

자연형 태양 챔버 시스템의 성능 분석

장항인*, 김병구*, 서승직**

*인하대학교 대학원 건축공학과(jhiaesl@inha.edu/babingos@naver.com),
**인하대학교 건축공학과(energeti@inha.ac.kr)

Performance Analysis of Passive Solar Chamber System

Jang, hyang-In* Kim, Byung-Gu* Suh, Seung-Jik**

*Dept. of Architectural Eng., Graduate School, Inha University(jhiaesl@inha.edu/babingos@naver.com),
**Dept. of Architectural Eng., Inha University(energeti@inha.ac.kr)

Abstract

This study proposes a Passive Solar Chamber System (PSCS) as a passive method for reduction of building energy consumption. Through numerical analysis, the study quantitatively analyzes system performance and aims to provide foundational data for system design. For this purpose, the study configures different system operation modes seasonally and also computes thermal and ventilation performance of the system in accordance with design factors (solar radiation, air channel height and distance). System and ventilation efficiency increases along with increase in solar radiation and air channel distance; however, as the air channel height increases, the efficiencies showed a tendency to decrease. Upon installation of PSCS, an average of 98.23 W/m^2 of heat flux was introduced in the daytime for the month of January in comparison to walls with no PSCS installed. For the month of August, natural ventilation of $56.68 \text{ m}^3/\text{h}$ was shown to be supplied to the room.

Keywords : 태양굴뚝(Solar chimney), 자연환기(Natural ventilation), 에너지절약(Energy conservation), 수치해석(Numerical analysis), 매트랩(MATLAB)

기 호 설 명

A_f	: 중공층 면적 [m^2]	hc	: 전도 열전달계수 [$\text{W/m}^2\text{K}$]
A_{fi}	: 중공층 유입구 면적 [m^2]	hr	: 복사 열전달계수 [$\text{W/m}^2\text{K}$]
C	: 비열 [J/kgK]	hv	: 대류 열전달계수 [$\text{W/m}^2\text{K}$]
C_c	: 운량	I_{vt}	: 남측수직면일사량 [W/m^2]
D	: 중공층 두께 [m]	k_w	: 열전도도 [W/mK]
H	: 중공층 높이 [m]	\dot{m}	: 질량유량 [kg/s]
		\dot{q}	: 중공층 공기열유속 [W/m^2]

투고일자 : 2011년 6월 2일, 심사일자 : 2011년 6월 7일, 게재확정일자 : 2011년 7월 25일
교신저자 : 서승직(energeti@inha.ac.kr)

S_1	: 투과체 흡수일사량 [W/m^2]
S_2	: 흡수체 흡수일사량 [W/m^2]
T	: 온도 [K]
T_{dp}	: 이슬점온도 [K]
V_f	: 중공층 평균 유속 [m/s]
$\overline{V_s}$: 중공층 체적유량 [m^3/s]
W	: 중공층 너비 [m]
Gr	: Grashof number
Nu	: Nusselt number
Pr	: Prandtl number
Ra	: Rayleigh number
α	: 흡수율
γ	: 중공층 평균온도근사계수
ϵ	: 방사율
η	: 시스템효율
ρ	: 밀도 [kg/m^3]
τ	: 투과율
δ_w	: 두께
g	: 투과체
f	: 중공층
$w1$: 흡수체외표면
$w2$: 흡수체내표면

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

기후변화에 대응해 에너지 소비를 줄이기 위한 다양한 노력이 시도되고 있지만 그 효과는 아직 미흡하고, 도리어 변하지 않는 에너지 소비문화와 폭설·한파가 겹치며 난방 부하가 급증해 지난해 겨울에는 전력 예비율이 5.5%까지 떨어지는 전력 대란의 사태를 겪었다. 이 같은 상황에서 국가 에너지의 약 25%를 소비하는 건물 부분의 에너지 절감을 위한 정책 및 기술 개발은 그 의미가 더해지고 있다.

본 논문에서는 외기온도, 일사량, 공조 모드에 따라 다양한 방식으로 운영하여 건물 에너지를 절감할 수 있는 건축적 방법을 이용한 자연형 태양 챔버 시스템 (Passive Solar Chamber

System : 이하 PSCS)을 제안하고, 이에 대한 이론적인 연구를 수행하였다. 설계 인자(일사량, 중공층높이, 중공층두께)의 변화에 대한 시스템의 열 및 환기 성능의 변화를 분석하였으며, 시스템 미설치 벽과의 성능을 비교하였다.

1.2 연구 방법 및 범위

본 논문은 시스템의 응용을 위한 이론적인 체계 정립과 수치해법에 따른 분석에 초점을 두었으며, 이를 위해 시스템 해석을 위한 수학적 모델을 수립하고, 수치해석 툴인 MATLAB을 이용하여 시스템의 성능을 분석하였다.

시스템 설계 인자에 대한 성능 변화를 분석하기 위하여 냉·난방기(1월 및 8월)를 평균 기상 조건을 기준으로 일사량, 중공층 높이, 중공층 두께 등의 설계 인자 변화에 따른 유입열류, 시스템효율, 환기량, 환기효율, 중공층유속 등의 시스템 성능을 분석하였다.

PSCS의 운영 모드별 성능을 분석하기 위해 건물 벽체에 부착하기 적절한 크기의 단위 모델을 선정하고, 해당 월의 모든 날을 시간대별로 평균하여 만든 가상의 날인 '평균일'을 대상으로 PSCS 설치벽과 미설치벽의 유입열류 및 환기량을 비교하였다.

2. 자연형 태양 챔버 시스템 개요

2.1 시스템의 구성

태양 굴뚝은 연돌 효과를 이용해 실에 열과 환기를 제공하는 간접 획득 자연형 태양열 시스템의 일종이다. 제안한 PSCS는 천장부터 창의 하부 공간의 앞쪽에 설치되는 모든 건물에 적용이 가능한 모듈의 소규모 태양 굴뚝 시스템이다.

그림 1은 PSCS의 구성을 나타낸 개념도이다. 시스템은 투과체, 중공층, 흡수체(집열체)의 세 부분으로 구성된다. 투과체는 일사를 투과하는 유리로 구성하고, 흡수체는 외표면을 무광택 검정색 페인트로 도장한 알루미늄

판재와 단열재로 구성된다. 공기의 유동 통로인 중공층의 상·하부에는 외부 및 실내로의 공기 유출입을 제어할 수 있는 환기 댐퍼가 설치되며, 시스템 외측에는 겨울철 야간의 열손실을 막기 위해 가동형 단열셔터가 설치된다.

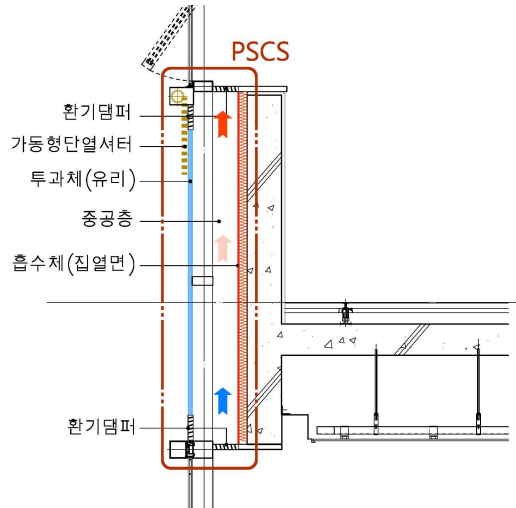


그림 1. 시스템 개념도

2.2 시스템 운영에 따른 계절별 기대효과

그림 2는 PSCS의 계절별 운영 모드를 나타낸 것이며, 기대효과는 다음과 같다.

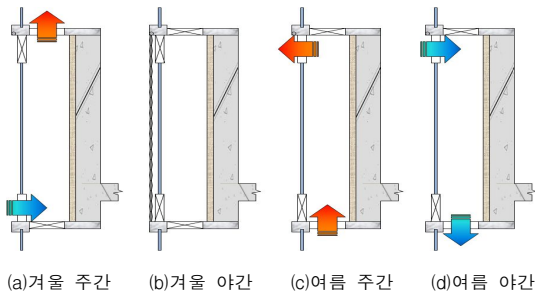


그림 2. 계절별 운영모드

- (a) 난방기 주간 : 예열된 외기를 실내에 공급하여 환기로 인한 열손실을 감소시킨다.
- (b) 난방기 야간 : 단열 셔터와 밀폐된 중공층이 건물의 단열 성능을 높여 일반 벽체에

- 비해 건물의 열손실을 줄여준다.
- (c) 난방기 주간 : 실내의 공기를 연돌효과에 의해 자연 배기시켜 환기부하를 경감시킨다.
- (d) 난방기 야간 : 유효복사에 의해 예냉된 외기를 실내에 공급해 자연환기를 제공하며 난방 부하를 저감할 수 있다.

3. 이론적 분석

시스템 해석을 위한 열수지 모델은 전도, 대류, 복사의 복합 열전달 메커니즘으로 그림 3과 같다. 이론적 분석을 단순화하기 위한 기본 가정은 다음과 같다.

- 1) X축 방향의 온도구배만을 고려한 1차원 정상상태로 가정한다.
- 2) 중공층 공기를 제외한 모든 재료의 물성값은 온도변화와 무관하다.
- 3) 공기 유출입구의 외기에 의한 영향은 무시한다.
- 4) 일사량 계산 시 음영의 영향은 무시한다.
- 5) 모든 표면은 회색체로 간주한다.
- 6) 흡수체와 유리의 열용량은 무시한다.
- 7) 지표면의 온도는 외기온도와 동일하다.

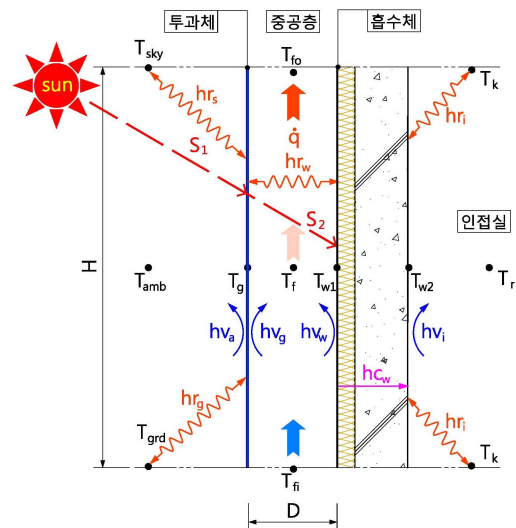


그림 3. 시스템 해석 개념도

3.1 열평형방정식

시스템 해석을 위한 열평형 방정식은 네 부분으로 나누어 수립했으며 아래와 같다

① 투과체

$$S_1 - hv_a(T_g - T_{amb}) - hr_s(T_g - T_{sky}) - hr_g(T_g - T_{grd}) + hv_g(T_f - T_g) + hr_w(T_{w1} - T_g) = 0 \quad (1)$$

② 중공층

$$-q - hv_g(T_f - T_g) + hv_w(T_{w1} - T_f) = 0 \quad (2)$$

③ 흡수체 외표면

$$S_2 - hv_w(T_{w1} - T_f) - hr_w(T_{w1} - T_g) + hc_w(T_{w2} - T_{w1}) = 0 \quad (3)$$

④ 흡수체 내표면

$$-hc_w(T_{w2} - T_{w1}) + hr_i(T_k - T_{w2}) + hv_i(T_r - T_{w2}) = 0 \quad (4)$$

식(2)의 \dot{q} 는 자연대류로 인해 공기에 전달되는 열유속(heat flux)을 나타내며 식(5)에 의해 계산된다. 여기서 γ 는 ‘평균온도근사계수’로 Ong과 Chow가 제안한 0.74를 사용하였다.¹⁾ 질량유량 \dot{m} 은 식(6)에 의해 계산할 수 있으며, 시스템의 압력손실을 나타내는 $C_1(A_f/A_{fi})^2 + C_2$ 에서 무차원상수 C_1 과 C_2 는 Trombe 등이 제안한 8과 2를 사용하였다.²⁾

$$\dot{q} = \frac{\dot{m} C_f (T_f - T_{fi})}{\gamma WH} \quad (5)$$

$$\dot{m} = A_f \cdot \rho_f \cdot \sqrt{\frac{2gH}{C_1 \left(\frac{A_f}{A_{fi}}\right)^2 + C_2} \frac{(T_f - T_{fi})}{|T_f|}} \quad (6)$$

3.2 열전달계수의 계산

열평형방정식의 계산을 위한 전도, 대류, 복사 열전달계수는 다음의 식을 이용하여 계

산하였다.

3.2.1 전도열전달계수

$$hc_w = \frac{k_w}{\delta_w} \quad (7)$$

3.2.2 대류열전달계수

중공층의 대류열전달계수는 중공층과 실내·외의 공기 유동 유무에 따라 구분하며, 식(8)~(12)을 이용하여 계산할 수 있다.

1) 중공층을 통한 공기 유동이 있는 경우

$$hv_{w,g} = \frac{k}{H} \cdot Nu \quad (8)$$

① $Ra \leq 10^9$ 인 경우

$$Nu = 0.68 + \frac{0.67(Ra)^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (9)$$

② $Ra > 10^9$ 인 경우

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (10)$$

2) 중공층을 통한 공기 유동이 없는 경우

$$hv_{w,g} = \frac{k}{(D/2)} \cdot Nu \quad (11)$$

$$Nu = \text{Max}[1, 0.228(Ra/K_A)^{0.25}, 0.039(Ra)^{0.33}] \quad (12)$$

실내·외의 대류전달계수는 다음 식(13)~(16)을 이용해 계산하였다.

$$hv_a = 2.8 + 3.0 Va \quad (13)$$

$$hv_i = \frac{k}{H} \cdot Nu \quad (14)$$

$$Nu = 0.516(Ra)^{1/4} \quad (10^4 < Gr \leq 10^8) \quad (15)$$

$$Nu = 0.117(Ra)^{1/3} \quad (10^8 < Gr \leq 10^{12}) \quad (16)$$

3.2.3 복사열전달계수

$$hr_s = 0.5 \cdot \sigma \cdot \epsilon_g \cdot (T_g^2 + T_{sky}^2)(T_g + T_{sky}) \quad (17)$$

1) K.S. Ong, C.C. Chow, Performance of a solar chimney, Solar Energy, Vol. 74, pp. 1-17, 2003.

2) Trombe, F., Robert, J. F., Cabanot, M., and Sesolis, B., Concrete Walls to Collect and Hold Heat, Solar Age, Vol 2, pp 13-19, 1977.

$$hr_g = 0.5 \cdot \sigma \cdot \epsilon_g \cdot (T_g^2 + T_{grd}^2)(T_g + T_{grd}) \quad (18)$$

$$hr_w = \sigma \cdot \frac{1}{1/\epsilon_g + 1/\epsilon_{w1} - 1} (T_g^2 + T_{w1}^2)(T_g + T_{w1}) \quad (19)$$

$$hr_i = \sigma \cdot \epsilon_{w2} \epsilon_k \cdot (T_{w2}^2 + T_k^2)(T_{w2} + T_k) \quad (20)$$

3.3 천공온도와 유효복사

위 식에서 사용되는 천공온도는 대기온도, 이슬점온도 및 운량을 고려하여 계산하는 Clark과 Allen이 제안한 식(21)을 이용하였다.³⁾ 야간의 복사 냉각을 유발하는 유효 복사량(J_e)은 천공에서 방사된 장파장 복사 및 지표면 복사와 건물 표면에서 방사된 장파장 복사의 차로 수직면의 경우 식(23)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$T_{sky} = (0.787 + 0.764 \ln(\frac{T_{dp}}{273} Ca))^{1/4} \cdot T_{amb} \quad (21)$$

$$Ca = 1 + 0.0224 C_c + 0.0035 C_c^2 + 0.00028 C_c^3 \quad (22)$$

$$J_e = 0.5 \sigma \epsilon_g (T_g^4 - T_{sky}^4) + 0.5 \sigma \epsilon_g (T_g^4 - T_{grd}^4) \quad (23)$$

3.4 시스템효율 및 환기량

시스템의 성능을 평가할 수 있는 시스템효율, 중공층 평균유속, 체적유량(환기량)은 아래 식을 이용하여 산출할 수 있다.

$$\eta = \left(\frac{\dot{m} C_f (T_{fo} - T_{fi}) + \frac{k}{L} (T_{w1} - T_{w2}) WH}{W \cdot H \cdot I_{ot}} \right) \times 100 \quad (24)$$

$$V_f = \frac{\dot{m}}{A_f \cdot \rho_f} \quad (25)$$

$$\overline{V}_s = \frac{\dot{m}}{\rho_f} \quad (26)$$

3.5 수렴 조건 및 재료의 물성값

시스템의 열평형방정식은 역행렬법을 이용하여 해를 구하고, 이 해가 오차 범위에 수렴할 때까지 반복함으로써 시스템의 근사해를 계산하였으며 수렴조건은 아래와 같다.

$$\left| \frac{T_f^{n+1} - T_f^n}{T_f^{n+1}} \right| \leq 10^{-5} \quad (27)$$

건물 벽체와 슬래브는 모두 동일하게 구성 된 것으로 가정하였고, 시스템의 분석에 사용 된 재료의 물성값은 ASHRAE에서 제공된 값을 사용하였으며, 다음 표 1과 같다.

표 1. 재료의 물성값

구분	공기	유리	알루미늄	단열재
두께(m)		0.005	0.001	0.1
열전도율(W/m·K)	0.026	1.05	221	0.029
밀도(kg/m ³)	1.204	2,470	2,740	29
비열(J/kg·K)	1,012	750	896	1,210
흡수율		0.06	0.95	
방사율		0.90	0.94	
투과율		0.84		

기상 데이터는 EnergyPlus에서 제공하는 인천 지역의 기상데이터를 이용하였으며, 설계 인자별 성능 분석을 위한 평균 기상 조건은 표 2와 같다.

표 2. 평균 기상 데이터 (EnergyPlus, 인천)

항 목	난방기 (1월)	냉방기 (8월)	연평균
일사량 (W/m ²)	241	205	192.86
운량	0.33	0.65	0.48
외기온도 (K)	270.8	297	284.8
이슬점온도 (K)	261.1	294.7	279
최고온도 (K)	273.5	300.5	-
최저온도 (K)	268.8	295.9	-
온도 (K)	293	299	-
상대습도 (%)	46.53	83.05	68.74
풍속 (m/s)	3.33	3.71	3.16
시스템 크기 (m)	1.5(H) * 1(W) * 0.2(D)		

3.6 수치해석 결과의 검증

그림 4는 기존에 소규모 태양 굴뚝에 관해 수행된 선행 연구의 실험 데이터와⁴⁾ 동일한 조건(시스템크기:1.875m*0.1m*0.2m, 외기온

3) Clark, G. and C. Allen, The Estimation of Atmospheric Radiation for Clear and Cloudy Skies, Proceedings 2nd National Passive Solar Conference (AS/ISES), pp. 675-678, 1978.

4) K.S. Ong, C.C. Chow, Performance of a solar chimney, Solar Energy, Vol. 74, pp. 1-17, 2003.

도=실내온도: 303K)에서 본 논문에서 사용한 수치 해석적 방법으로 계산한 결과를 비교한 것이다. 선행 실험 연구의 경우 일사량과 시스템효율의 상관계수는 0.534, 결정계수는 0.285로 데이터의 분포 폭이 크지만 상관관계가 존재하며, 회귀식이 유효한 것으로 판단되었다. 본 논문에서 수행한 수치 해석 결과의 회귀식은 결정계수가 0.811로 계산되었으며, 선행 실험 연구와 결정계수가 다르다는 전제조건하에 두 회귀선을 비교하였다. 회귀식을 기준으로 비교한 결과 두 데이터는 동일한 추세를 보이고 있으며 약 0.9~1.8%의 미세한 결과값의 차이를 보이고 있다.

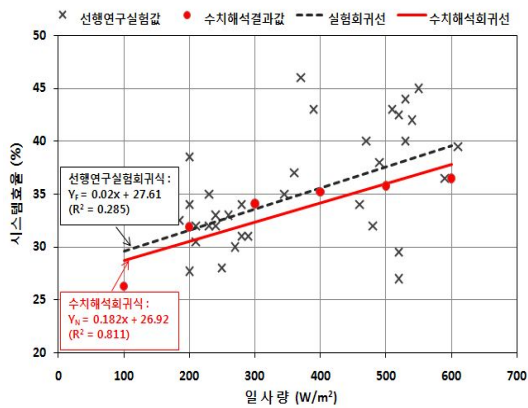


그림 4. 실험과 수치해석의 결과 비교

4. 설계인자 변화에 따른 시스템 성능

일사량, 중공층 높이, 중공층 두께의 변화에 따라 난방 효과가 있는 난방기의 경우 유입열류와 시스템효율로, 환기 효과가 있는 냉방기의 경우 환기량과 환기효율로 시스템 성능을 비교하였다.

4.1 일사량 변화에 따른 시스템 성능

그림 5는 난방기(1월)의 일사량 변화에 따른 시스템 각 부분의 온도 및 성능을 나타낸 것이다. 일사량 증가에 따라 중공층의 온도가

상승하고, 이로 인해 중공층 유속이 증가하여 유입열류와 시스템효율이 증가하는 것으로 나타났다. 그림 6에 나타난 냉방기(8월)의 경우도 난방기와 비슷한 경향을 보여 중공층 유속이 증가하고 이에 따라 환기량과 환기효율이 증가하는 것으로 나타났다.

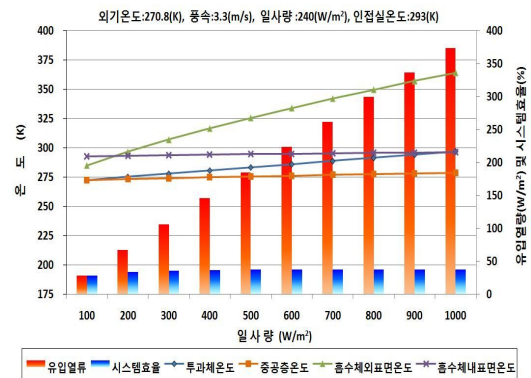


그림 5. 일사량에 따른 시스템 성능 (난방기)

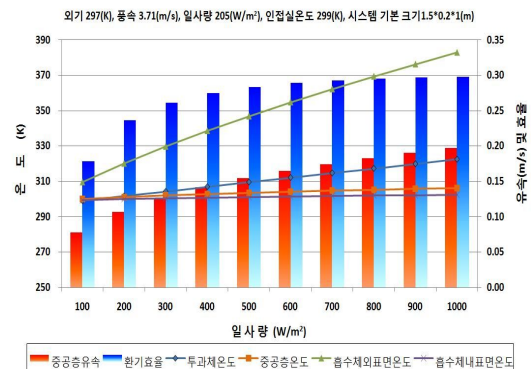


그림 6. 일사량에 따른 시스템 성능 (냉방기)

4.2 중공층 높이(H) 변화에 따른 시스템 성능

그림 7은 난방기의 중공층 높이 변화에 따른 시스템 성능을 나타낸 것이다. 중공층의 높이가 증가함에 따라 시스템이 획득하는 총 일사량이 증가해 중공층의 평균온도가 상승하지만, 면적 증가에 비해 질량유량의 증가 폭이 작아 유입열류와 시스템효율은 다소 감소하는 것으로 나타났다.

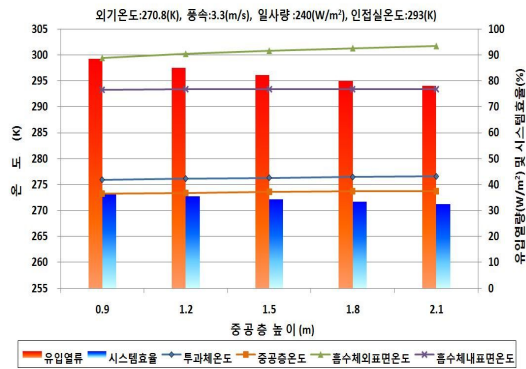


그림 7. 중공층 높이에 따른 시스템 성능 (난방기)

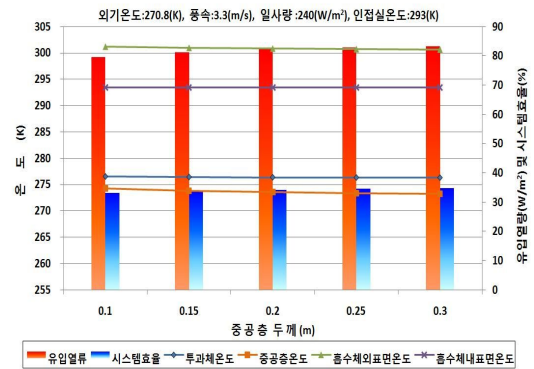


그림 9. 중공층 두께에 따른 시스템 성능 (난방기)

그림 8에 나타난 냉방기(8월) 경우 시스템 면적 증가에 따라 환기량은 증가하지만, 면적 증가에 비해 환기량의 증가 폭이 작아 환기효율은 26.0~22.4%로 감소하였다.

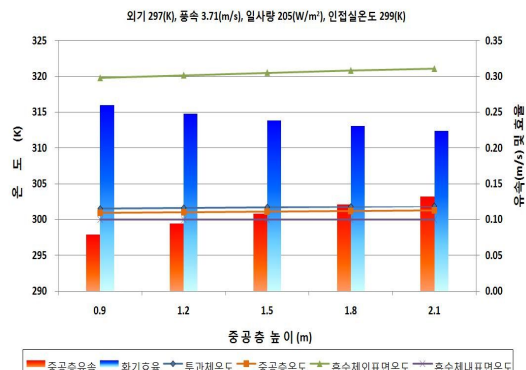


그림 8. 중공층 높이에 따른 시스템 성능 (냉방기)

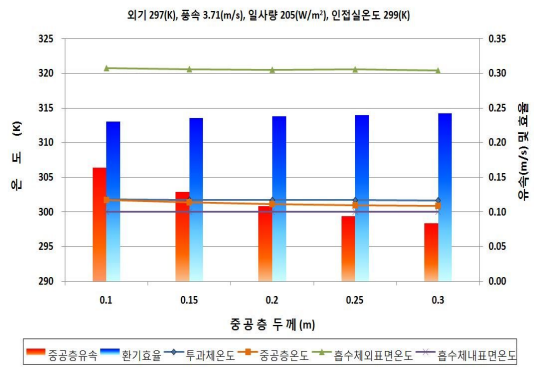


그림 10. 중공층 두께에 따른 시스템 성능 (냉방기)

4.3 중공층 두께(D) 변화에 따른 시스템 성능

그림 9, 10은 중공층의 두께 변화에 따른 시스템 성능을 나타낸다. 난방기의 경우 중공층의 두께가 증가할수록 중공층의 온도와 유속이 감소하지만, 중공층 두께 증가로 인한 체적 증가로 인해 시스템효율은 소폭 상승하는 것으로 나타났다. 냉방기(8월)의 경우도 중공층 두께 증가에 따라 환기량과 환기효율이 소폭 상승하였다.

5. 시스템 성능 비교

그림 11은 PSCS의 계절별 운영모드에 따른 효과를 판단하기 위해 콘크리트와 단열재로만 구성된 시스템 미설치 벽과 유입열류 및 환기량을 비교한 결과이다. 시스템은 건물의 남측 벽에 설치하였으며, 시스템의 크기는 건물의 창호하부부터 천장까지의 공간 앞쪽에 설치하기 적절한 크기인 1.5*1.0*0.2 m로 선정하였다.

분석 기간은 1월과 8월이며 주·야간을 구분하여 운영 모드에 따른 시스템 성능을 평가하였으며, 인접실의 온도는 난방기 293K, 냉방기 299K로 설정하였다.

난방기(1월) 주간 경우 예열된 공기가 실

내에 공급되어 미설치벽에 비하여 순획득열류가 98.23 W/m² 만큼 높게 나타났다. 야간의 경우에도 단열서터의 영향으로 미설치벽에 비해 손실열류가 다소 낮게 나타났으나 그 효과가 크진 않는 것으로 판단된다.

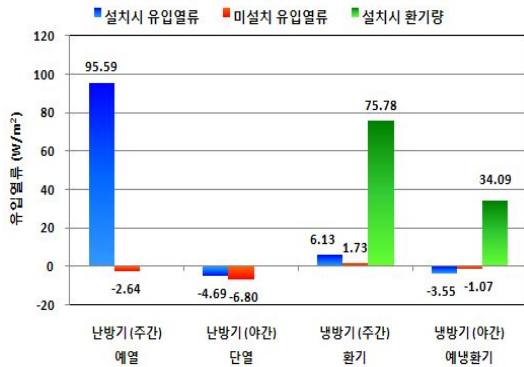


그림 11. 운영 모드별 시스템 성능

냉방기(8월) 주간의 경우에는 따뜻한 실내 공기가 중공층을 통과함에 따라 벽체를 통한 열전달이 발생해 4.40 W/m²의 추가 열획득이 발생하지만, 75.78 m³/h의 자연 환기(배기)를 실에 제공할 수 있다. 냉방기 야간의 경우 유효 복사에 의해 예냉된 공기를 실내에 유입시킴으로서 34.09 m³/h의 자연 환기(급기)가 가능하며 2.48 W/m²의 냉방 부하 저감의 효과도 있는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 수치 시뮬레이션을 통해 자연형 태양 챔버 시스템(PSCS)의 설계인자에 따른 성능 변화와 시스템 설치에 따른 효과를 운영 모드에 따라 정량적으로 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 일사량이 100~1,000 W/m²로 증가함에 따라 난방기 유입열류 및 시스템 효율은 각각 27.6~373.1 W/m², 27.6~37.3%로 증가했으며, 냉방기의 경우 환기량 및 환기

효율이 55.7~142.1 m³/h, 17.9~29.7%로 증가하였다.

- (2) 중공층 높이가 0.9~2.1 m로 증가함에 따라 난방기 유입열류 및 시스템 효율은 각각 88.5~78.1 W/m², 36.8~32.5%로 감소하였으며, 냉방기의 경우 환기량은 57~95.4 m³/h로 증가하지만 면적 증가에 비해 환기량의 증가폭이 작아 환기효율은 26~22.4 %로 소폭 감소하였다.
- (3) 중공층 두께가 0.1~0.3 m로 증가함에 따라 난방기 유입열류 및 시스템 효율은 각각 79.7~83.4 W/m², 33.2~34.7%로 증가했으며, 냉방기의 경우 환기량 및 환기효율이 58.9~90.8 m³/h, 23~24.3%로 증가하였다.
- (4) 건물의 남측면에 1.5*1.0*0.2(H*W*D)의 PSCS를 설치해 시스템 미설치벽과 비교한 결과, 난방기(1월) 주간의 경우 평균 98.23 W/m²의 유입열류 증가가 나타났으며, 야간의 경우 단열서터 설치 시 시스템을 통한 열손실을 줄일 수 있는 것으로 나타났다.
- (5) 또한 냉방기(8월)의 경우에는 주간 배기 75.78 m³/h, 야간 급기 34.09 m³/h, 평균 56.68 m³/h의 자연 환기를 인접실에 공급하는 것으로 계산되었다.

이상의 연구를 통해 PSCS에 대한 수치적 방법에 의한 기초 이론 정립이 이루어졌으며, 이후 시스템의 적용성을 높이기 위한 중간기를 포함한 연간 성능 평가와 다양한 투과체(BIPV, Low-E 유리 등) 적용에 따른 성능 변화에 관한 연구를 추가적으로 수행할 예정이다.

후 기

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. K.S. Ong, C.C. Chow, Performance of a solar chimney, Solar Energy, Vol. 74, pp. 1-17, 2003.
2. Trombe, F., Robert, J., Cabanot, M., and Sesolis, B., Concrete Walls to Collect and Hold Heat, Solar Age, Vol 2, pp. 13-19, 1997.
3. Clark, G. and C. Allen, "The Estimation of Atmospheric Radiation for Clear and Cloudy Skies," Proceedings 2nd National Passive Solar Conference (AS/ISES), pp. 675-678, 1978.
4. ASHRAE, ASHRAE Fundamentals Handbook 2009, ASHRAE, 2009.
5. 서승직 외, 건축환경공학, 일진사, 2004.
6. Yunus A. Cengel, Heat Transfer : A Practical Approach, 2nd Ed., McGraw -Hill, 2006.