

TIM-PCM

태양열 난방 및 주관채광을 위한 TIM-PCM 외벽 시스템

SYSTEM

1. 서론

단열이 된 불투명 건물벽은 열손실을 감소시킬 수는 있으나, 태양에너지를 효율적으로 이용하지는 못한다. 창을 통과하는 일사량은 콘크리트 또는 블록으로 이루어진 건물의 매체요소에 부분적으로 흡수된다. 그러나 태양 이득량(gain)은 높은 일사량의 경우에 종종 일어나는 내실의 과난방(overheating)에 의해 제한을 받는다. 태양열 난방을 위한 투사일사량의 더 많은 양을 사용하기 위해서는 다수의 집열기/저장외벽 시스템이 제안되어져 왔다. 태양열 저장소로서의 외벽의 결점은 겨울철에 건물외피에 발생하는 높은 온도구배라 할 수 있다. 그러나 태양외벽 시스템은 아주 간단하다. 즉 어떤 열전달매체와 펌프 및 환 등이 없기 때문이다. 또한 이들 시스템의 요소들은 날씨 보호기능을 수행하므로 다른 요소들을 필요치 않게 된다. 따라서 이 시스템은 잠재적 경제성을 갖고 있다 하겠다.

Trombe 등⁽¹⁾은 벽골구조물로 만들어진 외벽을 설치하고 이곳에 태양일사량을 흡수하여 시간이 경과함에 따라 벽의 열전도에 의해 뒤쪽의 실내로 열을 방출하는 실험을 행한 바 있다. 주위로의 열손실을 감소시키기 위해서는 외부면에 유리창

을 설치하곤 한다. 실내로의 열유속의 증가는 벽의 하부와 상부에 나있는 작은통로를 통해 공기의 대류가 나타나기 때문이다. 그러나 이와 같은 시스템은 전면 유리창을 통한 열손실로 인하여 중,북부 유럽과 같은 차가운 기후에서는 효과적이지 않다.

투명 단열재의 물리적 특성을 향상시키기 위하여 지난 10여년 동안 많은 연구가 수행되었다. 1960년대에 투명단열물질로 벌집구조가 Hollands⁽²⁾ 및 다른 연구자들에 의해 수행되었으며, 많은 연구가 오늘날까지 이 형태의 물질을 개선코자 하는데 노력이 집중되었다. 따라서 그 응용으로서 Trombe 벽과 유사한 자연형 태양열 난방(passive solar heating) 요소로 외벽에 성능이 향상된 TIM을 설치한 형태가 제안되어 시험되었다. Platzer와 Wittwer⁽³⁾는 투명단열 및 열적/광학적 특성 및 태양열시스템의 적용을 위한 일반적 형태에 대하여 개괄적으로 조사한 바 있다.

열저장 용량을 향상시키기 위해서는 건물에 상변화물질(PCM)을 적용하는 방법이 Telkes⁽⁴⁾ 등에 의해 제안이 되었다. 그후 최근 Merkel⁽⁵⁾은 벌집형태의 투명단열재가 덮혀진 PCM 외벽 시스템을 연구한 바 있다. 이들 PCM을 사용하는 연

구의 대부분은 - 비록 다공물질내의 미세캡슐인 경우가 가능성이 더 크지만 - PCM이 커다란 용기안에 담겨져 있다. Lane⁽⁶⁾은 PCM물질의 물리적 특성, 캡슐화 및 시험 등에 대하여 개괄적으로 조사하였다.

잠열저장물질에 에너지를 저장하는 메카니즘은 일반적으로 열전도에 의해서 이다.

부가적으로 말하면 액상의 의한 자연대류의 현상도 나타날 수 있다. 다만 몇몇의 연구자들은 상변화물질의 용융을 유도하는 복사에 대하여 연구한 바가 있다.

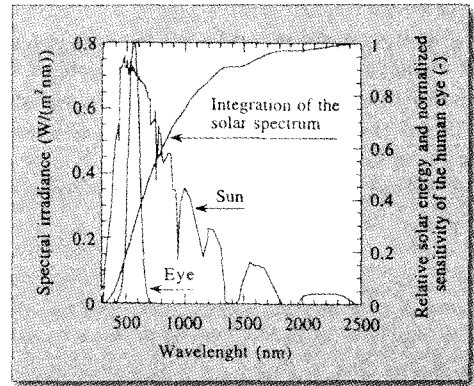
건물벽에 대한 상변화 물질의 적용에 관한 연구의 대부분은 불투명벽에 대하여 이루어졌는데, 이는 PCM이 가시광선을 투과시키는 능력이 거의 이용되지 않기 때문이다. Sedrick⁽⁷⁾은 섬유유리로 만들어진 용기안에 불투명 PCM을 채운 이러한 시스템을 기술하였는데, 이 모ジュール은 뒤에 남쪽면에 창문이 있는 건물에 적용이 되었다. Korin⁽⁸⁾ 등은 겨울 기후가 온화한 지역에서 그린 하우스에 열과 조명을 공급하기 위하여 벽과 지붕에 PCM 건물요소를 설치할 것을 제안하였는데, 그는 2중 플라스틱 패널안에 PCM을 채운 바 있다.

오늘날 열적 및 광학적으로 훌륭한 투명 단열 물질이 이미 상용화되어 이용되고 있다. 따라서 이 논문은 주간채광 및 태양열 난방을 위한 PCM 벽의 성능을 보다 향상시키기 위한 것에 초점이 두어있다.

2 시스템

2.1 시스템의 개요

투과된 태양일사량 에너지의 약 50%는 가시 스펙트럼 범위안에서 발생한다. 인간의 눈으로 감지할 수 있는 파장 간격은 태양일사량이 최고 점일때의 스펙트럼 범위와 일치한다(그림 1).

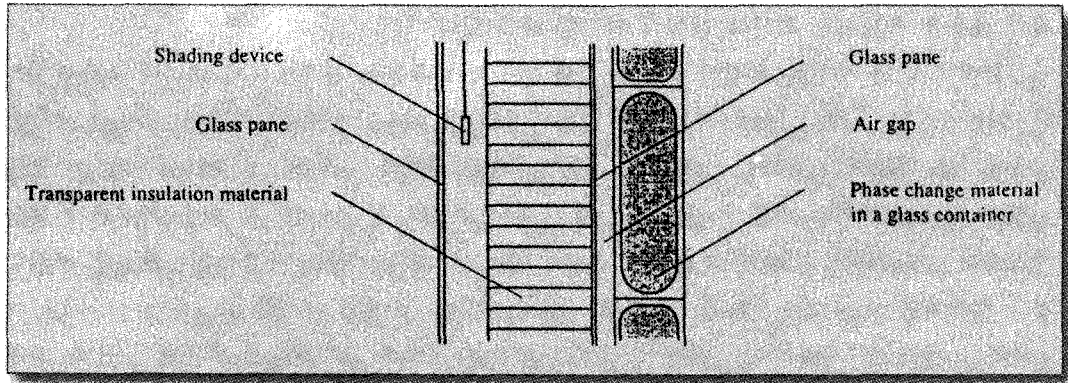


[그림 1] 태양일사량(AM=2)의 스펙트럼분포 및 사람의 눈의 스펙트럼 감도

만일 외벽 시스템이 가시 태양일사량이 투과되고 비가시광선, 즉 스펙트럼의 적외선 부분에서 흡수되어 열로 전환되어 시간차를 두고 후위의 실내 안으로 유동이 생겨나도록 설계가 된다면, 하나의 시스템 안에서 2가지의 기능이 현실화되는 것이다. 즉 태양열 난방 및 주간채광이다. 따라서 선택적 열저장 물질이 높은 열용량을 가져야 할 뿐만 아니라 흡수 및 투과 데이터와 같은 특정한 광학적 물성치를 가져야 한다.

물의 광투과율은 완전히 사람 눈의 민감도와 일치하나, 적당한 온도간격에서 상변화하는 물질을 사용함으로써 저장용량은 확실히 증가 될 수 있다. 따라서 물을 많이 함유하고 있는 PCM을 선택하도록 한다.

제안된 바와 같은 2개 층의 자연형 벽 시스템은 염수산화물(salt hydrate) 상변화물질과 투명 단열물질, 즉 벌집형태(그림 2)의 조합으로 되어 있다. PCM은 유리용기, 즉 상업용 유리블럭안에 채워져 있으며, 고에너지밀도를 가진 열저장장치를 나타낸다. 투사된 태양일사량의 일부는 즉시 주간채광의 목적으로 후위에 있는 실내안으로 투과된다. PCM이 고체결정상태로 있는 낮은 온도에서 저장물질 안의 확산과정 때문에 투과된 광분포는 확산된다. 따라서 방 근처의 주간채광이



[그림 2] 태양열난방 및 자연채광용 TIM-PCM 외벽 시스템의 시작품

안락하게 해준다.

용융과정은 저장물질 자체가 투사된 일사량을 일부 흡수함으로써 이루어지며, 이 저장된 태양 에너지는 시간차이를 두고 난방을 목적으로 사용될 수 있다. 저장장치의 내부 표면으로부터 실내로의 열전달 메카니즘은 자연대류 및 적외선 일사량이다. 전달과 같은 자동조절 효과는 내부 저장장치의 표면과 안쪽 실내의 온도차에 의존한다. 투명 단열덮개는 저장장치로부터 주위로의 열손실을 줄여준다. 여름철의 과난방을 방지하기 위하여는 바깥쪽 표면에서 높은 태양 반사율을 가진 롤러 블라인드가 설치될 수 있으며, 야간에는 닫혀져서 난방철에 열손실을 감소시킨다.

2.2 저장물질

PCM으로서 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 의 사용은 Swaton[®]에 의해 맨 처음으로 제안되었다. Lane^⑥은 순수물질에 첨가제(additive) 넣으므로써, 특히 과냉(supercooling)을 억제하고 장기적 안정성을 검토하는 등 열적특성을 향상시키기 위한 첨가제를 넣은 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 에 기초한 상용화 가능한 PCM을 사용하여 실험을 수행하였다. 이 물질은 192 J/g의 용융엔탈피와 24~29°C사이의 용융온도를 보여준다. Porisini^⑨는 소량으로 이 PCM의 장기 안

정성을 시험하였는데, 5650번의 용융/응고 사이클 후에도 열적특성에 아무런 변화가 없음을 알았다. 실험을 통해서 단지 약간의 과냉효과, 즉 경제조건에 의존하는 대략 1~3K 정도가 관찰되었다. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 은 전형적으로 길고 막대기 같은 육사각형 단면의 결정으로 응고된다. 이 결정은 끝에서 더 급속히, 또 측면에서는 더 천천히 성장하기 때문에 결정들 사이에는 더 천천히 응고하는 다수의 액체 포켓(liquid pocket)이 혼하게 존재한다.

3. 실험

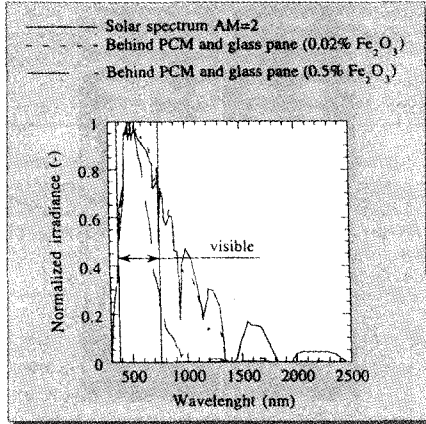
3.1 광학 및 열적 모델링

과장에 강하게 의존하는 광학적 특성을 가진 물질이 벽 시스템에 사용되어졌기 때문에 투사된 태양일사량은 총에너지의 5%를 나타내는 과장간격 20으로 나누어 졌다. 광학 시스템 계산은 각각이 간격으로 나누어 수행되었다. 전체 일사량은 빛과 등방성-반구(semispherical)요소로 나누어졌다. TIM의 광학적 모델링에서 빈 원추형 분포의 빛 일사량으로 가정되었으며, 투사각에 대한 투명단열재 안의 투과율 및 2차 열유속의 의존성이 고려되었다. PCM은 낮은 온도에서 비등방성 확산효과를 보이기 때문에 Monte Carlo 기법이

PCM의 광학적 특성을 모사하기 위해 선택되었다. 에너지의 양을 나타내는 투사광은 경계층을 통과함으로써 산란되거나 저장물질 안으로 흡수된다. 광학법칙 및 재료의 특성에 따른 임의의 수 및 확률분포 등을 이용하여 광이 반사되는지 혹은 투과하는지를 컴퓨터를 사용하여 결정하였다. 그리하여 맨 나중에 모든 반사, 흡수 및 투과된 광을 계산함으로써 전체 반사율, 흡수율 및 투과율 등이

산출되었다. 입자들은 임의의 방향으로 산란되는 것으로 가정되었으며, 흡수율 및 산란계수 등과 같은 광학특성은 물질(재료)의 온도분포의 함수로 고려하였다. 흡수된 광은 PCM층에 수직인 공간좌표의 함수로서 저장물질의 열적모델에서 열원의 기능을 하도록 하였다.

3.2 광학 물질의 물리적 특성에 대한 시험



[그림 3] 유리/PCM/유리 시스템 전후면의 태양일사량의 스펙트럼 분포

분광광도계(spectrophotometer)에서 시작품의 벽에서 사용된 유리용기에 담긴 시편의 스펙트럼 투과율은 파장간격 350~2500nm에서 측정되었다. 직경이 150mm인 완전한 구와 함께 동일한 분광광도계를 사용하여 두께가 10mm와 20mm인

2가지 PCM 시편의 스펙트럼 반사율이 2가지 온도에서 측정되었다. PCM은 액체상태에서 유리용기에 채워졌는데, 용기안에는 순환유체로 PCM이 일정한 온도가 유지될 수 있도록 하였다. 분광광도계에서 일사량의 투사각은 8°였다. 액상에서 산란효과를 무시하면 흡수계수는 파장의 함수로 계산된다. Freiburg에 있는 Fraunhofer태양열시스템 연구소에서 설치된 실험장치에서는 PCM 결정에서 산란된 광의 분포가 측정되었다. 레이저 빔은 두께 1.5mm의 PCM 시편에 쏘여진다. 좁고 전방향 분포의 비편광 산란광이 감지되었다. PCM의 굴절지수는 Abbe 굴절계에서 측정되었는데, 여기서는 지수를 결정하기 위해 총 반사율 각을 사용한다.

두 유리층 사이에서 두께 10mm인 액체 PCM의 경우에 투과된 광의 스펙트럼이 산출되었다. 철 산화물을 작게 함유하고 있는 두 개의 유리창 사이에 있는 PCM 층은 일사광의 스펙트럼을 변화시키지 않는 것으로 밝혀졌다(그림 3). 광학 선택벽 시스템의 개념을 이해하기 위해서는 철산화물을 많이 함유하고 있는 하나 또는 두 개의 유리창이 사용될 수도 있다. 결점으로 유리가 약간 초록색 빛을 띠우는 것으로 나타날 수 있다.

3.3 시작품 정면에 대한 실험

TIM-PCM 벽의 시작품은 야외시험장에서 설치되었으며, 1993년 11월부터 1994년 4월 사이의 기후에서 시험되었다.

집열기의 구경은 720mm×1200mm였다. 벽의 방향은 남으로부터 30° 비껴가게 설치되었다. 내부에서 외부로 총두께 278mm인 외벽은(그림 2)와 같이 이루어졌다.

- PCM으로 채워진 유리블럭(총두께 80mm)
- 철 산화물 성분이 적게 함유된 유리(4mm)
- PMMA(120mm)로 만들어진 모세관 구조
- 롤러 블라인드(roller blind)를 가진 공기층(air

gap)

- 철 산화물이 작게 함유된 2번째 유리(4mm)

냉·난방 실험장치에서 시작품 벽위의 공기온도는 20°C로 제어되었다. 2분의 시간간격으로 58개의 파라미터가 측정되고, 그 평균값이 1시간 간격으로 저장되었다. 측정된 기상변수들은 공기온도 및 직달 및 산란일사량 등이었다. 벽 시스템의 측정된 데이터들은 수많은 온도(주로 PCM 내부)와 열유속 및 벽 뒤편의 일사량 등이다. TIM-PCM벽으로부터 공기층으로 전달된 열량은 2가지 방법으로 측정되었다. 즉 냉·난방층에 놓여진 열유속 센서로, 그리고 액체의 질량유속과 함께 냉·난방 순환장치의 입구 및 출구의 온도를 측정함으로써 얻을 수 있었다.

높이 및 너비는 벽의 두께와 비교하여 상대적으로 아주 크게 설계되지 않았기 때문에 알루미늄 박막(foil)은 광의 반사층으로서 벽 시스템 주변에 고정되었다. 주변 요소들에 의한 차폐 때문에 벽의 중앙에 있는 유리블럭이 적어도 경제효과에 의해 방해받기 때문에 측정치와 계산치 사이의 최적비교를 위해서는 중앙 유리블럭으로부터의 실험데이터가 고려되었다.

4. 결과

여기서 나타낸 시뮬레이션 결과는 설계기준년도(design reference year : DRY) 기상데이터 파일로부터 뿌리허공항의 기상데이터를 사용하여 살펴본 것이다. DRY 데이터 파일을 생성해 내기 위한 알고리즘은 Skartveit⁽¹⁰⁾ 등에 의해 기술되어 있다. <표 1>은 2가지의 DRY 뿌리허공항 데이터의 기상변수에 대한 월간 평균치를 보여준다. 시작품 벽에 대한 측정 동안 경제조건을 비교해 볼 때 이 데이터는 다소 청명하나 오히려 추운기후인 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고 뿌리허공항의 기후조건은 대략 스위스 저지지방의 인구

<표 1> 외기온의 월간 평균값 및 수직 남향정면에 투사된 전체 태양일사량

	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr
\bar{T}_a (°C)	10.0	7.9	1.7	0.4	0.3	5.6	8.3
G (W m ⁻²)	186	64.1	48.4	66.8	100.3	123.3	126.1

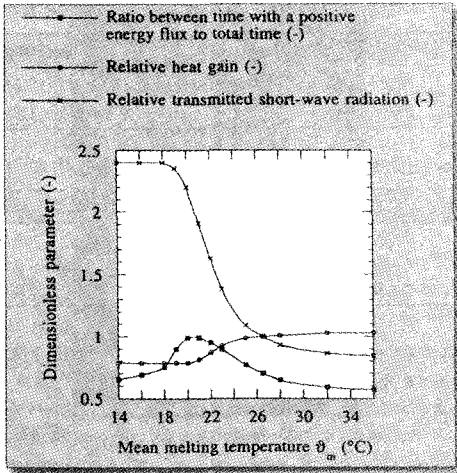
<표 2> 실내전달 총에너지의 월간 평균값, 저장장치의 표준엔탈피 및 시스템 효율

	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr
q_{110} (W m ⁻²)	37.5	21.4	13.3	21.4	34.9	48.4	41.7
γ (-)	0.31	0.11	0.07	0.10	0.28	0.47	0.40
η (-)	0.38	0.33	0.27	0.32	0.35	0.39	0.33

가 밀접한 지역을 대표하는 것으로 고려될 수 있다. 내부경제조건으로 20°C의 일정한 실내온도가 가정되었다. 그리고 20°C의 일정한 저장온도가 초기조건으로 선택되었다.

<표 2>는 여러 가지 변수를 사용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이 표에서는 가장 일사량이 작은 12월달에 실내로 들어간 평균 총 에너지유속은 13.3W/m²인 것으로 나타났다. PCM의 평균 7%가 용융되었고, 이 달의 시스템의 효율은 27%인 것으로 나타났다.

다른 모든 시스템 변수들을 고정하고 평균 용융온도를 변화시켜보았다. 그 결과 온도 의존적인 광학 및 열적성질은 온도축을 따라 이동되었으며, 시스템 이득에 대한 영향이 조사되었다. 3가지 변수가 시뮬레이션 결과를 기술하기 위해 사용되었다. 첫 번째는 남향벽을 통한 건물의 에너지 이득량을 갖는 시간과 총 시간 사이의 비이다. 비가 1인 경우는 건물이 고려된 시간간격 동안 남쪽면 벽을 통한 에너지 손실이 없다는 것을 나타낸다. 이 비는 태양이득량의 이용과 아주 관계가 있다. 추가하면 나머지 2개 변수, 즉 열 이득의 상대량과 단파 일사량 이득의 상대량이 정의된다. 시작품의 평균 용융온도인 26.5°C에서의 이득량은 앞에서 정의된 이득량을 표준화하기 위해 사용되었다. 시뮬레이션은 11월 1일부터 이듬해 1월 31일 사이의 DRY 뿌리허공항 데이터를



[그림 4] 총시간에 대한 건물에너지의 이득량이 있는 시간의 비와 열 및 일사 이득의 상대량

<표 3> 실내로 들어간 총에너지 유량의 월간 평균값, 저장장치
의 표준엔탈피 및 시스템 효율(외벽이 불투명한 경우)

	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr
$q_{\text{ave}} (W m^{-2})$	41.6	24.0	13.3	25.9	39.5	53.0	46.8
$\bar{\gamma} (-)$	0.69	0.33	0.14	0.28	0.58	0.72	0.7
$\bar{\eta} (-)$	0.42	0.40	0.42	0.39	0.39	0.43	0.37

가지고 수행되었다. [그림 4]를 보면 보다 낮은 용융온도에서는 투과된 단파 일사량의 양이 더 커지는 것으로 나타난다. 이는 평균적으로 액상의 양이-산란 PCM이 아니라-이 경우에 더 많은 것으로 나타나 보다 높은 투과율을 보이기 때문이다. 그러나 보다 낮은 평균 용융온도에서는 실내로 들어가는 열에너지량이 감소하게 된다. 시간 비는 20 및 21°C에서 최대가 된다. 단지 이 경우에 시간의 1% 동안에 정면을 통한 에너지 손실이 나타난다. 만일 평균 용융온도가 실내온도로부터 상당히 벗어나는 값으로 선택된다면, 접근 값들이 얻어진다. 그리고 이 영역 안에서는 단지 현열저장만이 일어난다. 벽 시스템을 최적화하기 위해서는 건물의 특성이 역시 고려되어야 하며, 여기서 적당한 평균 용융온도는 대략 20°C ~ 27°C의 온도간격 안에서 위치해야 하는 것으로

여겨진다.

이상의 변수조사에서는 불투명하고 검은 PCM 저장용기의 외부표면이 전체 태양일사량의 0.9인 흡수율을 갖는 것으로 가정되었다. 이러한 시스템에서는 광이 전혀 실내로 투과되지 않으나-낮은 광학손실로 인하여-시스템 효율이 증가된다(표 3). 이러한 장치를 추진하기 위한 에너지 전달 메카니즘은 복사가 아니라 열전도 및 가능한 대류이다.

5. 결론 및 전망

M-PCM 외벽시스템이 실험적으로 조사되었으며, 상변화물질 에너지 저장의 긍정적 효과가 나타났다. 즉 건물안으로 들어가는 에너지유속이 평등하게 분포되기 때문에 태양열 이득량의 높은 이용율을 기대할 수 있다. 선택된 PCM의 문제점은 열과 광 이득량의 감소를 가져오는 고체상태에서 태양일사량의 후면확산이 있는 점이다. 변수 조사로부터 평균 용융온도가 대략 26.5°C부터 21°C로 감소하는 경우가 유용한 것으로 나타났다. 소량 시료의 시험에서 유망한 것으로 나타난 CaCl₂·6H₂O-PCM 혼합물의 장기 안정성(수명)은 수 킬로그램의 PCM 시료에 대하여 해당된다. 그렇지 않으면 유리용기안의 체적을 나누고 분정(segregation)을 방지하는데 사용되는 투명구조물이 고려되어야만 한다. 그리고 5개월여 동안의 시제품 시험에서 분정은 관찰되지 않았으며, 다른 PCM의 사용에 대해서도 고려되어야 할 것이다. 한편 시스템을 건물에 적용하기 전에는 안정성에 대한 문제가 보다 조사되어야 한다. 가장 최악의 경우는 차양시스템의 고장인데, 이는 유리용기의 기계적 파괴가 생겨날 가능성이 있기 때문이다. 최근에 스위스 연방 재료 시험연구소의 한 실험실에서는 2번째 시험 벽에 대한 안정성과 미적 문제를 연구하기 위해 건설 중에 있다.