

碩士學位論文

All-Glass Solar Vacuum Collector
Tube의 열성능 및 내구성 증진에 관한
기초 연구



濟州大學校 大學院

에너지工學科

玄 俊 豪

2002년 12월

All-Glass Solar Vacuum Collector
Tube의 열성능 및 내구성 증진에 관한
기초 연구

指導教授 千院基

玄俊豪

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



玄俊豪의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2002年 12月

A Study on the Improvement of Thermal Efficiency and Durability of All-Glass Solar Vacuum Collector Tubes

Jun-Ho Hyun

(Supervised by Professor Wongee Chun)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF
ENGINEERING

DEPARTMENT OF NUCLEAR AND ENERGY ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2002. 12.

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
SUMMARY	vi
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	5
1. 열효율 이론	5
1.1 집열성능	5
1.2 집열효율	10
1.3 단일 진공관(Single Solar Vacuum Collector Tube)	12
2. 시뮬레이션 프로그램의 재배방정식	14
2.1 지배 방정식	14
III. 실험장치 및 실험방법	17
1. 실험 장치	17
1.1 Single Solar Vacuum Collector	18
1.2 All-Glass Solar Vacuum Collector	21

2. 실험방법	26
2.1 유량 조절	26
2.2 시스템 제어	26
2.3 데이터 수집 및 열전대 보정	27
2.4 실험 장치 구성	28
2.5 축열 및 내구성 증진을 위한 상변화물질의 이용에 관한 연구	32
IV. 실험결과 및 고찰	37
1. 축열조의 온도 변화 분석	37
1.1 동일한 조건에서의 축열조 온도 변화	37
1.2 집열면적 변화에 따른 축열조 온도 변화	43
1.3 펌프 작동시 유량의 변화에 따른 축열조 온도 변화	48
2. 시뮬레이션 분석	50
2.1 정상상태에서 Conduction만을 고려	50
2.2 정상 상태에서 Conduction과 Convection을 고려	53
V. 결 론	55
참 고 문 헌	57

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Graph of the collector efficiency	11
Fig. 2 Performance test of SEIDO collectors	13
Fig. 3 Schematic of a single vacuum collector with dual pipe flow passage(SEIDO 2)	18
Fig. 4 Connection of the storage tank and dual pipe flow passage (SEIDO 2)	19
Fig. 5 Schematic of a single vacuum collector with heat pipe (SEIDO 5)	20
Fig. 6 Connection of the header and heat pipe (SEIDO 5)	20
Fig. 7 All-glass solar vacuum collector tube	21
Fig. 8 All-glass solar vacuum collector tube with U-pipe and metallic fin inserted	23
Fig. 9 All-glass solar vacuum collector tube with U-pipe inserted	25
Fig. 10 Photograph of the differential temperature controller and the pump	27
Fig. 11 Photograph of the thermistor	27
Fig. 12 Photograph of the portable data acquisition system(Hydra)	28
Fig. 13 Photograph of the radiometer	28
Fig. 14 Experimental apparatus	29
Fig. 15 Photograph of the installed 8mm U-pipe type system	30
Fig. 16 Photograph of the installed 10mm U-pipe type system	30
Fig. 17 Photograph of a installed single vacuum tube system with heat pipes(SEIDO 5)	31
Fig. 18 Photograph of the installed single vacuum tube with a dual pipe flow passage(SEIDO 2)	31
Fig. 19 A view of experimental installations	32
Fig. 20 Schematic of solution domain with PCM	34

Fig. 21	Schematic of solution domain with PCM and oil jacket	34
Fig. 22	Schematic of solution domain with PCM, oil jacket and various caps	35
Fig. 23	Kind of the caps	35
Fig. 24	Test results of a 8mm U-pipe type	40
Fig. 25	Test results of a 10mm U-pipe type	40
Fig. 26	Test results of a single vacuum tube with a dual pipe flow passage(SEIDO 2)	41
Fig. 27	Test results of a single vacuum tube with heat pipe	41
Fig. 28	Average storage tank temperatures for different systems	42
Fig. 29	Insolation	42
Fig. 30	Test results of a 8mm U-pipe type	45
Fig. 31	Test results of a 10mm U-pipe type	45
Fig. 32	Test results of a single vacuum tube with a dual pipe flow passage(SEIDO 2)	46
Fig. 33	Test results of a single vacuum tube with heat pipe	46
Fig. 34	Average storage tank temperatures for different systems	47
Fig. 35	Insolation	47
Fig. 36	Comparative performance 10mm and 8mm U-pipe	49
Fig. 37	Comparative performance 10mm and 8mm U-pipe	49
Fig. 38	Melting of the case 1	51
Fig. 39	Velocity and temperature contour of case 1 melting	51
Fig. 40	Solidifying of the case 1	52
Fig. 41	Temperature contour of case 1 solidifying	52
Fig. 42	Melting of the case 1	53
Fig. 43	Case 1 velocity and temperature contour of melting	53
Fig. 44	Solidifying of the case 1	54
Fig. 45	Case 1 temperature contour of solidifying	54

LIST OF TABLES

<Table 1> Efficiency of SEIDO collectors	13
<Table 2> Specifications of all-glass solar vacuum collector tube	24
<Table 3> Comparison of each collector	29
<Table 4> Thermophysical properties used for computation	36
<Table 5> Results of experimental data and comparison performance	43
<Table 6> Results of experimental data and comparison performance	48

SUMMARY

Nature has been giving us energy from the beginning of the world. But human hardly use it. Solar energy is a kind of energy from the nature. This study has been carried out to study the use of solar energy as it is harnessed in the form of thermal energy. Solar energy is one of the most promising energy resources on earth and in space, because it is clean and inexhaustible. Heat for comfort in buildings can be provided from solar energy by systems that are similar in many respects to the water heater systems. To utilize the solar energy, we can not only solve the problem of energy shortage, but also can protect the environment and benefit the human beings.

We must think about how to absorb the solar energy more efficiently, how to store more energy, and other problems such as additional electrical-heating system. This study deals with the collection of solar energy and its storage in all-glass solar vacuum tubes for different types of header design, flow passage and heat transfer devices.

In order to elicit the most efficient combination of header design, flow passage, heat transfer hardware and operating conditions, we have studied four different types of solar collectors utilizing vacuum tubes. We selected the evacuated solar collector with metal cap and the all-glass evacuated solar collector. These collectors are more efficient than flat-plate collectors in both direct and diffuse solar radiation. The all-glass evacuated collector have been widely utilized due to their high efficiency, low heat losses, long lifetime and low costs.

The evacuated solar collector in the present study uses a single vacuum solar collector either with a heat pipe (SEIDO 5) or with a "dual pipe" flow passage (SEIDO 2). The one with heat pipe is designed such that the condensing section of heat pipe is inserted into a pipe header where the water from the storage tank is constantly circulated. Solar energy is transferred in the form of heat as it is ultimately saved in the storage tank. Similar principle is applied in the "dual pipe" type where cold water enters the inner pipe and flows along the outer pipe raising its temperature thanks to the irradiation of solar energy. Different from these in its design and heat collection mechanism, all glass solar vacuum collector is utilized more efficiently and more conveniently in harnessing the solar energy. The "U-pipe" type is one of those methods, which became quite popular recently with the usage of all glass solar vacuum tubes. Water is heated as it flows through the

U-shaped copper pipe placed inside the vacuum tube. A rolled copper sheet tightly inserted along the inner surface of inner tube enhances heat transfer between the heated collector surface and the water contained in the U-shaped copper pipe.

This study has been carried out a series of tests under the same conditions to elicit the most suitable model, which deems to enhance heat transfer and improve its durability in utilizing solar vacuum tubes.



I. 서론

에너지에 관심이 있는 사람은 두 말할 필요도 없고, 그다지 관심이 없는 사람들일지라도 대체에너지에 대해 한번쯤 접해보지 않은 사람들은 거의 없을 것이다. 그리고 조금이라도 관심이 있는 사람들은 대체에너지 개발의 필요성을 인지하고 있을 것이다. 이제 많은 사람들이 기존의 화석에너지의 사용에서 새로운 에너지의 이용 시기가 점점 다가오고 있음을 자각하면서 그 분야에서의 연구를 계속하고 있다.

원시시대부터 주요 에너지자원으로 불을 일으키기 위해 필요한 연료인 목재, 농사를 짓기 위해 가축을 이용한 축력, 바다나 강을 항해하기 위해 이용하는 풍력 등이 있었다. 이는 석탄을 이용한 증기기관이 발명되기 전까지는 인간이 살아가기 위해 이용한 중요한 에너지 자원이었다. 18세기에 이르러 증기기관이 발명되면서 목재와 석탄이 이용되었다. 그 중에서도 석탄을 이용하게 됨으로써 인류는 비약적인 기계문명이 발달하는 전기를 마련하였다. 석탄을 이용한 증기기관은 기계를 움직이게 함으로써 대량생산이 가능해졌으며, 수송수단인 열차나 배를 움직이게 함으로써 생산된 제품을 멀리 운반할 수 있게 되었다. 산업과 기술의 발달이 지하에 매장되어 있는 자원(석유, 천연가스 등)을 이용 가능케 하여 이후 석유와 천연가스가 동력에너지로 이용됨으로써 석탄을 대신하여 기계와 교통수단을 움직이게 하는 중요한 자원이 되었다. 그리고 전기의 발명은 인류문명을 더욱 진보시켰다. 전기의 힘으로 어둠을 밝히게 됨으로써 인간의 활동시간을 연장시켰으며, 공장을 가동시키고 생활의 편의시설인 냉장고, TV, 에어컨, 각종 가전제품을 이용할 수 있게 되었다. 전기를 생산하기 위해서 역시 물, 석탄이나 석유가 이용되었으며, 최근에는 원자력을 많이 이용하고 있다. 이 모두가 화석 연료의 발견과 이용이 있었기에 가능한 일이었다. 그야말로 사람들은 지금까지 에너지의 천국에서 살았다고 해도 과언이 아니다.

그러나, 한정된 에너지자원과 화석 연료의 심각한 공해문제, 오염물질에 의한 환경파괴, 온실효과 등에 의한 이상기후 문제가 인류의 과제로 등장하였으며 최근 세계환경정상회의(WSSD)의 주된 주제로까지 대체에너지 개발이 거론되고 있는 실정이다. 세계적인 추세가 되고 있는 대체에너지 사용비율 확대는 우리 산업계에 엄청난 파장을 몰고

오게 된다. 유럽연합(EU)은 2010년까지 풍력, 태양열 등 대체에너지를 1차 에너지 공급의 15%까지 확대할 것을 주장하고 있는 반면 우리나라는 최대 2%선을 요구하고 있다. 특히, 선진국들은 생태계 파괴를 이유로 수력 발전을 대체에너지에서 제외할 움직임이어서 대체에너지 사용 확대는 우리 에너지산업의 구조를 완전히 흔들어 놓을 가능성이 높다. 따라서 에너지절약 및 에너지의 효율적 이용의 필요성이 강력하게 대두되고 있고, 대체에너지 관련 기술에 대한 관심이 고조되고 있으며 그 중에서도 태양에너지의 활용이 많은 연구대상이 되고 있다. 태양에너지를 이용하는 것 중에 무한한 에너지원인 태양열을 이용한 시스템을 건물의 냉·난방에 적용하기 위한 많은 연구와 개발이 진행되어 왔다. 대체에너지원 중에서 비교적 적은 연구개발 비용과 짧은 연구개발 기간에 실용화가 가능한 분야 중의 하나가 바로 태양열 이용 분야이다.

그 동안 태양열 이용 및 보급 분야의 실용화는 평판형 태양열집열기를 채용한 가정용 태양열 온수기를 중심으로 상당히 보급이 활발하게 진행되어 왔다. 그러나 평판형 태양열집열기는 비교적 낮은 온도(70℃ 이하)에서 온수·급탕 및 난방의 보조열원이기 때문에 높은 효율을 유지하고, 70℃ 이상의 열원을 요구하는 건물의 난방 및 냉방용으로의 이용은 효율적이지 못하다. 집열기가 풀어야 할 최대 과제는 열에너지를 최소의 비용으로 얻는 것이다. 세계 각국에서는 여러 가지 고효율 태양열집열기와 요소 기술들의 개발을 위해 많은 연구를 진행 중에 있다. 특히 중·고온 이용을 위한 태양열집열 기술 분야에서 고 효율화는 집광형에서와 같이 반사경을 부착하여 태양 복사광을 선(line-focus), 혹은 점(point-focus)에 모으는 방법과 태양열집열기에 진공기술이 투입되어 집열판으로 흡수된 열 손실을 줄이는 방법으로 크게 나누어서 연구가 진행되고 있다. 각 국에서는 오래 전부터 이러한 중·고온용 태양열집열기의 개발을 시도하여 판매하고 있고, 계속해서 고 효율화를 위한 노력을 경주하고 있으며, 현재 국내에서도 실용화를 위한 중·고온 태양열분야의 기술 개발이 활발히 진행되고 있다.

이 논문은 많은 에너지의 이용 가운데 온수시설에 관한 연구의 한 분야로 현재 시중에 시판되고 있는 여러 형태의 태양열에너지를 이용한 시설들을 비교 분석하고 이들의 기술적인 문제, 특히 집열장치와 열에너지 저장장치(축열장치)와의 결합방식에 따른 축열성능을 분석함으로써 최적의 결합방법을 찾아 효율을 증대함은 물론 내구성 증진에도 기여하는데 그 목적이 있다. 현재 온수·급탕 및 건물의 냉·난방에 이용되고 있

는 태양열 시스템은 에너지를 전달하고 저장하는 방식에 따라 자연형(passive system)과 설비형(active system)으로 나누어진다. 설비형 태양열 시스템은 기계적 장치들을 이용하여 시스템을 구동시키는 것으로, 태양열집열기, 축열조, 펌프, 제어장치 등으로 구성되어 있다. 이 시스템의 경우 기계계통을 작동시키기 위해서 별도의 전력 공급을 필요로 하지만 시스템 각 계통을 제어함으로써 시스템의 효율을 높이고 대규모 설비가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 자연형 태양열 시스템은 자연순환 즉, 열전도, 대류 및 복사현상에 의해 에너지 전달이 이루어짐으로 특별한 기계장치 없이 태양열에너지를 자연적인 방법으로 열을 저장하여 이용할 수 있도록 하는 장치이다. 이 시스템은 경제성이 높은 것은 물론이고 고장의 염려가 적어 오래 쓸 수 있으며 관리가 쉽다는 장점이 있으나, 열의 순환을 원하는 대로 조절하기가 어렵고, 원하는 만큼의 열만 공급받을 수 있도록 제어하기 어렵다는 단점이 있다.

최근 시판되고 있는 제품들은 평판형 집열기의 형태에서 진공관식 형태로 그 모습이 변화하는 추세이다. 현재 국내에서 사용되고 있는 평판형 집열기는 초기 투자 비용면에서 진공복사관식 태양열집열기(single tube with metal cap or all-glass solar vacuum collector)에 비해 저렴한 편이나 겨울철에 난방용수와 온수 사용이 증가하는 국내 환경에는 맞지 않기 때문에 그 이용 면에서는 미비한 실정이다. 반면, 진공복사관식 태양열 집열기의 경우 태양 복사광에서 직달성분과 산란성분 모두 유효하므로 산란성분이 많은 국내의 경우 더 유리하다고 할 수 있다. 또한 진공기술을 적용함으로써 평판형 집열기와는 달리 흡수판 주위의 공기층에 의해 흡수한 열에너지를 대류 열 손실로 인해 누수되는 현상을 줄일 수도 있으며, 설치 면적을 30%가량 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다.

이렇게 진공복사관식 태양열집열기가 우수한 성능을 나타냄에 따라 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 결합방식 또한 여러 형태로 제조 회사마다의 다른 특징들을 보이고 있고 신제품을 개발 중에 있다. 결합방식에는 여러 가지가 있으나 이 논문에서는 최근 효율이 우수한 진공복사관식 태양열집열기를 그 대상으로 하고 있다. 우선 이 논문에 비교된 진공복사관식 태양열집열기의 결합방식을 살펴보면, 이중관 삽입 형태, U자관형, 히이트 파이프 삽입 형태 등의 세 가지 유형이 있다. 이들은 모두 전기모터를 이용한 강제순환(forced circulation)형태의 가압식으로 ‘차온 제어기’를 이용하여 강제유동을

제어한다. 여기서는 이 세 가지 형태의 결합방식이 어떠한 특징을 가지며 집열면적에 따라 어떠한 열성능을 나타내는지 비교 분석하였다. 그리고 PCM(Phase Change Material) 즉, 상변화물질을 이용하여 태양열집열기의 급격한 온도변화에 적응할 수 있는 방안을 찾기 위한 기본적인 시뮬레이션 작업을 실시하였다. 본 논문은 이러한 실험을 통해 현재 중국, 독일 등 여러 나라에서 연구되고 있는 진공복사관식 태양열집열기 중에서 All-Glass Solar Vacuum Collector의 기술을 바탕으로 집열기와 축열조의 최적의 연결 형태를 발견하고 연구하여 국내 시장에서의 All-Glass Solar Vacuum Collector의 개발과 열성능 및 내구성 향상을 위해 열성능이 뛰어나고 경제적인 부담도 줄일 수 있는 안정되고 효율적인 제품 생산에 기여하고자 한다.



II. 이론적 배경

태양열집열기는 태양복사 에너지를 열에너지로 변환하기 위한 장치로써 열에너지의 이용목적과 축열온도에 따라 여러 가지의 형태를 갖는다. 구조적으로 평판형, 진공관형, 집광형 등으로 분류할 수 있다. 이들 중에서 진공관형 집열기는 진공 유리관, 흡수판과 그 중심부에 설치된 열회수요체로 구성되어 있다. 그리고 흡수판이 설치된 유리관 내부를 진공으로 유지함으로써 흡수판 주위의 공기층에 의한 대류 열손실을 방지하기 위한 집열기이다.

태양복사는 약 $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ (단파)내의 파장영역에 열에너지가 집중되어 있다. 복사에너지는 3×10^8 m/sec의 속도로 지구 대기층에 도달하며, 이러한 복사에너지 즉, 태양 에너지를 집열하는 태양열집열기의 집열효율을 높이기 위해 진공복사관식 태양열집열기는 집열 시스템의 대류에 의한 열손실을 진공 단열을 통하여 획기적으로 줄인 것이다.

[곽희열, 2000.]

집열기의 열성능은 일사량, 외기온도, 집열기 입구온도, 집열기 출구온도의 몇 가지 조건들로 순간효율을 계산함으로써 부분적으로 결정된다. 순간효율은 실험적으로 집열기에 입사하는 일사량과 열매체가 집열기를 통과할 때 열매체가 얻는 에너지를 측정하는 것이 필요하다.[에너지 전문가 기술 교육 프로그램, 2001.]

1. 열효율 이론

1.1 집열성능

기본적인 개념을 살펴보면, 안정된 상태 하에서 어떤 주어진 시간 동안에 태양열집열기가 취득한 에너지는 흡수판에서 흡수한 에너지와 주위로 손실된 에너지와의 차이이

다. 여기에, 태양열 시스템에 일사량의 변화를 무시할 수 없다. 이와 같은 관계를 식으로 표현하면 다음과 같다.

..... (1)

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

여기서

- Q_w : 집열 에너지(kcal/hr)
- A_c : 집열 면적()
- I_t : 집열면 일사량(kcal/hr · m²)
- τ : 유리관 투과율
- a : 흡열판 흡수율
- U_L : 열손실계수 (kcal/hr · m² · °C)
- \bar{t}_p : 흡수판 표면의 평균 온도 (°C)
- t_a : 외기 온도 (°C)



앞서 언급한 바와 같이 집열판의 성능을 크게 하려면 일사량과의 관계가 아주 중요하다. 위의 식 (1)에서 일사량과 관계된 값을 최대한으로 크게 하고, 일사량과 함께 흡수한 열에너지를 빼앗기지 않도록 열손실계수와 관계된 값을 최소로 줄일 수 있도록 설계하고, 가동조건도 적절히 선택해야 한다.[John A. Duffie and William A. Beckman, 1980.]

1) 열손실계수,

$$U_{LT}$$

열손실계수는 진공 압력과 흡수판의 방사율에 영향을 받는다.

..... (2)

$$U_{LT} = \frac{c_f M(t_i - t_f)}{A_A(t_m - t_a) \Delta \tau}$$

$$t_m = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}$$

- $t_m = \frac{t_{a1} + t_{a2} + t_{a3}}{3}$
 t_m : initial temperature
 t_i : final temperature
 t_f : Heat loss coefficient, [w/m²°C]
 U_{LT} : average water temperature in the tubes, [°C]
 t_m : average ambient temperature, [°C]
 t_a : total measuring period of time, [s]
 $\Delta\tau$: mass of water filled up in the tube, [kg]
 M : specific heat capacity of water, [J/kg · K]
 c_f : outside area of absorber, [m²]
 A_A : testing time interval
 Δt : 각 위치에서 시작 온도와 시작 후 30분, 60분 후의 온도를 평균한 값이다.
 t_1, t_2, t_3

All-Glass Solar Vacuum Collector의 집열기의 열손실계수 U_{LT} 는 튜브 내 물의 평균온도가 감소함에 따라 같이 감소한다. All-Glass Solar Vacuum Collector의 열손실은 다음과 같다.

$$Q_{LT} = U_{LT} A_A (T_m - T_a) \quad \dots \dots \dots (3)$$

이것은 다음 사항들을 포함한다.

① 흡수판의 방사 열손실

$$Q_e (W)$$

보통 선택성 흡수 도료층의 hemispherical emittance ϵ_h 에 의해 결정된다.

$$\dots \dots \dots (4)$$

$$Q_e = \frac{\epsilon_h \cdot \sigma \cdot A_A}{1 + \frac{d_1 \epsilon_h}{d_2 \epsilon_e} (1 - \epsilon_e)} (T_m^4 - T_a^4)$$

$$\frac{d_1 \epsilon_h}{d_2 \epsilon_e} (1 - \epsilon_e) \ll 1$$

$Q_e = \epsilon_h \cdot \sigma \cdot A_A (T_m^4 - T_a^4)$
 hemispherical emittance : 방사율은 물체의 온도, 방사된 복사선의 파장, 및 방향에 따라 달라진다. 따라서 특정한 파장에서의 방사율을 spectral emissivity ϵ_λ 라 하고, 특정 방향에서의 방사율을 directional emissivity ϵ_θ , 표면에서의 수직과 복사선의 각, 표면의 모든 방향에 대해 평균한 방사율을 hemispherical emissivity라 하며, 모든 파장에 대해 평균한 방사율을 total emissivity라 한다. 그리고 모든 파장 방향에 대해 평균한 방사율을 total hemispherical emissivity라 한다.

② 흡열튜브의 진공덮개에서의 전도에 의한 열손실

$$Q_g = k_g(T_m - T_a) \quad \dots \dots \dots (5)$$

: 고진공에서 잔류 가스의 열전도율

③ open된 끝 부분에 선택성 흡수 도료층이 없는 내부 유리 튜브 부분과 봉합된 getter부분의 복사 열 손실

$$Q_b = k_b(t_m^4 - t_a^4) = (k_{b1} + k_{b2})(t_m^4 - t_a^4) \quad \dots \dots \dots (6)$$

④ 내부와 외부 유리 튜브사이의 open된 끝 부분의 유리와 봉합된 부분에서 고정 장치의 대류에 의한 열손실

$$Q_c = k_c(T_m - T_a) \quad \dots \dots \dots (7)$$

$k_c = k_{cg} + k_{cs}$
 그러므로 All-Glass Solar Vacuum Collector의 전체 열손실은 $\dots \dots \dots (8)$

$Q_{LT} = Q_c + Q_g + Q_b + Q_c$
 그리고, 열손실계수는 전형적으로 $0.9W/m^2\text{C}$ 와 같거나 넘지 않는다.[Tang Xuan, 1998.]

이와 같이 집열기의 성능은 태양열의 흡수량과 집열기로부터의 열손실 등 두 가지 요소에 의해 좌우된다.

2) 태양열의 흡수량

집열기의 성능을 좌우하는 태양열 흡수량은 집열기의 설치 경사각, 흡열판 표면의

광선흡수율, 유리의 광선투과율 등의 요소에 의해 결정된다.

① 경사진 집열판에 입사되는 입사광선의 양 : 경사각에 따라 입사광선의 양은 달라지며 가장 집열량이 높은 방위는 정남향이 아니라 동으로 약간 치우친 각도이다. 최대 집열량의 95%이상 집열이 가능한 방위각 범위는 동으로 50°치우친 각도에서 서로 10°치우친 각까지 50°나 된다. [에너지 전문가 기술 교육 프로그램, 2001.]

② 흡열판 표면의 광선흡수율(a) : 집열기 전체의 효율은 이 흡수율에 의해서 많이 좌우된다. 알루미늄의 기본 층에 질소와 알루미늄 혼합물질을 침적시킨 것으로 이 혼합물질을 표면에 코팅하였을 경우 태양의 보편적인 파장에서 높은 흡수율을 가진다. 열처리된 표면의 흡수율은 0.92까지 올라가고 방사율은 0.06~0.08(80℃)까지 감소한다. [Yin Zhiqiang, 1997.]

③ 유리의 광선투과율() : 유리의 광선투과율은 유리의 질과 입사광선이 유리 표면에 도달할 때에 표면과 이루는 각도에 의해 달라진다. 보통 유리 한 장이 반사시키는 양은 직사광선의 약 8% 정도이다. 유리 속의 불순물 특히 철분은 광선을 흡수하므로 철분이 적은 유리를 사용하면 광선을 거의 다 투과시킬 수 있다. 현재 시판되는 유리의 투과율은 양호한 것이 약 80% 내외이다.

3) 흡수된 태양열의 열손실

집열기의 성능에 영향을 미치는 또 하나의 요소인 집열기의 열손실은 유리관 성능, 흡열판의 평균온도 등에 의해 결정된다.

① 유리관 성능 : 진공복사관식 태양열집열기의 경우 대류와 복사에 의한 열손실을 줄이기 위해 하나 또는 두 겹의 유리로 열매체가 흐르는 관이나 흡열판을 둘러싸고 있다. 즉, 흡열판과 유리 사이를 진공 처리함으로써 대류에 의한 열전달을 막아 전체 열손실계수()를 작게하는 것이다. 특히, 유리는 흡열판으로부터 방사되는 장파장의 열복사를 막을 수가 있다.

② 흡열판의 평균온도 : 식 (1)에서 알 수 있듯이 흡열판의 온도와 외기온도와의 차이가 적을수록 열손실도 적어진다는 것을 알 수 있다. 그러나 주위 공기의 온도는 임의로 조절할 수 없으므로 흡열판의 평균온도를 조절해야 한다. 이 흡열판의 온도는 집열기의 설계 및 그 작동 방법에 관계된다. 가장 중요한 요소는 집열기를 흐르는 전열매

체의 유속, 유체의 종류, 집열기로 들어올 대의 전열매체의 온도, 흡열판의 열전도도 등이다. 이러한 요소들을 조절함으로써 흡열판의 평균온도를 조절하여 열손실을 줄일 수 있다. [천원기, 2001.]

1.2 집열효율

모든 측정값들은 준 정상 상태에서 측정되며, 태양열집열기에 입사되는 일사량에 대한 집열기의 유리관내 파이프(manifold)에 흐르는 열매체에 가해지는 에너지의 비를 실험적으로 측정하는 것이 필요하다. 태양열 가용 집열량(useful energy gain) Q_w 를 구하려면 집열기의 설계조건은 물론 일사량, 흡열판의 평균온도 및 외기온도 등을 알아야 한다. 이 중에서 흡열판의 평균온도를 제외한 다른 요소들은 쉽게 구할 수 있으나, 흡열판의 평균온도는 전열매체의 공급온도 및 단위 시간당 흐르는 유량에 의해 변화되기 때문에, 편의상 흡열판 평균온도 대신 쉽게 알 수 있는 집열기 입구온도로 바꾸고, 집열효율수정계수 F_R 을 사용하여 식 (1)을 식 (9)로 표현할 수 있다. 태양열 시스템에서 열매체의 온도는 쉽게 측정될 수 있으며, 액체식 집열기의 흡열판 온도는 집열기 입구의 열매체 온도보다 5℃ 내지 10℃가 높고, 공기식의 경우는 20℃ 내지 30℃ 높다.

$$Q_w = F_R A_c [I_t \tau a - U_L (t_i - t_a)] \quad \dots \dots \dots (9)$$

: 집열기 입구의 열매체 온도 (℃)

t_i : 집열 효율 수정 계수

F_R

식 (9)를 태양열 집열효율식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{Q_w}{I_t A_a} = F_R \tau a - F_R U_L \frac{(t_i - t_a)}{I_t} \quad \dots \dots \dots (10)$$

여기서 η 는 실제로 유용한 태양 집열량을 집열면에 조사되는 총열량으로 나눈 값으로 집열기의 효율을 말한다.

전열매체의 유속을 일정하게 유지하면서 작동하는 태양열집열기에서 $A_c F_R \tau a$ 및 U_L 등은 거의 항상 일정하므로, 상수로 가정한다면 집열효율 η 는 $(t_i - t_a)/I_t$ 의 조건

에 따라 변하는 일차식으로 나타낼 수 있으며, 기울기가 $-F_R U_L$ 이고 수직축인 효율축의 $F_R(\tau\alpha)$ 를 지나는 직선 그래프로 나타난다. Fig 1은 집열성능그래프이다.[John A. Duffie and William A. Beckman, 1980]

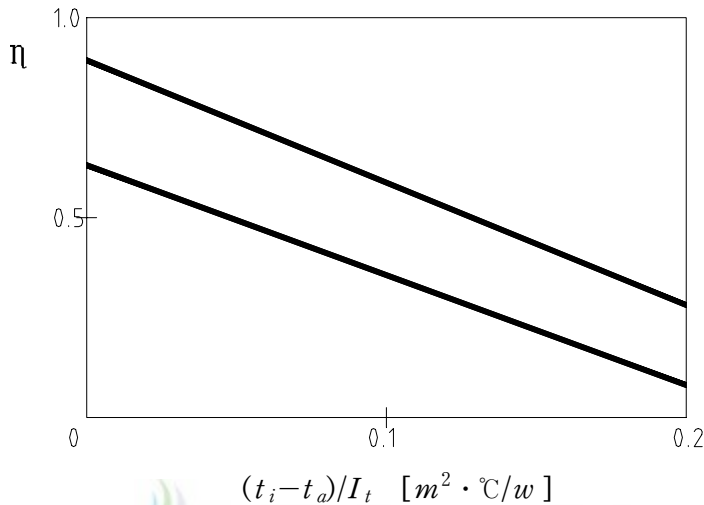


Fig. 1 Graph of the collector efficiency

태양열집열기의 성능은 일반적으로 실험에 의하여 구하며, 태양열집열기를 통과하는 열전달 매체의 유량과, 집열기 입·출구의 온도차를 측정하면 된다.[천원기, 2001]

$$\dots\dots\dots (11)$$

- $Q_w = AGC_p(t_o - t_i)$
- A : 집열면적
- G : 열매체의 비열
- C_p : 집열기 입구의 온도
- t_i : 집열기 출구의 온도
- t_o : 집열기 출구의 온도

식 (11)의 집열기 효율은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\dots\dots\dots (12)$$

$$\begin{aligned} \eta &= Q_w / AI_t \\ &= GC_p(t_o - t_i) / I_t \end{aligned}$$

$$= F_R \tau a - F_R U_L (t_o - t_i) / I_t$$

$$= F_R \tau a - F_R U_L (t_i - t_a) / I_t$$

Fig. 1에서 $(t_i - t_a) / I_t$ 의 조건에 의한 집열효율 그래프의 기울기와, 효율축 값에 영향을 미치는 집열기의 주요 요소는, 유리막의 수효와 흡열판의 특성 등이다. 어떤 경우에는 태양열집열기의 성능 시험 결과로서 집열효율 그래프가 집열기 내의 열매체 평균 온도나, 집열기 출구의 열매체 온도에서 외기온도를 뺀 값을 집열면 일사량으로 나눈 값으로서 표시하기도 한다. 즉, $(\frac{t_i - t_a}{2} - t_a) / I_t$ 나 $(t_i - t_a) / I_t$ 의 조건에 의한 집열효율 성향과 매우 비슷하게 나타난다. 그러나 이 그래프의 기울기나 효율축 값은 다르게 나타난다.[천원기. 2001]

1.3 단일 진공관(Single Solar Vacuum Collector Tube)

우리나라에서 동파 방지나 적용성 측면에서 그 보급 가능성이 비교적 양호한 중국 SUNDA社의 이중관 삼입형 진공복사관식 태양열집열기(SEIDO 2) 모델과 그 밖의 향후 국내의 태양열 보급 활성화를 위해 고려될 수 있는 단일관 삼입형 진공복사관식 태양열집열기(SEIDO 1) 그리고 히이트 파이프 삼입 방식의 진공복사관식 태양열집열기(SEIDO 5) 모델인 Single Solar Vacuum Collector에 대하여 그 열성능 및 내구성 등에 대하여 살펴보고자 한다. <Table 1>에서 나타낸 SEIDO 1-16, SEIDO 2-6, SEIDO 5-16에서 뒤에 나타낸 수는 집열기의 개수를 나타내는 것이다. <Table 1>에 나타낸 흡수 면적과 유량을 가지고 집열기의 성능을 비교한 것이 Fig. 2에 도식되었다. Fig. 2는 SUNDA社에서 제공한 순간효율을 나타내는 자료로 그림에서 보듯이 이중관 삼입형(SEIDO 2)의 효율이 가장 높다. 그리고 단일관 삼입형(SEIDO 1)과 히이트 파이프 삼입형인(SEIDO 5)의 경우 전체적인 효율면에서는 별다른 차이가 없지만, 일출 후와 일몰 전 일사량이 적은 시간대에 히이트 파이프 삼입형인 SEIDO 5가 보다 우수한 성능을 나타낸다. 본 실험에서는 아래의 실험 데이터를 기초로 하여 성능이 우수한 이중관 삼입형(SEIDO 2)과 단일관 삼입형 진공복사관식 태양열집열기(SEIDO 5)를 이용하여 실험하였다.

<Table 1> Efficiency of SEIDO collectors

Type	Efficiency	Absorption Area [m ²]	Flow Rate [l/h*m ²]
SEIDO 1-16	$\eta=0.7469 - 2.04X$	2.704	110
SEIDO 2-6	$\eta=0.8131 - 2.19X$	1.008	102
SEIDO 5-16	$\eta=0.7356 - 1.78X$	2.592	300

$$X = (T_m - T_a) / G_k \quad [\text{Km}^2/\text{W}]$$

T_m : average running temperature [K]

$$T_m = (T_i + T_o) / 2 \quad T_i: \text{input temperature of collector [K]}$$

T_o : output temperature of collector [K]

T_a : ambient temperature [K]

G_k : solar irradiation on collector surface [W/m²]

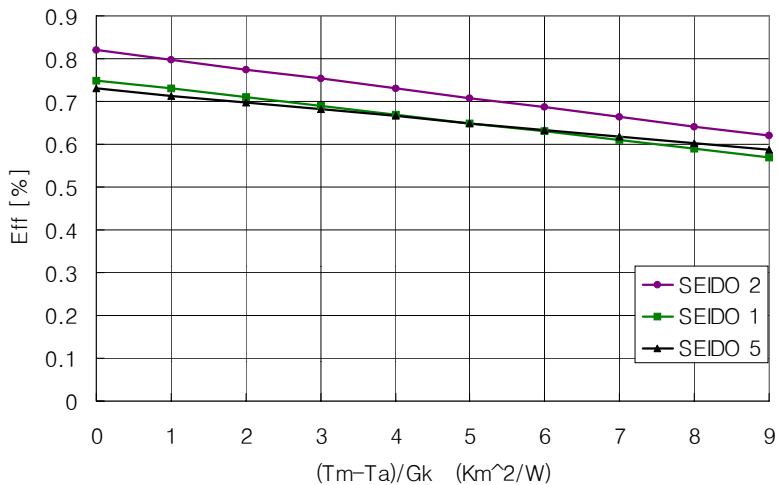


Fig. 2 Performance test of SEIDO collectors

2. 시뮬레이션 프로그램의 지배방정식

All-Glass Solar Vacuum Collector의 열성능과 내구성 증진을 위한 또 다른 방법으로 PCM(Phase Change Material)을 이용하여 겨울철 동파를 막고 태양열집열기의 열적 이용 효과를 극대화하기 위한 타당성 여부를 알아보기 위하여 기초 실험인 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 물론, 이 방법이 기존의 모든 문제를 해결하기에는 여러 현실적인 문제를 내포하고 있으나 본 연구에서는 이에 대한 가능성을 조사해보고자 하였다. 일사조건이 양호한 시간대에 가급적 많은 태양에너지를 상변화물질 등을 이용하여 축열하고, 특히 동절기 야간에 방열(상변화물질로부터)을 이루어 집열 튜브 내의 온도가 급격히 떨어지는 현상을 완화시키는 데에 그 의의가 있다고 할 수 있다.

2.1 지배방정식

컴퓨터 시뮬레이션을 실시하기 전에 몇 가지 전제조건과 방정식이 필요하다.

1) 전제 조건

- ① PCM의 열전달이 Laminar flow를 따른다.
- ② PCM container가 완전한 단열이다.
- ③ PCM이 균일하게 분포하고 있다.
- ④ Thermal radiation을 무시한다.

2) 지배방정식

PCM은 연속체이므로 다음과 같은 방정식을 적용할 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad \dots \dots \dots (13)$$

또한, 3차원 운동을 하기 때문에 운동 방향에 따라서 각각 방정식을 적용해야 하는데 아래의 식과 같다.

① Motion (14)

· r Component

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\theta^2}{r} \right) \\ & = \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial r} + S_r \end{aligned}$$

· θ Component

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) \\ & = \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right] - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + S_\theta \end{aligned}$$

· z Component

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ & = \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial z} + S_z \end{aligned}$$

② Energy

에너지에 관한 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial H}{\partial t} + v_r \frac{\partial H}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial H}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) \\ & = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial (r \partial T / \partial r)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (15)$$

식 (14)~(16)의 지배방정식들을 계산하기 위하여 유한체적법을 사용하는 상용 프로그램인 STAR-CD를 사용하였다.

3) 상변화 과정의 모델링

상변화 문제와 관련하여 가장 일반적이고 효과적인 방법이 엔탈피법이다. 엔탈피법은 현열과 잠열의 합으로 구성되는 전엔탈피를 이용하는 방법과 현열을 계산하고 잠열

의 방출 및 흡수는 에너지 방정식의 생성항으로 처리하는 방법으로 크게 나뉘어 진다. 본 시뮬레이션 연구에서는 Breant가 제안한 방법을 이용하여 상변화 과정을 모델링 하였으나 잠열 처리는 전자의 방법을 사용하였다

① Definition of source terms

$$S_x = Au, \quad S_y = A\nu + S_b, \quad S_z = Aw \quad \dots \dots \dots (16)$$

여기에서,

$$A = C \frac{(1-\epsilon)^2}{(\epsilon^3 + q)}$$

ϵ : 다공율 (element liquid fraction, $\Delta H/L$)

C : 형태계수

q : 0.0001 (introduced to avoid division by zero)

S_b :

$$\rho g \beta (T - T_m)$$

β : 체적팽창계수 [1/K]

g : 중력가속도[m/s²]

② Enthalpy definition

엔탈피의 정의는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = h + \Delta H = C_p T + f_l \cdot L \quad \dots \dots \dots (17)$$

여기서, f_l 은 액상분율이고 완전 액상영역에서는 1, 완전 고상영역에서는 0의 값을 가지며 상변화 영역에서는 0에서 1사이의 값을 갖는다. L 은 잠열을 나타낸다.

$$H = \begin{cases} C_p T, & (T < T_s) \\ C_p T_s + \left[C_p + \frac{L}{2\epsilon} \right] (T - T_s), & (T_s \leq T \leq T_l) \\ C_p T + L, & (T_l < T) \end{cases} \quad \dots \dots \dots (18)$$

여기서,

$$T_s = T_m - \epsilon, \quad T_l = T_m + \epsilon$$

그리고, ϵ 는 상변화 간격이다.

Ⅲ. 실험장치 및 실험방법

1. 실험장치

집열기의 종류는 전열매체의 종류에 따라 구분하면 액체식 및 공기식의 두 가지로 구분된다. 집열기의 집열 방법 및 집열기의 형태에 의해서 구분하면 평판형 (flat plate collector), 진공관식(evacuated tubular collector), 집중식(concentrating or focusing collector)등의 집열기가 있다. 태양열집열기에서의 에너지 전환은 흡열부에 태양 복사 에너지가 흡수되어 흡열부가 가열되어 열전달 매체에 열이 전달됨으로써 이루어진다. 가용 열에너지는 현열(sensible heat)또는 잠열(latent heat)형태로 나타나며 이를 이용하기 위하여 열전달 매체를 자연순환(natural convection)또는 강제순환(forced circulation)시켜 축열조에 저장한다.

진공복사관식 태양열집열기는 현재 대규모의 태양열 이용 시스템 뿐 아니라 소규모의 원예단지, 공중목욕탕 및 냉방 시스템 등 다양하게 적용되고 있으며 향후 새로운 제작공정 기술의 개발을 통한 가격의 하락과 품질 향상으로 그 보급이 더욱 활발해질 것으로 전망된다. 본 연구에서는 중국 SUNDA社의 단일 진공 유리 튜브에 직경이 서로 다른 금속제 관 2개를 삽입하여 냉수가 직경이 작은 안쪽관으로 유입되어 관의 하단부에 이르면 바깥쪽 관을 따라 흐르면서 태양열에 의해 데워지도록 이중 유로가 설계된 이중관 삽입형(SEIDO 2)과 단일 진공 유리 튜브에 히이트 파이프를 삽입하여 제작한 히이트 파이프 삽입형(SEIDO 5), 그리고 역시 중국의 청화대학에서 개발한 완전 유리식 이중 진공관에(All-Glass Solar Vacuum Collector Tube)에 U자형 유체 순환 파이프를 삽입하여 제작한 서로 다른 세 가지 형태의 진공복사관식 태양열집열기를 대상으로 실험을 수행하였다.

1.1 Single Solar Vacuum Collector

중국 SUNDA社의 이중관 삽입형(SEIDO 2)과 히이트 파이프 삽입형인(SEIDO 5) A Single Solar Vacuum Collector에 대한 구조, 집열 방법 및 집열기와 축열조의 연결 방법은 다음과 같다.

1) 이중관 삽입형(SEIDO 2)

이중관 삽입형 진공복사관식 태양열집열기(single solar vacuum collector)인 SEIDO 2는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 진공으로 처리된 유리 튜브 속에 diameter가 서로 다른 두 개의 관을 삽입한 구조로 되어있다. 이 이중관 삽입형은 내부의 관을 통하여 열매체가 입수하여 외부 파이프를 통하여 데워진 열매체가 축열조로 이동하게 된다. 이 집열기는 그림에서 보는 바와 같이 주 파이프(헤더) 또한 이중관으로 되어 있다.

Fig. 4는 이중관 삽입형 진공복사관식 태양열집열기의 이중관과 축열조와 연결되는 주 파이프와의 연결 형태를 나타내는 그림이다.

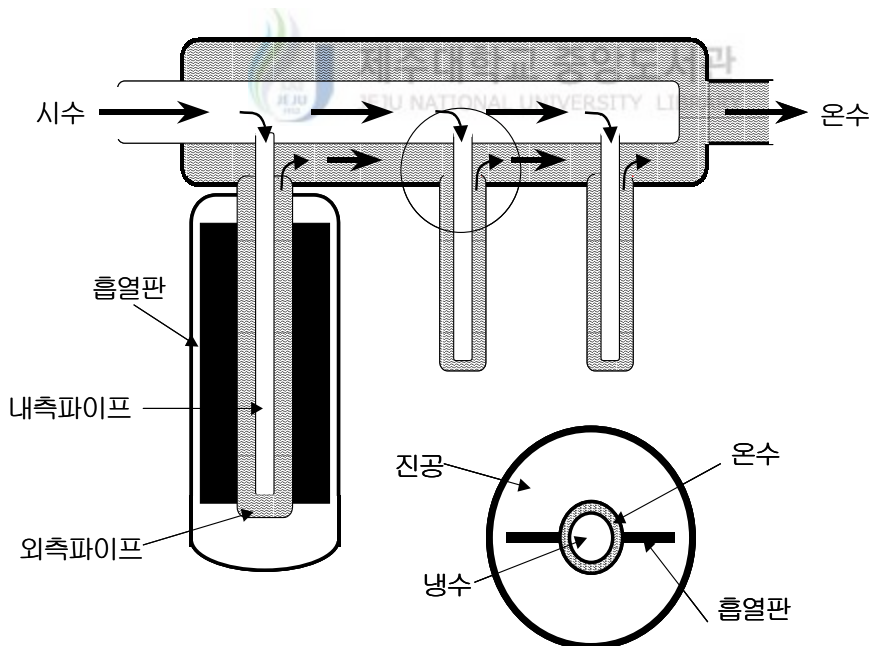


Fig. 3 Schematic of a single vacuum collector with dual pipe flow passage(SEIDO 2)

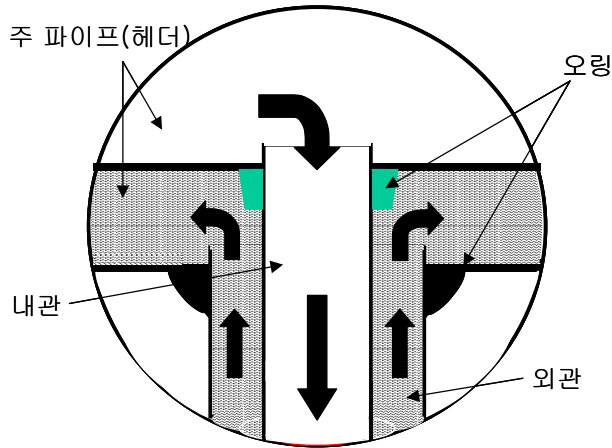


Fig. 4 Connection of the storage tank and dual pipe flow passage (SEIDO 2)

2) 히이트 파이프 삽입형(SEIDO 5)

히이트 파이프 삽입 형태인 진공복사관식 태양열집열기(SEIDO 5)는 진공으로 밀봉된 유리튜브 내에 태양열 흡열관이 부착된 히이트 파이프가 삽입되어 있는 형태로 진공 튜브의 뛰어난 단열 기능과 히이트 파이프의 신속한 열 응답성을 이용하여 태양열의 집열을 극대화 할 수 있도록 되어있다. 히이트 파이프 삽입형 진공복사관식 태양열 집열기는 높은 열전도도를 갖는 열전도체로서 직접 태양열을 흡수하여 열매체를 데우는 것이 아니라 태양열을 받은 히이트 파이프 내에 있는 열매체의 대류에 의한 열전달에 의해 히이트 파이프 상부로 열전달이 이루어지고 히이트 파이프상부가 축열조와 열결되는 주 파이프와 결합하여, 주 파이프에 있는 열매체에 열을 전달하는 것이다. 이것은 일종의 간접 열전달 방식을 취한다고 할 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 히이트 파이프 삽입형 진공복사관식 태양열집열기의 모습과 주 파이프인 헤더와의 연결 형태를 나타내고 있다.

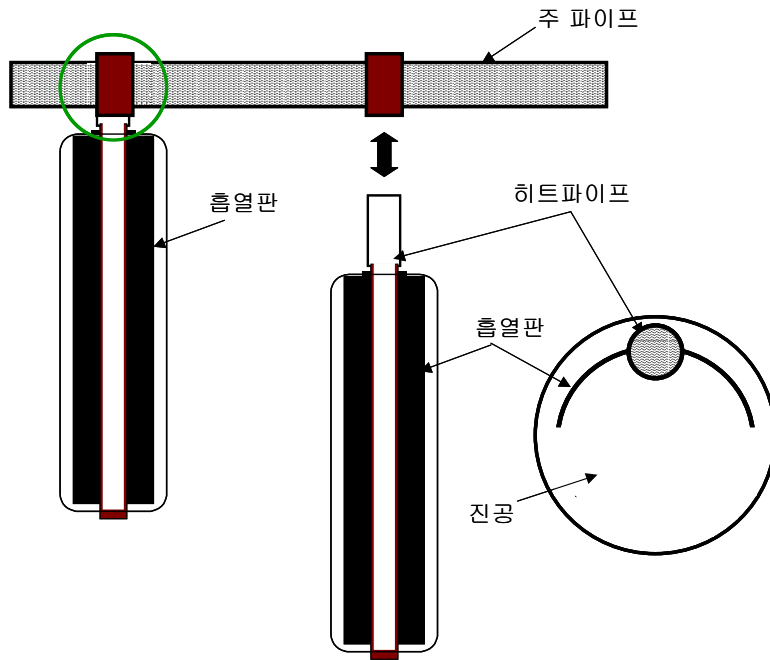


Fig. 5 Schematic of a single vacuum collector with heat pipe (SEIDO 5)

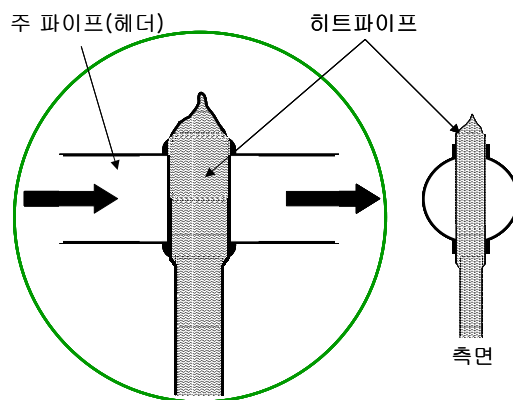


Fig. 6 Connection of header and heat pipe (SEIDO 5)

1.2 All-Glass Solar Vacuum Collector

U자관형인 청화대학에서 제작한 All-Glass Solar Vacuum Collector의 특징은 집열기 전체를 유리로 제작하는 것이다. 이는 A Single Solar Vacuum Collector의 기술적인 어려움 즉, 유리관과 금속과의 접합 문제를 극복하기 위한 것으로 Fig. 7은 바로 이와 같은 개념으로 설계·제작된 All-Glass Solar Vacuum Collector Tube의 구조를 나타낸 것이다.

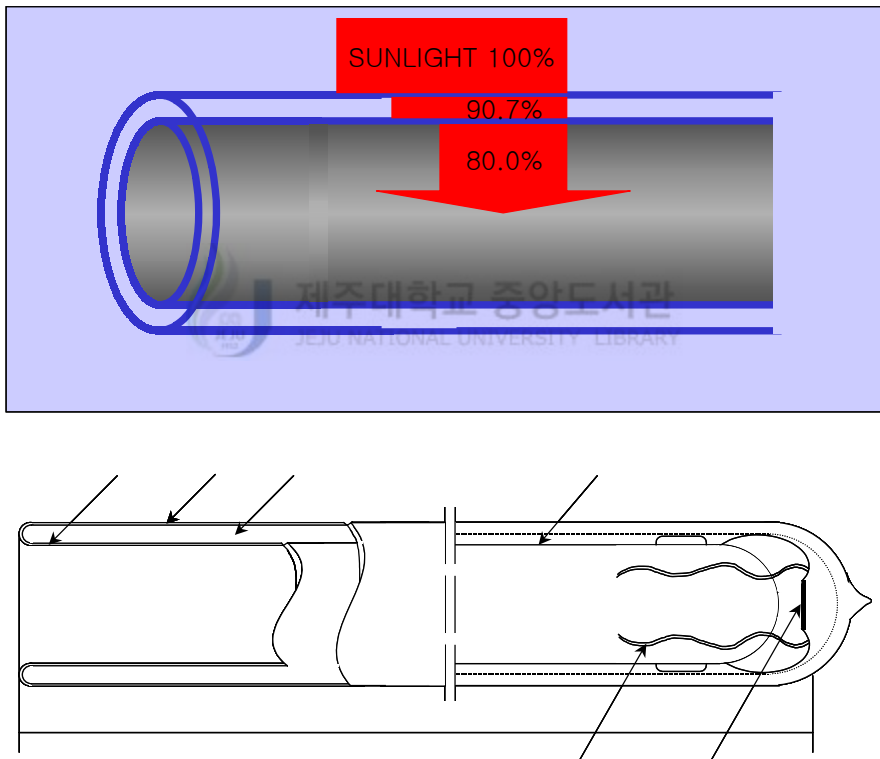


Fig. 7 All-glass solar vacuum collector tube

All-Glass Solar Vacuum Collector의 집열관은 길게 뽑은 보온병처럼 내유리관과 동주축의 외유리관으로 조성되었고, 내·외유리관의 입구는 합쳐 용봉되어 있다. 내·외

관 사이는 고압 진공 상태에서 받침대 있는 흡기제를 봉입하여 한 면으로 흡기제를 사용하여 증기 발산 후 진공 집열관의 보존 혹은 사용 과정 중 발산한 미소량의 기체를 흡수한다. 내관의 바깥쪽 표면은 태양광 선택성 흡수성 도표층(solar spectrum selective absorbing surface)을 칠하여 태양광에 대해 높은 흡수율을 보이고, 적외 파장 범위가 낮은 반사율을 확보하게 하였다. 흡수면의 코팅 과정에서 코팅면을 내·외곽 유리관의 진공 상태로 약 400℃에서 한 시간 가량 열처리를 하면 열처리된 표면의 흡수율이 0.92까지 상승하고, 방사율은 0.06~0.08(80℃)까지 감소한다.[YIN ZHIQIANG, 1999.]

현재 All-Glass Solar Vacuum Collector는 중·고온 이용을 위한 태양열 집열 기술 분야에서 많이 이용되고 있으며, 독일 파라디그마사의 CPC(Compound Parabolic Concentrator)형 태양열 집열 시스템, 중국 청화대학의 All-Glass Tube 방식의 태양열 집열기 등 여러 제품들이 출시되고 있다.

본 실험에서는 청화대학의 All-Glass Tube 방식의 태양열집열기를 가지고 실험을 하였다. Fig. 8과 9는 청화대학의 All-Glass Solar Vacuum Collector Tube에 U자관이 삽입되어 있는 형태를 나타낸 것이다. 이 형태는 Inlet관과 Outlet관 연결 부위를 다르게 한 것으로 상부의 관으로 열매체가 입수를 하여 U자관을 거치면서 태양열을 받아 데워지고 하부의 관으로 나온 열매체가 축열조와 연결된 주 파이프인 헤더에 모여 펌프에 의해 축열조로 이동하게 된다.

U자관형 All-Glass Solar Vacuum Collector는 fin이 있는 형태와 fin이 없는 형태 두 가지가 현재 보급되어 있다. Fig. 8은 U자관을 fin이 감싸고 All-Glass Solar Vacuum Collector Tube의 내부관의 안쪽을 둘러싸고 있는 것을 보여주고 있다.

<Table 2>은 중국 청화대학에서 개발한 All Glass Solar Vacuum Collector Tube의 재질과 설계 사양 등을 나타내고 있다.

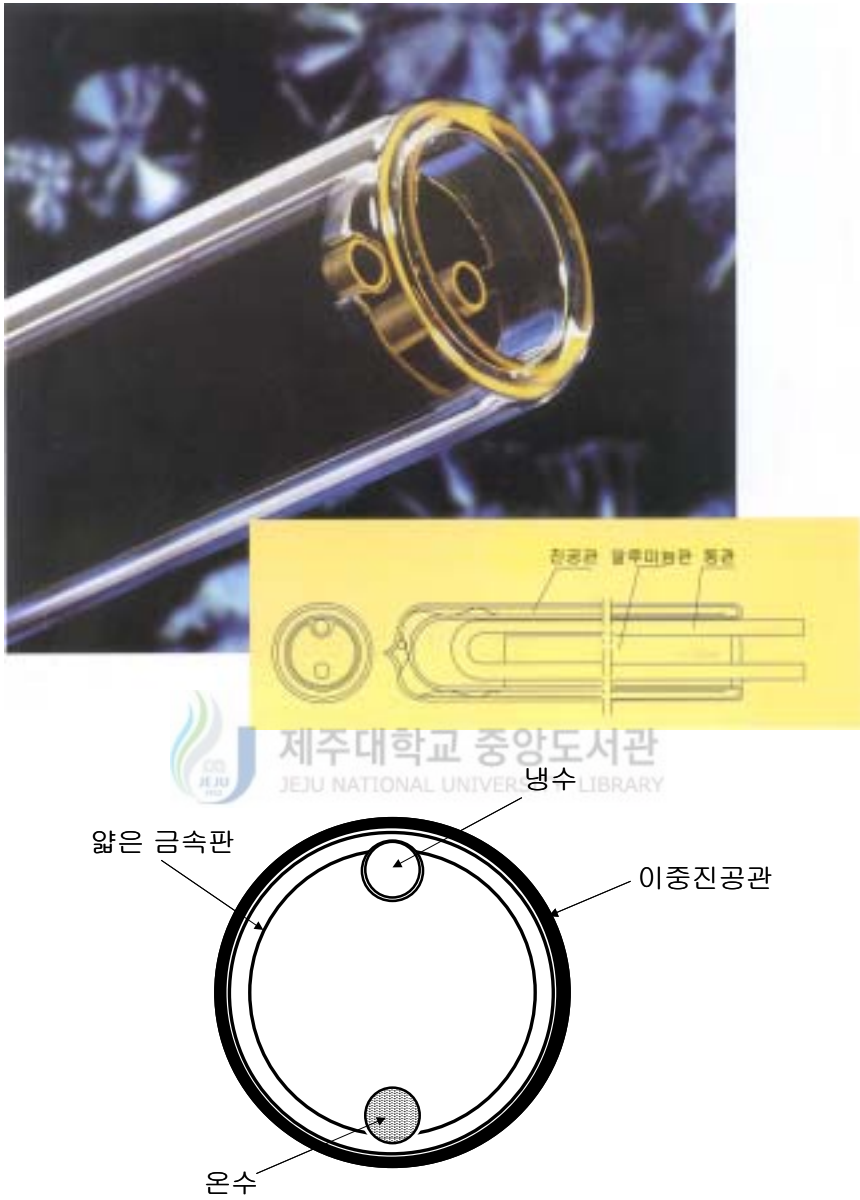


Fig. 8 All-glass solar vacuum collector tube with U-pipe and metallic fin inserted

<Table 2> Specifications of all-glass solar vacuum collector tube

Type	SL-1200 (QB-AI-N/AI-37 /47-1200-1)	SL-1500 (QB-AI-N/AI-37 /47-1500-1)
Configuration	Two concentric borosilicate glass tubes	Two concentric borosilicate glass tubes
Glass thermal expansion coefficient	$3.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$3.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Length	1200 mm	1500 mm
Cover tube diameter	47 mm	47 mm
Absorber tube diameter	37 mm	37 mm
Wall thickness	1.6 mm	1.6 mm
Transmittance of cover tube	0.91	0.91
Solar selective absorbing coating, Technology	Graded-N/AI selective surface Sputtering	Graded-N/AI selective surface Sputtering
Solar absorptance (AM1.5)	0.93	0.93
Emittance(80℃)	0.06	0.06
Vacuum Gas Pressure	$\leq 5 \times 10^{-3}$ Pa	$\leq 5 \times 10^{-3}$ Pa
Stagnation temperature (typical)	200 ℃	200 ℃
Heat loss coefficient of collector tube	≤ 0.85 W/m ² ℃	≤ 0.85 W/m ² ℃
Impact resistance	Withstand in(25mm) diameter hailstone without breaking	Withstand in(25mm) diameter hailstone without breaking
Strength (pressure tested)	1 MPa	1 MPa
Empty weight	1.1 kg	1.3 kg

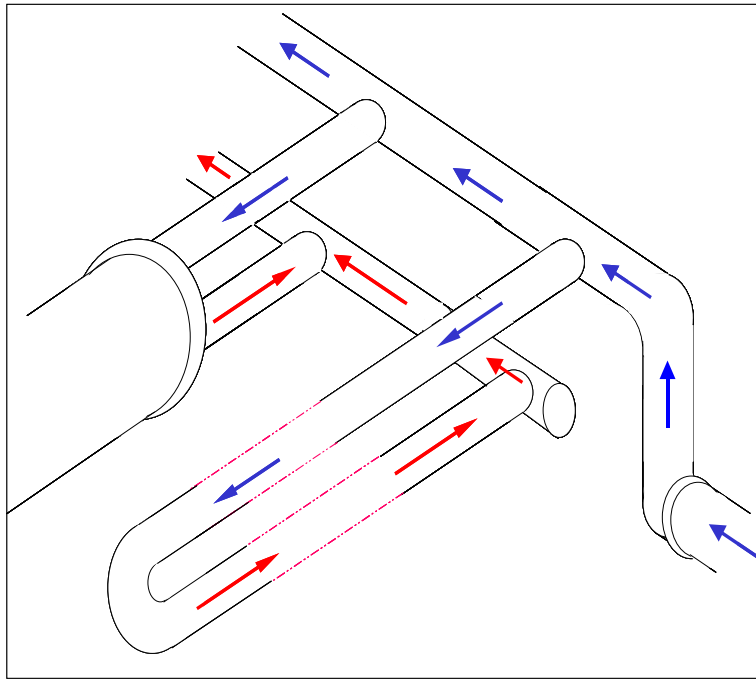


Fig. 9 All-glass solar vacuum collector tube with U-pipe inserted

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2. 실험방법

본 실험은 가급적이면 동일한 조건(집열 면적, 축열조 용량, 일사량 등)에서 모든 실측 data를 획득하는 데에 그 초점을 맞추고 수행하였다. 모든 실험 장치의 유량 공급 및 조절은 강제 대류 방식을 적용하여 펌프와 유량계 등으로 그 양을 조절하였다. 그리고, 열매체는 물을 사용하였고 집열기에서 데워진 물을 직접 축열조로 보내 저장하는 방법으로 실험하였다. 실험 장치에 사용된 펌프, 유량계, 차온제어기는 각각 동일한 것으로 사용하였다.

2.1 유량 조절

본 실험이 자연 대류 방법이 아닌 강제 대류 방법인 만큼 유량의 조절이 무엇보다 중요한 요소라 할 수 있다. 이러한 유량 조절은 앞서 언급한 바와 같이 펌프와 유량계 등을 통하여 이루어졌다. 펌프는 태양열 온수 시스템에서 주로 사용되는 것으로 50미크론 필터와 V-Seal을 사용하여 이물질이 유입되는 것을 방지하고 터미널박스에 부착된 속도 조절 장치가 있어서 출력의 4단 조정이 가능하여 유량을 알맞게 조절할 수 있었다. 또한, 유량계는 작동 유체의 유량을 분당 7ℓ까지 조정이 가능한 것으로 쉽게 그 양을 제어할 수 있다. 본 실험에서는 먼저 모든 시스템의 펌프 작동시 유량을 2ℓ/min으로 하여 실험을 하였고, 두 번째로 U자관형 All-Glass Solar Vacuum Collector인 경우 10mm의 U자관인 경우는 펌프 작동시 유량을 3ℓ/min로 8mm의 U자관인 경우는 2ℓ/min으로 각각 유량을 달리하여 실험해 보았다.

2.2 시스템 제어

유량의 조절도 중요하지만 전체 시스템을 제어하는 기능 또한 무시할 수 없다. 시스템을 제어하기 위해 사용된 차온제어기는 써미스터를 이용하는 것으로써, 써미스터를 집열기 헤더의 inlet 부분과 outlet에 각각 설치하였다. 차온제어기의 작동은 두 써미스

터 간의 온도차가 12°C 이상일 경우 자동으로 펌프를 작동시켜 집열기 내의 데워진 작동 유체를 축열조로 밀어내고, 그 온도차가 4°C 이하로 떨어지게 되면 펌프를 자동 정지시키도록 설정하였다. Fig. 10은 유량을 조절하는 펌프와 시스템을 제어하는 차온제어기를 나타낸 사진이다. Fig. 11은 써미스터를 나타내는 사진이다.

집열기와 축열조의 연결 부위가 서로 다른 네 개의 실험장치의 축열온도 변화를 알아보기 위하여 집열면적과 축열용량을 같게 하여 실험하였다.



Fig. 10 Photograph of the differential temperature controller and the pump

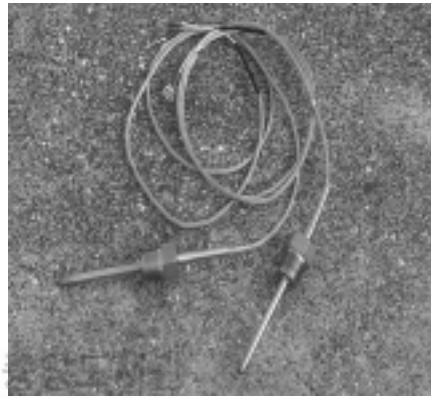


Fig. 11 Photograph of the thermistor

2.3 데이터 수집 및 열전대 보정

온도 측정에 필요한 열전대(thermocouple)는 K타입을 이용하였다. 열전대의 설치는 집열기의 입구와 출구, 축열조의 상부, 중부, 하부 그리고, 대기온도를 모니터링 할 수 있도록 각각 설치하였다. 열전대의 설치에 앞서서 측정 에러를 줄이기 위해 열전대의 보정 작업이 이루어졌다. 삽입될 모든 열전대를 데이터 수집 장치에 연결하고 항온조를 이용하여 0°C와 80°C까지의 범위에서 보정 과정을 거친 열전대를 사용하였다. 보정된 열전대는 ±0.5°C 이내의 오차 범위로 보정되었다.

태양 에너지의 양을 측정하기 위하여 집열기와 같은 각도로 일사량계를 설치하였다.

자료획득시스템(HYDRA: data acquisition system)을 이용하여 매 2분 간격으로 자료를 수집·기록하였다. 이 자료획득시스템은 온도 측정을 위한 다중 채널 온도측정 시스템으로 일사량과 온도를 동시에 측정하여 EXCEL 프로그램을 통해 그래프화 할 수 있다. Fig. 12는 자료획득시스템인 HYDRA를 Fig. 13은 일사량계를 각각 보여준다.



Fig. 12 Photograph of the portable data acquisition system(Hydra)

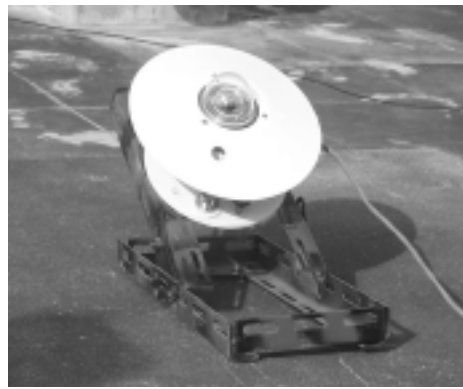


Fig. 13 Photograph of the radiometer



2.4 실험장치 구성

본 실험에 사용된 실험장치를 간단한 구성도로 Fig. 14에 나타내었다. 탱크의 초기 온도는 탱크 내에 보조열원을 두지 않아서 탱크 열손실 에너지에 영향을 주지만, 집열 효율은 탱크 내 설정 온도에 관계가 거의 없다. <Table 3>에서 알 수 있듯이 모든 집열기의 집열면적과, 축열조의 용량이 동일하게 하여 실험하였다. U자관형의 태양열집열기인 All-Glass Solar Vacuum Collector의 경우는 축열조와 연결되어 있는 주 파이프인 헤더와 연결되는 U자관의 내경(10mm, 8mm)과 길이(1660mm, 1360mm)를 서로 달리한 것으로 동일한 집열면적과 동일한 유량을 공급할 경우 관의 크기에 따라 어떤 축열효율을 보이는지 비교할 수 있다.

U자관형과 Heat Pipe 삽입형은 모두 지면과 40°의 경사각을 두고 설치하였다. Fig. 15, 16과 17은 시스템을 완전히 설치한 후의 사진이다.

<Table 3> Comparison of each collector

분 류	Heat pipe 삽입형	10mm U자관형	이중관 삽입형	8mm U자관형
진공관 외경 (mm)	98	58	102	47
연결형태	Heat pipe 삽입형	U자관 삽입형	이중관 삽입형	U자관 삽입형
관내 유량 (ℓ/개)	0.48	1.24	0.7	0.92
집열면적 (m ²)	0.7	0.7	0.7	0.7
축열조 용량 (ℓ)	100	100	100	100

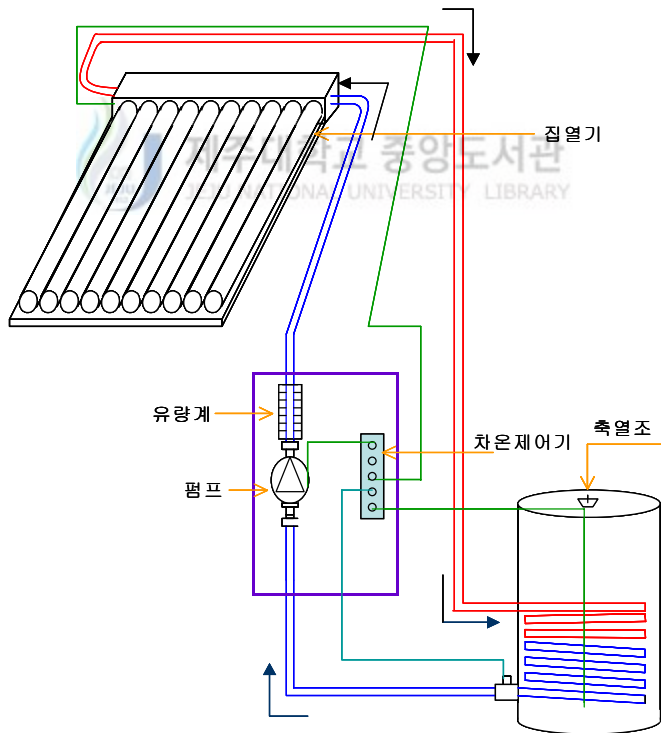


Fig. 14 Experimental apparatus



Fig. 15 Photograph of the installed
8mm U-pipe type system



Fig. 16 Photograph of the installed
10mm U-pipe type system



Fig. 17 Photograph of the installed single vacuum tube system with heat pipes(SEIDO 5)

이중관 삽입 방식인 진공복사관식 태양열집열기(SEIDO 2)인 경우 집열기를 지면에서 80cm정도 올린 상태에서 수평으로 배열하였으며, 진공관 안에 있는 흡수관의 각도를 40°로 하여 다른 집열기의 경사각과 동일하게 하였다. Fig. 18은 이중관 삽입형 진공복사관식 태양열집열기(SEIDO 2)의 설치 모습이다



Fig. 18 Photograph of the installed single vacuum tube with a dual pipe flow passage(SEIDO 2)



Fig. 19 A view of experimental installations

Fig. 19는 모든 실험 장치가 동일 장소에 설치되어 있음을 보여주는 사진이다.



2.5 축열 및 내구성 증진을 위한 상변화물질의 이용에 관한 연구

1) 개요

완전 유리식 진공관은 물을 직접 진공관 내부에 채워 가열할 경우 그 열성능은 가장 뛰어나지만 동결기 동파의 위험성이 항상 상존하게 된다. 이를 보완하기 위하여 만약 상변화물질 등을 이용하여 일사조건이 양호한 낮 동안에 태양열을 최대한 축열하여 야간의 냉각기에 방열·이용할 수 있다면 물의 결빙 등을 방지하여 집열 장치의 내구성 증진을 꾀할 수 있을 뿐 아니라, 시스템의 효율 향상에도 기여할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 태양열의 축열 제고 및 내구성 증진을 위해 완전 유리식 진공관 내에 상변화 물질이 충전된 원형 실린더 구조의 container를 삽입하였을 경우 시스템의 열성능 및 내구성에 미치는 영향을 간단한 수치해석 모델을 이용하여 분석하였다. 이 연구는 실제로 실측하기 어려운 상변화 경계면의 이동과 열전달 메커니즘 상호간의 관계를 체계적으로 관찰할 수 있는 tool을 제공하여 준다고 할 수 있다. 물론, 본 연구의 결과

를 바로 실제 상황에 적용하기는 현실적으로 어려우나 그 개념을 구현할 수 있는 장치를 설계·장착한다면 상당한 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다.

2) 모델링

PCM(Phase Change Material)이 들어 있는 container를 가정한 모델에서 어떤 한 경계면이 그 상변화 온도보다 높은 온도장에 놓일 경우 그 경계면의 온도가 상변화 온도를 넘어서면 액화가 일정한 비율로 진행되기 시작한다. 이때 열전달은 두 개의 상에서 같이 일어나므로 그 결과식은 각각의 상에 대하여 구해야 한다.

고상과 액상의 경계면에서는 열평형에 대한 미분방정식을 풀어서 그 위치를 추정할 수 있고, 그 열전달 프로세스의 방식은 고상에서는 전도이지만, 액상에서는 전도뿐만 아니라 고체가 액화되어 가는 과정에서 발생하는 밀도 차에 의한 자연대류가 있을 수 있다.

만약, 용융 과정에서 액화의 양상이 어떠한 층을 이루며 나타난다면, 그것은 단지 전도만의 문제일 것이다. 하지만, 실제적인 현상은 액체는 어떠한 외적 요인으로 인하여 흔들리게 되고 따라서 층을 이루면서 액화되어지지 않게 된다. 이러한 경우에는 운동량방정식이 고려되어야 되고, 그 해석은 한층 더 복잡해지게 된다.

상변화물질(PCM)인 Paraffin Wax가 채워진 3차원 원통형 실린더를 모델로 heat transfer finite volume package를 사용하였고, 시뮬레이션 프로그램으로 STAR-CD를 이용하였다.

① Simulation 1

PCM만을 고려한 실험으로 외면이 100% 단열되어 있고 일정한 초기온도를 유지하고 있는 원통형 실린더의 한쪽 면에 순간적으로 용융온도 보다 높은 100℃의 온도를 가한 후, 내부 PCM의 상태변화와 온도장을 계산한다. 이때, 시간 $t=0$ 일 때, $T_{pcm} = T_{ambient} = 20^\circ\text{C}$ 이고 상변화 온도는 47℃로 가정한다. 결과적으로 일정시간이 흐른 후에는 액체 경계면이 발생하게 되고, 그 상경계면은 점차적으로 이동하게 된다. PCM의 상태가 고상에서 액상으로 완전히 변화된 후에는 100℃의 온도를 가했던 한쪽 면을 다시 초기 온도로 돌려서 액상 경계면을 다시 이동시킨다. container의 재료는 SUS304를 사용한다. Fig. 20은 case 1의 경우를 도식화 한 것이다.

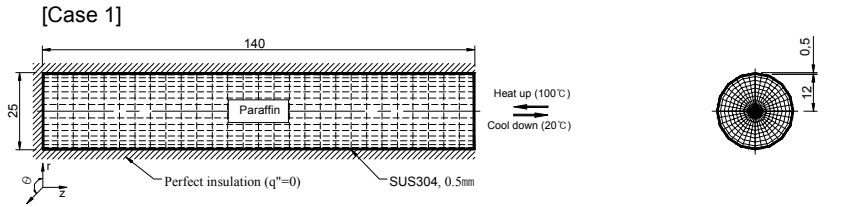


Fig. 20 Schematic of solution domain with PCM

② Simulation 2

Simulation 1과 동일하나 원통형 실린더의 외부에 외면이 100% 단열 된 오일 자켓을 씌운 후 같은 방법으로 오일 자켓의 한쪽 면을 순간적으로 100°C로 만든 후, 내부 PCM의 상태변화와 온도장을 계산한다. 이때도 시간 $t=0$ 일 경우에 $T_{pcm} = T_{ambient} = T_{oil} = 20^\circ\text{C}$ 이다. PCM의 상태가 고상에서 액상으로 완전히 변화 후에는 그 과정을 반대로 수행한다. 즉, 오일 자켓의 한쪽 면을 순간적으로 다시 20°C로 만들어 응고를 시켜 PCM의 온도가 20°C가 될 때까지 실험을 한다. Fig. 21은 case 2의 경우를 나타낸 그림이다.

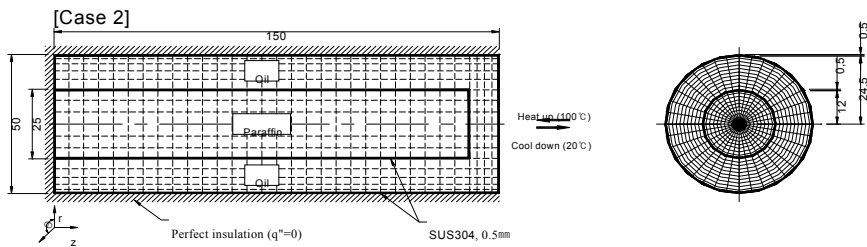
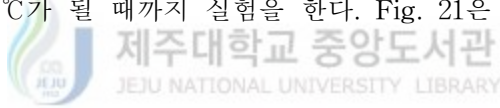


Fig. 21 Schematic of solution domain with PCM and oil jacket

③ Simulation 3

Simulation 2의 모델에 마개를 장착하고 그 마개의 종류를 변화시켜가면서 마찬가지로 마개의 한쪽 면을 순간적으로 100°C로 만든 후, 내부 PCM의 상태변화와 온도분

포를 기록한다. 이때도 초기조건과 경계조건은 동일하다. 역시 PCM의 상태가 고상에서 액상으로 완전히 변화 후에는 그 과정을 반대로 수행하여 마개를 통한 열손실에 따른 온도장을 계산한다. 본 실험에서는 먼저 Simulation 1을 수행하였다. Fig. 22는 case 3의 그림을 나타낸 것이다.

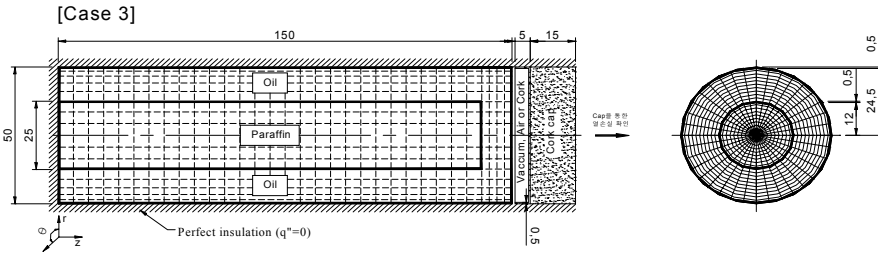


Fig. 22 Schematic of solution domain with PCM, oil jacket and various caps

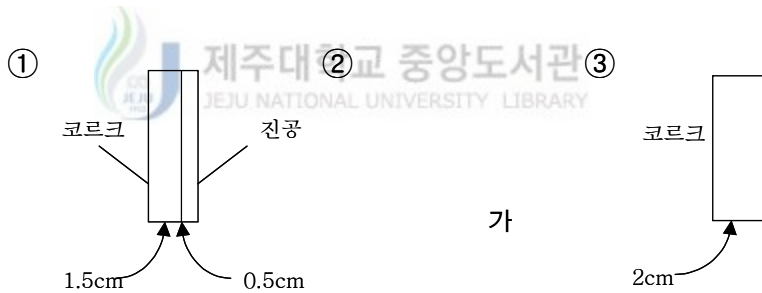


Fig. 23 Kind of the caps

Fig. 23은 case 3인 경우에 쓰이는 마개의 종류를 나타낸 그림이다. <Table 4>는 시뮬레이션에 이용된 재료들의 특성들을 나타낸 것이다. 그리고 PCM의 melting Point와 latent heat는 각각 47°C, 2.09×10^5 J/s이다.

<Table 4> Thermo-physical properties used for computation

Material	Thermal Conductivity [W/(m · K)]	Density [kg/m ³]	Specific Heat [J/(kg · K)]	Viscosity [kg/(m · s)]
*PCM (Paraffin Wax)	0.14	820 (Sol.) 770 (Liq.)	2890 (Sol.) 2510 (Liq.)	1.07×10 ⁻⁶
PCM container (SUS 304)	14.9	7900	477	·
Oil	0.145	890	1868	0.999
Air	0.02637	1.205	1006	1.81×10 ⁻⁵
Vacuum	0.01948	1.205	1006	1.809×10 ⁻⁵
Cork	0.039	120	1800	·

IV. 실험결과 및 고찰

1. 축열조의 온도 변화 분석

1.1 동일한 조건에서의 축열조 온도 변화

서로 다른 네 개의 집열기의 진공관내 파이프(manifold)와 축열조와 연결되는 주 파이프인 헤더의 연결 형태에 따른 축열조 온도의 변화를 알아보기 위하여 우선 동일한 집열면적과 동일한 유량을 흘려보내어 축열용량이 같은 축열조의 온도 변화가 어떻게 나타나는지를 살펴보았다. 펌프 작동시 흐르는 유량은 $2\ell/\text{min}$ (이상적인 유량)으로 하였고, 집열면적은 0.78m^2 , 축열조의 물의 용량은 100ℓ 로 하였다. 그리고 일사량 조건과 주변 공기온도를 같게 하기 위하여 동일한 시간에 동일한 장소에서 실험을 실시하였다.

Fig. 24~29는 위에서와 같은 조건에서 실시한 실험에 의해 얻어진 데이터이다. 각각의 결과들은 집열기의 입구와 출구의 온도를 나타내는 Inlet과 Outlet의 온도 분포와 축열조의 평균온도, 주위의 공기의 온도를 나타내는 그래프이다. 그리고 Fig, 29는 실험 시간 동안의 일사량을 나타낸다. Fig. 24는 U자관형 All-Glass Solar Vacuum Collector에서 U자관이 8mm인 경우 집열기가 나타내는 온도 분포이다. 집열기의 성능이 좋아 그래프가 요동하는 일이 거의 없이 일정한 기울기를 가지고 온도가 증가하는 모습을 볼 수 있다. Outlet 곡선이 일정하게 상승했다는 것은 시스템에서 헤더를 지나가는 저온의 유체와 집열기 내에 가열된 유체 사이에 열전달이 적절하게 이루어졌다는 것을 의미한다. 즉, 집열기에 있는 U자관과 헤더와의 연결 부위에서의 열매체의 이동에 큰 지장이 없었음을 미루어 짐작할 수 있다. 반면에, 이중관 삽입형 진공복사판식 태양열집열기(a single solar vacuum collector SEIDO 2)의 경우를 보면, 전체적으로 Outlet의 온도가 평균적으로 증가하는 것을 보이고 있으나 그래프의 peak 주기가 아주 빠르게 나타남을 알 수 있다. 이는 시스템에서 이중관 내의 유량이 0.7ℓ 로 다른 집열기에

비해 상대적으로 적어 집열기에 의한 온도 상승 시간이 줄어들었다고 볼 수 있다. 이중관 삽입형인 경우 지면에 수평으로 설치되어 있어 집열기의 이중관 내의 온도와 써미스터의 위치에서의 온도가 서로 다르다는 것을 알 수 있다. 즉, 집열기의 이중관내의 뜨거워진 열매체가 이중관 내에서 대류에 의해 이중관 상부에 머물게 되고 상부에 머물고 있던 열매체에 의해 축열조와 연결된 주 파이프인 헤더에 있는 열매체에 열전달이 이루어지므로 경사각을 주어 설치된 다른 집열기들보다 열전달이 늦게 이루어져 실제로 집열기의 이중관에 있는 열매체의 온도보다 써미스터가 감지하는 온도가 낮아 큰 진폭의 peak를 보이고 있는 것이다. 다시 말하자면, 집열기에서 열매체가 머무는 관이 이중관으로 되어 있고 주 파이프인 헤드 또한 이중관으로 되어 있어 수평으로 이루어진 집열기의 대류에 의한 열전달이 경사각을 이룬 집열기의 열전달보다 느리고, 주 파이프의 냉수에 또한 열을 빼앗겨 실제 집열기에서의 온도와 써미스터에서의 온도차가 심하게 나는 것이다. 따라서 설정된 온도에 펌프가 작동은 하지만, 실제 집열기의 이중관에서의 온도는 설정된 온도보다 훨씬 높게 나타나는 것이다. 이러한 온도차는 시스템에 갑작스런 온도 변화로 인한 열 쇼크를 주게 되어 내구성 문제로 인한 시스템의 장기간 사용에 어려움을 주게 된다. 그리고, 이 시스템인 경우는 헤더와의 연결이 삽입형인 만큼 작은 온도 변화와 관의 크기가 작아 다른 집열기보다 높은 압력으로 인하여 장시간 사용할 경우 삽입 부분의 연결 상태에 문제가 발생할 우려가 있다. 그래프의 앞부분과 뒷부분의 부드러워진 곡선이 의미하는 것은 차온제어기의 온도 설정에 기인한 것으로 Inlet과 Outlet사이의 온도차가 최고 12℃의 차이를 보여야만 펌프가 작동하게 되어 있어서 그 구간에서는 일사량의 부족으로 집열기의 Outlet온도가 서서히 증가하고 또한 감소하게 된 것이다.

Fig. 25와 27은 각각 10mm U자관형 All-Glass Solar Vacuum Collector와 Heat Pipe 삽입 방식의 진공복사관식 태양열집열기(SEIDO 5)의 결과 그래프를 나타낸다. 이 두 그래프의 공통적인 특징을 살펴보자. 이중관 삽입식 진공복사관식 태양열집열기의 그래프와 단순히 그래프의 모양만을 보고 비교한다면 peak의 진동 모습이 같다고 할 수 있다. 하지만, 그 peak의 높이가 다르다는 것은 바로 알 수 있을 것이다. 이것은 경사각을 이루어 설치된 집열기(U자관형 All-Glass Solar Vacuum Collector, Heat Pipe 삽입형 진공복사관식 태양열집열기 등)의 경우 뜨거워진 열매체가 밀도차와 대류에 의

해 자연스럽게 상부로 모이게 되고 이것을 써미스터가 바로 감지를 하게 되어 실제 집열기의 온도와 써미스터의 감지 온도가 차이가 없게 되고 따라서 차온제어기가 설정한 온도에 알맞은 온도의 진폭을 보여준다. 두 그래프간의 또 다른 한 가지 공통점은 peak의 주기가 이중관 삽입형보다 길다는 것이다. 이것은 U자관인 경우 관 내부의 열매체의 유량이 많아 열매체의 온도를 높이는 데 그만큼 시간이 걸리며 그래프에 나타난 peak의 평균 주기는 약 12.5분이다. Heat Pipe 삽입식인 경우는 직접적으로 열매체를 집열관에서 데우지는 않지만, 헤더의 유량이 많아서라기보다는 다른 집열기에 비해 열매체의 순환이 원활하고 열매체의 교체 후 Heat Pipe가 빼앗긴 열을 회복하는 시간이 긴데서 오는 현상이라고 보인다. Fig. 27의 그래프에 나타난 Heat Pipe 삽입형 집열기의 평균 peak의 주기는 약 10분이다. 반면에 Fig. 26의 peak의 주기는 약 6분 정도이다.

Fig. 28은 각각의 집열기에 대한 축열조 열매체의 평균온도를 나타낸 그래프이다. 집열면적이 같고, 축열용량이 같음에도 불구하고 보는 바와 같이 축열조의 평균온도의 큰 차이를 보이는 것으로 보아 U자관 삽입형인 All-Glass Solar Vacuum Collector의 열 성능이 뛰어난을 알 수 있다. 그래프에서 보면 8mm관으로 연결된 All-Glass Solar Vacuum Collector가 10mm로 연결된 것 보다 더 높은 축열온도를 나타내고 있다. 이것은 fin이 8mm U자관과 유리관 내부를 감싸고 있어서 그 효과로 인한 차이를 확연히 보여주고 있는 것이다.

Fig. 29는 실험 시간동안의 일사량을 나타낸 그래프이다.

<Table 5>는 실험 결과의 비교를 표로 나타낸 것이다.

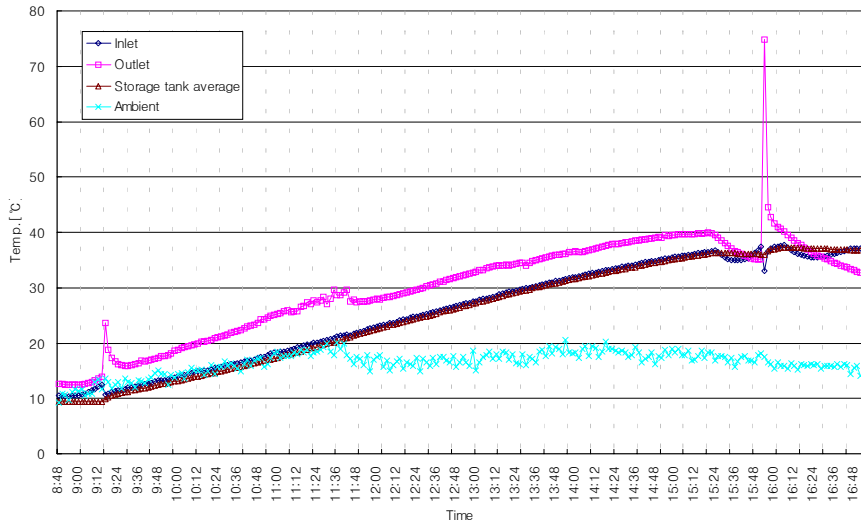


Fig. 24 Test results of a 8mm U-pipe type

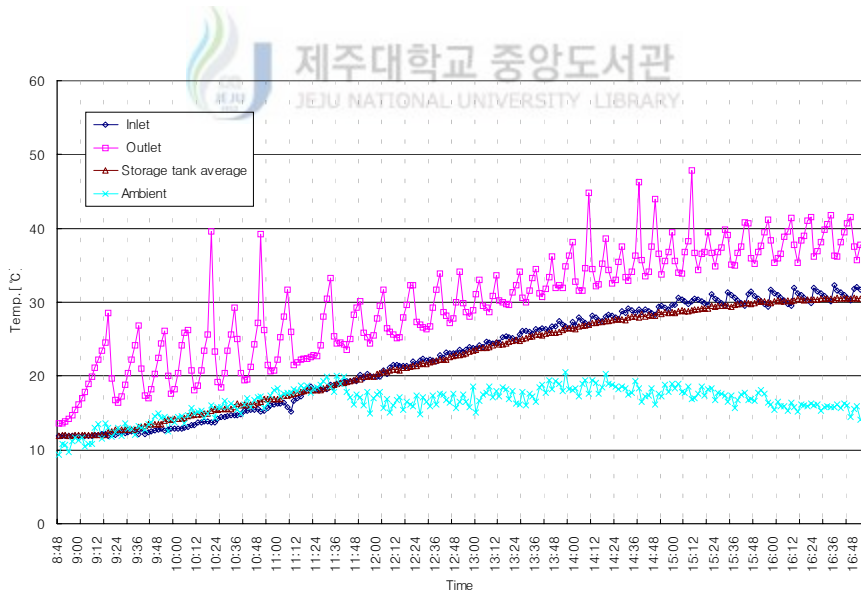


Fig. 25 Test results of a 10mm U-pipe type

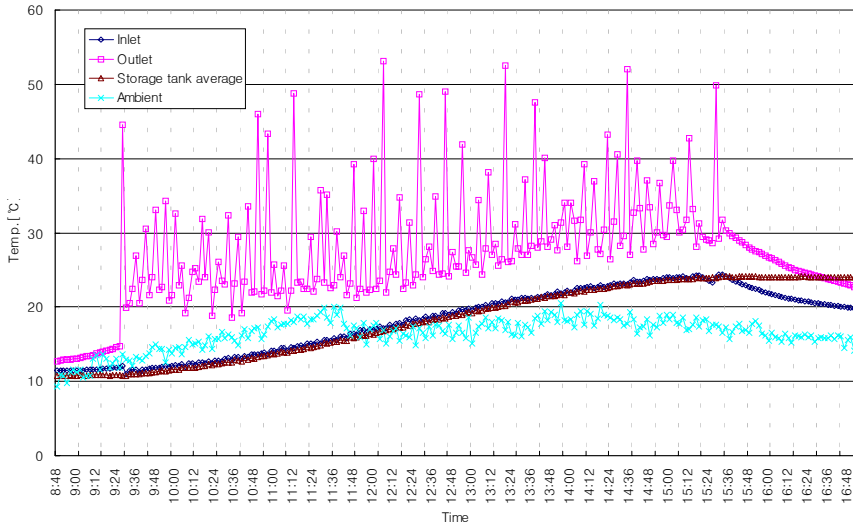


Fig. 26 Test results of a single vacuum tube with a dual pipe flow passage(SEIDO 2)

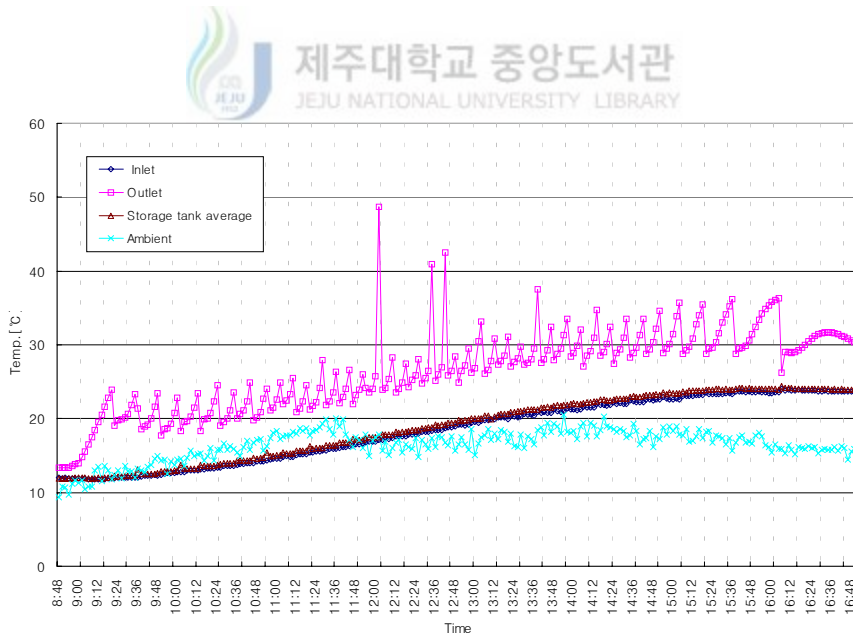


Fig. 27 Test results of a single vacuum tube with heat pipe

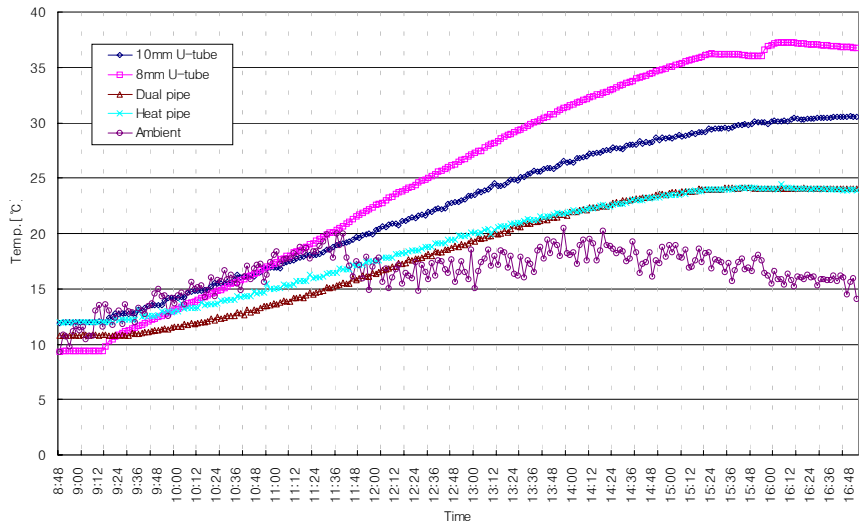


Fig. 28 Average storage tank temperatures for different systems

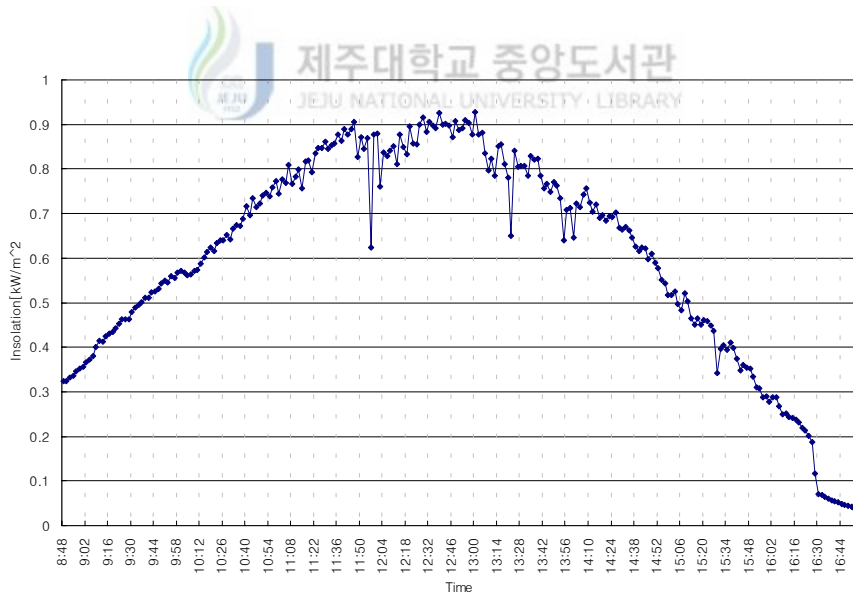


Fig. 29 Insolation

<Table 5> Results of experimental data and comparison performance

	8mm U자관형	10mm U자관형	이중관 삽입형 (SEIDO 2)	Heat pipe형 (SEIDO 5)
평균 일사량 (J/sec · m ²)	72.52			
누적 일사량 (J/sec · m ²)	17623057.68			
초기 Inlet온도 (°C)	10.48	11.88	8.5	11.94
초기 축열조 평균 온도 (°C)	9.35	11.9	7.8	11.9
축열조 용량(ℓ)	100			
최종 축열조 평균 온도(°C)	36.45	30.05	24.5	24
효율(%)	78.97	55.25	47.43	36.79

1.2 집열면적 변화에 따른 축열조 온도 변화

동일한 집열면적에서 U자관형 All-Glass Solar Vacuum Collector 태양열집열기가 우수한 집열량을 나타냄을 알았다. 앞의 실험에서 집열량이 가장 좋았던 8mm U자관형 All-Glass Solar Vacuum Collector의 집열면적을 그대로 두고 나머지 집열기들의 집열면적에 변화를 주었다. 이 때, 펌프 작동시 흐르는 유량은 2ℓ/min, 축열조의 축열 용량 100ℓ로 같으며, 앞의 실험에서처럼 동일한 시간, 동일한 장소에서 실험을 진행하였다. Fig. 30~35는 집열면적 변화에 따른 결과를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 30은 8mm U자관형 All-Glass Solar Vacuum Collector의 실험 결과이다. 일사량의 변화에 따라 그래프의 기울기에 큰 진동 없이 진행되었다. 그러다가 오후 2시 20분이 지나면서 일사량의 변화가 자주 일어나자 그래프의 기울기의 증가가 둔해져 Outlet의 온도가 떨어짐을 알 수 있다. Fig. 31은 10mm U자관형 All-Glass Solar Vacuum Collector의 실험결과를 나타낸다. 이 때, 집열면적은 0.95m²이다. 중간에 peak가 없는 구간이 보이는데 이는 일사량이 좋지 않아 관내 유량이 많은 관의 온도를 높이는데 그만큼 시간이

걸림을 보여주고 있다. 오전(10시 30분 이전)에 peak의 움직임을 보면 온도는 평균 Outlet의 온도는 꾸준히 올라가고 있으나 peak의 움직임을 보면 주기가 길다. 이는 이 시간대의 평균적인 일사량이 $0.6\text{kW}/\text{m}^2$ 를 보이고 있어 관내 유량이 많은 열매체의 온도를 높이는데 시간이 걸린다고 볼 수 있다. 그리고 주기가 길어진 것은 집열면적과 관계가 있다고 볼 수는 없고 다만 축열조의 평균온도에 영향을 준다고 봐야 하겠다. 반면에 Fig. 33 Heat pipe 삽입식인 경우 헤더에 있는 열매체를 Heat pipe가 데우는 방식이므로 헤더에 연결된 Heat pipe 수가 증가한 만큼 peak의 동일 일사량에서 peak의 주기가 빨라짐을 알 수 있다. 또한 Heat pipe 삽입식은 재료의 특수성인 빠른 열 반응성에 의하여 Fig. 32의 이중관 삽입형 Single Solar Vacuum Collector보다 소폭의 진폭을 보여주고 있다.

Fig. 34는 축열조의 평균온도를 나타낸 것으로 집열면적이 늘어나 전체적으로 축열조의 평균온도가 높아졌음을 알 수 있다. 특히, 이중관 삽입형 집열기인 경우 집열면적을 0.78m^2 에서 1.45m^2 로 거의 두 배로 늘려 측정하였는데, 그 효과로 평균온도의 증가량이 좋아졌음을 확인할 수 있다. 재미있는 사실은 8mm U자관형 All-Glass Solar Vacuum Collector의 집열면적이 0.78m^2 로 이중관 삽입형 집열기 면적의 절반 정도인데 축열조의 평균온도 기울기는 거의 비슷하게 나온다. 이는 8mm U자관형의 All-Glass Solar Vacuum Collector의 가용 집열량이 우수하다는 것을 보여 준다고 하겠다.

Fig. 35는 실험 시간대의 일사량을 나타낸다. <Table 6>에는 실험결과를 나타내었다.

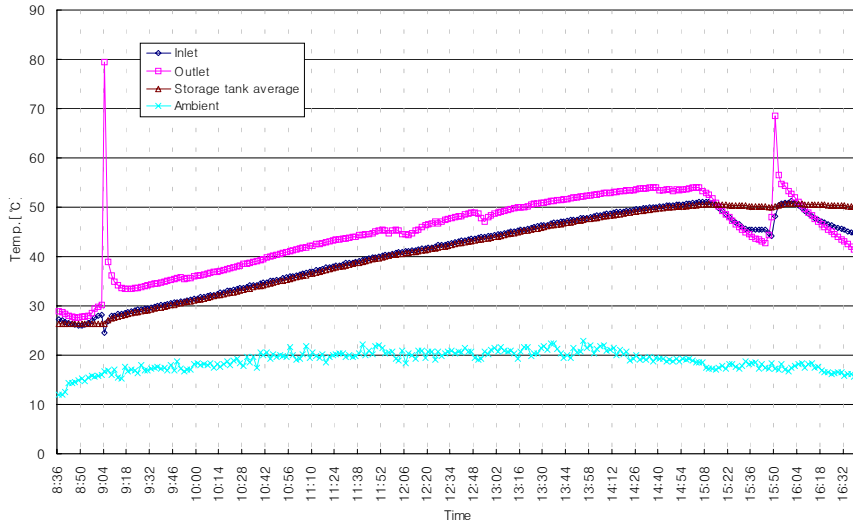


Fig. 30 Test results of a 8mm U-pipe type

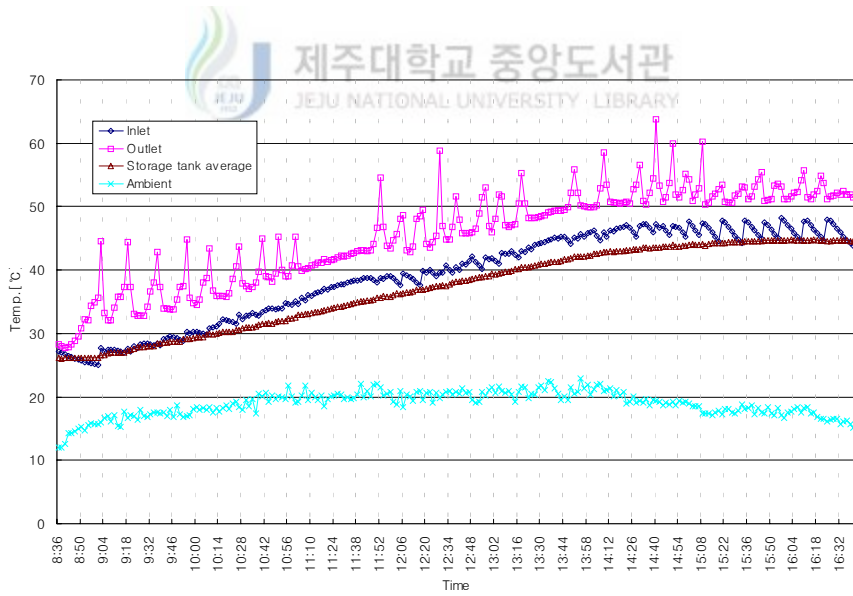


Fig. 31 Test results of a 10mm U-pipe type

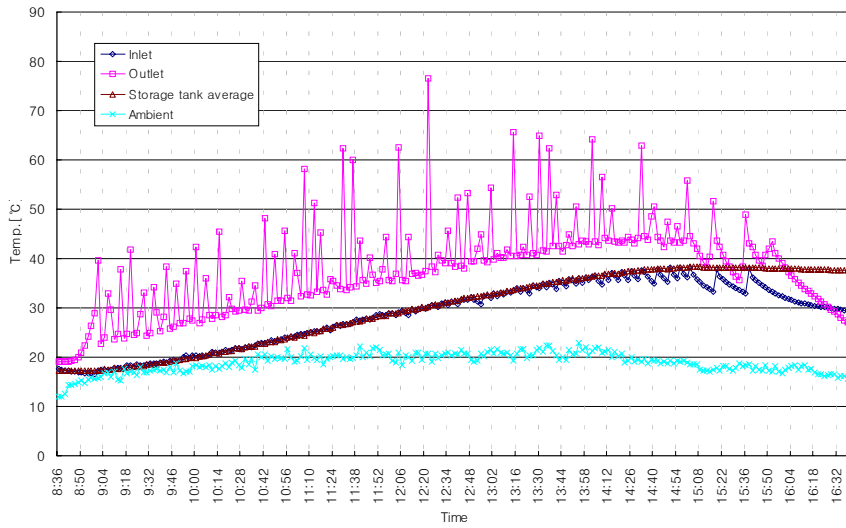


Fig. 32 Test results of a single vacuum tube with a dual pipe flow passage(SEIDO 2)

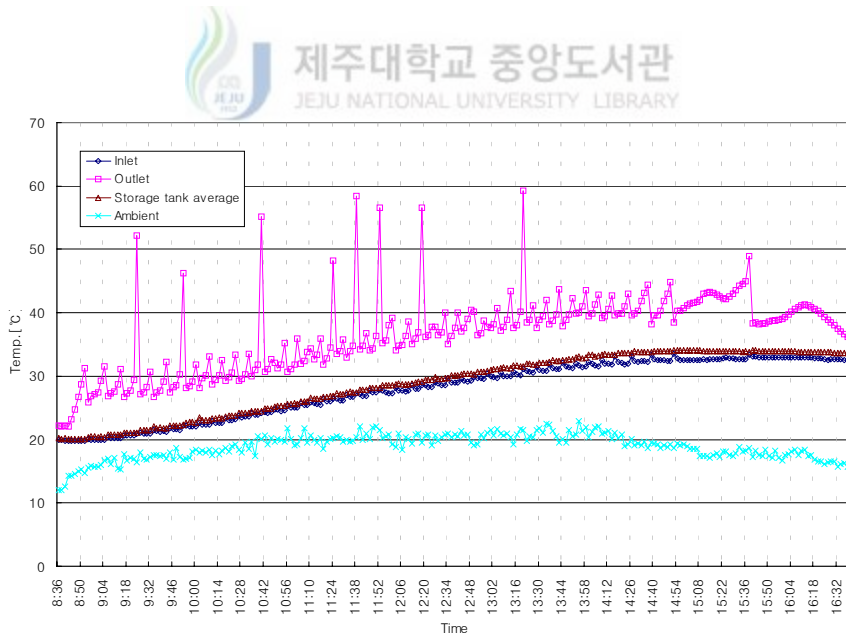


Fig. 33 Test results of a single vacuum tube with heat pipe

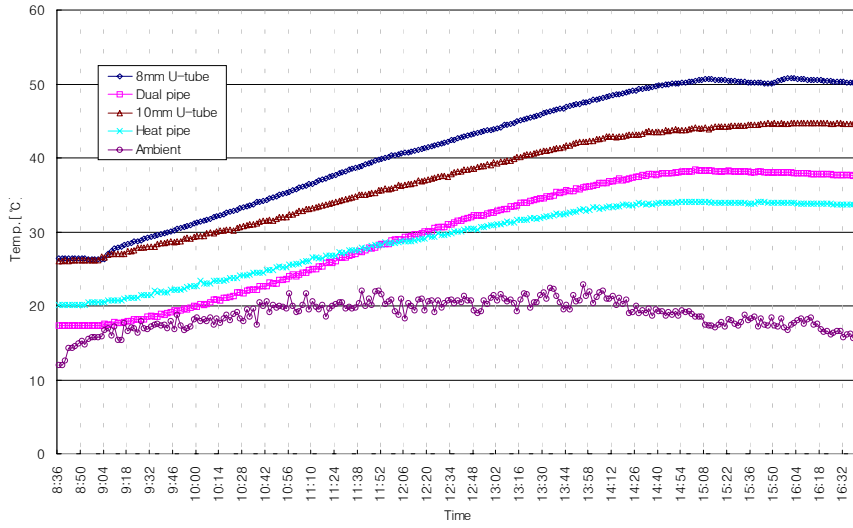


Fig. 34 Average storage tank temperatures for different systems

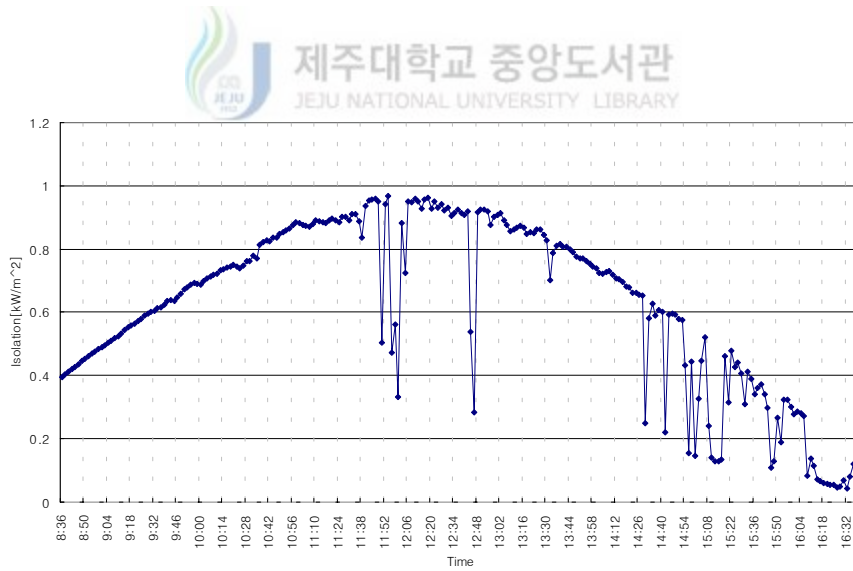


Fig. 35 Insolation

<Table 6> Results of experimental data and comparison performance

	8mm U자관형	10mm U자관형	이중관 삼입형 (SEIDO 2)	Heat pipe형 (SEIDO 5)
평균 일사량 (J/sec · m ²)	75.4			
누적 일사량 (J/sec · m ²)	18323280.6			
초기 Inlet온도 (℃)	26.5	26.39	17.21	19.8
초기 축열조 평균 온도(℃)	26.4	26.1	17.3	20.14
축열조 용량(ℓ)	100			
최종 축열조 평균 온도(℃)	50.24	44.63	37.93	33.7
집열 면적(m ²)	0.78	0.95	1.45	0.95

1.3 펌프 작동시 유량의 변화에 따른 축열조 온도 변화

다음은 성능이 좋은 두 U자관형 All-Glass Solar Vacuum Collector의 유량을 달리 하여 실험하였다. 이는 fin의 역할을 펌프 작동시의 유량의 변화로 대신 할 수 있는지에 대해 실험을 한 것이다. 8mm U자관인 경우 펌프 작동시 2ℓ/min의 유량을 흘려주었고, 10mm U자관인 경우에는 3ℓ/min의 유량을 흘려주었다. 물론, 집열면적과 축열조의 열매체 용량을 같게 하였고, 동일 장소에서 같은 시간 동안에 측정한 것이다. Fig. 36과 37의 그래프에서 볼 수 있듯이 그래프의 기울기의 차이가 거의 없는 것으로 보아 8mm U자관의 fin의 역할을 10mm U자관에서 관이 큰 점을 이용하여 유량을 늘려 어느 정도는 극복 할 수 있음을 보여주고 있다.

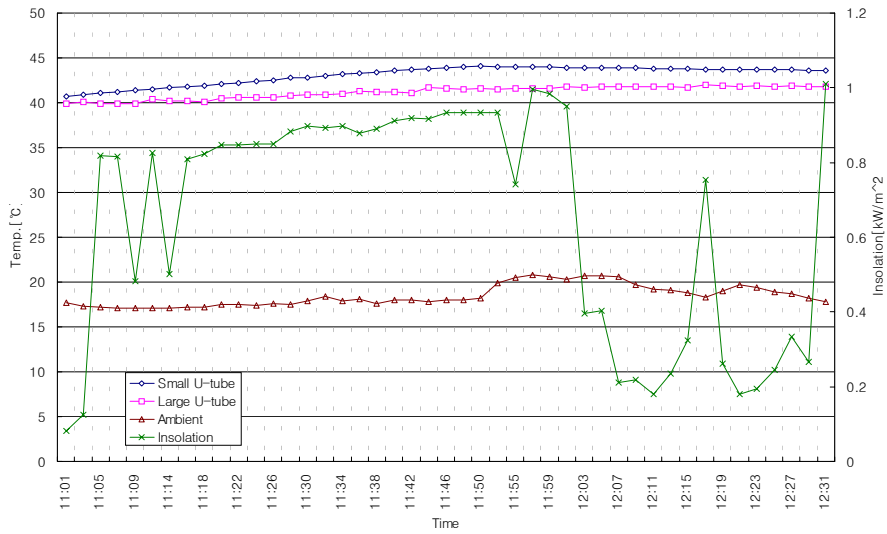


Fig. 36 Comparative performance data of 10mm and 8mm U-pipe

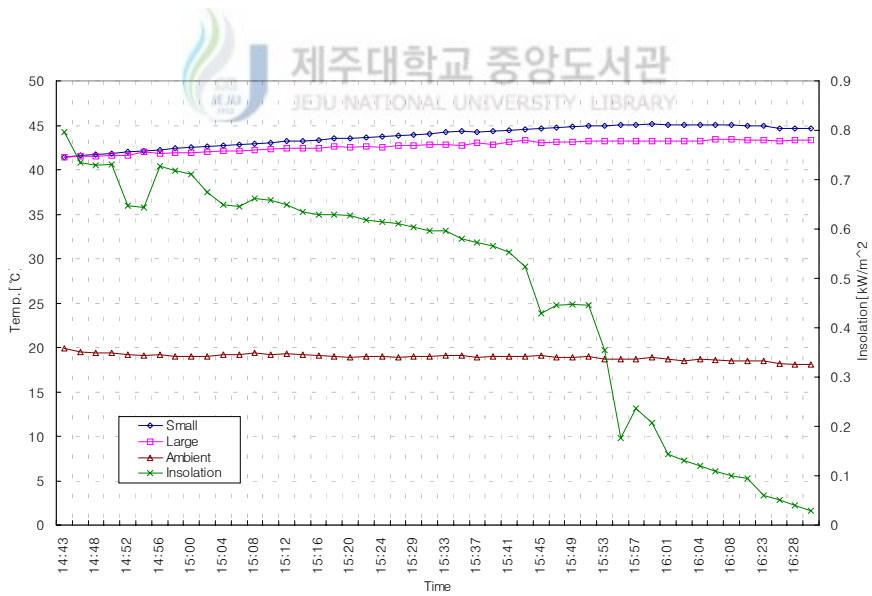


Fig. 37 Comparative performance data of 10mm and 8mm U-pipe

2. 시뮬레이션 분석

상변화물질이 충전된 container는 진공관 안에 놓일 경우 여러 형태의 온도 조건에 놓이게 된다. 본 연구에서는 실린더 형상의 container의 일단이 가열 혹은 냉각될 경우의 실린더 내부의 상변화물질의 시간에 따른 변화를 해석적으로 보여주고 있다. 또한, 정상상태 하에서 conduction과 convection을 동시에 고려할 경우의 수치해석 결과를 일부 소개하고 있다.

2.1 정상상태에서 Conduction 만을 고려

정상상태에서 conduction만을 고려하였을 때, melting과 solidifying시 PCM의 시간에 따른 변화 상변화 온도와 과정을 알아보고자 하였다.

Fig. 38은 Case 1의 melting 과정을 나타낸다. PCM의 두께를 굵게 하였을 때 훨씬 상변화 과정을 알아보기가 쉽다. 상변화가 일어나는 온도를 47°C로 하였다. Fig 39는 시간에 따라 container안의 PCM이 전도에 의해 어떻게 열이 전달되는 지를 보여주고 있다. 오른쪽 끝에 100°C의 온도를 가해주어 서서히 왼쪽으로 상변화가 진행되고 있음을 보여주고 있다. Fig. 40과 41은 solidifying 과정을 나타내는 것으로 역시 47°C에서 액상에서 고상으로의 상변화가 다시 일어나면서 떨어지던 온도를 일정시간 유지시켜주고 있는 것을 볼 수 있다. 그리고, Fig. 41에서 보이는 것처럼 solidifying이 진행되는 과정에서 melting시의 상변화 시간에 도달하는 시간보다 오랜 시간이 걸림은 물론 상변화 과정시간도 더 오래 걸리는 것을 알 수 있다.

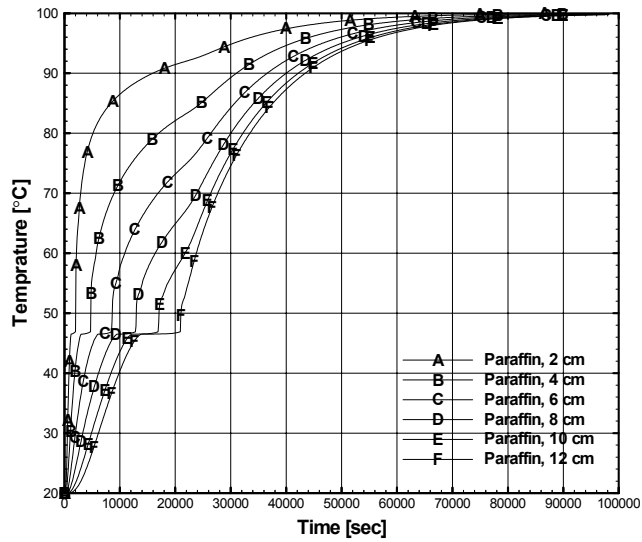


Fig. 38 Melting of the case 1

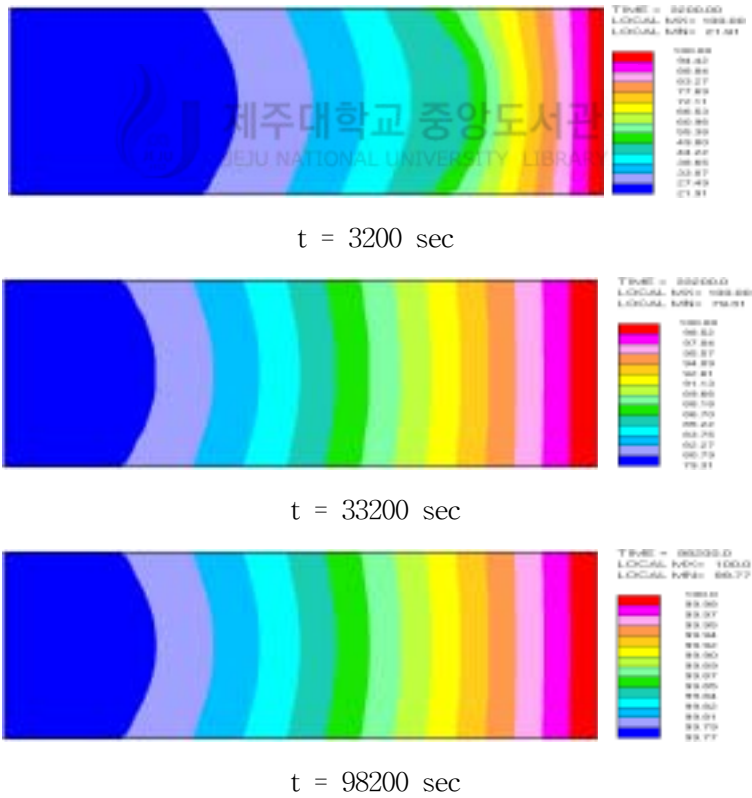


Fig. 39 Velocity and temperature contour of case 1 melting

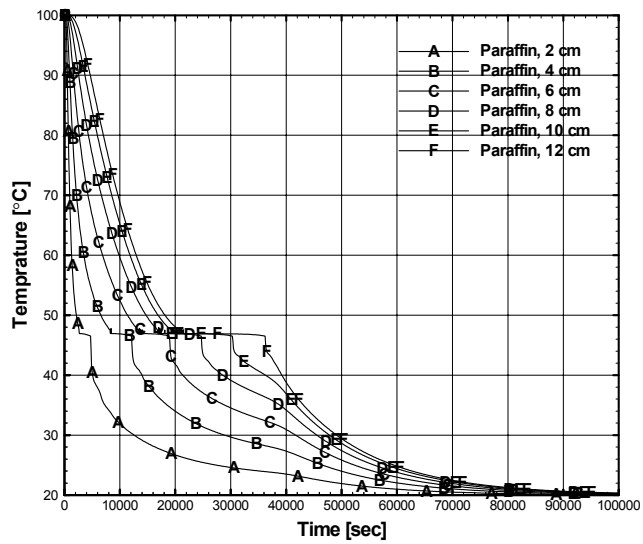
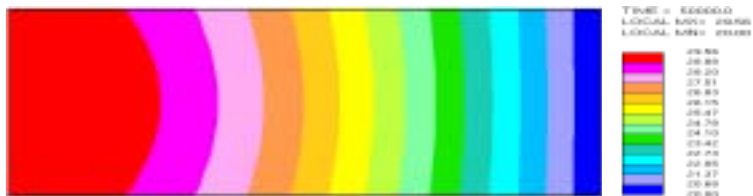


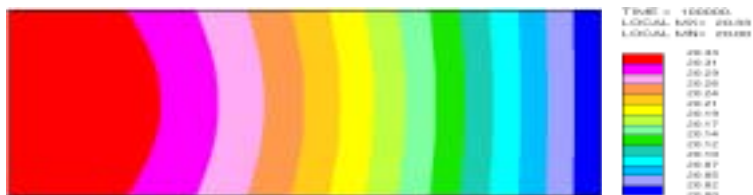
Fig. 40 Solidifying of the case 1



$t = 10000$ sec



$t = 50000$ sec



$t = 100000$ sec

Fig. 41 Temperature contour of case 1 solidifying

2.2 정상상태에서 Conduction과 Convection을 고려

PCM이 고상일 때는 conduction만 일어나지만 고상에서 액상으로 상변화가 되고 상변화 후에 액상으로 있을 때 우리는 convection 현상을 한번 고려해 볼 필요가 있다. Fig. 42와 43은 melting 과정을 나타낸 것이다. conduction만을 고려 할 때와는 다르게 상변화 후의 그래프의 모습이 하나로 나타남을 알 수 있다. 이는 convection에 의한 열전달이 그리 두껍지 않은 PCM의 온도를 빠른 시간 내에 같게 만듦을 보여준다. Fig. 43은 container 안의 PCM의 온도변화 과정을 보여주는 것으로 열원이 있는 쪽에서부터 뜨거워진 열을 container 상부로 전달하고 있고 convection에 의해 Fig. 39와는 다르게 열전달이 이루어지고 있음을 볼 수 있다.

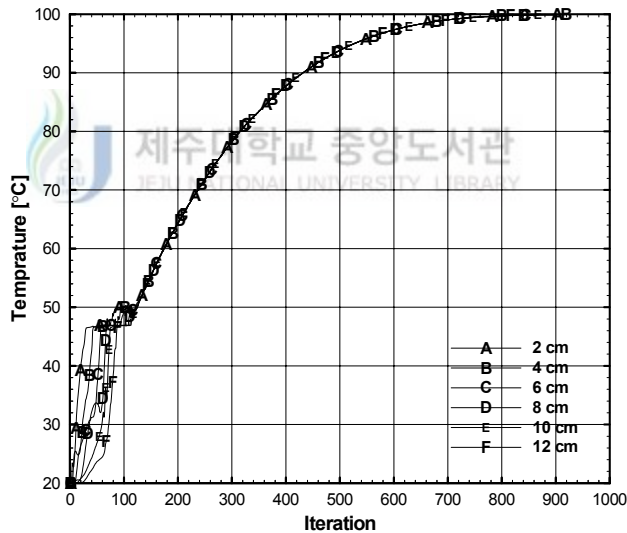


Fig. 42 Melting of the case 1

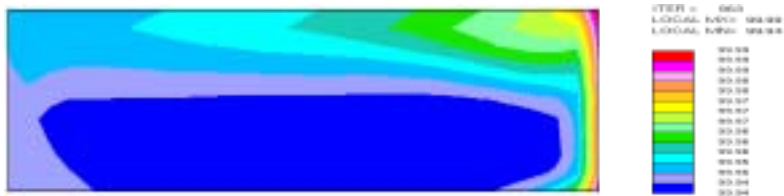


Fig. 43 Case 1 velocity and temperature contour of melting

Fig. 44와 45는 solidifying 과정을 나타내 것으로 액상에서의 온도는 PCM의 두께에 관계없이 같게 나타나며 액상에서 고상으로 상변화가 이루어지고 난 후의 모습은 두께에 따라 온도가 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 45에서 보면 solidifying시에 PCM이 식어가는 모습은 container의 Fig. 43과는 반대로 아래에서부터 온도가 내려가고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상 또한 convection의 영향이라고 할 수 있다. 즉, 상변화에 따른 밀도차와 대류효과가 나타난 것이다.

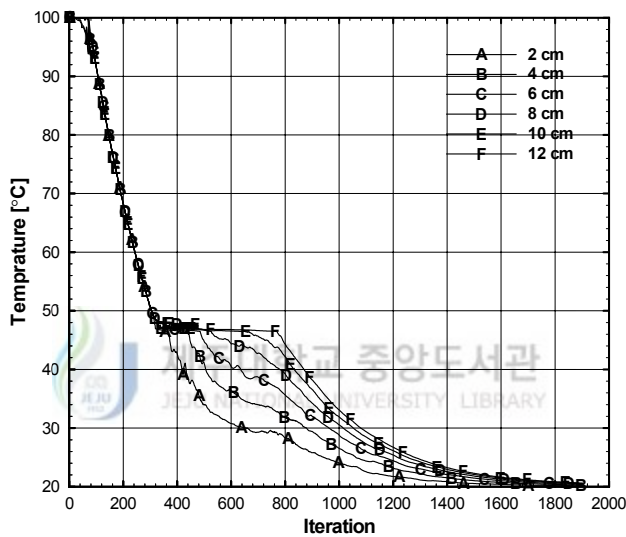


Fig. 44 Solidifying of the case 1



Fig. 45 Case 1 temperature contour of solidifying

V. 결 론

본 연구는 현재 보급되고 있는 태양열집열기들의 내부에 내재되어 있는 관(manifold)이 집열기에서 축열된 열매체를 운반하는 헤더와 여러 가지 형태로 연결되어 있는데 이러한 형태가 축열조의 평균온도 변화에 어떠한 영향을 미치는 지 살펴봄으로써 열성능은 물론 집열기의 내구성 향상에도 도움이 되는 자료를 얻고자 수행되었다. 또한, 상변화물질을 이용하여 집열기와 축열조 간에 열매체가 흐르는 관과 유리관의 갑작스런 온도 변화에 대한 적응력을 보완해 주고 상변화 시 발생하는 열을 이용하여 All-Glass Solar Vacuum Collector 의 내구성 개선에 도움이 될 수 있는 방안을 도출하고자 하였다. 이러한 연구를 통해 현재 보급되고 있는 태양열집열기들의 장·단점을 파악하게 되었고, 새로운 시스템 개발에 필요한 시스템의 구상에도 도움이 될 것이라고 생각한다.

본 연구를 통해서 도출된 결과들은 다음과 같다.

1) 동일한 조건에서 네 개의 태양열집열기의 시험

동일한 조건(집열 면적, 축열조 용량, 유량, 일사량, 동일 장소 등)에서 네 개의 태양열집열기를 시험했을 때, 8mm U자관형 All-Glass Solar Vacuum Collector의 태양열 가열 집열량이 가장 좋은 것으로 나타났다. 이중관 삽입형 Single Vacuum Collector는 집열기 내에서의 빠른 열매체의 온도 상승은 좋으나 온도의 변화 폭이 크고, 잦은 온도 변화로 인한 내구성 문제를 초래하게 된다. 또한, 관내에 또 다른 관이 삽입되는 구조적인 복잡함으로 인하여 열매체의 흐름에 어려움이 있게 되어 타 집열기보다 이중관과 주 파이프인 헤더에 걸리는 압력이 높아 기계적 장치에 무리가 올 경우 내구성 면에서는 떨어진다고 볼 수 있다. 그리고 진공관의 제작 상에 있어서 유리 와 금속을 접합하고 진공을 유지해야 하기 때문에 열응력에 의해 시간이 지남에 따라 유리 와 금속 접합면에 균열이 생겨 진공이 빠지게 되는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 이중관 삽입형 Single Vacuum Collector와 비교해서 열성능이 우수하고 집열기와 헤더와의 연결부위에 무리가 없는 U자관형 All-Glass Solar Vacuum Collector를 이용하는 것이 더 안

전하고 열전달 성능도 좋다는 결론을 내리게 되었다.

2) U자관형 All-Glass Solar Vacuum Collector 비교

본 실험에서 사용된 U자관형 All-Glass Solar Vacuum Collector는 8mm U자관과 10mm U자관이며, 동일한 조건에서 측정한 두 시스템의 결과는 8mm U자관이 태양열 가용 집열량이 좋았다. 하지만, 8mm U자관에는 관과 유리관을 얇은 fin이 감싸고 있고 10mm U자관에는 fin이 없다. 실험에서도 관찰되었듯이 10mm U자관의 펌프 작동시 흐르는 유량을 2ℓ/min에서 3ℓ/min로 조정하였을 경우 축열조의 평균온도 차이를 줄일 수 있었다. U자관과 유리관에 fin을 감싸는 기술적인 어려움과 경제성 등을 고려해 볼 때 유량의 조절에 따른 이 결과를 간과 할 수 없다고 본다. 따라서 유량으로 fin의 역할을 어느 정도 대신해 줄 수 있는지에 대한 연구도 필요하다고 생각된다.

3) PCM(Phase Change Material)의 태양열집열기에의 응용

PCM의 시뮬레이션 결과를 보면 PCM이 들어있는 container 내의 열전달 모습이 conduction만을 고려했을 때나, conduction과 convection을 고려했을 때, 모두 상변화 시에 PCM의 잠열을 이용할 가치가 있음을 알 수 있었다. 이러한 상변화 잠열을 이용하도록 상변화물질인 PCM을 앞선 태양열집열기의 실험에서 진공관 내에 삽입하여 튜브 내부의 온도가 급격히 떨어지는 것을 어느 정도 줄일 수 있다면 갑작스러운 외기온도의 변화에도 능동적으로 대처를 할 수 있어 시스템의 손상을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 즉, U자관이 삽입되지 않은 All-Glass Solar Vacuum Collector의 적용에 상변화물질 등을 이용하여 일사조건이 양호한 낮 동안에 태양열을 최대한 축열하여 야간의 냉각기에 방열·이용할 수 있다면 물의 결빙 등을 방지하여 집열 장치의 내구성 증진을 꾀할 수 있을 뿐 아니라, 시스템의 효율 향상에도 기여할 수 있을 것이라 기대된다. 그리고 Case 2와 3의 경우에도 시뮬레이션 실시하면 보다 알맞은 조건의 PCM 재료와 장치를 구상할 수 있을 것이라 생각된다.

이상에서 얻어진 결과가 열성능과 내구성을 증진시키는 새로운 All-Glass Solar Vacuum Collector의 개발에 유용한 정보가 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

A. A Mason and J. H. Davidson, 1995, "Measured Performance and Modeling of an Evacuated-Tube, Integral-Collector-Storage Solar Water Heater", *Transactions of the ASME*, Vol. 117, pp.225~229.

G. Oliveti and N. Arcuri, 1996, "Solar Radiation Utilisability Method In Heat Pipe Panels", *Solar Energy*, Vol. 57, pp. 346~349.

Ghoneim A. A., Fisch N., Ammar A. S. A. and Hahne E., 1994, "Investigation of Evacuated Tube Collectors", *Solar Energy*, Vol. 16, pp.16~23.

HE ZINIAN, GE HONGCHUAN, JIANG FULIN and LI WEI, 1997, "A Comparison of Optical Performance between Evacuated Collector Tubes with Flat and Semicylindric Absorbers", *Solar Energy*, Vol. 60(2), pp.115~116.

Hawladar M. N. A and Qijeysundera N.E., 1987, "Solar Collector Testing", *Renewable Energy Review Journal*, Vol. 9, pp. 11~25.

K. A. R. Ismail and M. M.Abogderah, 1998, "Performance of a Heat Pipe Solar Collector", *Transactions of the ASME*, Vol. 120, pp. 52~58.

K. Sumathy, 1997, "Solar Flat-Plate Collector Testing for The HongKong Climate", *ISES 1997 Solar World Congress*, Vol. 2, pp. 57~58.

M. Y. Othman, B. Yatim, M. H. Ruslan and K. Sopian, 1996, "Indoor Testing of Various Collectors", *Solar Energy Research Group*, pp.149~150.

Wu Jinfu, Zou Huaisong, Zhang Jian and Fang Jun, 1997, "Experiments of All-Glass Evacuated Tubular Collect with U-Tube and Al Fin Manifold and Embodiment", *ISES 1997 Solar World Congress*, Vol. 2, pp. 79~84.

강용혁 등, "태양열 온수 급탕 시스템 성능 표준화", 한국에너지기술연구소, KIER-991423, 1999.

조일식 등, "태양열 열전 발전 시스템의 실험적 연구", 한국태양에너지학회 논문집, 제 18권, 제 3호, pp. 114~116, 1998.

천원기 등, "진공복사관식 태양열 집열기의 최적모델 개발 연구", 포항산업과학연구원, 2001.



감사의 글

오늘은 첫 눈이 내립니다. 이런 날 책상에 앉아 학창시절을 마무리하는 마음을 담으려니 가슴이 정함을 느끼게 됩니다. 말도 많았고 할도 많았고...즐거기도 하였고, 또한 마냥 즐거워할 수 만도 없었습니다. 그렇게 그리 짧지 않은 사회 생활을 위한 준비 과정을 마치고 이제 막 사회로 발을 내딛으려 합니다. 항상 어떤 일이 끝나게 되면 후회가 남는 것은 인지상정인가 봅니다. 많이 부족하지만 그 동안의 성과물을 내면서 오늘은 그 동안 속스러워서 미뤄왔었던 “감사합니다”라는 말을 한 번 해 보렵니다.

문득 짙 두근 걱정하셨다는 이윤준 교수님의 말씀이 생각납니다. 지도 교수님이신 천원기 교수님은 항상 세세한 부분까지 조언을 아끼지 않으셨습니다. 변함없는 모습으로 학생들을 지도해주신 이현주 교수님, 박재우 교수님, 언제나 학생들에게 삼촌이고 형님이 되어주시길 마다하지 않으셨던 김신 교수님, 항상 밝은 웃음을 잃지 않으시는 정범진 교수님, 상투적인 표현이지만 이보다 더 좋은 말이 생각이 나질 않습니다. “감사합니다.” 경진이형! 버릇없이 구는 후배에게 웃어주시는 모습도 고맙습니다. 풍시물랑 찢찢매는 날 구원해주는 종관님 그리고, 숙희양 감사... 그리고, 나의 수호천사들, 지훈, 상범, 계홍 정말 자세들이 아니었음 내가 이 글을 쓰고 있을지 저으기 의심이 가는구만. 고마우이들! ^^ 빠진사람 또없나? 아~~ 우리 아우들(유철, 재철)이 실험을 도와줘서 이 형이 졸업을 하게되었군. 고맙다. 뜬금없이 전화하는 날 반갑게 맞아주는 상훈이도 고맙다. 내 영원한 형제들 “케도르” 벵들에게도 인사를 해야겠군요. “언제민 졸업할꺼냐?”며 날 구박하는 내 고고 동창들 이거 다 써야 되나? ‘가나다’ 순이니 싸우지 틀 마시게... 택신, 상수, 은용, 지훈, 수영, 경원, 경식, 현구, 경학, 성호, 승필, 원혁이 고맙다. 제수씨들도 고맙습니다. 몸보신 많이 시켜준 은주도

고맙다. 그리고, 사춘기 시절 내 'I LOVE SCHOOL'동창들, 혹 이름이 빠져 섭섭
해하는 벗이 있을까 우려하여 나열하지 못함을 양해해 주시길 바랍니다. 그래
도 동네 벗들은 언급해야 될 듯 싶네요. 내 후원자 명문, 그리고, 희문, 사춘이
자 벗인 용권, 태영, 철민, 성주, 지훈, 세찬, 정철, 시욱, 종훈, 인숙, 명희, 행
열, 인순, 광순, 은주, 정숙, 모두들 저의 소중한 재산입니다.

그리고 보니 제 가족들이 있었군요. 항상 손주 생각에 걱정이 많으신 우리
할머니, 아들 하는 일이 못마땅 하셔도 믿고 묵묵히 지켜봐 주시는 아버지, 가
족들 행복을 챙기시느라 여념이 없으신 어머니, 때론 친구처럼 내 든든한 후원
자가 되어주시는 큰누나, 셋누나, 막내누나 그리고, 매형들, 모두에게 이 글을
벌어 정말 감사하고, 사랑한다는 말씀을 전합니다. 셋아버지와 셋어머님의 자식
못지 않은 사랑에 감사드립니다. 그리고, 두분 삼촌과 숙모님들, 고모와 고모부
등등 모두 모두 고맙습니다.

그 밖에도 동아리 선·후배님들과 대학 동기들 등등 감사해야 할 사람들이
너무 많아서 새삼 제가 신세만 지고 살아온 것 같은 생각이 듭니다. 두근두근
저의 멍에로 삼겠습니다.

이 모든 분들의 사랑과 격려에 힘입어 이 논문을 마침에 감사드립니다. 아기
가 첫 걸음을 떼어놓듯이 쓰러짐에 대한 두려움과 위험도 있을 것이나, 그 발
을 내딛었을 때 내 자신과 이 분들의 기쁨을 생각하며 첫걸음을 힘차게 내 딛
으려 합니다.