

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 22, No. 1, 2002

완전유리식 진공관형 집열기의 성능 개선에 대한 연구

강상훈*, 천원기*

* 제주대학교 에너지공학과(첨단기술연구소)
E-mail : wgchun@cheju.ac.kr

A Study on the Performance Improvement of All-Glass type Solar Vacuum Collectors

Sang-Hoon Kang, Wongee Chun*

Department of Nuclear & Energy Engineering
Cheju National University(Research Institute of Advanced Technology)
* wgchun@cheju.ac.kr (corresponding author)

Abstract

This study has been carried out to study the thermal performance of an all-glass type solar collector tube when a heat transfer medium is used with a heat storage unit capable of preventing pressure build-up within the tube. The heat storage unit is devised such that it performs the dual function of relieving excessive pressure and storing solar thermal energy. Different types of heat storage medium are tested under heat-up phase of a collector tube. It is found that the proposed unit could be used quite effectively if one wishes to capitalize more aggressively in harnessing the solar energy.

Key words : all-glass evacuated tube, 열팽창흡수 및 축열 장치.

■ 기호 설명 ■

Q_w : 집열 에너지(W)

A_a : 집열 면적(m^2)

I_t : 집열면 일사량(W/m^2)

τ : 투명 덮개 투과율

a : 흡수판 흡수율

U_L : 열 손실 계수 ($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$)

\bar{t}_p : 흡수판 표면의 평균 온도 (°C)
 t_a : 외기 온도 (°C)

1. 서론

지금 세계적으로 환경과 에너지에 대한 관심과 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 환경이 깨끗한 국가일수록 삶의 질적인 면이 풍요롭다는 말이 된다. 세계 여러 선진국에서는 이러한 환경문제와 에너지문제를 해결하고자 대체에너지 개발에 많은 비중을 두고 있다. 태양력, 풍력, 수력, 지열 등의 에너지원을 활용한 대체에너지는 무공해이면서 그 자원의 고갈성이 없다는 장점이 있다. 이중 태양열은 무한하며, 또한 다양한 형태로 이용될 수 있다.

기존에 평판형 태양열 집열기는 가격이 저렴하고 어느 정도의 효율을 유지하기 때문에 일반가정에서 주로 사용하였고, 진공관식 집열기는 주로 히이트파이프식으로 실험용이나 대규모 시설에 주로 이용해 왔다. 하지만 여기서 소개하는 이중 유리식 진공관형 집열기는 그 성능이 우수하고, 기존의 다른 진공관형 집열기에 비해 경제성이 우수하다.

진공관형 태양열 집열기는 유리튜브 형태로서 태양열을 집열하는 표면과 접하는 폐쇄된 공간을 진공처리하여 대류에 의한 열손실을 최소화시킬 수 있도록 만들어진 것이다. 진공관은 크게 히이트파이프식과 완전유리식의 형태로 사용되어진다. 히이트파이프식의 경우 유리튜브의 상단을 금속재질의 마개로 밀봉시킴에 있어서 유리와 금속의 접합문제로 인해 내구성과 경제적인 부분에 대해 문제가 있었다.

완전유리식 집열기의 경우 본체의 제작에는 문제가 없지만 물을 집열기 내에 직접 채워서 사용하면 동절기, 혹한기에 동파문제와 태양열에 의해 가열된 집열기 내에 물이 갑자기 유입되면 열응력

에 의해 집열기가 열쇼크현상이 발생하여 파손되는 문제가 있었다.

이에 본 연구에서는 완전유리식 진공관형 태양열 집열기의 적용성 제고를 위해 완전유리식 집열기에 열매체(부동액: 에틸렌글리콜 50%)을 사용하고 아울러 태양열 이용의 극대화를 위해 축열매체를 사용할 수 있는 방법을 고려함에 있어 액상의 열매체의 가열에 의한 부피 팽창으로 인한 집열기 내부의 과도한 압력 상승을 억제함과 동시에 효율적인 축열을 기할 수 있는 장치(이하 "열팽창 흡수 축열 장치"라 지칭함, 특허 출원 10-2001-0015293)를 설계·제작하여 이의 열성능을 분석하였다. 장치는 우선 상기의 역할을 수행함에 있어 가장 간단한 형태로 설계·제작되었으며, 그 외의 다양한 형상에 대하여도 간단히 소개하기로 한다.

2. 이론적 고찰

집열 효율과 집열 성능을 집열기에 따라 다소 차이가 나는데 그 이론적 산술치는 다음과 같은 가정 및 수식(equation)을 이용하여 체계적으로 구할 수 있다. 안정된 상태하에서 어떤 주어진 시간 동안에 태양열 집열기가 취득한 에너지는, 흡수판에서 흡수한 에너지와 주위로 손실된 에너지와의 차이이다. 이와 같은 관계를 식으로 표현하면 다음과 같다¹⁾.

$$Q_w = A_c [I_t \tau \alpha - U_L (\bar{t}_p - t_a)] \quad (1)$$

집열판의 성능을 극대화하려면 위의 식 (1)에서 $I_t \tau \alpha$ 값을 최대한으로 크게 하고, $U_L (\bar{t}_p - t_a)$ 값을 최소로 줄일 수 있도록 설계하고, 가동 조건도 적절히 선택하면 된다. 이와 같이 집열기의 성능은 태양열의 흡수량과 집열기로부터의 열 손실 등 두 가지 요소에 의해 좌우된다. 완

전유리식 태양열 집열기의 경우를 평판형의 그것과 비교하여 살펴보면 식(1)에서의 U_L 의 값이 상당히 작게 실측되어 진다. 이는 평판형과는 달리 흡열면 역할을 하는 안쪽 유리튜브의 외측 표면과 바깥쪽 튜브 사이의 공간이 진공으로 처리되어 대류에 의한 열손실을 근본적으로 차단하였기 때문이다.⁸⁾

3. 실험장치 제작 및 실측

3.1 상변화 물질의 열역학적 성질

본 실험에서는 여러 가지 형태의 상변화물질 중에서 저온 상변화 축열재로 사용되는 물질중에서 대표적으로 사용되는 초산나트륨 수화물 ($CH_3COONa \cdot 3H_2O$)과 파라핀(paraffin wax)를 이용하였다.²⁾

무기염의 수화물은 일반적으로 용융잠열과 열전도도가 크며, 열역학적 특성이 축열매체로서 적합한 물질이다. 그러나 과냉각과 상분리 현상이 일어나는 단점을 갖고 있다. 많은 종류의 무기염 수화물중에서 그 특성이 이번 실험에 적합한 것으로 판단되는 초산나트륨 수화물을 이용하였다.^{3), 4)}

초산나트륨 수화물은 용융열이 63cal/g이고, 비열이 약 0.7cal/g°C로서 그 값이 높은 편이며 부식성이나 흡습성이 없고 약 10°C의 과냉각 온도에서 2.4mm/sec의 결정 성장속도를 갖고있으며 용융시 약 11%의 부피팽창을 한다. 초산나트륨 수화물은 과냉각이 커서 상온까지 냉각시켜도 결정이 석출되지 않는데 여기에 $Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$ 를 첨가하면 35°C~70°C에서 1000회 이상의 반복실험을 하여도 용융은 58°C정도에서, 결정화는 53°C에서 일정하게 일어나므로 과냉각 현상이 상당히 줄어든다.

또 다른 상변화 물질인 파라핀은 취급이 쉽고 온도범위가 다양하며 과냉각이나 상분리 현상이

없는 물질이다. 그러나 증기압이 높고 축열용량은 무기염의 수화물보다 대체로 작은 편이다.

파라핀은 C_nH_{2n+2} 로 표시되는 포화 지방족 탄화수소를 주성분으로 하는 물질로 용융점은 6~80°C의 분포를 갖고, 상변화에 따른 부피변화가 10%정도가 된다. 파라핀은 가격이 저렴하고 반응성이 없으며, 사용온도에 따라 그 선택의 폭이 넓으며, 과냉각 현상이나 상분리 현상이 없는 것이 장점이다.^{5), 6), 7)}

3.2 열팽창흡수장치

본 실험을 수행하기 위해서 먼저 구리동판을 이용하여 사각기둥형태의 열팽창흡수장치를 제작하였다. 여기에 사용된 동판은 외부의 압력변화에 따라서 변형이 쉽게 일어날 수 있도록 0.1mm 두께로 하였다. 이렇게 제작된 열팽창 흡수장치를 완전유리식 집열기 안에 넣고 그 주변에 물을 넣고 열전도율이 좋은 마개를 끼워 넣은 형태이다. 아래의 Fig. 1은 위에서 설명한 내용을 간략하게 도식화한 것이며, 기존에 사용되고 있는 완전유리식 진공관형 집열기의 문제점을 보완하기 위해 고안된 것이다.

Fig.1에 그려진 장치(특허 출원 10-2001-0015293)의 작동원리는 다음과 같다. 먼저 집열기에서 받아들인 열이 부동액에 전달되어 온도가 상승하면 열팽창흡수 및 축열을 위해 집열기 내부에 장착한 장치(열팽창흡수 축열 장치) 내부에 있는 상변화 물질이 물로부터 열을 전달받아 고체에서 액체로 변하게 된다. 어느 정도 가열되면 유리관 내부에 압력이 증가하게 된다. 이때 연성이 좋은 구리판으로 만든 열팽창흡수 축열 장치가 수축하면서 압력을 흡수하게 되는 것이다. 이때 고체에서 액체로 변한 상변화 물질은 공기가 차 있던 부분으로 조금씩 이동하게 된다. 즉, 사각실린더 내부의 압력은 항상 대기압과 같게 되는 것이다. 사각실린더 내부에 채워진 상변화 물질의 기능은 일사량이 적어지게 되는 시점에서 액체에서 고

체로 변화하면서 부동액으로 열을 주게 된다. 즉 적은 양이지만 축열을 하게 되는 것이다. 또 하나의 기능은 사각실린더가 압력을 받아 수축되었다가 다시 원래대로 복원 될 때에 그 복원력을 높여 주는 기능을 하게 된다. 이와같은 장치를 사용하면 기존 완전 유리식 태양열 집열 튜브가 가지고 있는 재질 상의 문제점(동파, Thermal Shock 등)을 해결할 수 있으며 아울러 집열 튜브를 축열조에 삽입하여 이용하는 형태도 집열 튜브와 축열조를 따로 취급할 수 있어 축열조의 내압 변화에 따른 집열 튜브의 분리 파손 등을 막을 수 있다. 또한 기존의 U자형 형태의 구리 관이나 히이트 파이프를 이용한 방법보다 그 내구성 및 경제성이 뛰어나다고 할 수 있다.

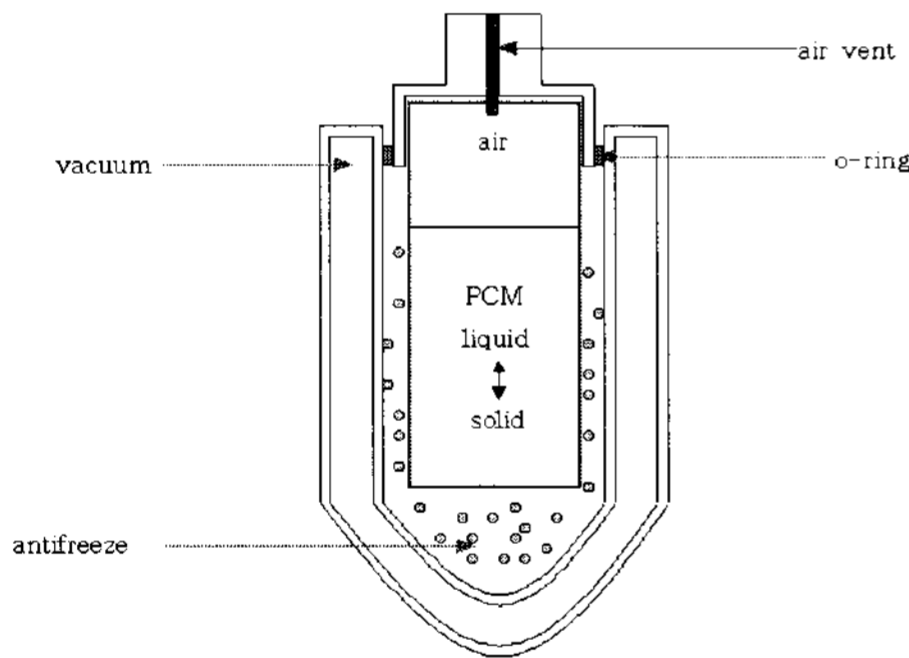


Fig. 1 Schematic of all-glass tube equipped with a pressure relief device capable of storing heat

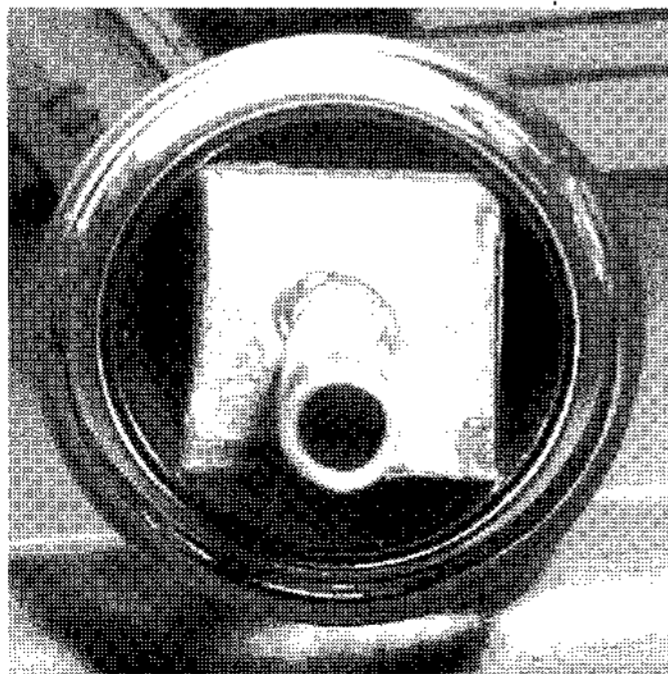


Fig. 2 A view from top

Fig. 2는 열팽창흡수 축열 장치를 완전유리식 진공관형 집열기에 삽입한 형태이다. 열팽창흡수장치와 유리관 사이에는 부동액이 채워지게 된다. Fig. 3은 상변화 물질과 부동액의 온도변화를 측정하기 위해 열전대를 삽입한 사진이다.

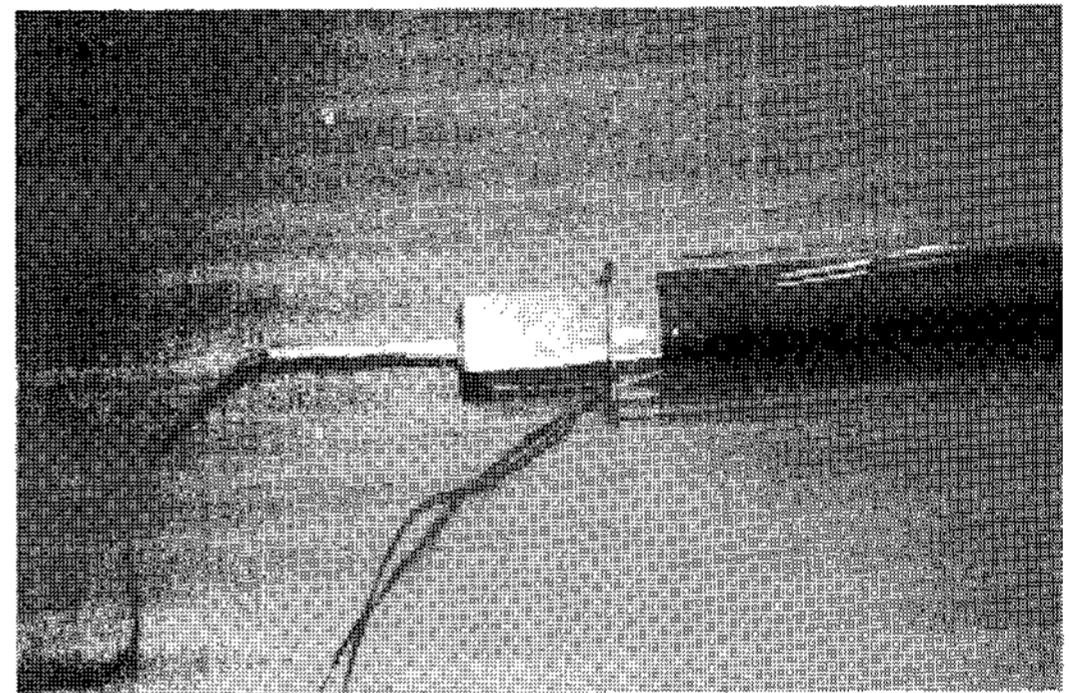


Fig. 3 A side view with inserted thermocouples

3.3 데이터 수집

온도 측정을 위한 열전대(thermocouple)는 K 타입을 사용하였으며, 열팽창흡수 축열 장치 내부에 상·중·하로 설치되었고, 열팽창흡수 축열 장치와 유리튜브 사이 부동액에 상부와 하부 그리고 대기온도를 모니터링 할 수 있도록 각각 설치하였다. 자료획득시스템(HYDRA: Data Acquisition System)을 이용하여 매 2분마다 자료를 수집 기록하였다. 열전대는 설치에 앞서서 측정에러를 줄이기 위해 열전대 보정작업을 수행하였다. 삽입될 모든 열전대는 데이터 수집장치에 연결하고 항온조를 이용하여 0°C~100°C사이의 범위에 걸쳐서 보정작업을 하였다. 보정된 열전대는 ±0.5°C 이내의 오차범위를 갖도록 보정하였다.

3.4 실험방법

실험은 본 연구팀에서 간이로 제작한 완전 유리식 진공관형 태양열 집열관을 위한 옥외 실험

용 태양열 집열 장치를 이용하여 일조량이 양호한 시간대에 실외에 실험장치를 설치하여 실시하였다. 태양에너지의 조사와 함께 집열관 내부에서는 상기 3.2에서 상술한 바 있는 물리적 현상이 일어나 태양열의 효율적인 집열과 축열을 피하게 되는데, 사각실린더 내부는 약 2/3가량이 상변화 물질로 채워져 있어 사각실린더 내의 데워진 공기의 일부가 상단의 통기 파이프를 통해 대기로 빠져나가면서 일정한 압력을 유지하게 된다. 본 연구에서는 몇 가지의 상변화물질과 열팽창흡수장치를 이용했을 경우와 부동액을 이용한 단순한 현열 저장을 위해 열팽창흡수장치를 이용했을 경우의 실측 결과를 보여주고 있는데 열팽창 흡수장치는 현열과 잠열을 모두 이용할 수 있을 뿐 아니라 이를 이용하면 집열 튜브의 크기를 임의로 설계하여 태양열의 집열을 피할 수 있다. 기존의 집열 튜브는 외경이 47mm 혹은 58mm 등으로 제작되고 있는데 이는 집열 튜브를 크게 만들어 집열 면적을 늘리고자 할 때 집열기 내부에 충전되는 열매체의 양이 너무 커져 가열 온도가 낮거나 가열 시간이 길어지기 때문이며 또한 "U" 자형의 관이나 히이트 파이프를 이용할 때도 그 적용성이 떨어지기 때문이다. 열팽창흡수

장치의 적용은 열매체를 가열하고 이를 이용하여 다시 물을 가열하는데 있어 번거로운 "U"자형 관이나 히이트 파이프를 쓸 필요도 없고 또한 "U"자형 관이나 히이트 파이프를 이용하는 기존의 방법에서 발생하는 집열 튜브 내측의 전도판과 "U"자형 관이나 히이트 파이프와의 접촉 열저항도 고려할 필요가 없다. Fig. 4는 옥외에 설치된 실험장치 모습이다.

4. 결과 분석

4.1 실측 결과

측정된 데이터를 분석한 결과는 Fig. 5, 6, 7 그리고 8에서 자세히 소개하고 있다. 이들 그림 중 Fig. 5는 부동액만 사용한 결과를 나타내고 있는데 이는 액상의 잠열재가 열팽창 흡수 장치의 복원에 미치는 영향을 평가하며 아울러 상온에서 액상으로 존재하는 잠열재의 열적 성질을 파악하기 위함이다. 이 그림에서 보면 사각실린더 내부와 진공관의 온도차가 거의 없이 일정하게 상승하고 있음을 알 수 있다.



Fig. 4 Outdoor experimental apparatus

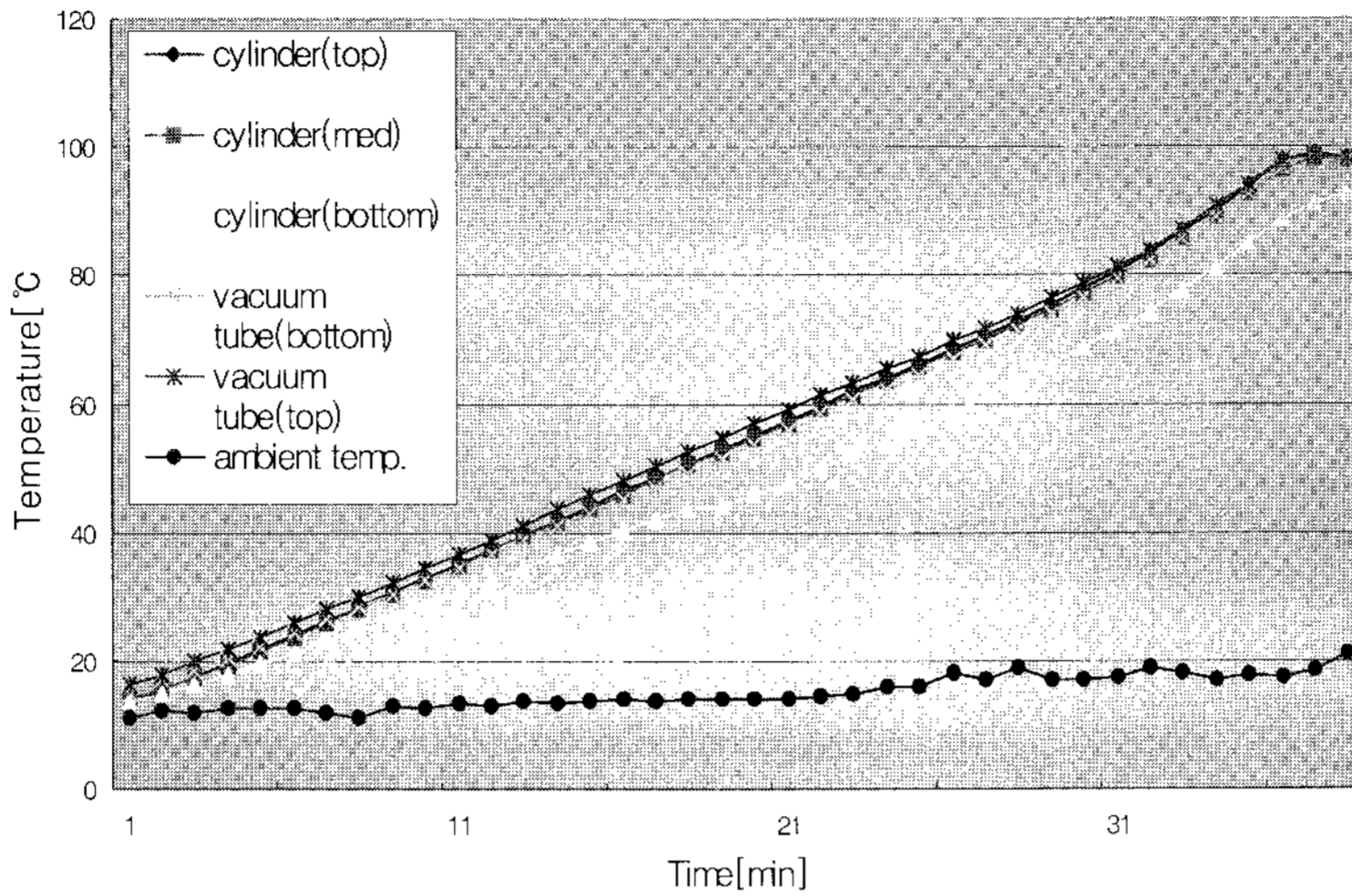


Fig. 5 The case when antifreeze is used as heat storage medium

Fig. 6은 상변화 물질인 초산나트륨 수화물을 넣고 실험한 것이다. 50~60°C사이에서 조금의 상변화가 일어나는 것을 알 수 있었다. 그림에서 상변화가 일어나는 부분이 이렇게 완만하게 경사지는 정도로만 나타나는 것은 집열된 태양열에 의해 초산나트륨이 고체에서 액체로 짧은 시간 내에 빠르게 상변화를 일으키기 때문이며 이는 실제로 육안으로 확인할 수 있었다. 또한 사각실린더 내의 온도와 진공관 사이 부동액의 온도차는 집열기 내부의 위치에 따라 차이가 나는데 집열기 상부의 온도가 하부와 현격한 온도차를 나타내며 집열기 내부의 부동액의 자연순환에 의한 유동을 짐작케 한다.

Fig. 7은 파라핀 왁스를 넣고 실험한 것으로 위에서 실험한 초산나트륨에 비해 상변화가 일어나는 것을 뚜렷하게 볼 수 있다. 이는 초산나트륨에 비해 확실하게 잠열재가 액상에서 고상의 상태로 바뀌고 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다. 이 그림에서 보듯이 상변화 약 60°C 부근에서 일어나고 있다.

한편, Fig. 8의 그림은 그 상변화 온도가 58°C인 PCM을 이용하여 제작된 미세 캡슐(Fig. 9)을 열팽창 흡수 장치 내에 물 혹은 부동액을 섞어 넣었을 때의 실측치를 나타내고 있다. 미세 캡슐은

$\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (sodium acetate trihydrate)라는 물질로 만들어 졌으며 이의 물성치는 Table 1에 표시된 바와 같다(8). 이들 그림에서 보면 알 수 있듯이 상기의 경우에 비해 미세 캡슐을 넣었을 때 그 상변화 현상이 더욱 뚜렷하게 나타남을 알 수 있으며 이는 그 만큼 미세캡슐과 물(혹은 부동액)로 구성된 사각실린더 형상의 열팽창 및 축열을 위한 장치 내부에서 활발한 열교환이 일어남을 나타내는 것이라 할 수 있다. 즉, 미세 캡슐이 Fluidized bed를 형성하고 있는 장치의 내부에서는 상변화 물질이 외부와의 실질적인 열전달 표면의 증가로 인하여 캡슐 내부로 바로 외부의 열적 상태가 전달되고 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다. 한편, 미세 캡슐을 함유하고 있는 물질이 물 혹은 부동액이냐는 전체적인 축열 성능에는 큰 영향이 없는 것으로 나타나고 있다.

상기의 3 가지 경우의 축열매체를 이용한 실험을 통하여 본 연구에서는 열팽창흡수 축열 장치의 태양열 집열 및 축열에 관한 가능성을 확인할 수 있었으며 아울러 지속적인 가열 실험을 통하여 열팽창흡수 축열 장치가 집열기 내부의 과도한 압력 상승 억제에 관한 기능적 타당성도 검증할 수 있었다.

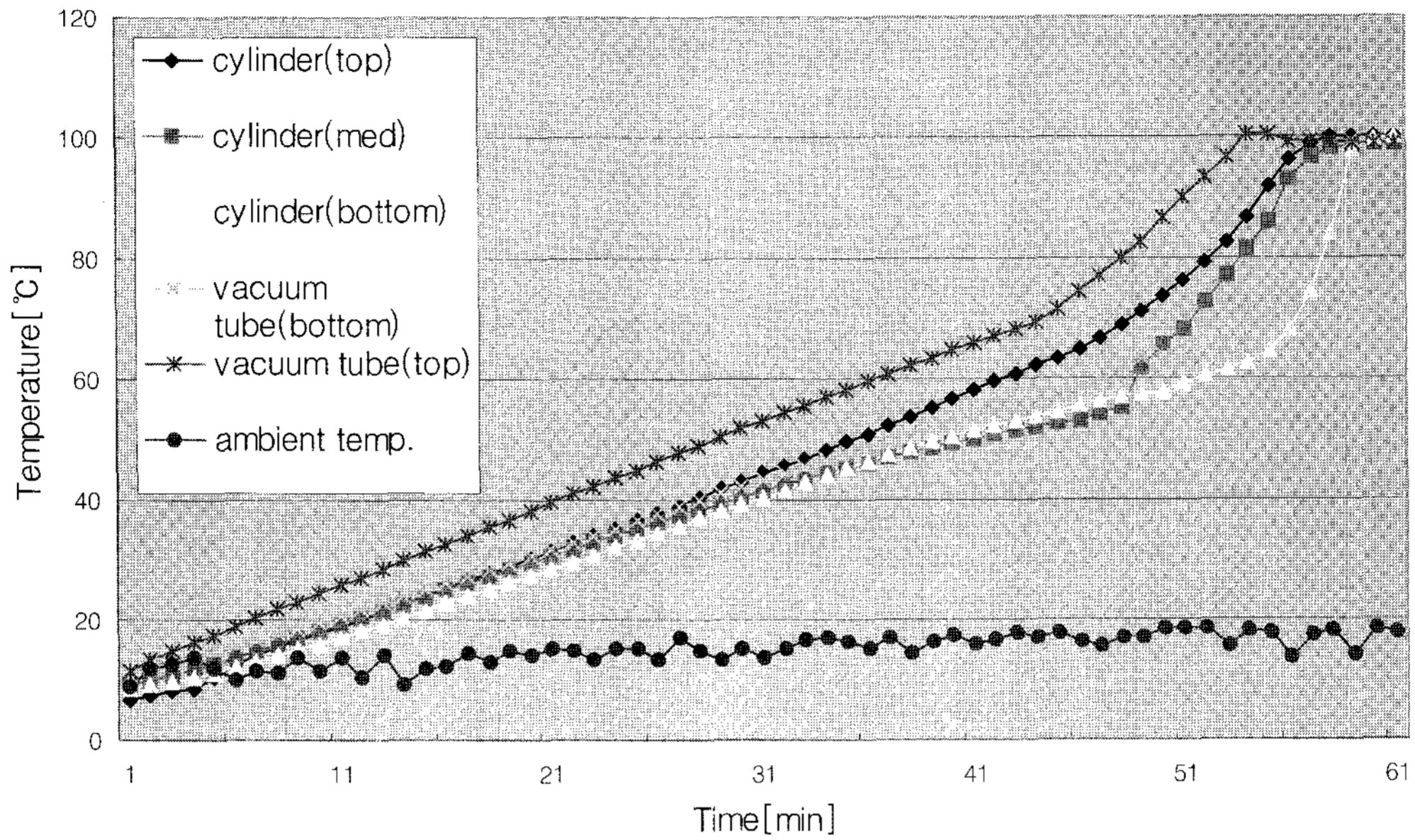


Fig. 6 The case when sodium acetate trihydrate is used as heat storage medium

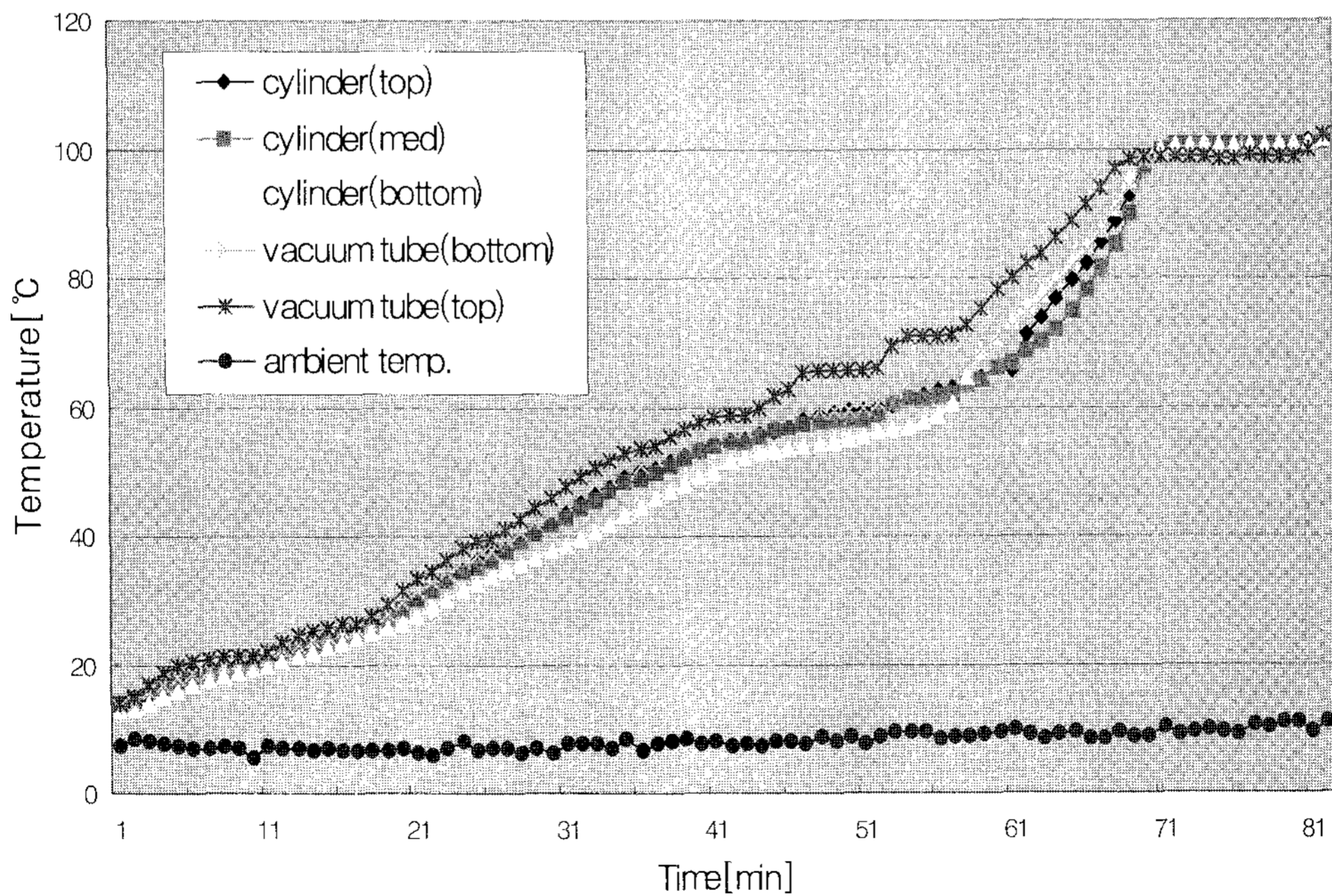


Fig. 7 The case when paraffin wax is used as heat storage medium

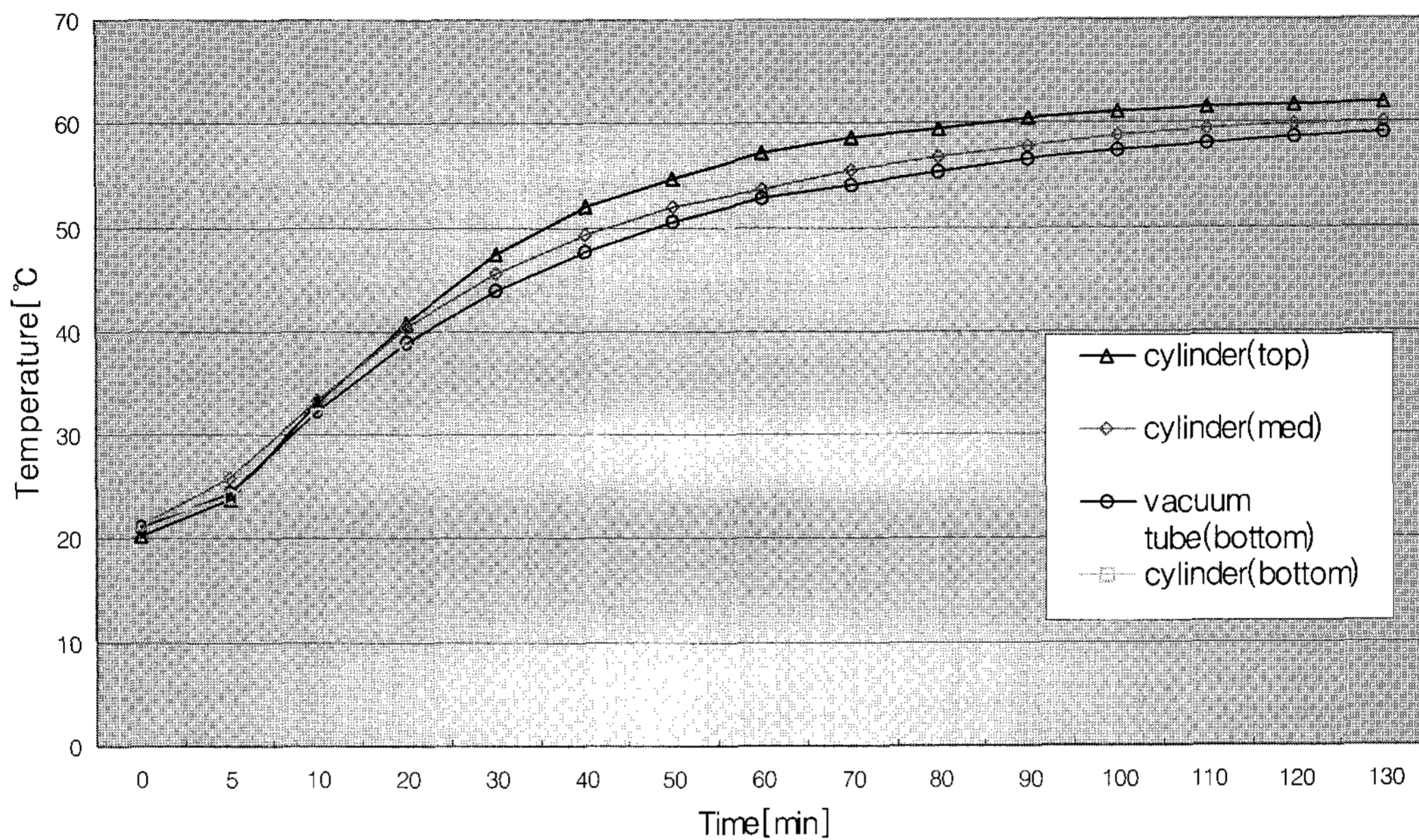


Fig. 8 The case when PCM capsules are used as heat storage medium

Table 1. Physical properties of a PCM capsule

melting temperature	58 °C
diameter	2.65 mm
latent heat	272.44 kJ/kg
specific heat(solid)	2.79 kJ/kg · K
specific heat(liquid)	3.68 kJ/kg · K
thermal conductivity(solid)	0.55 W/m · K
density(solid)	1.45 g/cm ³
subcooling temperature	10 °C
crystal growth rate	2.4 mm/sec

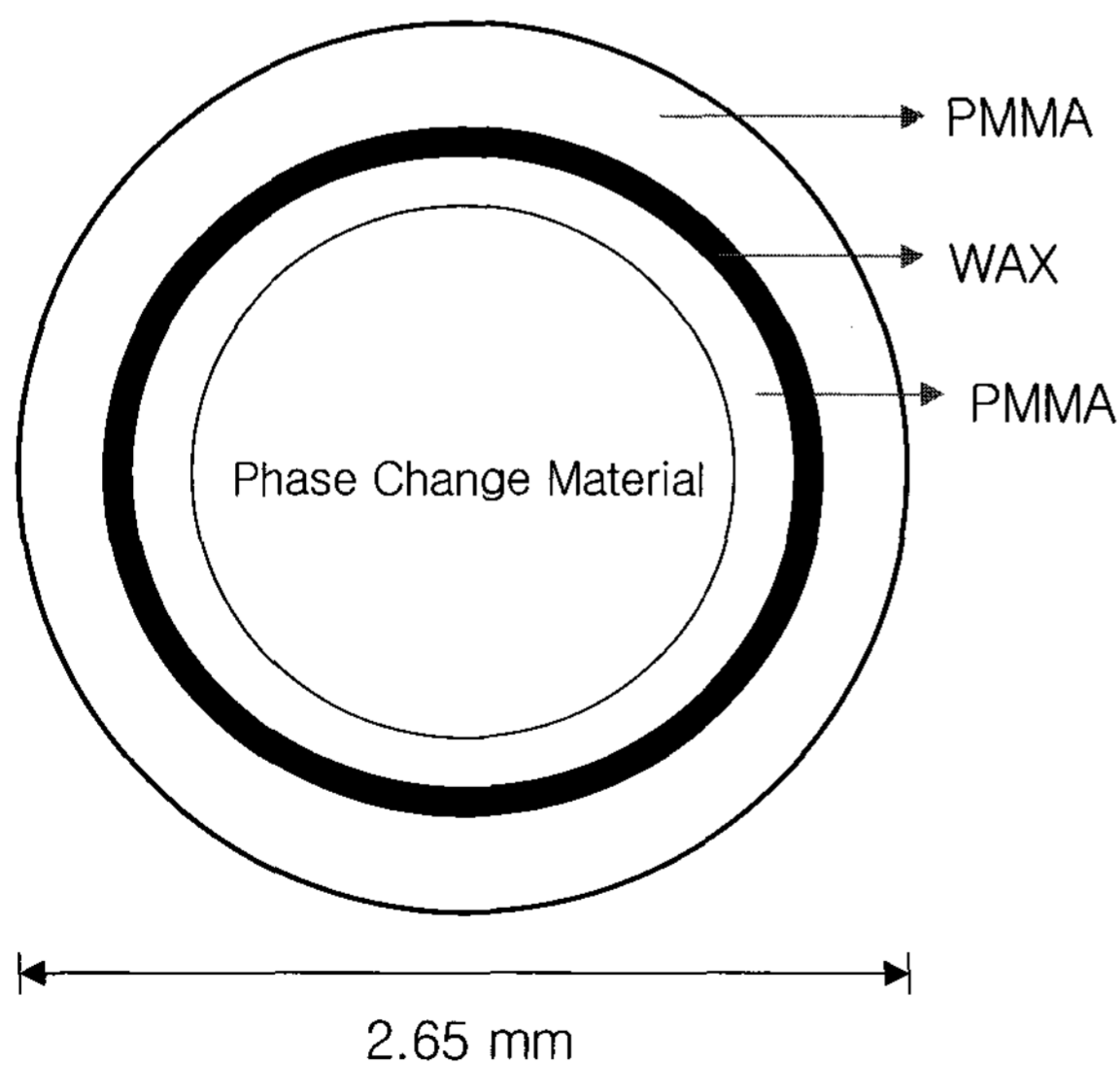


Fig. 9 Structure of a PCM capsule

4.2 시뮬레이션

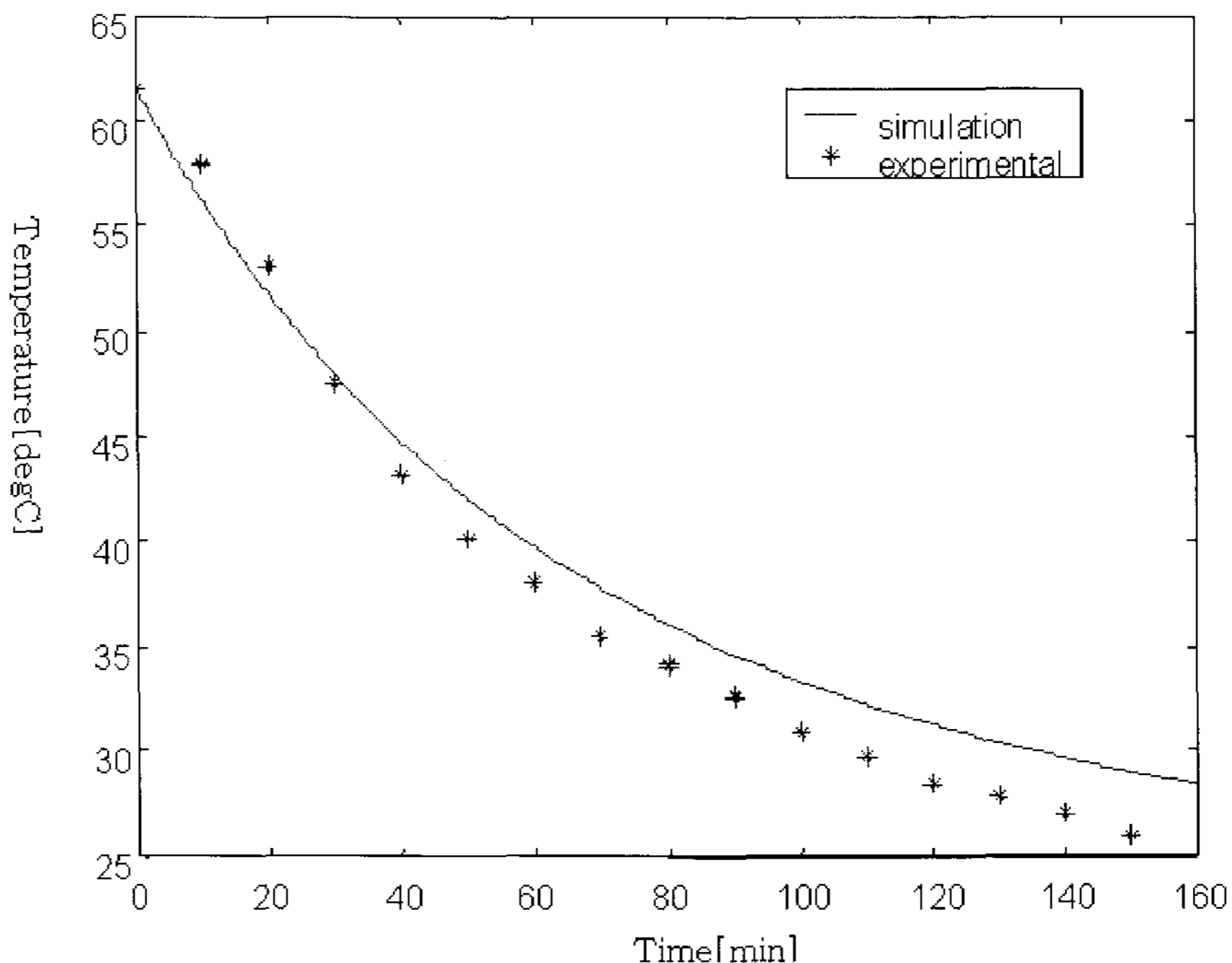
Fig. 5의 실측데이터는 사각실린더 내의 부동액과 사각실린더 외부의 부동액이 time lag이 거의 없이 시간에 따라 함께 변화하는 결과를 보여주고 있는데(실린더 하단의 온도는 일부 차이를 보임), 이를 이용하여 여기서는 아래와 같이 간단한 일차원 해석 모델을 설정하여 집열 튜브 내의 시간에 따른 온도 변화에 대한 연구를 수행하였다.

$$[(\rho cV)_{\text{pyrex}} + (\rho cV)_{\text{antifreeze}} + (\rho cV)_{\text{cylinder}}] dT/dt = Q_{\text{in}} - Q_{\text{loss}} \quad (2)$$

여기서 U_{LT} 는 본 진공 튜브 제작사(Tsinghua Solar)에서 제공한 값의 평균치 $0.75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 를 이용하였는데 이는 그들이 제시한 값의 평균치에 해당한다⁹⁾. 방열 면적은 안쪽 집열 튜브의 내경(37mm)을 이용하여 계산한 원주 길이에 집열 튜브의 높이(40cm)를 곱한 값을 사용하였다.

한편, 태양열 집열시 집열량(Q_{in})은 $q_{\text{rad}} \alpha T A_s$ 로 주어질 수 있으며 이 때 A_s 는 투영면적(projection area)을 사용한다.¹⁰⁾

Fig. 10은 Fig. 5의 경우에 있던 방열시 식(2)의 온도와 실측한 집열 튜브 내의 열매체의 평균 온도(사각실린더 내·외부의 열매체 온도의 평균값)를 비교한 것인데, 아주 간단한 모델을 이용한 계산치(MATLAB 5.3 이용)와 실측치가 비교적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 이는 제작사에서 제공한 방사율(ϵ_r)의 실측치를 이용하였고 또한 집열 튜브 내의 열매체의 양이 적어 집열기 내부의 온도를 하나로 가정하여 계산한 것이 큰 오차를 야기하지 않았음을 의미한다고 할 수 있다. 물론, 집열 튜브의 내적이 커지고 또한 이에 따라 열팽창 흡수장치의 크기도 이에 비례하여 커진다면 식(2)의 모델은 사용할 수 없을 것이다. 본 연구에서 방열에 대한 이론치와 실측치의 비교 분석을 수행한 것은 방열시 가 집열시보다 여러 가지 면에서 간단하기 때문



인데, 이는 안쪽 튜브의 외측 표면 온도(흡열면 온도) 등을 구해야 하는 번거로움을 피할 수 있고 또 필요한 실제 데이터(방사율(ϵ_r)에 대한 데이터)를 쉽게 구할 수 있었기 때문이며, 식(2)를 그대로 이용하기 위해서는 더 많은 실측치를 이용한 계산이 수행되어야 한다.

5. 결론

기존의 완전유리식 태양열 집열기의 단점이라고 지적되어온 동파문제와 열쇼크에 의한 파손문제를 해결하고자 사각실린더 형태의 열팽창흡수 축열 장치를 고안하여 제작하였으며, 이를 이용하여 실험적 연구를 수행하였다. 또한 축열성능 향상을 꾀하고자 사각실린더 내부에 상변화 물질인 초산나트륨과 파라핀을 삽입하여 각각 실험하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다:

1. 실험을 통해서 밀폐된 진공관 내부의 온도가 상승하면서 압력이 상승하는 것을 사각실린더가 찌그러지면서 압력을 흡수하는 것을 알 수 있었으며, 상변화 물질을 사각실린더에 삽입했을 경우에는 진공과 내의 부동액 온도가 상승했을 때 사각실린더 내의 상변화 물질이 고상에서 액상으로 바뀌면서 압력이 상승하는 만큼 내부의 공기를 밖으로 밀어내면서 압력을 대기압과 같게 유지하여 진공관이 파손되는 것을 막을 수 있었다. 그리고, 냉각되는 과정에서 상변화 물질이 액상에서 고상으로 바뀌면서 원래 부피대로 되돌아오게 되고, 이런 현상은 사각실린더가 원래 상태로 복원하는 것을 기능적으로 촉진하였다.
2. 상변화 물질을 삽입하여 운용하였을 때 초산나트륨의 경우 상변화가 일어나는 부분이 파라핀처럼 뚜렷하지 않고 그 부분의 경사가 완만하나마 경사지게 나타나는 것은 초산나트륨

결정체 사이에 과냉각된 액상의 초산나트륨의 존재하기 때문이다.

3. 파라핀 왁스의 경우 초산나트륨에 비해 상변화가 뚜렷하게 관찰되었으며 과냉각 현상은 관찰되지 않았다. 이는 초산나트륨에 비해 잠열재가 고상에서 액상으로 바뀌고 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다.
4. 열팽창 흡수장치와 부동액만을 사용했을 때와는 달리 상변화 물질을 열팽창 흡수장치에 삽입하여 사용하게 되면 보다 안정적이고, 효율적으로 완전유리식 진공관형 집열기를 운용할 수 있을 것으로 기대된다. 즉, 기존의 완전유리식 집열 튜브를 사용함에 있어 동파 방지와 시스템 구성의 다양성을 부여할 수 있을 것이다.
5. 열팽창흡수장치는 완전 유리식 태양열 집열 튜브를 이용하는 기존의 시스템에서 동파나 시스템의 작동 건전성을 제고하기 위해 사용되는 "U"자형 구리관이나 히이트 파이프를 대체할 수 있는 대안으로 활용할 수 있다.
6. 열팽창흡수장치의 적용은 "U"자형 관이나 히이트 파이프를 이용하는 경우에 비해 접촉열저항이 없으므로 태양열 이용시 그 효율성을 제고할 수 있다.
7. 본 연구에서 얻어진 결과는 사각 실린더 구조의 열팽창흡수 축열 장치의 역할을 실증적으로 보여주고 있으며, 소재에 따라 다양한 형태의 이와 같은 장치의 설계 및 제작이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2001년도 제주대학교 발전기금 청봉 학술연구비 지원에 의해서 연구되었으며, 이에 심심한 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. Duffie, J. A. and Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Process*, John Wiley & Sons, pp. 197 ~ 281, (1990)
2. 임장순, "상변화 물질을 이용한 잠열축열조에 대한 기초 연구", 동력자원부, (1991).
3. 서정세, 김찬중, 유제인, 노승탁, "수평관내 과냉각 및 자연대류가 용해과정에 미치는 영향", 대한기계학회 논문집, 17(8), pp. 2079~2087, (1993).
4. Chen, S. L. and Yue, J.S., "A Simplified Analysis for Cold Storage in Porous Capsules with Solidification", *J. Heat Transfer*, Vol. 113, pp.108~116, (1991).
5. Saitoh, T. and Hirise, K., "High Performance Phase-Change Thermal Energy Storage Using Spherical Capsules", *Chem. Eng. Comm.* Vol. 41, pp.39~58, (1986).
6. Kamimoto, M. and et al., "Investigation of Nitrate Salts for Solar Latent Heat Storage", Vol. 24, pp.581~587, (1980).
7. Kimura H. and Kai, J., "Phase Change Stability of Sodium Acetate Trihydrate and its Mixtures", *Solar Energy*, Vol. 35, No. 6, pp.527~534, (1985).
8. 한국에너지기술연구소, "태양에너지의 효율적 이용을 위한 상변화 물질의 미세캡슐화, 보고서, pp.111~142, (1996).
9. Tang, X. and et al., "Heat Loss Coefficients of All-Glass Evacuated Collector Tubes," *Proceedings of 1997 ISES Solar World Congress*, Vol. 2, pp. 84~88, (1997).
10. Beijing Tsinghua Solar Ltd., *Product Technical Manual*, 2001.