

# 자연형태양열 트롬월 축열벽 시스템의 열성능 특성 실측 분석 연구

윤종호\*, 백남춘\*\*, 신우철\*\*\*†

\*한밭대학교 건축공학과(jhyoon@hanbat.ac.kr), \*\*한국에너지기술연구원  
신재생에너지연구부(baek@kier.re.kr), \*\*\*대전대학교 건축공학과(shinuc@dju.ac.kr)

## Experimental Study on the Thermal Performance of Passive Solar Trombe Wall System

Yoon, Jong-Ho\*, Baek, Nam-Choon\*\*, Shin, U-Cheul\*\*\* †

\*Hanbat National University(jhyoon@hanbat.ac.kr),  
\*\*Korea Institute Of Energy Research(baek@kier.re.kr),  
\*\*\* Daejeon University(shinuc@dju.ac.kr)

### Abstract

Thermal performance of passive solar Trombe wall system which is applied on the south wall of KIER Zero energy Solar House has been monitored for 6 months of heating season. Based upon the long-term measurement results, extensive statistical analysis was conducted to investigate temperature profiles and heat flow pattern in Trombe wall system under actual operating condition. Heat flow characteristics depending on the time variation of day and month was clearly revealed. Heat gain and loss on the inner surface of the Trombe wall was calculated base upon measured temperature data. Those results would be utilized to improve the efficiency of new type solar storage wall system.

Keywords : 자연형 태양열 시스템(Passive Solar System), 트롬월(Trombe Mass Wall), 열성능 실험  
(Thermal Performance Experiment), 제로에너지 솔라하우스(Zero energy Solar House)

### 기 호 설 명

- $\alpha_i$  : 축열벽내표면열전달율(W/m<sup>2</sup>°C)
- $A$  : 축열벽 면적 (m<sup>2</sup>)
- $T_s$  : 축열벽 내표면온도(°C)
- $T_r$  : 실내온도(°C)

### 1. 서 론

자연형태양열 시스템은 전세계적으로 1980년대 초부터 본격적 개발이 시작되어, 지금까지 많은 연구결과와 응용사례를 찾을 수 있다. 국내의 경우도 연구소를 중심으로 80년대 중반 활발한 연구가 진행된 바 있으나,

접수일자 : 2008년 1월 25일, 심사완료일자:2008년 2월 14일  
교신저자 : 신우철(shinuc@dju.ac.kr)

여타 태양열 시스템과 유사하게 90년대 이후 부터는 연구개발이 거의 중단된 상태이다.<sup>1)</sup>

자연형태양열 시스템 중 대표적 간접획득 방식의 일종인 축열벽 방식은 크게 상하부 공기순환 벤트가 있는 트롬월(Trombe Wall) 방식과 순수히 축열매스만 있는 매스월(Mass Wall)이 가장 대표적이다. 자연형태양열 시스템 중 상대적으로 시스템 효율이 높고, 남측벽에 손쉽게 적용가능하기 때문에 가장 많이 응용되고 있는 시스템들이다.

축열벽 방식에 대한 이론적 해석 및 실험적 실증연구는 그동안 국외에서 상당 수의 연구가 수행된 바 있으며, 최근에는 Shen의 연구<sup>2)</sup>와 같이 시스템의 성능향상 및 단점보완을 위한 시스템 개선연구가 활발히 진행되고 있다.

한편 축열벽 시스템에 대한 많은 이론적 실험적 선행 연구가 수행되었다 할지라도, 축열벽 시스템 자체가 태양에너지를 집열하는 비정상 모델이기 때문에 해석이 난이하고 열거동 특성에 대한 이해가 쉽지 않다. 또한 상하부 벤트, 야간단열, 축열두께, 재료 등 시스템 구성방식에 따라 다양한 설계변수가 존재하기 때문에 아직까지도 축열벽 시스템의 실질적 설계에 있어서는 많은 어려움을 호소하고 있는 것이 현실이다.

특히 국내의 경우 실제 적용된 시스템 사례를 중심으로 장기간의 성능모니터링을 통한 열거동 특성 및 효율성 입증에 대한 선행 연구의 부족으로 자연형 시스템의 실용화가 지연되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 제로에너지 태양열 주택 개발을 위한 1단계 연구결과인 KIER ZeSH I 데모 주택에 자연형태양열 트롬월 축열벽 시스템을 설계 적용하고, 이를 대상으로 난방기에 걸쳐 열성능 측정 실험을 수행하여, 다양한 통계적 기법을 통해 축열벽 시스템의 열거동 특성을 분석함으로써, 국내 기후조건에 적합한 개선모델 개발을 위한 기초데이터 수립에 연구의 주 목적이 있다.

## 2. 축열벽 시스템의 실험조건

2.1 축열벽 시스템 성능측정 개요 및 실험조건  
에너지 자립형 제로에너지 솔라하우스의 1차 데모 주택인 KIER ZeSH I에는 남측벽면을 활용해 다양한 형태의 자연형 태양열 시스템을 적용하였다<sup>3)</sup>. 표 1에 대상건물 및 적용 트롬월시스템의 사양을 나타내었다.

표 2 KIER ZeSH 1 주택 및 적용 트롬월 시스템 사양

KIER ZeSH I 주택		트롬월 시스템	
위치	대전 KIER	위치	1층 침실 남향벽
규모	지상2, 지하1층	시스템유형	상하벤트 축열벽
연면적	262m <sup>2</sup>	트롬월면적	7.35m <sup>2</sup>
난방면적	138.6m <sup>2</sup>	야간단열	가동식외부셔터
구조	철근콘크리트	축열벽두께	250mm
준공	2002. 12	공기층폭	130mm

1층 동측침실의 경우 상하부 벤트를 통해 자연대류가 가능한 대표적 축열벽 시스템인 트롬월을 설치하였으며, 1층 거실은 직접획득방식의 개념을 도입하여 바닥에 태양흡수율 및 축열성능이 좋은 바닥축열체와 집열창을 적용하였다. 그림 1은 실험대상 축열벽 시스템의 전경이다.

적용된 자연형태양열 시스템 중 정밀 열성능 측정은 상대적으로 성능효과가 가장 큰 트롬월 시스템에 대해 수행하였다. 1층 남측침실의 트롬월 설치면적은 7.35m<sup>2</sup>로, 이는 남측면 외벽 전체 면적에서 창호를 제외한 면적이다.

트롬월에는 하절기 과열방지 및 난방기의 난방효과를 극대화시키기 위해 축열벽 상하부에 각기 2개의 자연대류용 벤트 환기구를 설치하였다. 또한 야간 열손실을 줄이기 위해 시스템의 최외부에 자동으로 작동 가능한 야간 단열 시스템을 설치하였다.

그림 2는 측정대상 트롬월 시스템의 입면도와 단면형상을 집열부, 축열부, 공기층으로 나누어 나타내고 있으며, 각 부분에 설치된 표면 센서의 위치를 나타내고 있다.

한편 트롬월의 정상적 작동을 위해서는 거주자가 주간 및 야간의 자연대류 방향에 따

라 벤트의 개폐작동을 주기적으로 조정해 주어야 그 성능을 최대화할 수 있다. 하지만 사용자가 매일 벤트를 조작한다는 것이 현실적으로 쉽지 않으며, 실제 트롬월이 설치된 실제 사례에서도 벤트조작이 이루어지지 않고 그대로 방치되어 운영되고 있는 것이 대부분이다.

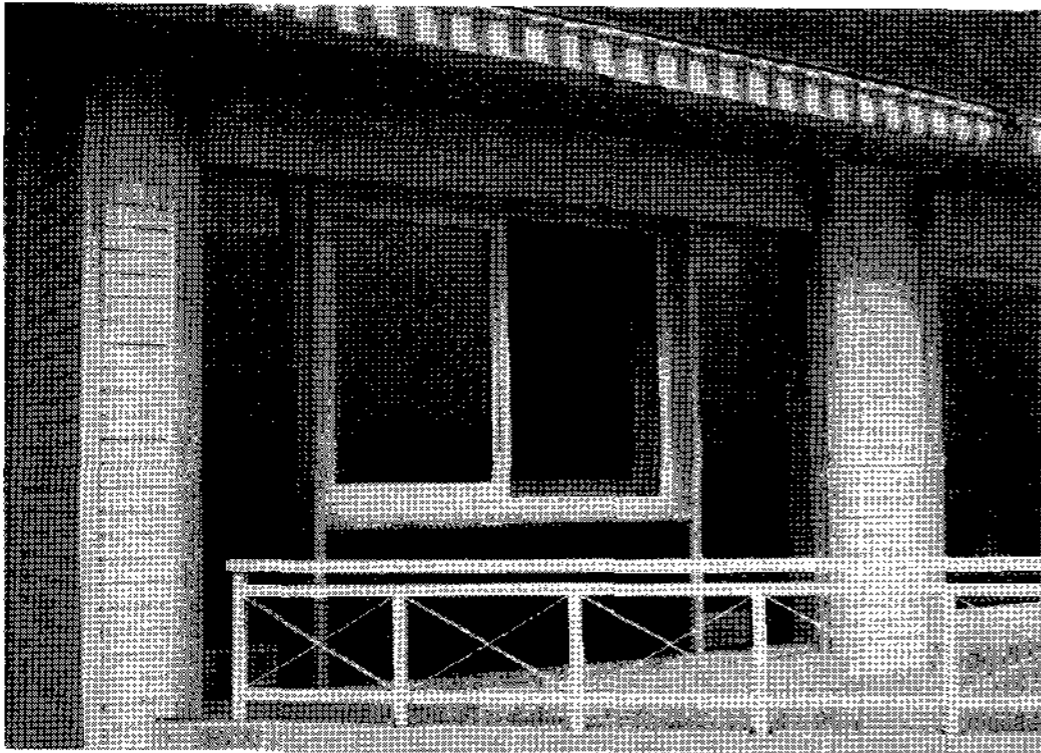


그림 1 KIER ZeSH I의 트롬월 축열벽 전경

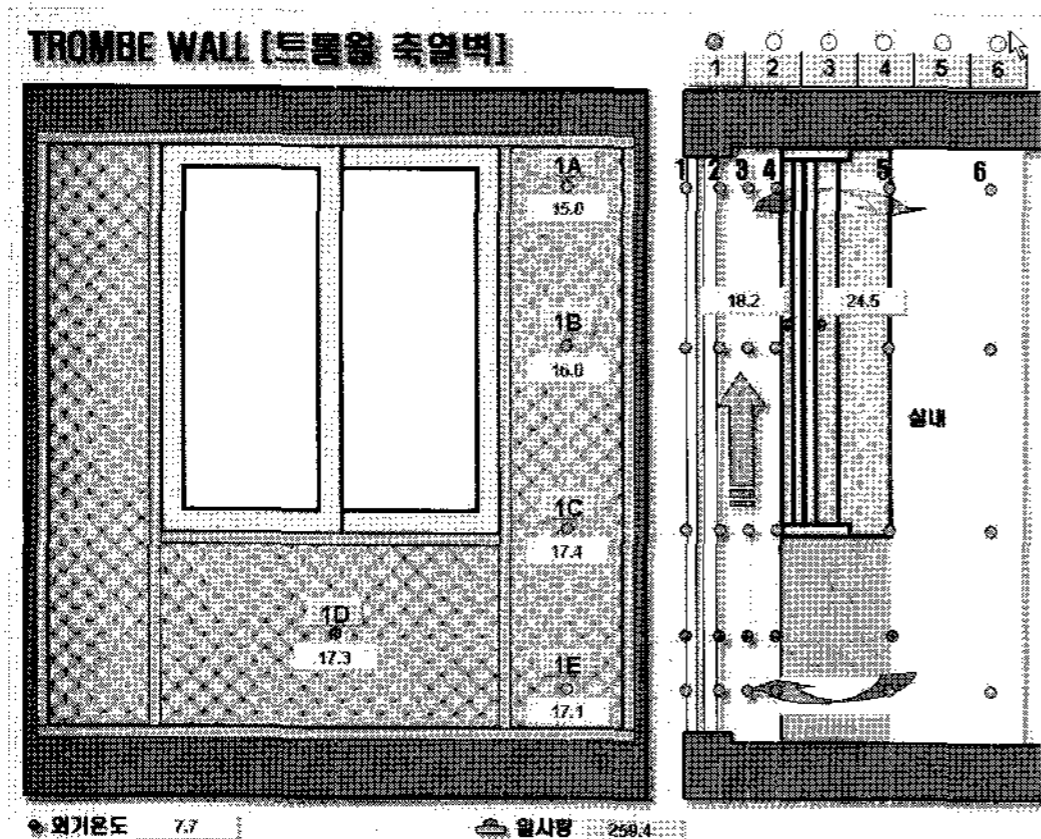


그림 2 트롬월의 구성 및 온도센서 설치위치

따라서 시스템 시공 후 첫해 난방기 실험에 해당하는 본 연구의 실험에서는 1차적으로 자연대류에 의한 영향을 최대한 억제한다는 목적과, 벤트조작의 어려움에 따른 자연방치 상황을 재현한다는 측면에서 트롬월 상하부의 벤트를 폐쇄시킨 상황에서 트롬월 중간의 공기층과 실내공간사이의 자연대류가 없는 상태로 실험을 실시하였다. 야간단열 또한

첫해 난방기 실험기간 동안에는 기본적으로 가동하지 않는 것을 원칙으로 하였다.

한편 KIER ZeSH I 트롬월 시스템에 대한 첫해의 난방기 성능평가는 2003년 10월초부터 시작되었으나, 초기 보정실험 및 다양한 변수 조작 실험을 거쳐 본격적 데이터 수집은 2003년 11월말부터 착수되었으며 그림 2에 도식된 지점의 온도 데이터를 매 1분 간격으로 평균을 기록하였다. 측정 시스템에 대한 세부사항은 선행연구<sup>5)</sup>를 참고한다.

본 연구에서는 실험초기인 2003년 11월22일 - 2003년 11월 24일까지의 실측결과를 대상으로 트롬월 시스템 집열 및 축열과정에 대한 열거동 파악을 위해 수직 및 수평 단면상의 각 부위별 온도분포에 대한 정밀 해석을 수행하였다.

한편 국내 기후조건에서 트롬월 시스템의 일반적 거동특성을 규명하기 위해 장기간의 성능측정데이터를 근거해 혹한기 및 중간기를 포함한 월별 트롬월 거동특성 분석, 축열체의 시간별 거동특성 등에 대한 분석을 수행하였다. 측정데이터는 2003년 12월1일 - 2004년 5월 27일까지 약 6개월에 걸친 장기 성능 실측결과를 대상으로 통계처리하여 분석하였다.

## 2.2 트롬월을 통한 열획득량의 산출방법

트롬월을 통한 태양에너지 획득량 산출을 위해서는 매우 많은 인자를 고려해야 하며, 그 계산과정도 단순하지 않다. 더구나 실험적 방법을 통해 획득량을 정밀 측정한다는 것은 더욱 복잡하고 어려운 과정이다. 본 연구에서는 트롬월의 상하부 벤트를 통한 공기층과 실내와의 자연대류가 없는 경우 난방에너지 절감효과에 직접적으로 영향을 주는 부분은 축열벽 내표면온도(그림 2의 5B, 5C, 5D)라는 가정하에, 실내와 접한 축열벽 내표면온도와 실내온도와의 온도차 및 이론적 수직 내표면열전달율을 이용하여 다음 식으로 시간당 발생하는 열손실량과 열취득량을 계산하였다. 이때 수직벽 내표면 열전달율( $\alpha_v$ )

은  $8.3 \text{ W/m}^2\text{C}$ 을 적용하였다<sup>4)</sup>.

$$Q = a_i A (T_s - T_r) \quad (1)$$

$a_i$ : 축열벽 내표면 열전달율( $\text{W/m}^2 \cdot \text{C}$ )  
 $A$ : 축열벽면적( $\text{m}^2$ )  
 $T_s$ : 축열벽내표면온도( $\text{C}$ )  
 $T_r$ : 실내온도( $\text{C}$ )

표면 열전달계수를 고정된 상수값으로 적용한다는 점에서 다소간의 오차가 수반되겠지만, 트롬월의 월별, 시간별 세부 거동특성을 상대적으로 비교 평가한다는 측면에서 본 연구에서는 이들 측정 온도차를 이용한 열획득량 산출방법을 적용해 트롬월의 난방성능을 분석하였다.

### 3. 트롬월 시간별 공간별 온도측정 결과

본 장에서는 2003년 11월 22일 - 11월 24일까지 3일(72시간)동안 측정한 단기간의 계측 결과를 대상으로 트롬월 시스템의 수평 및 수직 온도변화를 비교함으로써 트롬월 시스템의 열적 거동특성을 분석하였다. 이때 난방설정온도는  $26\text{C}$ 로 고정하고 24시간 연속 난방을 공급하였다.

그림 3은 트롬월 시스템의 C지점(그림 2 참조) 수평 단면상의 온도분포 분석결과를 예시한 것이다. 수평 단면상의 측정 절점은 외기측으로부터 ①이중유리 외표면온도, ②이중유리 내표면온도, ③트롬월 공기층온도, ④트롬월 축열벽 외기측 표면온도, ⑤트롬월 축열벽 실내측 표면온도 및 ⑥실내온도 등 6개 지점이다. 이를 통해 시간별로 실내측에서 실외측으로 또는 반대방향으로 흐르는 열류의 거동특성 분석이 가능하다.

그림 4는 트롬월 시스템의 수직 단면상의 온도분포로 축열벽 3번지점 즉, 트롬월 공기층의 위치별 온도변화를 보여준다. 이 분석 결과를 통해 집열에 따른 공기층 및 축열벽의 상하부 시각별 온도분포를 판정할 수 있다. 각 분석 그래프의 하단부에는 동일기간의 외기온 변화 및  $45^\circ$  지붕경사면 전일사량

의 변화와 실내 설정온도도 같이 도식하였다.

그림 5는 11월21일부터 4일간에 걸쳐 트롬월 중앙부분의 축열벽 내표면온도와 실내온도 그리고 실내로 유입·손실되는 열량을 시간별로 나타낸 것이다.

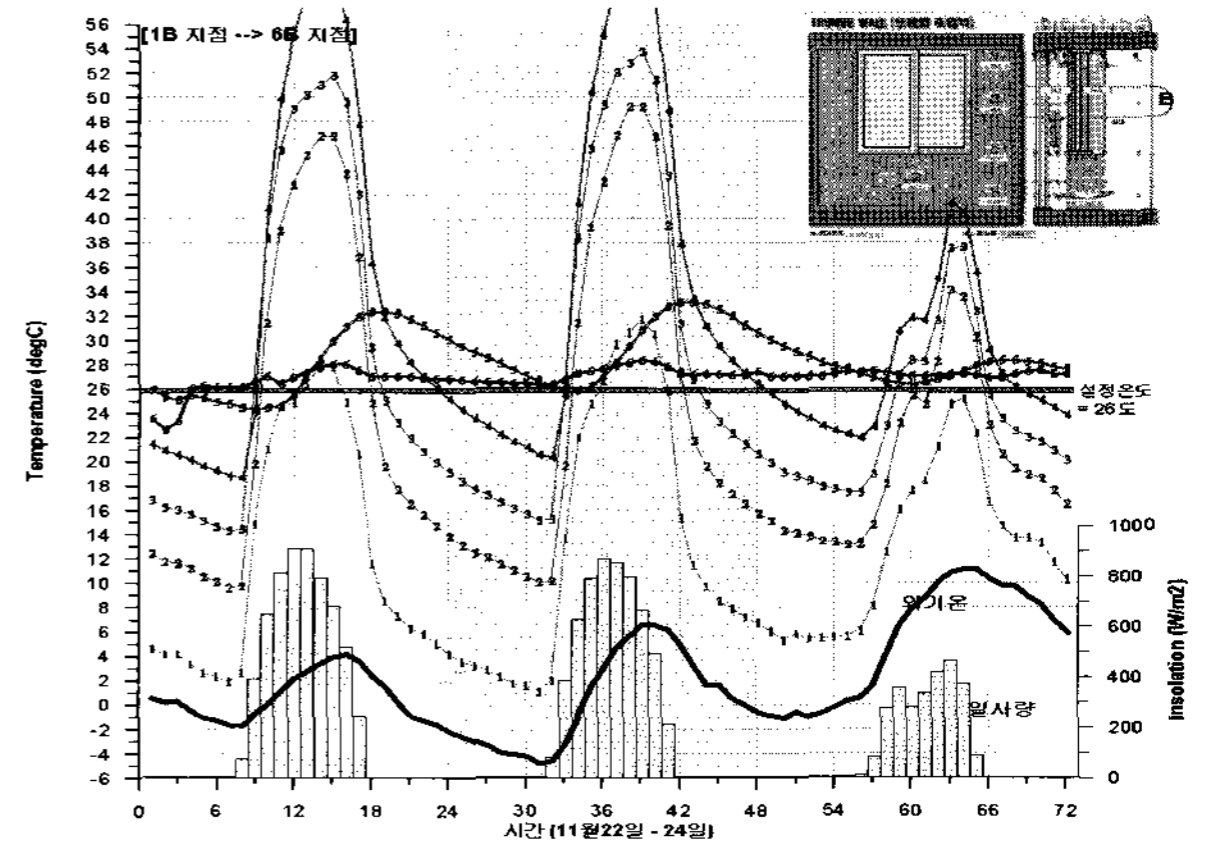


그림 3 축열벽 B지점의 단면상 온도변화 실측결과

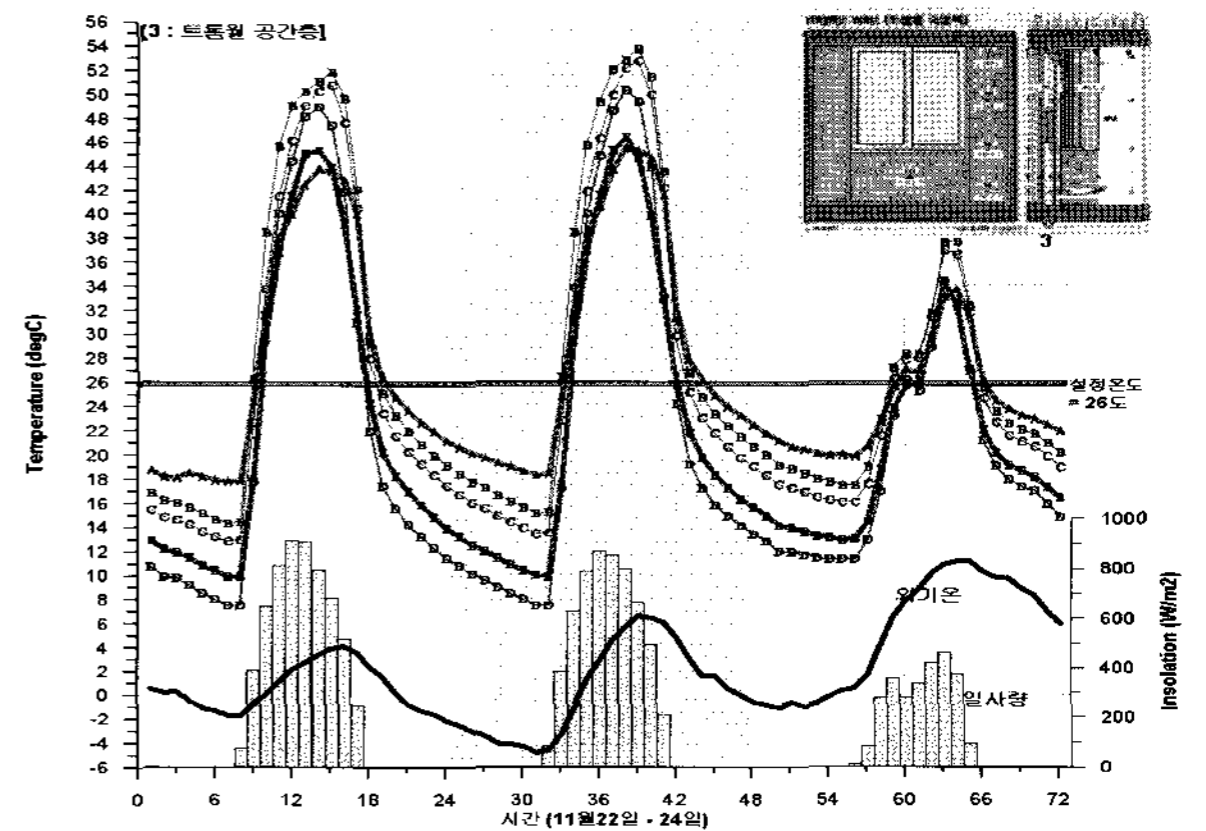


그림 4 축열벽 3번지점 수직 온도분포 실측결과

그림에 도식된 바와 같이 실내온도를  $26\text{C}$ 로 설정, 운영한 경우 일사가 없는 야간이나 새벽의 축열벽 내표면온도는 실내온도보다 최대  $2.8\text{C}$  이상 낮게 나타났으며, 일사에 의해 축열벽이 최대로 가열될 경우 축열벽 내표면 온도는 실내온도보다 최대  $6.2\text{C}$  이상 상승하였으며, 17시부터 다음날 오전 7시까지 총 15시간 동안 축열벽에 축열된 열이 실내로 유입되고 있는 것으로 나타났다. 이에



대한 세부적 특성 분석은 다음 장의 장기 성능데이터를 중심으로 분석 제시하였다.

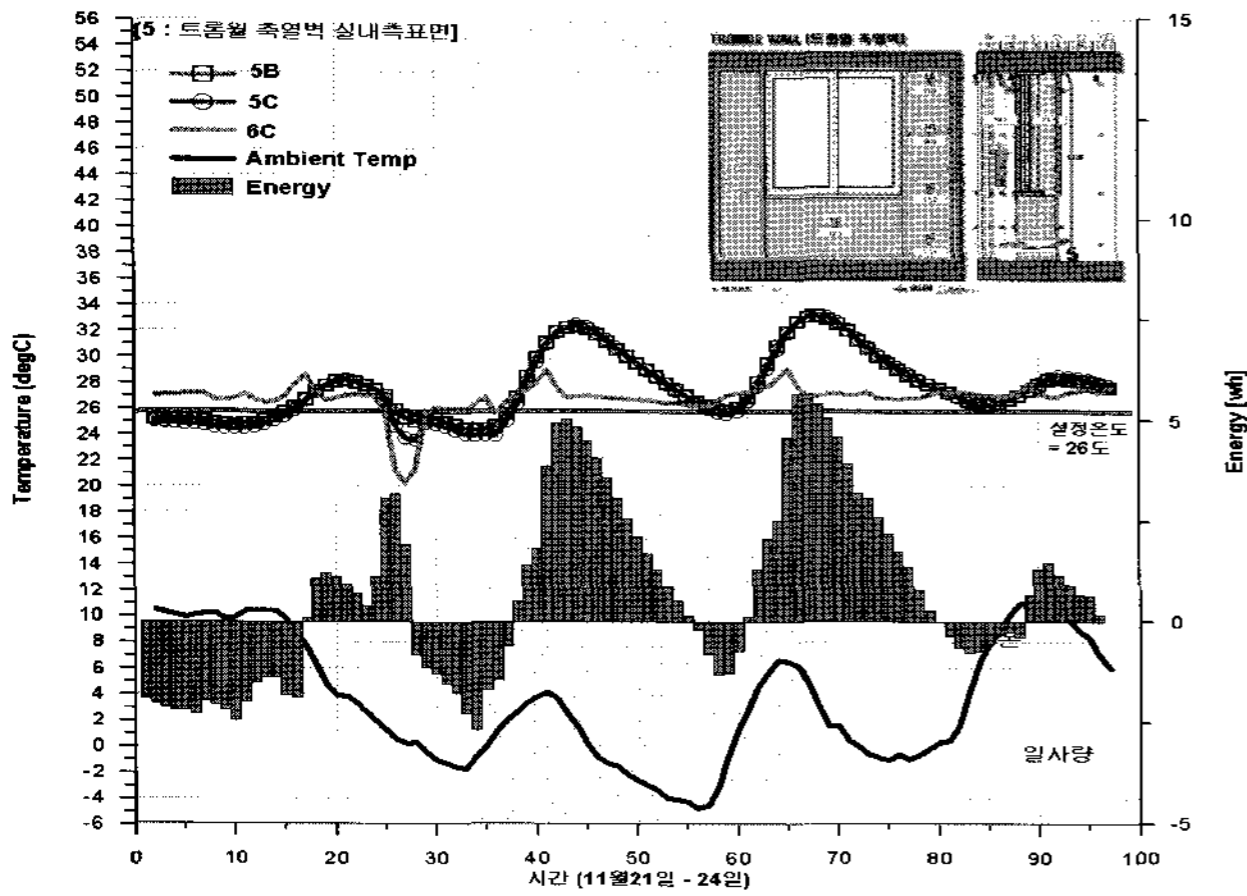


그림 5 축열벽 내표면온도와 실내온도 및 획득열량

#### 4. 트롬울의 장기간 열성능 분석 결과

본 장에서는 2003년 12월1일 - 2004년 5월 27일까지 약 6개월에 걸친 장기간 트롬울 열성능 실측결과를 대상으로, 통계처리를 통해 트롬울의 시간별 월별 거동 특성을 분석하였다. 6개월간에 걸친 장기간의 트롬울 각 부위별 시간별 온도 계측결과를 분석하기 위해서는 단순히 시간별 단면별 온도변화의 비교를 통해서서는 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 전체 계측 데이터를 우선 각 월별로 1차 그룹화하고, 2차로 각 시간대별로 그룹화하여 산술평균 및 표준편차, 최대 및 최소값에 대한 통계처리를 함으로서 각 월을 대표할 수 있는 하루 중의 시간별 변동특성 그래프의 형태로 분석을 수행하였다.

그림 6은 이런 분석방법의 일례로서, 6개월에 걸친 측정기간 동안 외기온 온도변화 실측결과를 이용해 매월 시간대별 외기온 변화를 통계 처리한 결과이다.

그림에서 “●”은 각 시간대별로 평균값을, “□”는 평균±표준편차의 범위를, “I”는 최대값 및 최소값의 변화 범위를 나타낸다. 예

를 들어 좌측 상단 첫 번째 그래프의 첫 구간은 12월중 1시에 계측된 모든 데이터의 평균, 표준편차 범위, 최대최소 범위를 나타내는 것이다.

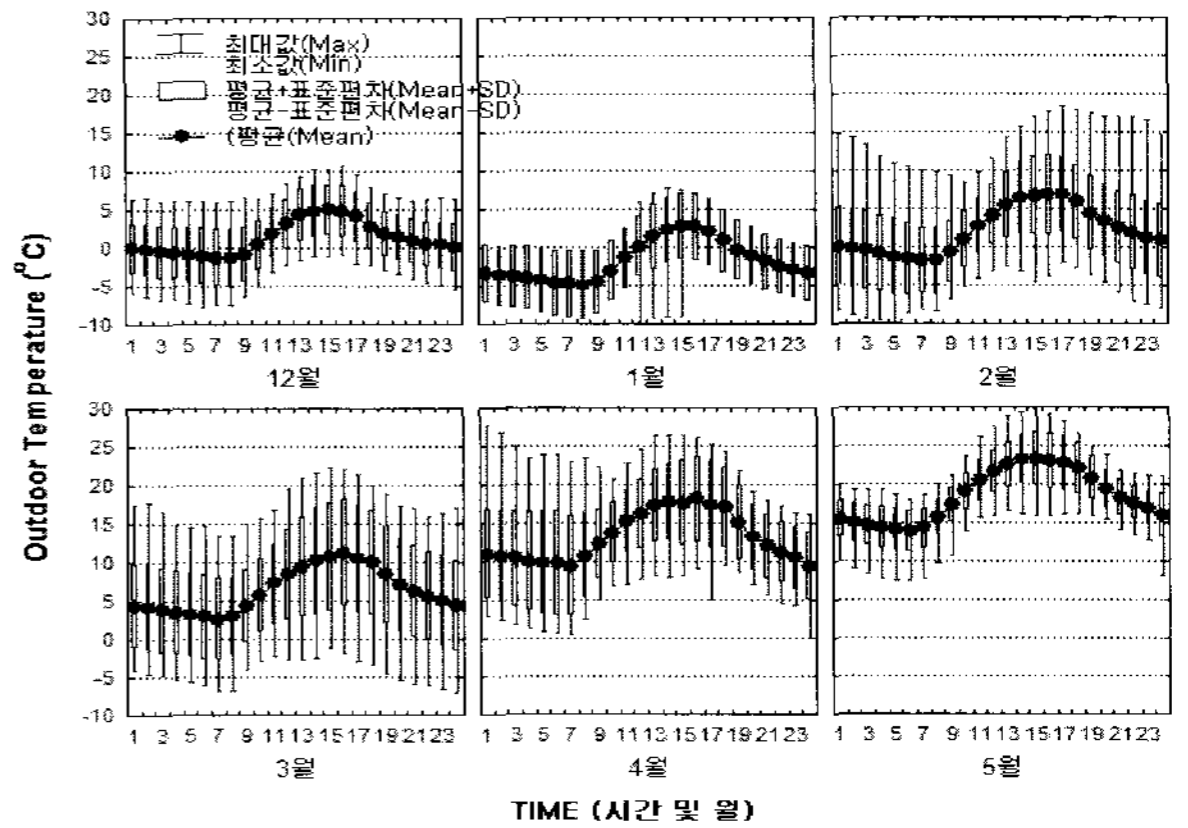


그림 6 월별 시간대별 외기온 변동 통계처리 결과

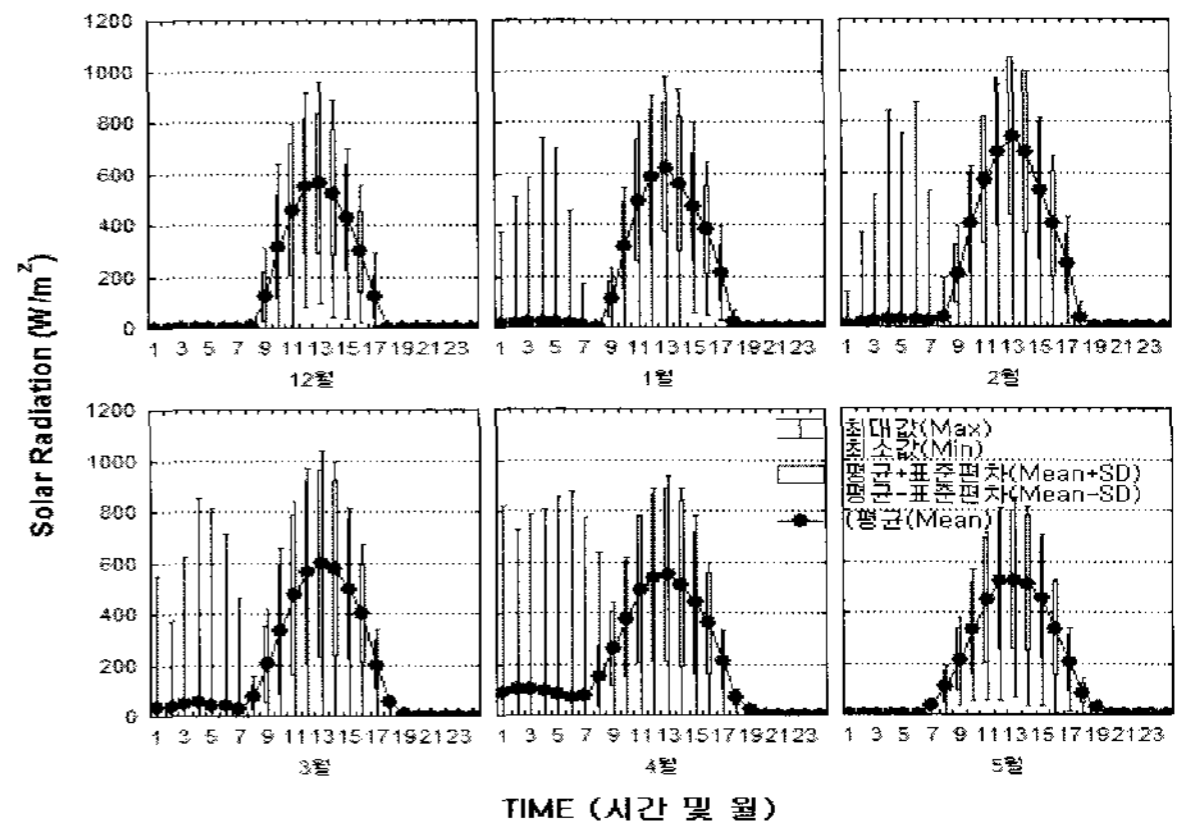


그림 7 월별 시간대별 지붕경사면(45°) 전일사량

이를 통해 각 월별 평균온도의 일간 시간별 변동이 월 변화에 따라 어떻게 변화되는지의 변동특성을 파악할 수 있으며, 특히 최대 최소의 변화범위 또한 동시에 판정가능하기 때문에 시스템의 거동특성을 매우 효과적으로 비교 분석할 수 있다.

그림 7은 동일기간동안 지붕 경사면 전일사량의 결과를 분석한 결과이다. 각 월별 일 평균 외기온 및 경사면 전일사량 값은 표 2를 참조한다.

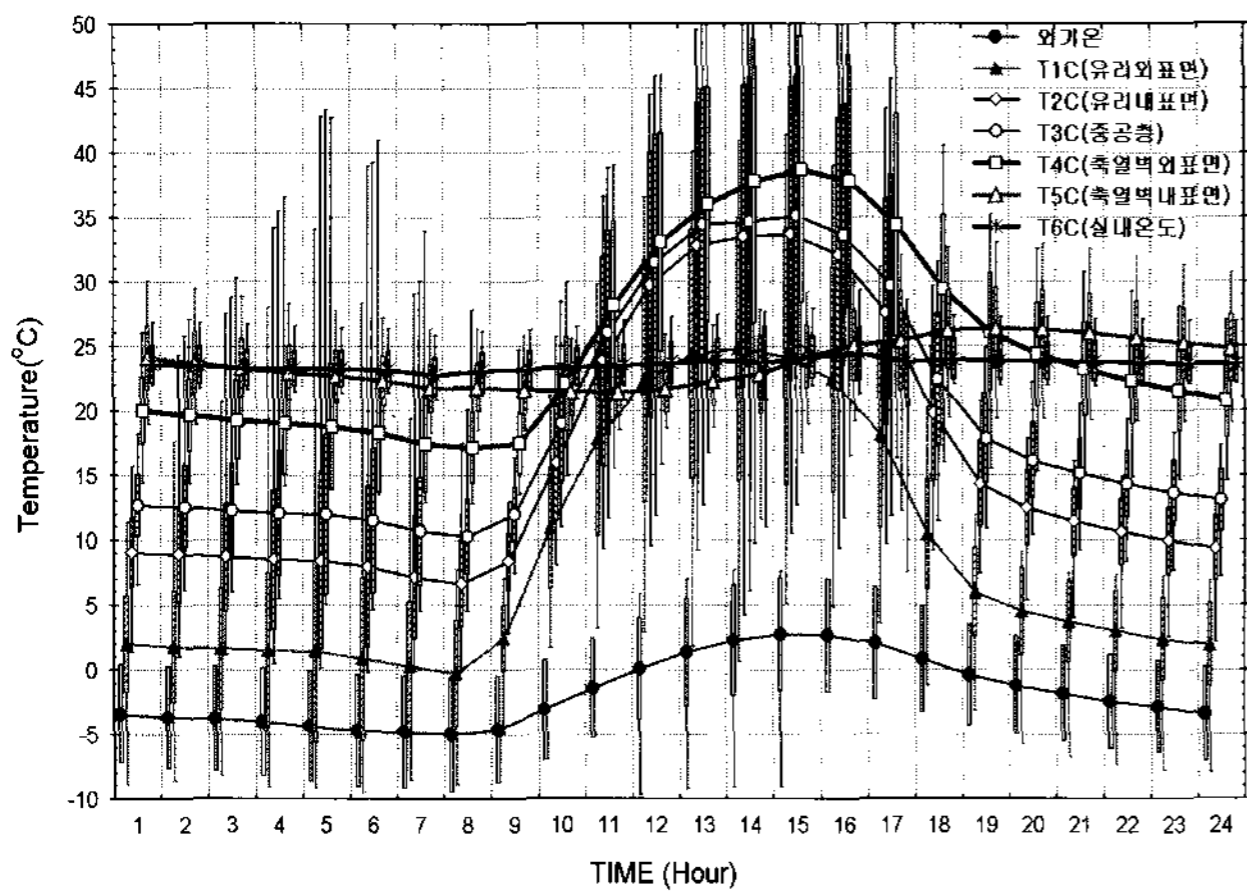


그림 8 축열벽 단면 절점별 시간 평균 온도변화(1월)

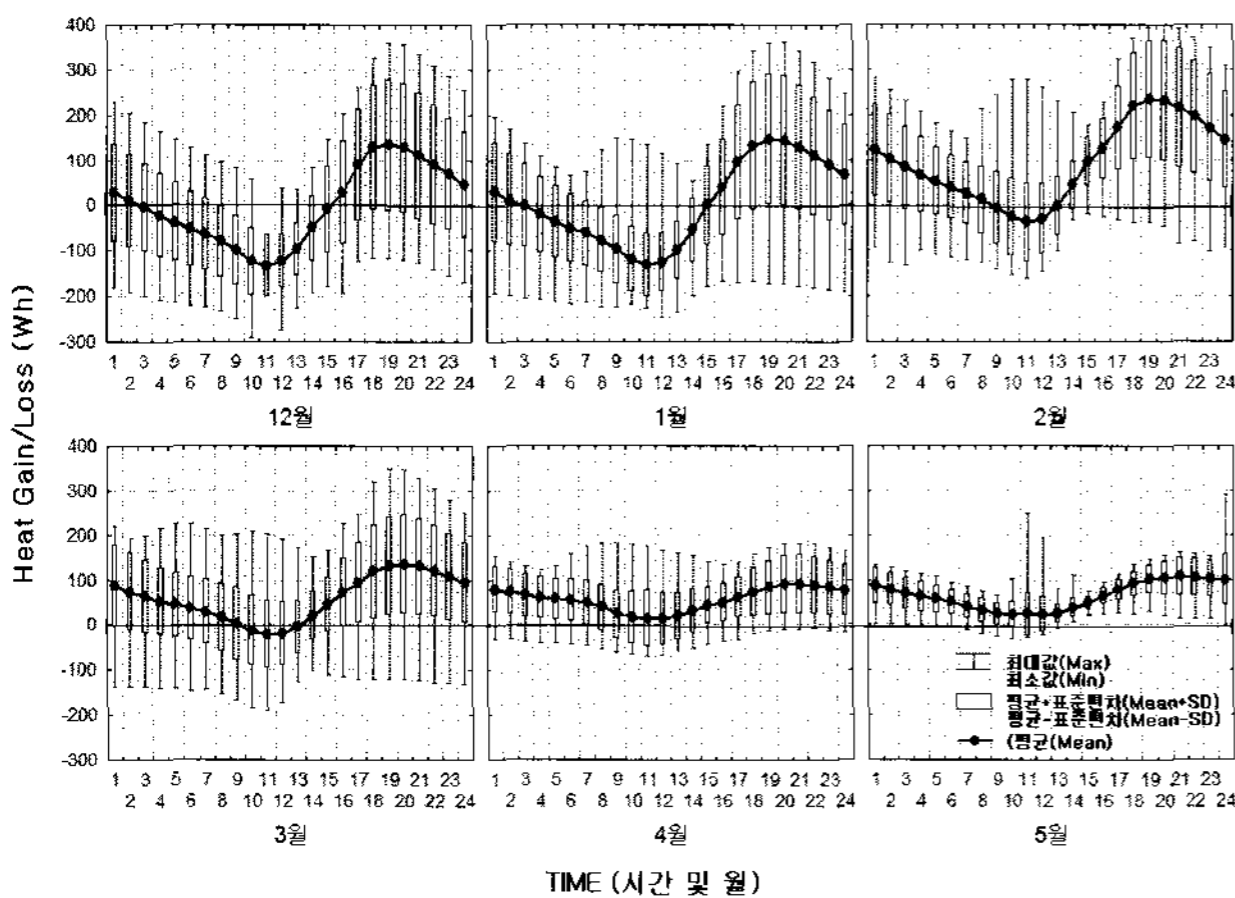


그림 9 월별 시간대별 축열벽을 통한 실내공간의 순수 열획득/열손실 변화 분석결과 (2003/12/1 - 2004/5/27)

표 3 축열벽의 일평균 열획득/열손실량 분석 결과

월	일평균 외기온 (°C)	일평균 지붕면 적산 일사량 (Wh/m <sup>2</sup> . day)	일평균 축열벽 총 획득/손실			일평균 축열벽 단위 면적당 획득/손실		
			획득 열량 (Wh/ day)	손실 열량 (Wh/ day)	순 획득 열량 (Wh/ day)	획득 열량 (Wh/m <sup>2</sup> . day)	손실 열량 (Wh/m <sup>2</sup> . day)	순 획득 열량 (Wh/m <sup>2</sup> . day)
12월	1.2	3,364	1,281	-1,311	-30	175	-179	-4
1월	-1.8	3,817	1,373	-1,257	115	188	-172	16
2월	2.0	4,634	2,598	-338	2,260	355	-46	309
3월	5.9	4,048	1,763	-346	1,417	241	-47	194
4월	11.6	4,172	1,430	-94	1,336	195	-13	183
5월	18.4	3,791	1,560	-18	1,542	213	-2	211

[\* 측정기간 : 2003/12/1-2004/5/27, \* 축열벽면적 : 7.32m<sup>2</sup>]

그림 8은 1월의 측정결과를 대상으로 트롬 월 수평면 단면상의 절점별 온도변화를 시간별로 통계처리한 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 각 절점별 온도차의 크기를 통해 시간대별 열류의 방향 및 크기를 손쉽게 파악가능하다.

한편 그림 9는 6개월에 걸친 축열벽의 온도 변화 실측결과를 이용해 매월 시간대별 열류 획득량, 손실량의 변화를 계산하여 통계 처리한 결과이다. 표 1은 각월에 대한 일평균 값을 나타낸다.

외기온이 낮고 일사량이 작은 12월, 1월의 경우 축열벽을 통한 획득량과 손실량의 비율이 거의 동일하게 나타난 반면, 2월 이후부터는 획득열량의 비율이 확연히 높아지는 경향이다. 2월의 경우 축열벽 단위면적당 일평균 열획득량은 355 Wh/m<sup>2</sup>.day, 손실열량은 -46Wh/m<sup>2</sup>.day로 하루 중 순수 획득량은 309Wh/m<sup>2</sup>.day로 나타났다.

한편 평균값을 중심으로한 획득/손실의 시간대별 변화를 살펴보면 12월과 1월의 경우 새벽 3시 이후부터 열류의 흐름이 실외 측으로 역전되어 실내측에서 축열벽측으로 열손실이 시작되는 것으로 나타났으며, 오전 11시까지 그 양은 지속적으로 증가된다.

낮 12시 이후부터는 손실열량이 감소하기 시작하며 오후 3시 이후부터는 열류의 방향이 다시 축열벽에서 실내측으로 역전되어 열획득이 이루어진다.

획득량은 오후 7시까지 지속적으로 증가하여 7-8시 사이에 최대 획득량을 보이며 이 시간 이후부터는 획득량이 감소하기 시작한다. 결과적으로 오전 4시 - 오후 3시까지 12시간은 실내에서 축열벽측으로 손실, 나머지 12시간은 축열벽에서 실내측으로 열획득이 이루어지는 것으로 분석되었다.

2월 및 3월의 경우는 손실되는 시간이 대폭 축소되어 오전 8시 - 12시 사이의 약 4시간 정도만 실내측에서 축열벽측으로 흐르며, 나머지 20시간은 지속적으로 열획득이 이루어지는 것으로 나타났다. 중간기인 4월, 5월의

경우는 하루종일 열류의 흐름이 획득방향을 유지함을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 대표적 자연형 태양열 시스템인 트롬월 축열벽 시스템을 대상으로 장기간의 열성능 측정 및 분석을 통해 집열창 및 축열매스를 통한 열류의 거동특성을 규명하였다. 트롬월을 통한 월간 단위면적당 집열량에 대한 실측데이터를 도출하였으며, 시간대별 열류의 방향을 각 월별로 규명함으로써 향후 축열벽의 규모결정에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 실험을 통해 도출된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 12월, 1월의 경우 축열벽을 통한 획득/손실의 비율이 거의 동일하게 나타나며, 2월 이후 부터는 획득의 비율이 크게 높아진다.
- 본 실험 조건에서 2월 평균 축열벽을 통해 순수히 획득할 수 있는 일일 집열량은 309 Wh/m<sup>2</sup>.day로 평가되었다.
- 12월, 1월의 경우 새벽 3시 이후부터 실외측으로 열류방향 역전하여 오전 11시까지 지속적으로 양이 증가함. 12시 이후부터는 실내측으로 열류방향 역전되어 19시-20시에 최대량이 된다.
- 2월, 3월의 경우 오전 8시-12시 사이에 약 4시간 정도 손실방향으로 열류가 외측으로 흐르며, 나머지 20시간은 지속적으로 열획득이 이루어진다.
- 4월, 5월의 경우는 24시간 지속적인 열획득이 이루어진다.

본 실험결과 자연형 태양열 축열벽 시스템의 경우 열류흐름의 패턴분석을 통해 시스템의 구성을 최적화할 경우 보다 높은 효율을 발휘할 수 있는 큰 잠재성이 있는 것으로 입증되었다.

향후 고효율의 축열벽 시스템 개발을 위해 야간단열 및 상하부 벤트의 운영방식에 따른 후속연구를 지속적으로 진행할 예정이며, 장

기간의 실험데이터를 기반으로 이론해석 모델의 검증 및 다양한 변수평가를 통한 트롬월 최적구성에 관한 연구도 진행할 예정이다.

## 후기

본 연구는 공공기술연구회 보급형 제로에너지 하우스 개발 사업(KIER-A32406)의 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

1. 윤종호, 백남춘, “한국에서 제로에너지하우스의 현황과 전망”, 광주환경연합·에너지대안센터 “태양건축과 에너지 전환” 2003.10
2. Shen, J. ; Lassue, S. ; Zalewski, L. ; Huang, D., Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls, Energy and buildings, v.39 no.8, 2007, pp.962-974
3. 한국에너지기술연구원, “보급형 제로에너지 하우스 개발 (I) - (III)”, 한국에너지기술연구원 보고서, KIER-A12205, 2004
4. 이경희, “건축환경계획”, 문운당.