위해 복층유리를 이용하였다. 건물에서 단열 가스로서 기체 상태의 순수한 SF₆ 가스를 활용할 수 있는 부분은 그리 많지 않지만, 복층유리는 두 장의 판유리와 단열 가스를 주입함으로 SF₆ 가스가 활용될 수 있는 최상의 건자재이다. 또한 유리의 가스층을 밀폐시키기 위한 Edge sealing 기술이 지속적으로 발전되어왔으며, 최근에는 복층유리에 주입된 가스층을 거의 완벽하게 밀폐시키는 기술과 제품들이 소개되고 있다. 따라서 유리의 운영기간 동안 주입된 SF₆ 가스가 대기 중으로 재 방출되는 위험성이 거의 없다고 판단된다. 그럼에도 불구하고, 아직 국내에서는 차세대 Edge sealing 기술을 적용한 복층유리의 연구와 제작이 국외와 비교하여 미비하기 때문에, 추후 연구를 통해 복층유리의 가스층에 대한 밀폐 여부와 SF₆ 가스의 가스층 이탈을 면밀하게 관찰하는 것이 필요하다.
3. 본 연구를 통해 제안된 SF₆ 가스를 주입한 복층유리의 단열 성능이 시뮬레이션 프로그램을 통해 이론적으로 분석되었다. 특히, 현재 복층유리의 단열 가스로서 폭넓게 활용되고 있는 Air, Ar, Kr 가스와 SF₆ 가스의 단열 성능 비교를 통해 복층유리 내에서 SF₆ 가스의 단열 성능 수준을 파악함과 더불어 가스 종류에 따른 건물의 난방 에너지 소비량을 정량적으로 분석했다. 우선, 유리의 표면온도를 분석한 결과, SF₆ 가스를 주입한 복층유리의 표면온도는 Air 및 Ar 가스를 주입한 복층유리의 중간 수준으로 분포하였으며, 미세한 차이지만 Air의 경우보다는 Ar 가스의 경우에 좀 더 근접한 것으로 분석되었다. 건물의 난방에너지 소비량에서도 Air, Ar, Kr은 625.08 kWh, 262.87 kWh, 260.51 kWh의 에너지를 소비하였으며, SF₆ 가스의 경우는 263.87 kWh의 난방에너지를 소비한 것으로 나타났다.
4. 이러한 결과를 종합할 때, SF₆ 가스는 Air 및 Ar 가스 중간 수준의 단열 성능을 발휘할 수 있을 것으로 보이며, 만약 가스의 순도를 극대화시킬 수 있다면 Ar 가스의 단열 성능에 좀 더 근접할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 밀폐된 가스층에서 SF₆ 가스가 높은 대기온도와 일사에 장시간 노출될 때, 압력과 체적이 팽창된다면 가스층을 밀폐시키는 Edge sealing 부분이 파손될 위험이 있다. 또한 복층유리의 제작 과정에서 미세하게 가스층으로 침투되는 수증기 및 유기물과 주입된 SF₆ 가스가 서로 반응한다면 SF₆ 가스의 단열 성능이 저하되고 가스층에서 예상치 못한 하자가 발생할 수 있다. 아울러, SF₆ 가스가 가스층 내의 수증기와 유기물들을 흡습제(Desiccant)에 흡수되는지에 대한 여부를 확인할 필요가 있

다. 향후 연구에서는 이러한 3가지 관점에서 SF₆ 가스의 특징을 좀 더 분석하고자 한다.

Acknowledgement

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (과제번호: 2018R1A6A3A01013035).

Reference

- [1] 한국환경산업기술원, 이산화탄소 포집·저장(CCS) 및 불화가스(SF₆) 저감 최신 기술동향, 2010 // (Korea Environmental Industry & Technology Institute, Technology trend on Carbon dioxide Capture & Storage (CCS) and reduction of Sulfur Hexafluoride (SF₆), 2010)
- [2] W.G. Lee, S.W. Kang, Highly selective polymer electrolyte membranes consisting of poly(2-ethyl-2-oxazoline) and Cu(NO₃)₂ for SF₆ separation. Scientific Reports, Vol. 6, 2016. p.20430
- [3] J.S. Lim et al., Gravimetric standard gas mixtures for global monitoring of atmospheric SF₆, Analytical chemistry, Vol. 89, 2017. pp.12068-12075
- [4] EnergyPlus, Engineering reference, https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf, 2019.03.27
- [5] Lawrence Berkeley National Laboratory, Conrad 5 & Viewer 5 Technical and Programming Documentation, <https://windows.lbl.gov/sites/all/files/Downloads/conrad-and-viewer-06-20-06.pdf>, 2006.06.20
- [6] E. Cuce, S.B. Riffat, A state-of-the art review on innovative glazing technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 41, 2015. pp.695-714
- [7] 최원기, 고단열, 고기밀 창호 및 일사차단 기술, 한국태양에너지학회, 제14권 제1호, 2016, pp.17-23 // (Choi, Won-Ki, Technology on the windows with superior insulation and airtightness and shielding solar radiation, The Korean Solar Energy Society, Vol. 14 (1), 2016, pp.17-23)
- [8] 조수, 김석현, 박정환, 진공유리 구성에 따른 건물 냉난방 에너지 소비량 변화에 관한 연구, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제10권 제3호, 2016, pp.213-218 // (Cho, Soo, Kim, Seok-Hyun, Park, Jung-Hwan, A Study on the Variation of the Heating and Cooling Energy Consumption in Buildings by Various Vacuum Glazing Components, Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building System, Vol. 10 (3), 2016, pp.213-218)
- [9] 조수, 김석현, 엄재용, 단열성 시험 방법을 통한 진공유리의 구성 및 필러 배치에 따른 열 성능 평가, 한국태양에너지학회 논문집, 제35권 제1호, 2015, pp.61-68 // (Cho, Soo, Kim, Seok-Hyun, Eom, Jae-Yong, The Evaluation of Thermal Performance of Vacuum Glazing by Composition and the Pillar Arrangement through Test Method of Thermal Resistance, Vol. 35 (1), 2015, pp.61-68)
- [10] 국가법령정보센터, 건축물의 에너지절약 설계기준, <http://www.law.go.kr/>, 2018.09.01. // (Korea Ministry of Government Legislation, Standard for energy saving design of building, <http://www.law.go.kr/>, 2018.09.01)
- [11] 한국태양에너지학회, 대한민국 표준기상데이터, <http://www.kses.re.kr/index.php>, 2015.06.02. // (The Korean Solar Energy Society, Korea Standard Weather Data, <http://www.kses.re.kr/index.php>, 2015.06.02)
- [12] 한국건축친환경설비학회, 건물의 기밀성능 기준, <http://www.kiaebs.org/>, 2013.06.14. // (Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building System, Building Airtightness Criteria, <http://www.kiaebs.org/>, 2013.06.14)
- [13] 국가법령정보센터, 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙, (<http://www.law.go.kr/>, 2017.12.04. // (Korea Ministry of Government Legislation, Regulation for Facility in Building, <http://www.law.go.kr/>, 2017.12.04)