

# 자연형 태양 챔버 시스템의 계절별 성능 및 크기 결정 방법

장향인\*, 김병구\*, 서승직\*\*

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

\*\*인하대학교 건축공학과(energeti@inha.ac.kr)

## Sizing Method and Seasonal Performance 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 focused on the application of the Passive Solar Chamber System (PSCS) as proposed by a previous study. The seasonal performance and sizing method for the system were investigated for a feasibility of the PSCS in Korean climate. For seasonal performance, heat and ventilation performances of the PSCS were analyzed for the months of January and August. This study proposed a simple configuration method in which the designer can decide on the system size at the preliminary design stage by using system efficiency, overall heat transfer coefficient transmission, monthly solar radiation, highest and lowest temperatures. During weeks that require heating, the system showed to acquire a daily average heat amount of  $860.28 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{day}$ . For cooling periods, the system was computed to supply a daily average natural ventilation of  $1,360.2 \text{ m}^3/\text{day}$  to the room. Moreover, proposed sizing method and the overall computation results showed a 6.04~7.24% error of assessment.

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

### 기 호 설 명

|                  |                                       |                  |  |
|------------------|---------------------------------------|------------------|--|
| A                | : 태양방위각 [°]                           | hr               | : 복사 열전달계수 [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]          |
| $A_{\text{sys}}$ | : 시스템설계면적 [ $\text{m}^2$ ]            | hv               | : 대류 열전달계수 [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]          |
| h                | : 태양고도각 [°]                           | $I_{\text{vt}}$  | : 수직면 전일사량 [ $\text{W/m}^2$ ]                  |
| hc               | : 전도 열전달계수 [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ] | $\dot{m}$        | : 질량유량 [ $\text{kg/s}$ ]                       |
|                  |                                       | $Q_{\text{g,d}}$ | : 주간 획득열량 [ $\text{Wh/m}^2 \cdot \text{day}$ ] |

투고일자 : 2011년 6월 2일, 심사일자 : 2011년 6월 7일, 게재확정일자 : 2011년 8월 8일

교신저자 : 서승직(energeti@inha.ac.kr)

|             |                                   |
|-------------|-----------------------------------|
| $Q_{in}$    | : 일일순 획득열량 [ $Wh/m^2 \cdot day$ ] |
| $Q_{l,n}$   | : 야간손실열량 [ $Wh/m^2 \cdot day$ ]   |
| $\dot{q}$   | : 중공층 공기열유속 [ $W/m^2$ ]           |
| $S$         | : 투과체 흡수일사량 [ $W/m^2$ ]           |
| $T$         | : 온도 [K]                          |
| $V_f$       | : 중공층 평균 유속 [m/s]                 |
| $\bar{V}_s$ | : 중공층 체적유량 [ $m^3/s$ ]            |
| $U_L$       | : 총합열손실계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]     |
| $\delta$    | : 태양의 적위 [°]                      |
| $\eta$      | : 시스템 효율 [%]                      |
| $\theta$    | : 건물의 경사방위각 [°]                   |
| $\Phi$      | : 관측점의 위도 [°]                     |

## 1. 서론

### 1.1 연구 배경 및 목적

본 논문은 건축적 방법에 의한 건물 에너지를 절감할 수 있는 자연형 태양 챔버 시스템 (Passive Solar Chamber System: 이하 PSCS)을 제안하고, 이에 대한 이론적인 연구를 수행하였다.

PSCS는 인접실에 열과 환기를 공급할 수 있는 소규모 태양 굴뚝 시스템으로, 본 논문에서는 PSCS의 계절별 열 및 환기 성능을 수치 해석적인 방법을 통하여 분석하고, 시스템의 활용도를 높이기 위한 초기 설계 단계에서 응용할 수 있는 간단한 시스템 크기 결정 방법을 제시하고자 한다.

태양 에너지의 적극적 활용을 위해 건물의 벽에 부착해 사용되는 PSCS는 외기온도, 일사량, 공조 모드에 따라 다양한 방식으로 운영되며, 주요 기능은 겨울철 주간의 예열된 공기의 공급으로 인한 난방 부하 절감과, 여름철의 연돌 효과에 의한 자연 환기를 하기 위함이다.

### 1.2 연구 방법 및 범위

PSCS의 계절별 열 및 환기 성능을 분석하기 위해 MATLAB을 이용해 시스템의 수치 모델을 구현하였다. 시뮬레이션 기간은 난방기(1월), 냉방기(8월)만을 대상으로 하였으며, 중간기는 연구

범위에 고려하지 않았다. 건물 벽체에 부착하기 적정한 형태의 단위모델(1.5\*1.0\*0.2m, H\*W\*D)을 선정하고 계절별 시스템 성능을 계산하였다.

설계자가 시스템 설계를 위한 기초 자료로 활용할 수 있도록 시스템의 성능 지표인 주간 시스템 효율, 야간 총합열전달계수와 기상 통계 데이터인 월평균 일사량, 최고온도, 최저온도를 이용해 시스템의 적정 크기를 계산하는 방법을 제안하고, 이를 해당월 전체 동안 1시간 간격으로 계산한 결과와 비교해 검증하였다.

## 2. 자연형 태양 챔버 시스템 개요

### 2.1 시스템의 구성

그림 1은 시스템 해석을 위한 전도, 대류, 복사의 복합 열전달 메커니즘을 나타낸 개념도이다. 시스템은 투과체(유리), 중공층, 흡수체(알루미늄집열판+단열재)의 세 부분으로 구성된다.

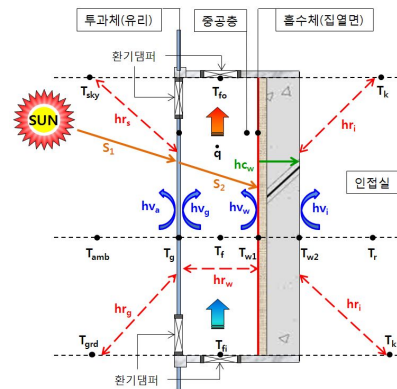


그림 1. 시스템 해석 개념도

시스템 외측에는 야간의 열손실을 막기 위한 단열 셔터가 설치되며, 중공층의 상·하부에는 외부 및 실내로 공기 유동을 제어하는 환기 댐퍼를 설치하였다. 시스템은 건물의 남측면에 설치하며 천장부터 창의 하부까지의 공간 앞쪽에 설치한다. 난방기의 경우 예열된 공기를 상부층에 공급하고, 냉방기의 경우 하부층에 자연 환기를 제공한다.

### 2.2 시스템 해석

시스템은 전도, 대류, 복사의 복합열전달 메커니즘을 가진 1차원 정상상태로 해석하였으며, 중공층 공기를 제외한 모든 재료의 물성값은 온도변화와 무관하고, 공기 유출입구의 외기에 의한 영향은 무시하였다. 열평형방정식은 다음과 같다.

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

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

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

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

시스템 해석을 열전달계수는 선행 연구에 사용된 것과 동일하며<sup>1)</sup>, 시스템의 열평형방정식은 역행렬법을 이용하여 해를 계산하였다. 시스템효율, 중공층 평균유속, 체적유량은 아래 식을 이용하여 산출할 수 있다.

$$\eta = \left( \frac{\dot{m} C_f (T_{fo} - T_{fi}) + \frac{k}{L} (T_{w1} - T_{w2}) WH}{W \cdot H \cdot I_{et}} \right) \times 100 \quad (5)$$

$$V_f = \frac{\dot{m}}{A_f \cdot \rho_f} \quad (6)$$

$$\bar{V}_s = \frac{\dot{m}}{\rho_f} \quad (7)$$

### 2.3 재료의 물성값

표 1. 재료의 물성값

| 구분                      | 공기    | 유리    | 알루미늄  | 단열재   |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 두께 (m)                  | 0.2   | 0.005 | 0.001 | 0.1   |
| 열전도율 (w/m·K)            | 0.026 | 1.05  | 221   | 0.029 |
| 밀도 (kg/m <sup>3</sup> ) | 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  |       |       |

1) 장항인, 서승직, 지하공간의 자연환기를 위한 태양 굴뚝 시스템의 응용, 한국태양에너지학회 논문집, 30권 2호, pp.87~95, 2010.04.

건물 벽체와 슬래브는 모두 동일하게 구성 된 것으로 가정하였고, 시스템의 분석에 사용한 재료의 물성값은 표 1과 같다.

### 3. 시스템의 계절별 성능

시스템의 계절별 성능 계산을 위한 주요 입력값 및 기상 조건은 표 2와 같다. 기상 데이터는 EnergyPlus에서 제공하는 인천 지역의 기상 데이터를 이용하였으며, 연평균 외기온도 284.91K, 일사량 192.86 W/m<sup>2</sup>, 풍속 3.16 m/s, 평균운량 0.48로 나타났다.

계절별 시스템 성능은 해당 기간의 모든 날을 시간대별로 평균하여 만든 가상의 날인 ‘평균일’을 이용하여 분석하였다.

표 2. 월평균 기상 데이터 (EnergyPlus, 인천)

| 항 목                     | 난방기 (1월)               | 냉방기 (8월) | 연평균    |
|-------------------------|------------------------|----------|--------|
| 일사량 (W/m <sup>2</sup> ) | 240.56                 | 205.32   | 192.86 |
| 운량                      | 0.33                   | 0.65     | 0.48   |
| 외기온도 (K)                | 270.84                 | 297.97   | 284.91 |
| 이슬점온도 (K)               | 261.08                 | 294.72   | 279.08 |
| 최고온도 (K)                | 273.53                 | 300.46   | -      |
| 최저온도 (K)                | 268.75                 | 295.86   | -      |
| 인접실온도 (K)               | 293.00                 | 299.00   | -      |
| 상대습도 (%)                | 46.53                  | 83.05    | 68.74  |
| 풍속 (m/s)                | 3.33                   | 3.71     | 3.16   |
| 시스템크기 (m)               | 1.5(H) * 1(W) * 0.2(D) |          |        |

#### 3.1 난방기

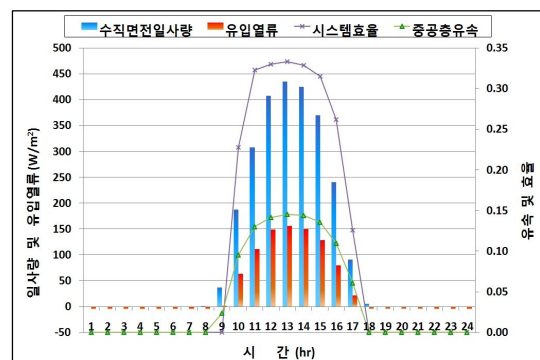


그림 2. 난방기(1월)의 성능 분포

그림 2는 난방기(1월) 평균일의 시간별 시스템 성능 분포이다. 시스템을 통한 총 유입 열량은  $860.28 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 분석되었다. 야간의 경우 가동형 단열 셔터를 설치해 시스템을 통한 열손실을 최소로 하였다.

### 3.2 냉방기

그림 3은 냉방기(8월) 평균일의 시간별 시스템 성능 분포이다. 냉방기의 경우 자연 환기의 제공이 PCSC의 주기능이며, 시스템을 통한 환기량은  $1,360.20 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 나타났다. 자연 환기는 일사가 있는 주간 시간에 주로 발생하지만, 야간의 경우에도 유효복사로 인해 환기가 발생하였다. 다만 일출(7시)과 일몰(20시) 시간의 경우에는 야간 급기모드와 주간 배기모드의 전환으로 인해 환기량이 낮게 나타나는 것으로 사료된다.

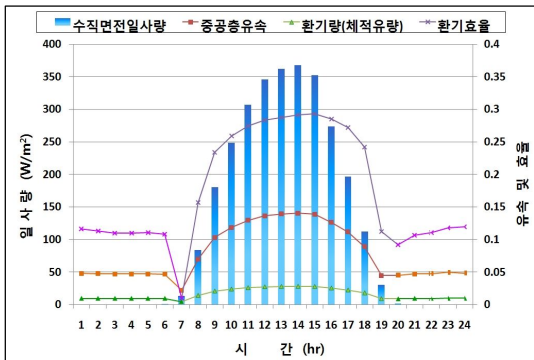


그림 3. 냉방기(8월)의 성능 분포

## 4. 시스템의 크기 결정

위에서 살펴보았듯 PCSC의 주요 기능은 난방기 주간의 난방효과이다. 이에 따라 본 절에서는 난방기 주간의 시스템효율, 야간의 총합 열손실계수와 월평균 일사량, 최고온도, 최저온도를 이용하여 시스템의 크기를 계산하는 방법을 제안하고, 이를 해당월 전체 기간 동안 1시간 간격으로 계산한 결과와 비교하여 검증하고자 한다.

### 4.1 난방기 성능 곡선

#### 4.1.1 주간 난방 시스템효율( $\eta$ )

PCSC는 난방기 주간에 일사에 의해 예열된 공기를 실내에 공급한다. 그림 4는 난방기(1월)에 시스템 크기  $1.5 \times 1.0 \times 0.2 \text{ m}$ 인 경우의 일사량과 외기온도에 따른 시스템효율을 계산한 것이다. 시스템효율은 일사량이 증가할수록 외기온도가 낮을수록 높게 나타났다.

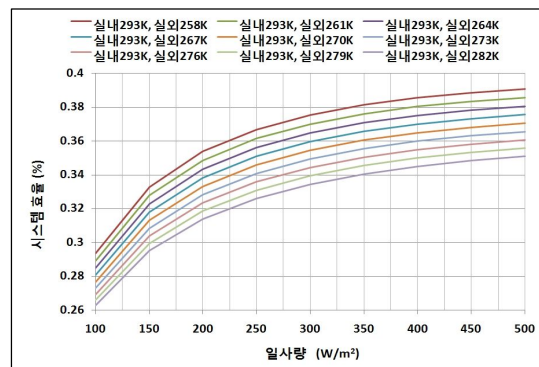


그림 4. 일사량과 외기온도에 따른 시스템 효율 (1월 주간)

#### 4.1.2 야간 총합열손실계수( $U_L$ )

PCSC는 야간의 시스템을 통한 열손실을 최소화하기 위해 단열셔터를 설치하고 중공층은 밀폐하였다. 그림 5는 시스템 크기  $1.5 \times 1.0 \times 0.2 \text{ m}$ 인 경우의 유효복사량을 결정하는 운량과 외기온도에 따른 야간의 총합열손실계수( $U_L$ )를 나타낸다.

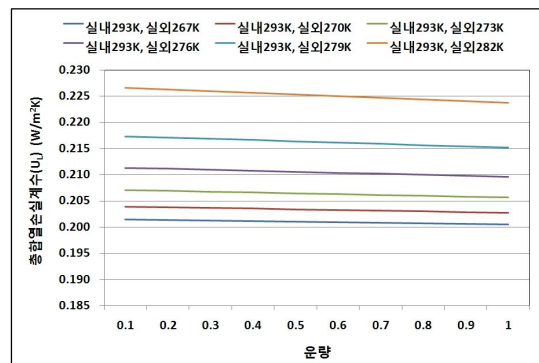


그림 5. 운량과 외기온도에 따른 총합열손실계수 (1월 야간)

### 4.2 시스템의 크기 계산

다음 표 3은 기상청에서 제공받거나 간단한 계산식으로 계산할 수 있는 기상 통계값이다. 본 논문에서는 검증에 위해 사용한 기상 데이터와 통일하기 위해 EnergyPlus에서 제공하는 각 지역의 기상데이터를 통계 처리해 이용하였다. 수직면 일사량 비율과 일몰(일출)시각은 아래 식 (8), (9)와 같이 계산된다. 또한 최고온도와 최저온도를 알고 있다면 ASHRAE에서 제공하는 알고리즘을<sup>2)</sup> 이용해 각 시간의 온도를 계산할 수 있다.

가조시간을 이용해 주·야간 평균온도를 계산할 수 있다.  $T_{a,i}$  는  $i$  시간의 외기온도이고,  $f$ 는 시간별 계수를 나타내며 표 4에 주어진다.

$$\bar{R}_b = (0.5 + 0.5\lambda_{\text{grd}}) + \frac{I_{nb}}{I_{ht}} [\cosh \cdot \cos(A - \theta) - 0.5 \sinh] \quad (8)$$

$$W_s = \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \quad (9)$$

$$\Delta T_a = T_{a,\text{max}} - T_{a,\text{min}} \quad (10)$$

$$T_{a,i} = T_{a,\text{max}} - \frac{f}{100} \Delta T_a \quad (11)$$

표 3. 기상 데이터 계산

| 구 분                            | 기호                 | 인천     | 광주     | 울산     | 인천 (12~2월) |
|--------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|------------|
| 수평면일사량 (kW/m <sup>2</sup> day) | $\bar{H}$          | 1.92   | 2.07   | 2.02   | 1.98       |
| 최고온도 (K)                       | $T_{a,\text{max}}$ | 273.53 | 277.09 | 279.19 | 275.22     |
| 최저온도 (K)                       | $T_{a,\text{min}}$ | 268.75 | 271.12 | 272.00 | 270.66     |
| 수직면일사량비                        | $\bar{R}_b$        | 1.45   | 1.38   | 1.39   | 1.37       |
| 수직면일사량 (kW/m <sup>2</sup> day) | $\bar{H}\bar{R}_b$ | 2.79   | 2.86   | 2.81   | 2.71       |
| 일몰시각 (°)                       | $W_s$              | 73.12  | 74.47  | 74.32  | 74.42      |
| 가조시간 (hr)                      | $2W_s/15$          | 9.75   | 9.93   | 9.91   | 9.92       |
| 시간당일사량 (kW/m <sup>2</sup> )    | $\bar{S}$          | 2.72   | 2.84   | 2.78   | 2.69       |
| 주간평균온도 (K)                     | $T_{a,d}$          | 271.90 | 275.05 | 276.73 | 273.67     |
| 야간평균온도 (K)                     | $T_{a,n}$          | 270.08 | 272.78 | 274.00 | 271.94     |

표 4. 일간 온도 비율

| i | 1  | 2  | 3  | 4  | 5   | 6  | 7  | 8  |
|---|----|----|----|----|-----|----|----|----|
| f | 87 | 92 | 96 | 99 | 100 | 98 | 93 | 84 |
| i | 9  | 10 | 11 | 12 | 13  | 14 | 15 | 16 |
| f | 71 | 56 | 39 | 23 | 11  | 3  | 0  | 3  |
| i | 17 | 18 | 19 | 20 | 21  | 22 | 23 | 24 |
| f | 10 | 21 | 34 | 47 | 58  | 69 | 76 | 82 |

4.1에서 계산된 성능 곡선을 이용해 근사값을 찾거나, 제공된 PSCS 수치해석 틀을 이용하면 주간 시스템효율과 야간 총합열손실계수를 계산할 수 있다. 이 값을 다음 식 (12)~(14)에 대입하면 시스템을 통한 면적당 순회득열량( $Q_{in}$ )을 계산할 수 있다.

표 5. 제안한 크기 결정 방법에 의한 시스템 크기 계산

| 구 분   | 중공층 높이 (m) | 중공층 두께 (m) | 분석 지역 | 분석 기간 | 시스템 효율 (%) | 총합열손실계수 (W/m <sup>2</sup> K) | 주간 회득 (W/m <sup>2</sup> ) | 야간 손실 (W/m <sup>2</sup> ) | 제안방법 순회득 (W/m <sup>2</sup> ) | 시스템 설치면적 (m <sup>2</sup> ) | 건 기간 순회득 (W/m <sup>2</sup> ) | 오차율 (%) |
|-------|------------|------------|-------|-------|------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|---------|
| ALT1  | 1.2        | 0.2        | 인천    | 1월    | 35.62      | 0.204                        | 944.64                    | 66.57                     | 878.07                       | 22.78                      | 819.32                       | 6.69    |
| ALT2  | 1.8        | 0.2        | 인천    | 1월    | 33.55      | 0.204                        | 889.75                    | 66.57                     | 823.18                       | 24.30                      | 765.99                       | 6.95    |
| ALT3  | 2.4        | 0.2        | 인천    | 1월    | 31.68      | 0.204                        | 840.15                    | 66.57                     | 773.58                       | 25.85                      | 728.70                       | 7.05    |
| ALT4  | 3.0        | 0.2        | 인천    | 1월    | 30.58      | 0.204                        | 810.98                    | 66.57                     | 744.41                       | 26.89                      | 700.16                       | 5.94    |
| ALT5  | 1.2        | 0.4        | 인천    | 1월    | 35.96      | 0.204                        | 953.65                    | 66.57                     | 887.08                       | 22.55                      | 838.19                       | 5.51    |
| ALT6  | 1.2        | 0.6        | 인천    | 1월    | 36.34      | 0.204                        | 963.74                    | 66.57                     | 897.17                       | 22.29                      | 847.19                       | 5.57    |
| ALT7  | 1.5        | 0.2        | 인천    | 1월    | 34.48      | 0.204                        | 914.41                    | 66.57                     | 847.84                       | 23.59                      | 789.86                       | 6.84    |
| ALT8  | 1.5        | 0.2        | 광주    | 1월    | 34.91      | 0.207                        | 984.50                    | 58.83                     | 925.67                       | 21.61                      | 858.69                       | 7.24    |
| ALT9  | 1.5        | 0.2        | 울산    | 1월    | 35.43      | 0.213                        | 973.61                    | 57.02                     | 916.59                       | 21.82                      | 850.35                       | 7.23    |
| ALT10 | 1.5        | 0.2        | 인천    | 12~2월 | 33.97      | 0.205                        | 906.48                    | 60.61                     | 845.87                       | 23.64                      | 794.75                       | 6.04    |

2) ASHRAE Fundamentals Handbook 2009.

$$Q_{g,d} = \eta \bar{S} \frac{2W_s}{15} \quad (12)$$

$$Q_{l,n} = U_L(T_r - T_{a,n}) \left[ 24 - \frac{2W_s}{15} \right] \quad (13)$$

$$Q_{in} = Q_{g,d} - Q_{l,n} \quad (14)$$

$$A_{sys} = \frac{Q_{load}}{Q_{in}} \quad (15)$$

식(14)에서 계산된 순획득열량은 시스템 설계 자료로 활용할 수 있으며, 식(15)을 이용하면 필요한 난방 부하에 해당하는 시스템의 설치 면적을 간단하게 계산할 수 있다.

#### 4.3 제안한 시스템 크기 결정법의 검증

표 5는 제안한 크기 결정법을 이용해 20 kWh/day의 난방 부하를 감당할 수 있는 다양한 경우의 PSCS를 설계한 예이다. 중공층의 높이, 두께, 분석지역, 분석기간 등을 변경해 순획득열량과 시스템 크기를 계산하였다.

제안한 시스템 크기 계산 방법과 해당월 전체 기간을 1시간 간격으로 계산한 방법의 순획득열량을 비교하여 오차율을 계산한 결과 두 방법 간의 오차율은 5.51~7.24% 범위로 계산되었다. 특히 ALT 9와 같이 분석기간을 난방기 전체(12월~2월)로 확장한 경우에도 오차율은 크게 변하지 않는 것으로 나타났다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 PSCS의 계절별 성능을 수치 해석적인 방법을 통해 정량적으로 분석하였다. 또한 시스템효율, 총합열손실계수, 기상 통계값(일사량, 최고온도, 최저온도)을 이용해 간략하게 시스템의 크기를 계산할 수 있는 방법을 제안하였으며, 이를 전 기간 데이터와의 비교를 통해 검증하였다.

- (1) 겨울철 주간(12월)의 예열 공기의 공급에 의한 난방 부하 저감이 PSCS의 가장 주요한 효과로 나타났으며, 여름철의 경우에는 연돌 효과를 이용한 자연 환기의 제공이 가능한

것으로 분석되었다.

- (2) 건물의 남측면에 1.5\*1.0\*0.2(H\*W\*D)의 시스템을 설치해 계절별 성능을 분석한 결과, 1월의 경우 평균 860.28 Wh/m<sup>2</sup>·day의 에너지를 취득할 수 있는 것으로 나타났으며, 8월의 경우 1,360.20 m<sup>3</sup>/day의 자연 환기를 실에 공급할 수 있는 것으로 계산되었다.
- (3) 시스템 효율, 총합열손실계수, 월평균 일사량, 최고·최저온도를 이용해 시스템의 크기를 계산할 수 있는 방법을 제안하였으며, 제안한 크기 결정 방법과 전체기간을 계산한 결과는 5.51~7.24 % 범위의 오차를 나타냈다. 이는 공학적으로 유의한 수준(10%)의 오차로 판단되어 제안한 크기 결정 방법을 PSCS의 초기 설계 단계에서 시스템 크기 계산을 위해 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 이후 PSCS의 성능과 수치해석 툴의 검증을 위해 Mock-Up 모델을 통한 실험적 연구를 수행할 예정이다.

### 후 기

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

### 참 고 문 헌

1. 장향인 외, 지하공간의 자연환기를 위한 태양 굴뚝 시스템의 응용, 한국태양에너지학회 논문집, 30권 2호, pp.87~95, 2010.04.
2. ASHRAE, ASHRAE Fundamentals Handbook 2009, ASHRAE, 2009.
3. 서승직, 건축환경공학, 일진사, 2004.
4. Duffie J. and Beckmann W., Solar Engineering of Thermal Processes. 3rd Ed., John Wiley & Sons, 2006.
5. Yunus A. Cengel, Heat Transfer : A Practical Approach, 2nd Ed., McGraw -Hill, 2006.