

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 21, No. 2, 2001

연돌 효과를 이용한 태양열 굴뚝의 자연환기 성능에 관한 연구

조성우* , 이재윤*

*삼척대학교 건축설계학과

A Study on the Performance of Natural Ventilation of Solar Chimney Using Stack Effect

S.W. Cho*, J.Y. Lee*

**Department of Architectural Design, Samchok National University*

Abstract

The results of numerical simulation on the performance of a solar chimney system in building are described. The inside surface temperature of four walls within the solar chimney are calculated with solar radiation and outdoor temperature in summer. The air within the solar chimney is heated by conduction, convection and radiation. Air temperature distribution from the bottom to the top and outlet air temperature can be obtained by solving energy balance equation.

Since the buoyance or stack effect is affected by temperature difference between the bottom and the top within the solar chimney, It is evaluated using inlet and outlet temperatures.

It is expected that natural ventilation by the solar chimney of witch the height is 7.8m and the cross sectional area is 4.93m^2 can provide about $6400\text{m}^3/\text{h}$ on sunny day.

1. 서론

1970년대 이후 에너지 파동을 겪으면서 고단열화, 고기밀화를 통한 에너지 절약형 건물들이 추세를 이루면서 현재까지 건설되고있다. 또한, 브라질의 리오데자네이로에서 채택된 Agenda 21에서는, 21세기의 지구환경문제 중에서 이산화탄소 감소에 대한 규제를 가장 중요한 이슈로써 다루고 있다¹⁾. 이와 더불어 21세기를 시작하면서 환경친화적 건축물에 대한 관심 또한 고조되고 있다.

고단열과 고기밀화된 건축물에서 발생하는 빌딩증후군(Sick Building Syndrom; SBS)은 환기 부족현상이 그 원인의 대부분을 차지하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법의 하나는 충분한 환기량을 확보하는 것이다. 에너지 절약적인 측면과 이산화탄소의 감소 등의 문제를 동시에 해결할 수 있는 방법의 하나로 최근 자연 에너지를 이용한 환기시스템이 주목을 받고 있다. 이와 같이 태양열을 이용한 환기시스템은 열대진조기후 특히 중동지역에서 다수로 건설되어진 Wind Tower가 태양열 굴뚝의 기원이라고 할 수 있다²⁾.

본 연구의 최종적인 목적은 지금까지 외장적측면(外裝的側面)과 건축 디자인적 측면에서 많이 고려되어진 태양열 굴뚝(solar chimney)의 환기량에 대한 정량화(定量化)를 추정함으로써 자연환기 시스템 특히, 태양열 굴뚝의 설계시 필요한 기초 자료의 제공에 있다. 본 연구는 그 기초단계로써 태양열 굴뚝의 환기량에 영향을 미치는 요소를 조사하고, 열평형식을 통한 수치계산식을 이용하여 공기속도 및 환기량을 추정하는데 목적이 있다.

2. 태양열 굴뚝내부의 열평형

태양열 굴뚝은 남측의 유리면과 3개의 벽체로

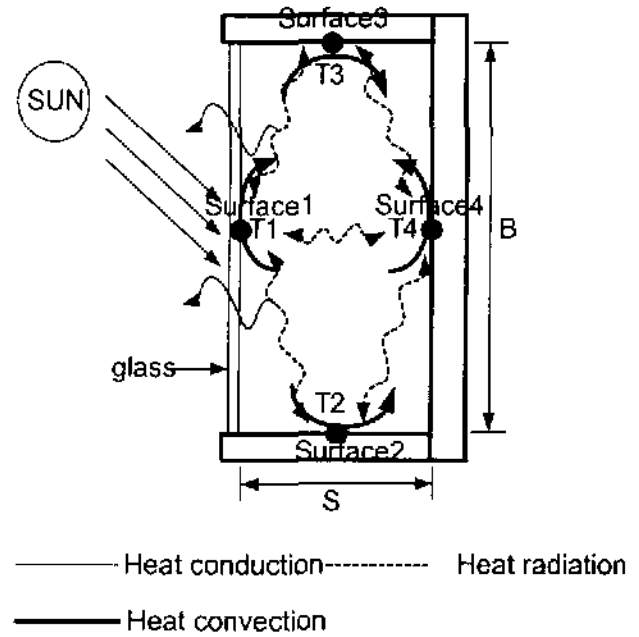


Fig. 1. Heat transfer in the solar chimney

구성되어 있다. 태양열 굴뚝의 각 표면은 남측에 있는 유리면을 통하여 들어오는 일사량에 의하여 가열되어 각 표면온도가 상승된다. 그림 1은 태양열 굴뚝내부에서의 열이동을 나타내고 있다.

각 표면온도는 열평형식에 의하여 구하여 질 수 있다.

1) 유리면에서의 열손실과 획득

$$\alpha_f \int_0^B B dz = B dz h_1 (T_1 - T_{at}) + B \sum_{j=1,2,3,4} F_{1j} h_{1j} (T_1 - T_j) dz + q_{s1} \quad (1)$$

2) 3면의 벽체에 있어서의 열손실과 획득

$$\tau \alpha_f \int_0^B S dz = S dz h_2 (T_2 - T_{at}) + S \sum_{j=1,2,3,4} F_{2j} h_{2j} (T_2 - T_j) dz + q_{w2} \quad (2)$$

$$\tau \alpha_f \int_0^B S dz = S dz h_3 (T_3 - T_{at}) + S \sum_{j=1,2,3,4} F_{3j} h_{3j} (T_3 - T_j) dz + q_{w3} \quad (3)$$

$$\tau \alpha_f \int_0^B S dz = B dz h_4 (T_4 - T_{at}) + B \sum_{j=1,2,3,4} F_{4j} h_{4j} (T_4 - T_j) dz + q_{w4} \quad (4)$$

식(1)의 좌변은 유리면에 흡수되는 열량을 나타내고 있으며, 식(2)~식(4)의 좌변은 남측면에 있는 유리면을 통한 일사량이 벽면에 흡수되는 열량을 의미한다. 식(1)~식(4)에서 우변의 제1항은 대류성분에 의한 열손실, 제2항은 복사성분에 의한 열손실을 나타내고 있으며, 제 3항은 벽체

와 유리면의 전도성분에 의한 열 손실을 나타내고 있다. 그러나, 본 연구에서는 유리면을 제외한 벽체의 열전도 성분은 완전단열로 가정하여 무시하였다.

대류열전달계수(h_c)를 가정할 수 있다면, 태양열 굴뚝의 표면온도는 식(1)~식(4)를 연립하여 구할 수 있다. 대류열전달계수는 표면온도와 태양열의 수열면 변화에 의하여 영향을 받으므로 태양열 굴뚝의 장변과 단변의 비에 따라 표면온도가 변화하게 함으로써 대류열전달계수도 변한다. 그림 2는 유리면과 각 벽체표면에 흡수되는 일사량을, 그림 3~그림 5는 태양열 굴뚝의 장변과 단변의 변화에 따른 벽체 내부표면온도를 식 (1)~식 (4)에 의해 구한 결과를 나타내고 있다

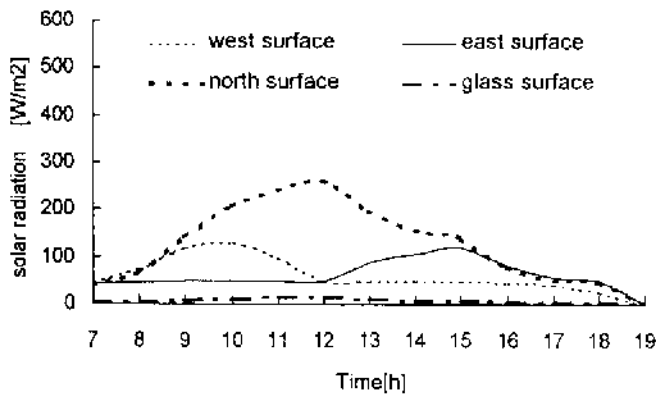


Fig. 2. Solar radiation on the glass and wall surface

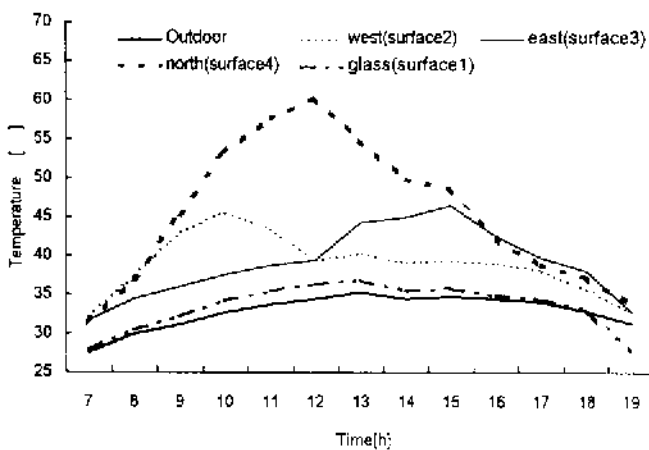


Fig. 3. Surface temperatures with aspect ratio of 2:1

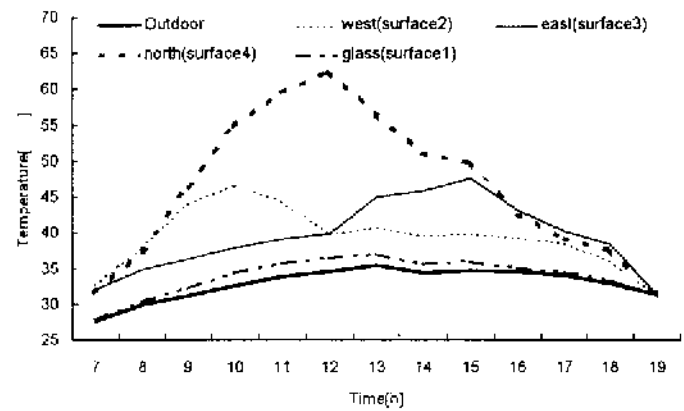


Fig. 4. Surface temperatures with aspect ratio of 3:1

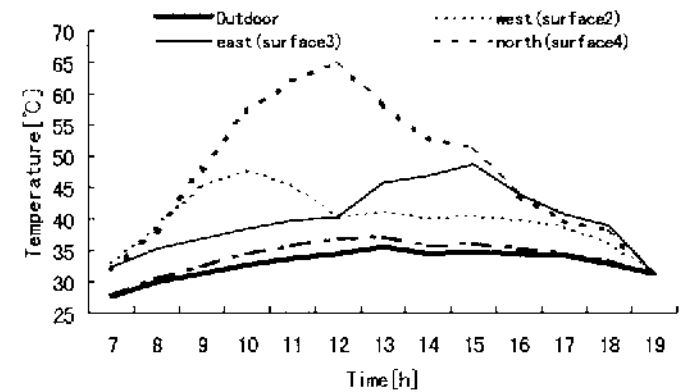


Fig. 5. Surface temperatures with aspect ratio of 4:1

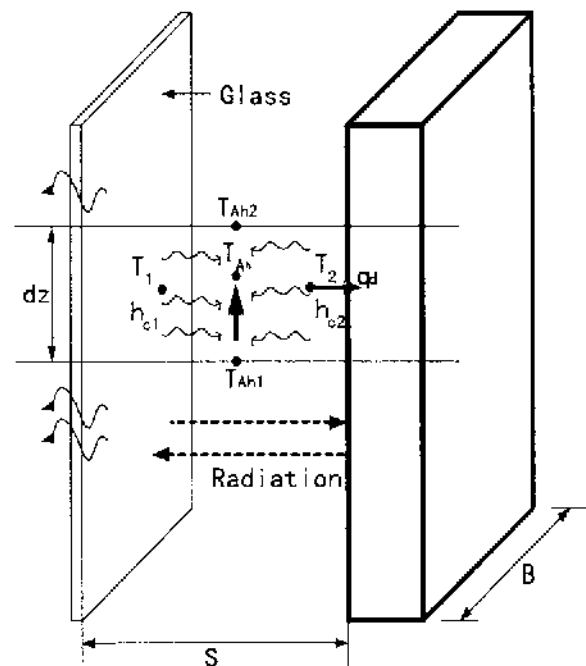


Fig. 6. Heat transfer between air and wall and between wall and wall within solar chimney

남측 수직창을 통한 일사량이 12시의 경우 260W/m^2 로 나타났다. 이 때, 북측 벽면의 내부 표면온도는 장변과 단변비가 2:1의 경우 60°C , 3:1의 경우 63°C 와 4:1의 경우 65°C 로 나타났다.

연돌 효과의 성능과 환기량을 예측하기 위해서는 태양열 굴뚝 내부의 높이에 따른 공기온도를 구하지 않으면 안 된다. 태양열 굴뚝내부에 있어서의 공기와 주위 벽체와의 열교환은 그림 6과 같다.

$$m_g dT_{An} = Bh_{b1}(T_1 - T_{An})dz + Sh_{c2}(T_2 - T_{An})dz + Sh_{c3}(T_3 - T_{An})dz + Bh_{b4}(T_4 - T_{An})dz \quad (5)$$

$$m_g dT_{An}/dz = Bh_{b1}T_1 + Sh_{c2}T_2 + Sh_{c3}T_3 + Bh_{b4}T_4 - (Bh_{b1} + Sh_{c2} + Sh_{c3} + Bh_{b4}) T_{An} \quad (6)$$

여기서, $m = \rho VA$ 로써 질량유량[Kg/s]을 의미한다.

$$R_1 = Bh_{b1}T_1 + Sh_{c2}T_2 + Sh_{c3}T_3 + Bh_{b4}T_4$$

$$R_2 = Bh_{b1} + Sh_{c2} + Sh_{c3} + Bh_{b4}$$

식(5)에서 좌변은 공기의 열용량[J/s]을 나타내고 있으며, 우변은 어떤 지점에 있어서의 공기와 벽체 사이의 열교환을 보여주고 있다.

식(6)의 미분방정식을 풀면 어떤 지점에 있어서의 공기온도는 식(7)에 의해서 구할 수 있다.

$$T_{An} = \frac{R_1}{R_2} + \left[T_{Ai} - \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \right] e^{(-R_2 h / m g)} \quad (7)$$

벽체 표면온도가 주어진 경우에 식(7)에 의해서 각 높이에 따른 공기온도를 구할 수 있다.

3. 연돌 효과와 환기량계산

3.1 연돌 효과

태양열 굴뚝을 이용한 자연환기는 굴뚝내의 상

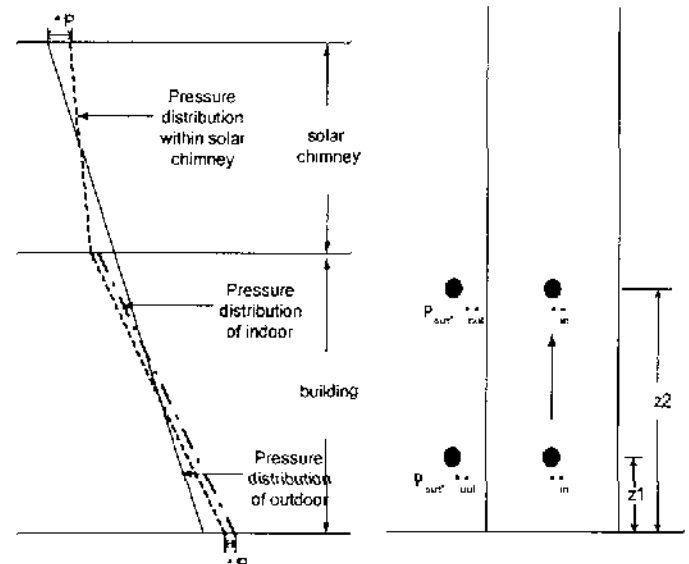


Fig. 7. Pressure distribution within solar chimney

하온도차의 원인으로 생기는 압력차 즉 연돌효과(煙突效果)에 의해서 생겨난다.

각 층의 실(室)에서 태양열 굴뚝으로 배출되는 개구부의 면적은 대상건물의 중성대(Natural Pressure Level ; NPL)의 위치에 의해서 결정된다. 태양열 굴뚝 설계시, 각 층의 개구부에서 역류현상(逆流現狀)이 발생하지 않도록 그림 7과 같이 설계되어야 한다. 즉, 태양열 굴뚝의 유출구는 중성대 위치 위에 두어야 한다.

공기를 정지상태의 기체(static air)로 가정한 경우, 연돌효과에 따른 실내와 실외의 압력차는 식(7)과 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$P_{z1} = P_{out} - \rho_{in} g z_1 \quad (7)$$

$$P_{z2} = P_{out} - \rho_{in} g z_2 \quad (8)$$

여기서, P_{out} 는 $\rho_{out} g z_1$ (Z_1 지점)를, P_{out} 는 $\rho_{out} g z_2$ (Z_2 지점)를 각각 나타낸다.

공기압력은 z_1 과 z_2 의 거리차에 따라 변화함으로써 z_1 과 z_2 사이에서의 압력차는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다³⁾.

$$\Delta P = (\rho_{out} - \rho_{in}) g (z_2 - z_1) \quad (9)$$

식(9)의 z_1 과 z_2 대신에 h_{NPL} 과 h 를 대입하면, 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = (\rho_{out} - \rho_{in}) g (h_{NPL} - h) \quad (10)$$

공기밀도는 온도, 습도와 기압과의 함수관계에 있으므로, 공기를 이상기체(ideal air)로 가정하면 실내외의 공기밀도차는 식(11)과 식(12)와 같다.

$$\rho_{in} = P / RT_{in} \quad (11)$$

$$\rho_{out} = P / RT_{out} \quad (12)$$

식(9)를 식(11)과 식(12)를 대입하면 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = \rho_{out} (h_{NPL} - h) g (T_{in} - T_{out}) / T_{in} \quad (13)$$

식(13)은 태양열 굴뚝내의 상하온도차에 따른 압력차 즉 연돌효과만을 나타내고 있다. 태양열 굴뚝에 의한 연돌효과는 식(7)과 식(13)에 의해서 구할 수 있다.

3.2 환기량계산

공기를 정상상태(state condition), 비압축성이고 점성인 경우, 베르누이식과 연속식을 식(14)와 식(15)로 표현할 수 있다.

$$P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} + \rho g z_1 = P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} + \rho g z_2 \quad (14)$$

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (15)$$

식(14)에서 양변의 제 2항은 운동에너지를 나타내고 있으며, 제 3항은 위치에너지를 나타내고 있다. 태양열 굴뚝의 유출구는 지붕 위에 존재하고 있으므로 z_1 과 z_2 의 높이는 같으므로 위치에너지는 무시할 수 있다. 식(14)와 식(15)를 조합하여 식(16)을 얻을 수 있다

$$V_2 = \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right)} \quad (16)$$

여기서, A_2 는 외기로부터 각층의 실내에서 태양열굴뚝으로 유입되는 유입구의 면적을 나타내고, A_1 은 공기가 배출되는 유출구의 면적을 나타낸다.

개구부의 면적 A_2 (A_1 인 경우, A_2/A_1 는 무시할 수 있으므로, 식(16)을 다시 쓰면 식(17)과 같다.

$$V = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (17)$$

그러나, 식(14)~식(17)은 이상기체의 경우를 나타낸 것으로서 점성과 난류현상이 무시된 상태의 공기속도이다. 그러므로, 배출계수(discharge coefficient)를 도입함으로써 이러한 현상들은 설명될 수 있다. 배출계수는 풍속, 온도차와 개구부의 형상에 따라 달라진다. 본 연구에서는 배출계수 값을 0.31^[4]을 사용하였다. 배출계수를 대입하여 다시 쓰면 식(18)과 같이 된다.

$$V = C_d \sqrt{\frac{2(P_{in} - P_{out})}{\rho}} \quad (18)$$

식(18)에 식(13)을 대입하면 연돌효과만에 의한 환기량은 식(19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = C_d A \sqrt{2g \Delta h_{NPL} \frac{(T_{in} - T_{out})}{T_{in}}} \quad (19)$$

3.3 유입구면적 계산

각 층의 유효 유입구 면적은 각 층의 필요 환기량과 식(19)로부터 구할 수 있다. 그림 8은 각 층의 유입구면적을 나타내고 있다. 각 층의 필요

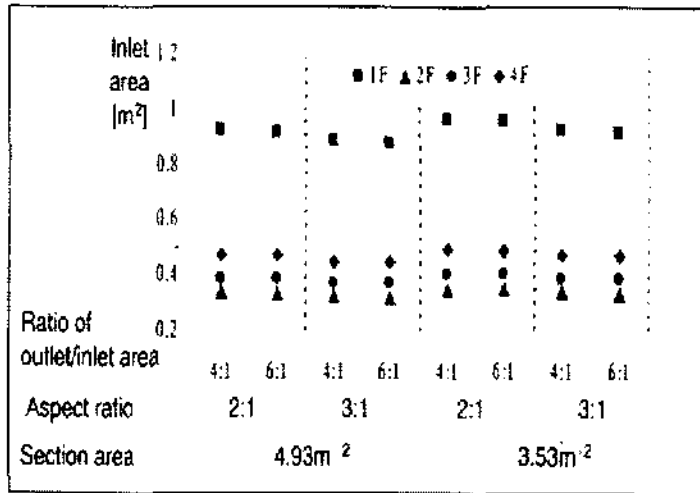


Fig. 8. The opening area of each floor

환기량은 1인 필요 환기량 $30\text{m}^3/\text{h}$ 를 기준으로 하여 산출하였다. 1층의 필요환기량은 $12000\text{m}^3/\text{h}$, 2층~4층의 필요환기량은 각각 $4000\text{m}^3/\text{h}$ 으로 추정하여 계산하였다.

필요 환기량이 같은 2층~4층의 각 유입구 면적은 중성대의 위치와 장변과 단변의 변화에 따라 변화되는 벽체의 표면온도와 함수관계에 있다. 그러므로 중성대의 위치에서 가까운 4층에서는 유입구 면적이 크게 나타난 반면, 가장 먼 위치에 있는 2층에서는 작게 나타난 것을 알 수 있다.

4. 계산결과 및 고찰

4.1 계산조건

태양열 굴뚝내의 상하온도분포와 공기속도 및 환기량을 수치계산식으로부터 계산하였다. 표 1은 태양열 굴뚝의 단면적, 장변과 단변과의 비와 표면온도등의 수치시물레이션의 조건을 나타내고 있다. 또한, 최초의 공기온도(T_{Ai})는 외기온도와 동일한 값을 주었다.

동일한 단면적을 가진 경우, 남측면을 통한 일사량이 많은 12시와 장변과 단변과의 비가 3:1의 경우에서 표면 4의 온도가 높게 나타난 것을 볼 수 있다.

Table 1. Surface temperature according to aspect ratio and cross sectional from the calculation

모델번호	태양열굴뚝의 단면적[m ²]	장변:단변	시간대	표면온도			
				표면1	표면2	표면3	표면4
T-1	4.93	2:1	10	34.2	45.6	37.6	53.3
T-2			12	36.4	39.4	39.5	60.3
T-3			15	35.8	39.6	46.6	48.7
T-4		3:1	10	34.4	46.7	38	55
T-5			12	36.6	39.9	39.9	62.5
T-6			15	35.9	40	47.6	50
T-7	3.53	3:1	10	34.4	46.7	38	55
T-8			12	36.6	39.9	39.9	62.5
T-9			15	35.9	40	47.6	50

4.2 상하온도분포

그림 9는 단면적 3.53m^2 , 장변과 단변과의 비가 3:1인 경우의 태양열 굴뚝 내부의 상하온도분포를 나타낸 것이다.

유입구의 공기온도가 18°C 일 때, 유출구의 공기온도는 10시의 경우 39.3°C , 12시의 경우 41.4°C , 15시의 경우 38.5°C 로 나타났다. 태양열 굴뚝내의 상하온도차는 12시의 경우 23.4°C 로 가장 큰 차를 보이고 있으므로 공기속도 또한 다른 시간대에 비하여 큰 값을 나타낼 것으로 생각된다.

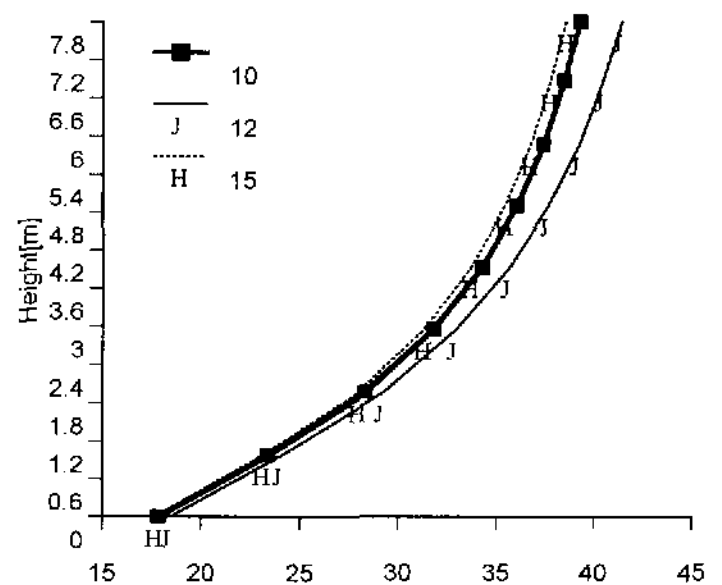


Fig. 9. Air temperature distribution with cross sectional area of 3.53m^2 and aspect ratio of 3:1

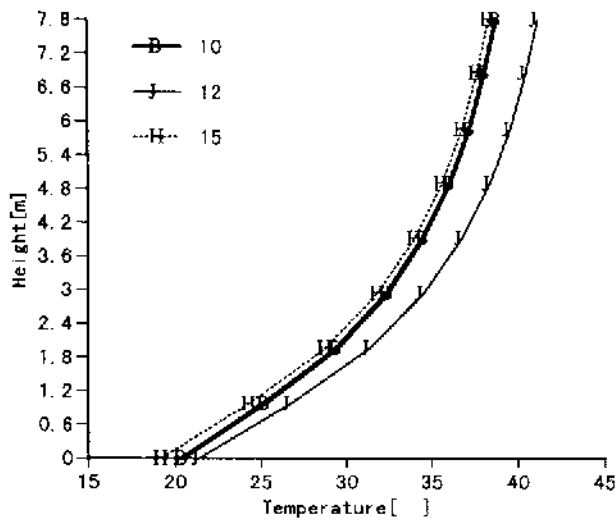


Fig. 10. Air temperature distribution with cross sectional area of 4.93m^2 and aspect ratio of 2:1

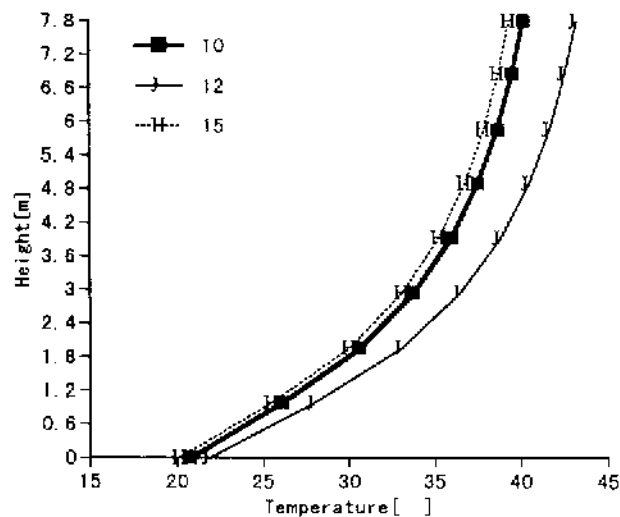


Fig. 11. Air temperature distribution with cross sectional area of 4.93m^2 and aspect ratio of 3:1

그림 10은 단면적 4.93m^2 , 장변과 단변과의 비가 2:1인 경우의 상하온도분포를 나타낸 것이다.

유입구의 공기온도가 20.3°C 인 경우, 일사량이 많은 12시에는 유출구의 공기온도가 41.2°C 까지 상승하였다. 10시와 15시에 있어서의 유출구의 공기온도는 각각 38.8°C 와 38.4°C 로 나타났다. 상하온도차는 12시의 경우 20.9°C 를 나타내고 있는 반면, 15시의 경우 18.1°C 를 나타내고 있다.

그림 11은 단면적 4.93m^2 , 장변과 단변과의 비가 3:1인 경우의 상하온도분포를 나타낸 것이다.

유입구의 공기온도가 20.9°C 일 때, 10시의 경우 유출구의 공기온도는 40.2°C , 12시의 경우 43.3°C 이고 15시의 경우 39.3°C 로 나타났다. 상하온도차는 12시의 경우 21.9°C 로 다른 시간대에 비하여 높게 나타난 것을 알 수 있다. 또한, 동일한 단면적에 있어서, 장변과 단변과의 비가 2:1인 경우의 최고온도차 20.9°C 보다 그 비가 3:1의 경우 21.4°C 로 약간 높게 나타난 것을 알 수 있다.

수치시뮬레이션 결과, 장변과 단변과의 비가 3:1인 경우가 다른 모델의 동일한 시간대와 비교하여 상하온도차가 큰 것으로 나타났으므로, 태양열 굴뚝내의 상하온도차는 일사의 수열면(收熱面)과 관계가 깊은 장변과 단변과의 비에 따라 크게 좌우되는 것을 알 수 있다.

4.3 공기속도 및 환기량

태양열 굴뚝을 통한 환기량은 공기속도와 유출구면적의 곱으로써 구할 수 있다. 그림 12는 각 모델에 대한 공기속도와 환기량을 나타낸 것이다.

단면적이 4.93m^2 이고, 장변과 단변과의 비가 2:1과 3:1인 경우, 각 모델에 있어서 유출구의 공기속도의 평균치는 $0.33\text{m/s} \sim 0.36\text{m/s}$ 로서 하나의 태양열 굴뚝에서 얻을 수 있는 자연 환기량은 $5700\text{m}^3/\text{h} \sim 6000\text{m}^3/\text{h}$ 로 나타났다. 특히, 단면적이

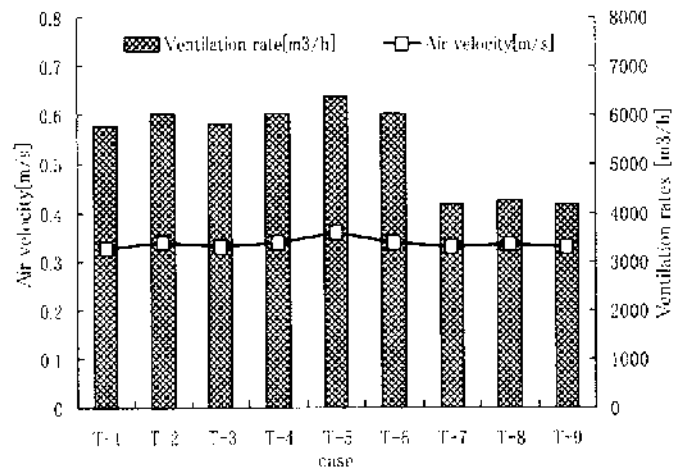


Fig. 12. Air velocity and ventilation rate of solar chimney

4.93m², 장변과 단변과의 비가 3:1이고 일사량이 많은 12시인 T-5의 경우, 공기속도는 0.36m/s로 하나의 태양열 굴뚝에 있어서의 자연 환기량은 6400m³/h로 나타났다.

그러나, 태양열 굴뚝의 단면적이 3.53m², 장변과 단변과의 비가 3:1인 경우, 공기속도는 0.336 m/s, 환기량은 4300m³/h로 나타났다. 이는 굴뚝 내부에서 소용돌이(渦) 현상으로 인하여 공기속도가 감소된 것으로 판단된다.

수치계산식으로부터 태양열 굴뚝내의 공기속도 및 자연 환기량은 단면적과 장변과 단변과의 비에 의해서 크게 변화된다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

이상과 같이 연돌효과를 이용한 태양열 굴뚝의 자연환기 성능에 대한 이론식의 계산으로부터 아래와 같은 결과를 얻었다.

- 1) 태양열 굴뚝의 단면적이 유입구의 면적의 2 배인 4.93m² 이고, 장변과 단변과의 비가 3:1 인 경우, 공기속도는 다른 모델의 경우에 비하여 크게 나타났고, 환기량 또한 크게 나타났음을 알 수 있었다.
- 2) 공기속도와 환기량은 태양열 굴뚝의 단면적과 수열면(收熱面)에 변화를 주는 장변과 단변과의 비에 의해 영향을 받는 것을 알았다. 즉, 벽체의 표면온도와 관계가 있는 것으로 생각된다.
- 3) 단면적이 4.93m², 장변과 단변과의 비가 2:1 인 경우, 공기속도는 0.34m/s, 환기량은 6000 m³/h로 나타났으며, 장변과 단변과의 비가 3:1인 경우, 공기속도는 0.36m/s, 하나의 태양열 굴뚝에서 얻을 수 있는 환기량은 6400 m³/h로 나타났다.

기 호

A	: 벽체의 면적[m ²]
B	: 벽체의 길이[m]
C_d	: 배출계수(discharge coefficient)
C_p	: 공기의 비열[KJ/kg K]
d	: 벽체의 두께[m]
F_{ij}	: i 면에서 j 면으로의 복사형태계수
g	: 중력[m/s ²]
H	: 태양열 굴뚝의 높이[m]
h	: 중성대에서 어떤 지점까지의 높이[m]
h_{NPL}	: 중성대의 높이
h_r	: 복사열전달계수[W/m ² K]
T_1, T_2, T_3, T_4	: 벽체내부의 표면온도[K]
T_{in}	: 벽체내부의 공기온도[K]
T_o	: 외벽의 표면온도[K]
T_A	: 공기온도[K]
T_{Ai}	: 유입구의 공기온도[K]
T_{Ah}	: 어떤 높이에서의 공기온도[K]
S	: 벽체와 벽체사이의 너비[m]
V	: 공기속도[m/s]
V_i	: 최초공기속도 또는 평균공기속도[m/s]
z	: 어떤 지점에서 어떤 지점까지의 높이[m]
α	: 일사흡수율
ρ	: 공기밀도[kg/m ³]
τ	: 일사투과율

참 고 문 헌

1. 박창섭, 박민용, 임영빈. 건축환경계획, 보성각, 2000
2. 一, 木村建一. 校舎建築の 自然換氣システムにおける ソーラーチムニーの 性能豫測に 關する 研究, 日本建築學會計劃系論文集, 537호, pp.37

- ~42, 2000. 11.
3. 一, Ken-ichi Kimura, Numerical simulation on the cooling effects of solar chimney by natural ventilation for a school building, PLEA 2000. 2000.07.
 4. Francis Allard, Natural Ventilation in Building, James & James, 1998.
 5. 一, 木村建一. ソーラーchimneyを利用した自然換気システムの研究, その2- ソーラーchimneyの性能予測にするシミュレーション, 日本建築學會大會學術講演梗概集, pp.525~526, 2000. 09.
 6. ASHRAE Fundamentals Handbook, 1993, chapter 23