

# 지하공간의 환기를 위한 태양굴뚝 시스템의 응용

장 향 인

인하대학교 건축공학과(jhiaesl@inha.edu)

## 연구 배경 및 목적

기후변화에 따른 저탄소·녹색성장은 국내 나아가 전 세계적인 기조이다. 국내 총 에너지 소비의 약 1/4이 사용되는 건물 분야에서도 에너지 소비 절감을 위한 다양한 방법들이 연구되고 있다. 건물 에너지 절감을 위한 방안은 건물 기본 디자인, 자연형 시스템, 설비형 시스템을 순차적으로 고려할 수 있지만, 국내의 경우 신재생에너지, 히트펌프, 열회수장치 등 설비형 시스템의 도입으로 치우친 경향이 있다. 별도의 기계 장치 없이 태양에너지의 활용을 높이는 자연형 태양열 시스템은 경제성이 높고 관리가 용이하지만, 효과가 직관적이지 않고 제어가 어렵다는 이유로 사용 빈도가 다소 낮다.

이에 본 연구에서는 오염이 심한 반면 자연 환기에 취약한 지하 공간의 환기를 개선하고 환기에 소비되는 에너지를 절감할 수 있는 대안으로 자연형 태양열 기법 중 하나인 태양굴뚝을 이용한 자연 환기 시스템을 제안하고, 시스템 성능과 적용 가능성을 분석하였다. 이를 통해 국내 기후 조건에서 지하 공간의 환경 개선과 에너지 절감을 동시에 달성할 수 있는 건축적 기법을 이용한 자연 환기 시스템의 기초 설계 자료를 제공할 수 있을 것이다.

## 연구 방법 및 범위

본 연구에서는 태양굴뚝 자연환기시스템의 성능을 분석하고 적용성을 평가하기 위한 이론적인 체계 수립과 수치 해법에 따른 분석에 초점을 맞추었다. 이를 위해 MATLAB을 이용하여 수치해석틀을 작성하였으며, 시스템의 성능은 시스템 각 부분 온도, 중공층 유속, 체적유량, 환기효율 등을 이용해 분석하였다. 연구의 수행 절차는 다음과 같다.

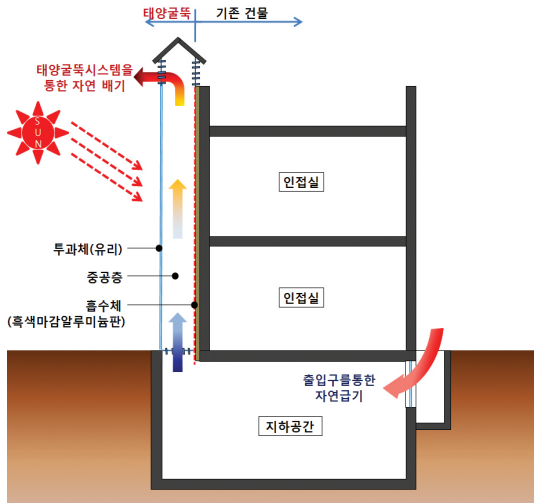
1) 이론적인 고찰을 통해 설계 인자들을 도출하고 수치 모델을 수립하였다. 수치 모델의 입력값(일사량, 지중온도, 열전달계수)들과 열평형방정식을 이산화하여 수치해석틀을 코딩하였다.

2) 시스템의 디자인을 결정하기 위해 중공층 높이, 중공층 두께, 횡단면적비 등의 주요 설계 인자들에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

3) 시스템의 국내 기후에서의 적용성을 평가하기 위해 해석 건물을 선정하여 태양굴뚝 자연환기 시스템을 적용해 연간 환기 성능을 평가하였다.

## 태양굴뚝 시스템의 개요

태양굴뚝 자연환기시스템은 연돌효과에 의해 지하공간에 자연환기를 제공하는 시스템으로, 일사로 인해 가열된 중공층의 공기와 외부 공기와의

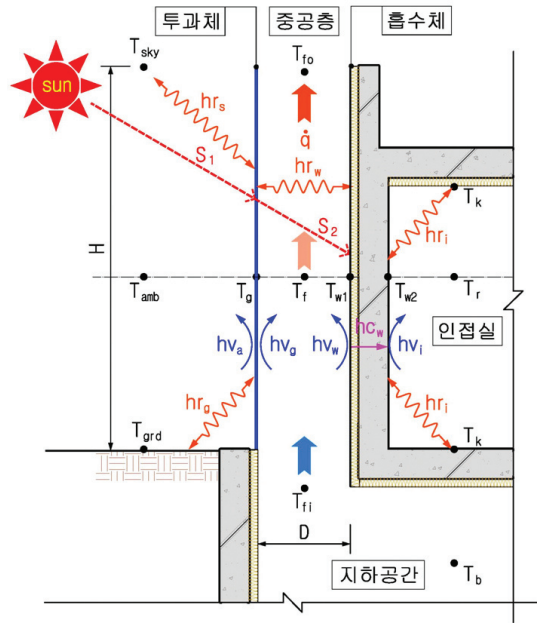


[그림 1] 시스템 개념도

밀도차에 의해 환기가 발생한다. 시스템은 투과체, 중공층, 흡수체(집열체)의 세 부분으로 구성된다. 투과체는 일사를 투과하는 유리로 구성하고, 흡수체는 건물 벽체 외표면에 무광택 흑색 도장한 알루미늄 판재를 부착하여 구성한다. 공기의 유동 경로인 중공층의 상·하부에는 외기 및 지하 공간의 공기가 유출입할 수 있는 통기구를 설치하였다. 시스템이 건물의 열부하에 미치는 영향을 최소화하기 위해 태양 굴뚝은 배기구로서의 기능만을 수행하도록 설계하며, 중공층 온도가 유입구의 온도보다 낮은 경우에는 유입구를 차단하여 환기가 발생하지 않도록 설정하였다. 다음 그림 1은 시스템의 구성 및 원리를 나타낸 개념도이다.

### 이론적 분석

시스템의 수치해석 모델은 그림 2와 같으며 전도, 대류, 복사의 복합 열전달 문제이다. 시스템 해석을 위한 열평형 방정식은 네 부분(투과체, 중공층, 흡수체 외표면, 흡수체 내표면)으로 나누어 수립했으며 식(1)~(4)와 같다. 식(2)의  $\dot{q}$ 는 자연대류로 인해 공기에 전달되는 열유속(heat flux)을 나



[그림 2] 해석 모델 개요

타내며 식(5)에 의해 계산된다. 두 개의 개구부를 가진 중공층에서 공기가 비압축성이고 평균온도와 밀도가 선형적으로 변화할 때 베르누이 방정식과 연속방정식에 의해 중공층 내 공기의 질량유량  $\dot{m}$ 은 식(6)에 의해 계산할 수 있다.

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

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

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

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

$$\dot{q} = \frac{mC_f(T_f - T_{fi})}{yWH} \quad (5)$$

$$m = A_{f0} \sqrt{\frac{2gH}{C_1 \left(\frac{A_f}{A_{f0}}\right)^2 + C_2} \frac{(T_f - T_f)}{|T_f|}} \quad (6)$$

열평형방정식의 계산을 위한 각종 열전달계수는 선행연구들에서 사용된 값을 고찰해 사용하였으며, 중공층 유입구 온도인 지하층의 온도는 다음 식(8)에 의해 계산된다. 지하층 온도 계산에 사용되는 지중온도는 T. Kusuda가 제안한 식(7)을 이용하여 계산하였다. 본 연구에서는 ETIS 분석지에서 제공된 서울 지역 월평균 지중온도와 동일한 분포 패턴을 만들기 위해 연평균지표면온도( $T_{mean}$ ) 14°C, 지표면온도진폭( $T_{amp}$ ) 15°C, 최저온도시간차( $t_{sh}$ ) 25일의 값을 사용하였다.

$$T_{grd,dp} = T_{mean} - T_{amp} \exp\left[-dp \left(\frac{\pi}{365\hat{c}_{so}}\right)^{0.5}\right] \times \cos\left[\frac{2\pi}{365} \left\{t_{now} - t_{sft} - \frac{dp}{2} \left(\frac{365}{\pi\hat{c}_{so}}\right)^{0.5}\right\}\right] \quad (7)$$

$$T_b = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{b,i}K_{b,i} + \frac{C_{b,i}D_{b,i}V_{b,i}}{3600})T_{b,i}}{\sum_{i=1}^n (A_{b,i}K_{b,i} + \frac{C_{b,i}D_{b,i}V_{b,i}}{3600})} \quad (8)$$

### 설계인자에 따른 시스템 성능

태양굴뚝 시스템의 최적 디자인 선정을 위해 시스템 성능에 영향을 미치는 주요 설계 인자(중공층 높이, 중공층 두께, 횡단면적비)에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 분석 기상 조건은 TRNSYS에서 제공하는 서울 지역 기상 데이터의 연평균값을 사용하였으며 분석 범위 및 입력값은 표 1과 같다.

#### 중공층 높이(H) 변화에 따른 시스템 성능

표 2는 시스템의 높이 변화에 따른 각 부분의 온도, 중공층 평균유속, 환기량(체적유량)을 나타낸다. 중공층의 높이가 높아질수록 시스템이 획득하는 총일사량이 증가해 중공층의 평균온도가 상

〈표 1〉 주요 입력값 및 기상조건

항 목	기본값	분석값
중공층 높이 (m)	10	5~50
중공층 두께 (m)	0.5	0.2~2.0
횡단면적비( $A_f/A_{f0}$ )	1	0.55~1
일사량 ( $W/m^2$ )	200	
풍 속 (m/s)	2.4	
외기온도 (K)	285	
유입구 온도 (K)	287	
인접실 온도 (K)	296	
중공층 너비 (m)	1	

〈표 2〉 중공층 높이 변화에 따른 시스템 성능

높이 (m)	중공층 온도(K)	유속 (m/s)	질량유량 (kg/s)	체적유량 ( $m^3/s$ )
5	288.6	0.231	0.139	0.115
10	288.9	0.363	0.218	0.181
15	289.2	0.472	0.283	0.236
20	289.4	0.569	0.341	0.285
25	289.6	0.658	0.394	0.329
30	289.7	0.740	0.443	0.370
35	289.8	0.818	0.489	0.409
40	289.9	0.891	0.533	0.446
45	290.0	0.961	0.575	0.481
50	290.1	1.028	0.615	0.514

승하고 이에 따라 중공층 내의 평균유속이 증가하여 질량유량과 환기량이 증가하는 것으로 나타났다. 중공층의 높이가 5 m 증가함에 따라 유속은 0.067~0.132 m/s, 환기량은 0.033~0.066  $m^3/s$  증가하였다.

#### 중공층 두께(D) 변화에 따른 시스템 성능

표 3은 중공층의 두께 변화에 따른 각 부분의 온도, 중공층 평균유속, 환기량(체적유량), 시스템 효율을 나타낸다. 중공층의 두께가 증가할수록 중공층의 평균온도가 감소하고, 이로 인해 중공층 내의 평균유속이 감소한다. 하지만 질량유량과 환기

〈표 3〉 중공층 두께 변화에 따른 시스템 성능

두께 (m)	중공층 온도(K)	유속 (m/s)	질량유량 (kg/s)	체적유량 (m <sup>3</sup> /s)
0.2	290.4	0.476	0.114	0.095
0.4	289.2	0.388	0.186	0.155
0.6	288.7	0.343	0.247	0.206
0.8	288.4	0.313	0.301	0.251
1.0	288.3	0.292	0.351	0.292
1.2	288.1	0.276	0.398	0.331
1.4	288.0	0.262	0.442	0.367
1.6	287.9	0.251	0.484	0.402
1.8	287.9	0.242	0.525	0.436
2.0	287.8	0.234	0.563	0.468

량은 중공층 두께 증가로 인한 단면적 증가로 인해 증가하였다. 중공층의 두께가 0.2 m 증가함에 따라 유속은 0.008~0.088 m/s 감소하는 반면 환기량은 0.032~0.060 m<sup>3</sup>/s 증가하였다.

### 중공층 형태 변화에 따른 시스템 성능

중공층의 형태는 여러 가지 요인에 의해 결정되지만 시스템 성능에 주로 영향을 미치는 요인은 유입구와 중공층의 횡단면적비(Ar)이다. 횡단면적비의 차이는 시스템의 압력손실을 변화시켜 환기 성능에 영향을 미친다. 횡단면적비가 클수록 시스템의 압력손실이 증가하고 유속이 감소하여 환기량이 감소한다. 표 4는 횡단면적비에 따른 시스템의 환기 성능을 나타낸다. 동일 체적에서도 횡단면적비의 변화에 따라 최대 15%의 환기량 차이가 발생하는 것으로 분석되었다.

이상의 주요 설계 인자에 대한 변수 분석과 건물 적용 요건을 고려하면 태양굴뚝 자연환기시스템의 중공층 두께는 0.6 m 이하, 횡단면적비는 0.8 이하가 적정한 것으로 판단되며, 중공층의 높이는 건물 높이에 영향을 받겠지만 최소 10 m 이상으로 설치하는 것이 중공층 유속과 환기량의 확보에 적정한 것으로 사료된다.

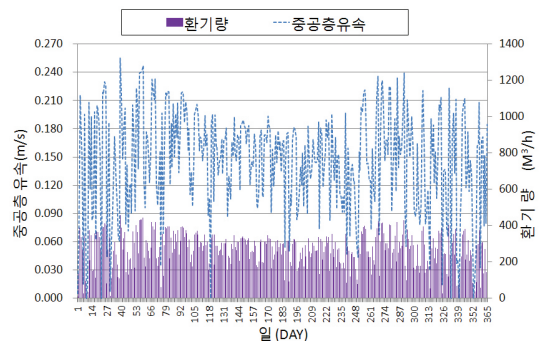
〈표 4〉 중공층 횡단면적비에 따른 시스템 성능

횡단면적비	중공층 온도(K)	유속 (m/s)	질량유량 (kg/s)	체적유량 (m <sup>3</sup> /s)
0.55	288.7	0.423	0.254	0.212
0.60	288.7	0.415	0.249	0.207
0.65	288.7	0.406	0.244	0.203
0.70	288.8	0.399	0.240	0.199
0.75	288.8	0.392	0.235	0.196
0.80	288.8	0.385	0.231	0.193
0.85	288.9	0.379	0.228	0.190
0.90	288.9	0.373	0.224	0.187
0.95	288.9	0.368	0.221	0.184
1.00	288.9	0.363	0.218	0.181

### 연간 환기 성능

태양굴뚝 자연환기시스템의 적용 가능성을 평가하기 위해 해석 모델을 선정하여 국내 기후 조건에서 연간 환기 성능을 평가하였다. 해석 모델은 3층 높이의 저층 건물에도 적용할 수 있는 크기인 1 m\*0.5 m\*10 m(W\*D\*H)로 선정하였다.

그림 3은 해석 모델의 일평균 시스템 환기 성능을 나타낸 것이다. 연간 분석 결과 연중 거의 모든 날에 태양굴뚝 자연환기시스템을 통한 자연환기가 발생하며 일평균 시간당 환기량은 262.9(m<sup>3</sup>/h), 최대 시간당 환기량은 458.9(m<sup>3</sup>/h)으로 계산되었다. 표 5는 일사가 있는 주간 시간대(07시~18시)



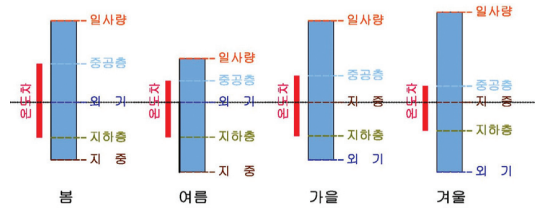
〔그림 3〕 일평균 환기량

〈표 5〉 월별 시스템 환기성능(주간:07~18시)

월	평균유속 (m/s)	질량유량 (kg/s)	체적유량 (m <sup>3</sup> /s)	환기량 (m <sup>3</sup> /h)
1	0.254	0.156	0.127	457.9
2	0.314	0.192	0.157	565.0
3	0.329	0.199	0.164	591.9
4	0.323	0.193	0.161	581.1
5	0.303	0.179	0.151	544.9
6	0.289	0.169	0.144	519.9
7	0.262	0.152	0.131	471.2
8	0.270	0.156	0.135	485.2
9	0.305	0.178	0.152	548.7
10	0.311	0.183	0.155	559.2
11	0.263	0.157	0.131	472.5
12	0.244	0.149	0.122	438.9
평균	0.289	0.172	0.144	519.7

의 시스템을 통한 환기 성능을 월별로 정리한 것이다. 월별 환기량 차이는 25% 이내로 계산되었으며 최대 환기는 3월, 최소 환기는 12월에 발생하였다.

그림 4는 계절별로 중공층 온도, 유입구(지하층) 온도, 외기온도, 일사량의 관계를 도식화해 나타낸 것이다. 시스템의 환기 성능은 중공층과 유입구의 온도차에 의해 결정된다. 중공층의 온도는 일사량과 외기온도가, 유입구 온도는 지중온도와 외기온도가 주요 변수이다. 수직면 일사량이 많은 겨울보다 봄, 가을이 환기량이 많은 이유는 일사량과 외기온도가 적정해 중공층 온도는 높아지고, 외기온도와 지중온도의 온도차가 적어 유입구 온도가 중공층과의 온도차를 유지하기 때문인 것으로 판단된다. 반면 여름과 겨울의 경우에는 외기온도와 지중온도의 차가 커 유입구와 중공층의 온도차를 감소시켜 환기량이 감소하는 것으로 나타났다.



[그림 4] 계절별 온도차 개념도

### 맺음말

본 연구에서는 지하공간의 자연환기를 개선하기 위해 태양열의 이용을 극대화하는 건축적 기법인 태양굴뚝을 이용한 자연환기시스템의 성능과 적용 가능성을 수치 해석적인 방법을 통하여 평가하였다. 시스템 설계 인자 중에서는 중공층의 두께 변화에 의한 민감도가 높게 분석되었으며, 횡단면 적비에 의해서도 동일 체적에서 약 15%의 성능 차이가 나타났다. 변수 분석을 통해 선정된 최소 규모의 해석 모델(1m\*0.5m\*10m)을 건물의 지하공간에 적용해 시스템의 환기 성능을 평가한 결과, 연평균 262.9m<sup>3</sup>/h, 주간 연평균 519.7m<sup>3</sup>/h의 환기를 지하 공간에 제공할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 시스템을 통해 연중 계속적으로 환기가 발생하였으며, 월별 환기량의 차이는 약 25%로 확인되었다. 태양 굴뚝을 통한 환기량은 일사량, 외기온도, 지중온도의 복합 작용에 의해 결정되며 국내 기후 조건에서는 봄>가을>여름>겨울 순서로 분석되었다. 제안된 태양굴뚝 자연환기시스템의 실용화를 위해서는 실험을 통한 검증과 적용 디자인 개발이 요구되겠지만, 이상의 연구를 통해 시스템의 활용 가능성 확인과 이론 정립이 이루어진 것으로 사료된다. 