



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사 학위논문

진동형 히트파이프를 이용한 이중
진공관 태양열 집열기의 성능평가



2011년 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

손길재

공학석사 학위논문

진동형 히트파이프를 이용한 이중
진공관 태양열 집열기의 성능평가

지도교수 : 김 종 수

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2011년 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

손 길 재

손길재의 공학 석사학위 논문을 인준함

2011年 2月



주 심 공학박사 금 종 수 (인)

위 원 공학박사 김 은 필 (인)

위 원 공학박사 김 종 수 (인)

목 차

ABSTRACT	iii
Nomenclature	v
1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	5
1.3 연구이론	7
2. 진동형 히트파이프	20
2.1 진동 세관형 히트파이프의 원리	20
2.2 작동 유체의 선정	22
3. 실험장치 및 방법	27
3.1 실험 장치	27
3.2 실험 방법	31
4. 실험 결과 및 고찰	33
4.1 PHP의 충진률에 따른 집열판의 회수열량	33
4.2 냉매의 종류에 따른 회수열량	37

5. 결론	40
참고 문헌	42
감사의 글	43



Performance Evaluation of the Evacuated Solar Collector Using the Pulsating Heat Pipe

Gil-jae Son

Department of Refrigeration Engineering,
Graduate school,
Pukyong National University



Abstract

It is increasing interests of the environment. It make efforts to saving a energy conservation. From the viewpoint of low cost as well as short construction schedule for the manufacturing of heat

exchanger, flexibility, simplification and high performance, PHP(Pulsating heat pipe) draws special attention in these points. So, in this paper, the thermal performance of evacuated solar collector using the pulsating heat pipe was investigated. We investigated a optimized working fluid on solar collector and charging ratio. One of the important things is collective efficiency of the evacuated solar collector. The evacuated solar collectors with the shape of the heat pipe were investigated in the same operating condition for a outdoor experiment equipment.

The experimental conditions are as follows ; The charging ratio of working fluid was 50%, 70%, 100% of evaporation section volume. The inclination angle was 35° from the fround. The mass flow rate is 1 ~ 2 kg/min. the working fluid is R-141b, R-142b, R-134a and Etyl Alcohol.

Optimum working fluid was Etyl Alcohol, its charging ratio is 100% to volume. In this study shows that 6.35 mm diameter was higher efficieincy of collected heat than 4.76mm diameter.

NOMENCLATURE

Symbols



A_c	collector surface area	$[m^2]$
Q_w		$[kcal/hr]$
I_t	measured incoming solar-irradiation on the collector surface	$[W/m^2]$
a	absorptance on collector surface	
τ	penetration ratio on glass tube	
U_L	heat loss coefficient	$[kcal/hr \cdot m^2 \cdot ^\circ C]$
t_p	the mean temperature on the collector surface	$[^\circ C]$
t_a	average ambient temperature	$[^\circ C]$
G	mass of water filled up in the tube	$[kg]$
t_m	average water temperature in the tube	$[^\circ C]$
t_a	daily average ambient-air temperature	$[^\circ C]$
t_i	initial water-temperature	$[^\circ C]$
T_f	final water-temperature	$[^\circ C]$
$\Delta\tau$	total measuring period of time	$[s]$
c_f	specific heat capacity of water	$[J/kg \cdot K]$
A_A	outside area of absorber	$[M^2]$
Δt	testing time interbal	$[s]$
T_w	water temperature in storage tank	$[^\circ C]$
ΔT	difference between T_i and T_f	$[^\circ C]$
ϵ_h	hemispherical emittance	

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

오늘날 환경 및 에너지의 문제가 더 이상 자국의 문제만이 아닌 전 세계가 공동으로 대처해야할 문제가 되었다. 도쿄 의정서에 따른 이산화탄소의 청정개발체제(CDM, Clean Development Mechanism)도 그 중의 하나로 이미 시행되기 시작하였고, 이에 아서 유럽에서는 산성비 및 스모그현상을 직간접적으로 겪었기 때문에 유럽연합을 주체로 환경문제를 대단히 중요하게 여기고 있다. 유럽 내에서는 온실가스 거래제(EU-ETS)를 시행하고 있고, 간헐적으로 쓰일 에너지로 여겨지지만 신·재생에너지가 안정적인 효율을 확보할 때까지 화석연료의 사용 저감방법 및 온실가스 저감 방법도 연구 중에 있다. 이러한 노력의 결과로 EU 온실가스 거래제 결과 보고서에 따르면 도입기간 1년만인 2006년에는 GDP가 3% 증가했으나 이산화탄소 배출량 증가율은 0.3%에 그치는 결과를 낳았다. 그리고 2005년 6월 1일 독일연방경제노동부(Bundesministerium fuer Wirtschaft und Arbeit)에서 발간한 ‘혁신과 에너지 신기술(Innovation und neue Energietechnologien) 제5차 에너지 연구 프로그램’ 정책보고서에 따르면 재생가능에너지법을 제정하여 2010까지 국가별로 할당된 재생가능 에너지원으로부터의 전기 생산 비율을 달성하는 것을 목표로 삼아 지속적으로 노력하고 있다고 밝혔다.

현재 우리나라에서 사용되는 총 에너지의 약 98%를 수입에 의존하는 에너지 약소국의 입장에 있으며, 교토 의정서뿐만이 아니라 고유가가 꾸

준히 지속되고 있는 상황에 화석연료를 대체할 수 있는 에너지 이용기술을 급히 개발·보급이 필요한 실정이다. 이에 우리나라에서는 유럽의 에너지 개발상황을 토대로 국내의 자연적 환경 및 적합한 지역에 신·재생 에너지를 얻을 수 있는 단지를 만들어 보급하고 있다. 그러나 지식경제부(전 산업자원부)에서의 2005년도 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 실행계획에 따르면 현재 사용하고 있는 에너지원에 대해 지식경제부의 목표량만큼 신·재생에너지로 교체를 하는 과정에서 국내의 기술과 연구 인력의 부족과 많은 부분을 수입에 의존하여 설치, 실행되고 있다고 문제점을 지적한 바 있다. 그리고 이 문제에 대한 해결책으로 산업적으로는 일부 중소기업에서 신·재생에너지 이용기술개발에 지원하는 한편 연구 기관들과 대학을 중심으로 개발 및 연구인력 양성에 노력하고 있다.

아직까지는 신·재생에너지에 대한 인식이 전력 발전에 치우치고, 전력을 발전 할 수 있는 것에만 많은 비중을 두고 있지만 전력발전을 제외한 다른 에너지 생산에는 소형화된 제품들이 개발되고 있어 각 가정에도 보급할 수 있게 되었다.

신·재생에너지의 정의에 대해 살펴보면 우리나라에서는 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법 제2조의 규정에 의거 “기존의 화석 연료를 변환시켜 이용하거나 햇빛·물·지열·강수·생물유기체 등을 포함하여 재생 가능한 에너지를 변환시켜 이용하는 에너지”라고 정의되어 있다. 신에너지는 연료전지, 석탄액화가스화 및 중질산사유가스화, 수소 에너지 3분야가 있고, 재생에너지는 태양열, 태양광, 바이오, 풍력, 수력, 해양, 폐기물, 지열의 8가지 분야가 있다.

유럽을 포함한 전 세계의 신·재생에너지 보급량을 2003년을 기준으로 하여 Table 1-1에 나타내었다. 연평균 증가율로 따지자면 우리나라가 가장 큰 비율을 보이지만, 신·재생에너지가 차지하는 비중을 중점적으로 살펴보면 일부 나라를 제외하고는 최고 45.4%까지의 보급률을 나타내고 있으며, 연평균 증가율은 최근 10년 동안 통계 낸 것으로 계속적인 상승률을 보이고 있다. 그리고 우리나라 또한 이 표에는 나타나있지는 않지만 최근 10년 이내에 보급량이 꾸준히 증가하였다. Table 1-2는 2005년 기준 신·재생에너지 자원별 선진국 대비 기술 개발 수준을 나타내었다.

전 세계적으로 인구 25위인 우리나라가 쓰는 에너지 소비량은 세계 10위 수준(2003년 기준)으로 세계에서 7번째로 석유를 많이 사용하는 나라이다. 반면 신재생에너지의 비중은 1.8%로 수력을 포함하는 경우에도 2.5%에 불과하다. 이마저도 폐기물에 의한 소각열이 대부분(68.6%, 수력 제외 시 94.7%)이며 태양광, 풍력 등 진정한 의미의 재생가능에너지 비중은 총 1차 에너지의 0.1%정도로 미미하다. 또한 지구온난화 등을 방지하기 위한 청정에너지도의 비중도 선진국에 비해 아직 낮은 수준이며, 한국은 에너지 자원 중에서도 석유에너지 소비가 절반이상을 차지하여 청정에너지 비중이 25%(2002년 기준)로 영국의 45%에 비해 절반정도 수준이다.

한마디로 한국의 에너지 분야는 소비규모가 급증하고 있을 뿐 아니라 환경적 외부효과가 크고 재생가능하지 않으며 해외에서 주로 수입하는 화석연료와 원자력(우라늄)의 비중이 높다는 문제가 있다. 에너지사용으로 인해 환경의 오염과 파괴가 발생하며 에너지안보가 상당히 취약한 것

이다. 또한 전력의 경우 대규모 중앙 집중적인 화력 및 원자력발전으로 공급하고 있어 생산지와 소비지가 이원화 되면서 시설의 입지를 둘러싸고 사회갈등이 진발하고 있다.

부존자원이 거의 없고 에너지 다소비형 산업구조를 가진 우리나라는 신재생에너지 개발과 환경친화적인 산업구조로의 전환이 시급한 상황이다. 신재생에너지 관련 기술 중에서도 태양에너지의 활용은 많은 연구대상이 되어 왔다. 태양에너지를 이용하는 것 중 무한한 에너지원인 태양열을 이용한 시스템을 건물의 냉·난방에 적용하기위한 많은 연구와 개발이 진행되어 왔다. 태양열 시스템은 온실 가스 발생 저감을 위한 투자효과가 높으며 기술의 완성도가 높고 각국의 자체생산이 가능하여 국민경제에 미치는 파급효과가 크다. 또한, 가정에너지의 30%이상이 온수생산에 상용됨으로 1차 에너지 대체효과가 크고 CDM인증 취득 시 기존 시스템비용의 25%~50%를 확보할 수 있다.

현재 온수·급탕 및 건물의 냉·난방에 이용되고 있는 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, 태양열 집열기, 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 태양열 에너지를 자연적인 방법으로 열을 저장하여 이용할 수 있도록 하는 장치

이다. 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.

1.2 연구목적

본 연구는 현재 온수 · 급탕의 난방열원 생산용으로 이용되고 있는 다양한 태양열 집열기 중 이중진공관 집열기(CETC : Concentric Evacuated Tube Collector)에 진동형 히트파이프(Pulsating heat pipe)를 적용하여 봄으로써 기존의 유체순환식인 평판형 집열기(flat plate collector)와 진공관식 집열기에서 지적되고 있는 겨울철의 집열기 동파 문제에 따른 시스템 유지관리의 어려움을 개선코자 하였으며, 궁극적으로는 진공관형 태양열 집열기의 열성능 개선을 통하여 태양에너지를 안정적으로 얻고자함에 있다. 또한 본 연구 실험자료를 바탕으로 Pulsating Heat Pipe를 이용한 태양열 집열기의 작동유체 충전량과 내부 형상에 따른 집열성능을 알아보기 위한 목적으로 진행 하였다.

Table 1-1 Energy Balances of OECD Contries 2002-2003, IEA
2005 EDITION (Korea, 2004)

The nation	Amount of supply (1000toe)	Rate of total energy(%)	Increasing rate of the average annual(%)	The nation	Amount of supply (1000toe)	Rate of total energy(%)	Increasing rate of the average annual(%)
Australia	6,537	5.8	3.2	Luxemburg	60	1.4	10.4
Austria	6,935	20.9	4.2	Netherlands	2,041	2.5	13.0
Belgium	1,194	2.0	7.3	New Zealand	4,852	27.9	0.3
Canada	40,793	15.7	2.8	Norway	10,627	45.5	-1.1
Denmark	2,707	13.0	12.3	Poland	5,414	5.8	12.7
Finland	8,157	21.7	5.8	Portugal	4,340	16.8	4.1
France	17,260	6.4	1.3	Slovakia	650	3.5	9.9
Germany	13,318	3.8	11.2	Spain	9,370	6.9	5.9
Greece	1,582	5.3	5.3	Sweden	13,739	26.7	2.3
Iceland	2,457	72.6	8.4	Suisse	4,814	17.8	4.0
Ireland	261	1.7	6.5	England	3,217	1.4	16.8
Italy	10,920	6.0	7.4	U.S.A	103,180	4.5	0.4
Japan	18,932	3.7	2.4	Korea	4,436	2.1	25.7

Table 1-2 Technical development standard percentage of the forward country that category of New & Reuseable energy resources

Categories	Technical development standard(%)	Categories	Technical development standard(%)
Hydrogen	39	Ocean	83
Fuel cell	59	Waste	53
Photopile	74	Use a coal	53
Solar	72	Water power	84
Wind power	87	Geothermal	56
Bio	57	Average	65

1.3 연구이론

태양복사 약 $0.1 \sim 0.3 \mu m$ (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.[1]

집열기의 열성능은 일사량, 외기온도, 집열기 입구온도, 집열기 출구온도의 몇가지 조건들로 순간효율을 계산함으로써 부분적으로 결정된다. 순간효율은 실험적으로 집열기에 입사하는 일사량과 열매체가 집열기를 통과할 때 열매체가 얻는 에너지를 측정하는 것이 필요하다.

1.3.1 집열 성능

기본적인 개념을 살펴보면, 안정된 상태 하에서 어떤 주어진 시간 동안에 태양열 집열기가 취득한 에너지는 흡수판에서 흡수한 에너지와 주위로 손실된 에너지와의 차이이다. 여기에, 태양열 시스템에 일사량의 변화를 무시할 수 없다. 이와 같은 관계를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Q_w = A_c [I_t \tau \alpha - U_L (t_p - t_a)] \dots \dots \dots (1)$$

여기서

Q_w : 집열 에너지(kcal/hr)

A_c : 집열 면적 (m^2)

I_t : 집열면 일사량 (kcal/hr $\cdot m^2$)

- τ : 유리관 투과율
 a : 흡열판 흡수율
 U_L : 열손실계수 (kcal/hr • m²°C)
 t_p : 흡수판 표면의 평균 온도 (°C)
 t_a : 외기 온도 (°C)

앞에서 언급한 바와 같이 집열판의 성능을 크게 하려면 일사량과의 관계가 아주 중요하다. 위의 식(1)에서 일사량과 관계된 $I_t \tau a$ 값을 최대한으로 크게 하고, 일사량과 함께 흡수한 열에너지를 빼앗기지 않도록 열손실계수와 관계된 $U_L(t_p - t_a)$ 값을 최소로 줄일 수 있도록 설계하고, 가동조건도 적절히 선택해야 한다.[2]

1) 열손실 계수, U_{LT}

열손실계수는 진공 압력과 흡수판의 방사율에 영향을 받는다.

$$U_{LT} = \frac{c_f M(t_i - t_f)}{A_A(t_m - t_a)\Delta\tau} \dots \dots \dots (2)$$

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

$$t_m = \frac{t_{a1} + t_{a2} + t_{a3}}{3}$$

- t_i : initial temperature (°C)
 t_f : final temperature (°C)
 U_{LT} : Heat loss coefficient (w/m²°C)
 t_m : average water temperature in the tubes (°C)

t_a : average ambient temperature ($^{\circ}\text{C}$)

Δt : testing time interval

$\Delta \tau$: total measuring period of time (s)

M : mass of water filled up in the tube (kg)

c_f : specific heat capacity of water ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)

A_A : outside area of absorber (m^2)

t_1, t_2, t_3 : 각 위치에서 시작 온도와 시작 후 30분, 60분 후의 온도를 평균 한 값이다.

2) 흡수관의 방사 열손실 $Q_e (W)$

보통 선택성 흡수 도료층의 hemispherical emittance ϵ_h 에 의해 결정된다.

$$Q_e = \frac{\epsilon_h \cdot \sigma \cdot A_A}{1 + \frac{d_1 \epsilon_h}{d_2 \epsilon_e} (1 - \epsilon_e)} (T_m^4 - T_a^4) \dots \dots \dots (3)$$

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

$$Q_e = \epsilon_k \cdot \sigma \cdot A_A (T_m^4 - T_a^4)$$

ϵ_h : 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.

1.3.2 태양열의 흡수량

집열기의 성능을 좌우하는 태양열 흡수량은 집열기의 설치경사각, 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.[3]

② 흡열판 표면의 광선흡수율(α) : 집열기 전체의 효율은 이 흡수율에 의해서 많이 좌우된다. 알루미늄의 기본층에 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.[4]

③ 유리의 광선투과율(τ) : 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.

4) 흡수된 태양열의 열손실

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

① 유리관 성능 : 진공복사관식 태양열 집열기의 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(U_L)를 작게하는 것이다. 특히, 유리는 흡열판으로 부터 방사되는 장파장의 열복사를 막을 수가 있다.

② 흡열판의 평균온도 : 식(1)에서 알 수 있듯이 흡열판의 온도와 외기 온도와의 차이가 적을수록 열손실도 적어진다는 것을 알 수 있다. 그러나 주위 공기의 온도는 임의로 조절 할 수 없으므로 흡열판의 평균온도를 조절해야 한다. 이 흡열판의 온도는 집열기의 설계 및 그 작동 방법에 관계가 된다. 가장 중요한 요소는 집열기를 흐르는 전열매체의 유속, 유체의 종류, 집열기로 들어올 때의 전열매체의 온도, 흡열판의 열전도도 등이다. 이러한 요소들을 조절함으로써 흡열판의 평균온도를 조절하여 열손실을 줄일 수 있다.[5]

1.3.3 집열 효율

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_e 를 구하려면 집열기의 설계조건은 물론 일사량, 흡열판의 평균 온도 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 (4)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, 공기 식의 경우는 20℃내지 30℃ 높다.

$$Q_w = F_R A_c [I_t \tau a - U_L (t_i - t_a)] \quad \dots \dots \dots (4)$$

t_i : 집열기 입구의 열매체 온도 (℃)

F_R : 집열 효율 수정 계수

식(4)를 태양열 집열효율식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{Q_w}{I_t A_a} = F_R \tau a - F_R U_L \frac{(t_i - t_a)}{I_t} \quad \dots \dots \dots (5)$$

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 $\frac{(t_i - t_a)}{I_t}$ 의 조건에 따라 변하는 일차식으로 나타낼 수 있으며, 기울기가 $-F_R U_L$ 이고 수직축인 효율축의 $F_R(\tau a)$ 를 지나는 직선 그래프로 나타난다. Fig. 1-1은 집열 성능 그래프이다.[6]

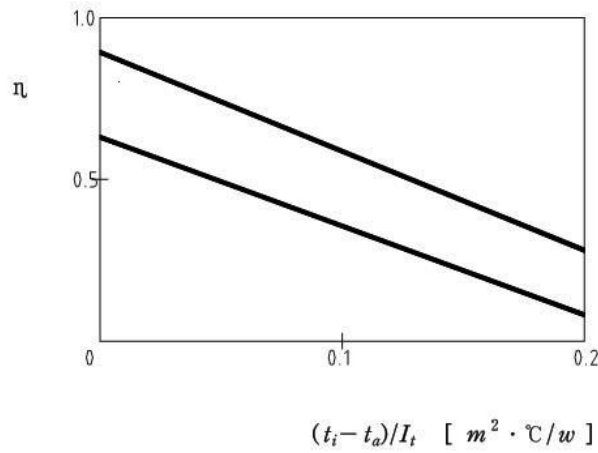


Fig.1. Collector efficiency

태양열 집열기의 성능은 일반적으로 실험에 의하여 구하며, 태양열 집열기를 통과하는 열전달 매체의 유량과, 집열기 입·출구의 온도차를 측정하면 된다.[7]

$$Q_w = AGC_p(t_o - t_i) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (6)$$

A : 집열면적 (m^2)

G : 집열매체의 유량 (kg/m^2)

C_p : 열매체의 비열 ($kcal/kg \cdot ^\circ C$)

t_i : 집열기 입구의 온도 ($^\circ C$)

t_o : 집열기 출구의 온도 ($^\circ C$)

식 (6)의 집열기 효율은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta &= Q_w / AI_t \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (7) \\ &= GC_p(t_o - t_i) / I_t \end{aligned}$$

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

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

Fig. 1에서 $(t_i - t_a) / I_t$ 의 조건에 의한 집열효율 그래프의 기울기와, 효율축 값에 영향을 미치는 집열기의 주요 요소는, 유리막의 수요와 흡열판의 특성 등이다. 어떤 경우에는 태양열집열기의 성능 시험 결과로서 집열효율 그래프가 집열기 내의 열매체 평균온도나, 집열기 출구의 열매체 온도에서 외기온도를 뺀 값을 집열면 일사량으로 나눈 값으로서 표시하기도 한다. 즉, $(\frac{t_i - t_a}{2} - t_a) / I_t$ 또는 $(t_i - t_a) / I_t$ 의 조건에 의한 집열효율 성향과 매우 비슷하게 나타난다. 그러나 이 그래프의 기울기나 효율축 값은 다르게 나타난다.[8]

1.3.4 유리식 태양열 집열기의 종류

1) 단일 진공관형 (Single Solar Evacuated Collector)

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

2) 이중관 삽입형(SEIDO 2)

이중관 삽입형 진공복사관식 태양열집열기(single solar vacuum collector)인 SEIDO 2는 Fig. 1-2에서 보는 바와 같이 진공으로 처리된 유리 튜브 속에 diameter가 서로 다른 두 개의 관을 삽입한 구조로 되어

있다. 이 이중관 삽입형은 내부의 관을 통하여 열 매체가 입수하여 외부 파이프를 통하여 데워진 열매체가 축열조로 이동하게 된다. 이 집열기는 그림에서 보는 바와 같이 주 파이프(헤더) 또한 이중관으로 되어 있다.

Fig. 1-3은 이중관 삽입형 진공복사관식 태양열 집열기의 이중관과 축열조와 연결되는 주 파이프와의 연결 형태를 나타내는 그림이다.

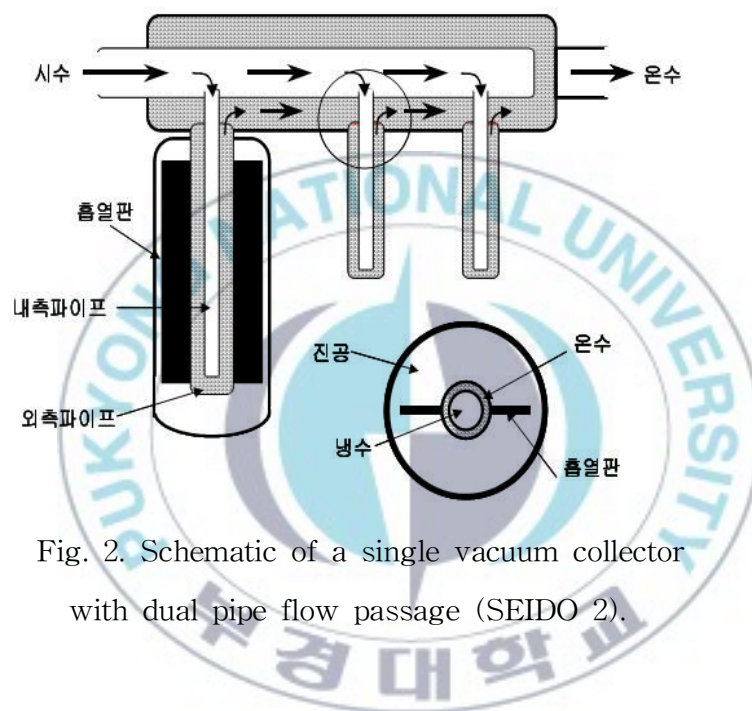


Fig. 2. Schematic of a single vacuum collector with dual pipe flow passage (SEIDO 2).

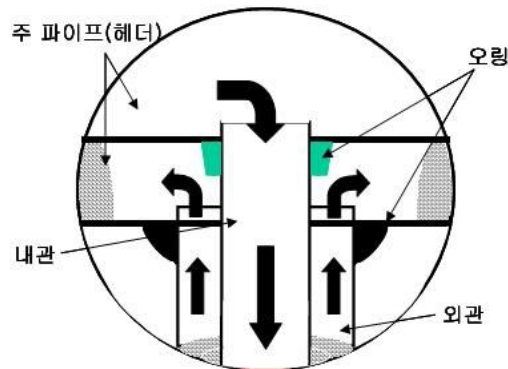


Fig. 3. Connection of the storage tank and dual pipe flow passage (SEIDO 2).

3) Heat pipe 삽입형(SEIDO 5)

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

Fig. 1-4와 Fig. 1-5는 Heat pipe 삽입형 진공복사관식 태양열집열기

의 모양과 주 파이프인 헤더와의 연결 형태를 나타내고 있다.

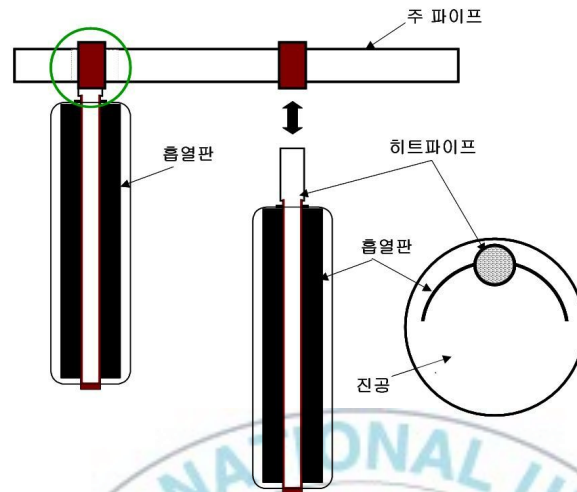


Fig. 4. Schematic of a single vacuum collector with heat pipe (SEIDO 5)

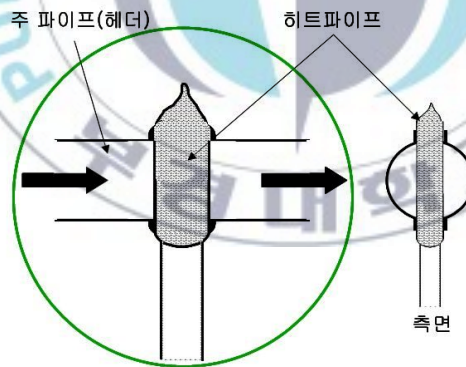


Fig. 5. Connection of header and heat pipe (SEIDO 5)

3) 이중 진공관형(All-Glass Solar Evacuated 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. 1-6은 바로 이와 같은 개념으로 설계·제작된 All-Glass Solar Vacuum Collector Tube의 구조를 나타낸 것이다.

All-Glass Solar Vacuum Collector의 집열관은 길게 뽑은 보온병처럼 내유리관과 동주축의 외유리관으로 조성되었고, 내·외유리관의 입구는 합쳐 용봉되어 있다. 내·외관 사이는 고압 진공 상태에서 받침대 있는 흡기제를 봉입하여 한면으로 흡기제를 사용하여 증기 발산 후 진공 집열관의 보전 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, 적외파장 범위가 낮은 은 반사율을 확보하게 하였다. 흡수면의 코팅 과정에서 코팅면을 내·외관 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.[9]

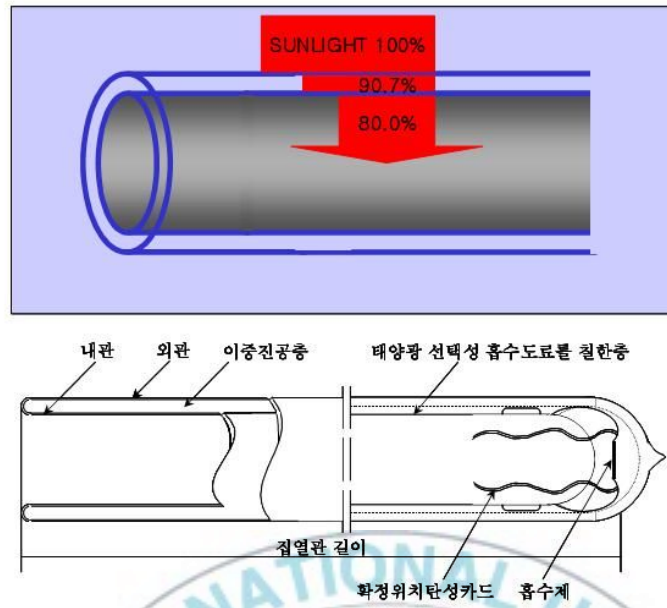


Fig. 6. All-glass solar vacuum collector tube



제 2 장 진동형 히트파이프

2.1 진동형 히트파이프의 원리

진동형 히트파이프는 Wick(wick)에 의한 증발부의 작동액 환원 없이, 유체의 진동에 의해 열을 수송하는 열전달 기구로, 구조는 Fig. 2-1에 나타낸 것과 같이, 간단히 세관을 사행(serpentine)시킨 밀폐 구조로서, 진공 상태로 만든 후 임의의 비율로 작동 유체를 충전시킨 매우 단순한 구조로 되어 있다.

기본적인 작동은 작동액 및 증기포의 불규칙적인 루프내 순환 또는 축방향 진동에 의한 것이며, 가열부에 주어진 열량만큼의 핵비등을 일으키고, 핵비등에 의해 발생된 기포는 합쳐진 후 기액 슬러그류의 형태로 된다. 슬러그류는 압력파를 발생시킴과 동시에 축방향 진동을 동반하는 유동으로 되어 순환하고, 증기의 기포가 대류열전달과 잠열수송을 통해 열수송이 이루어진다.

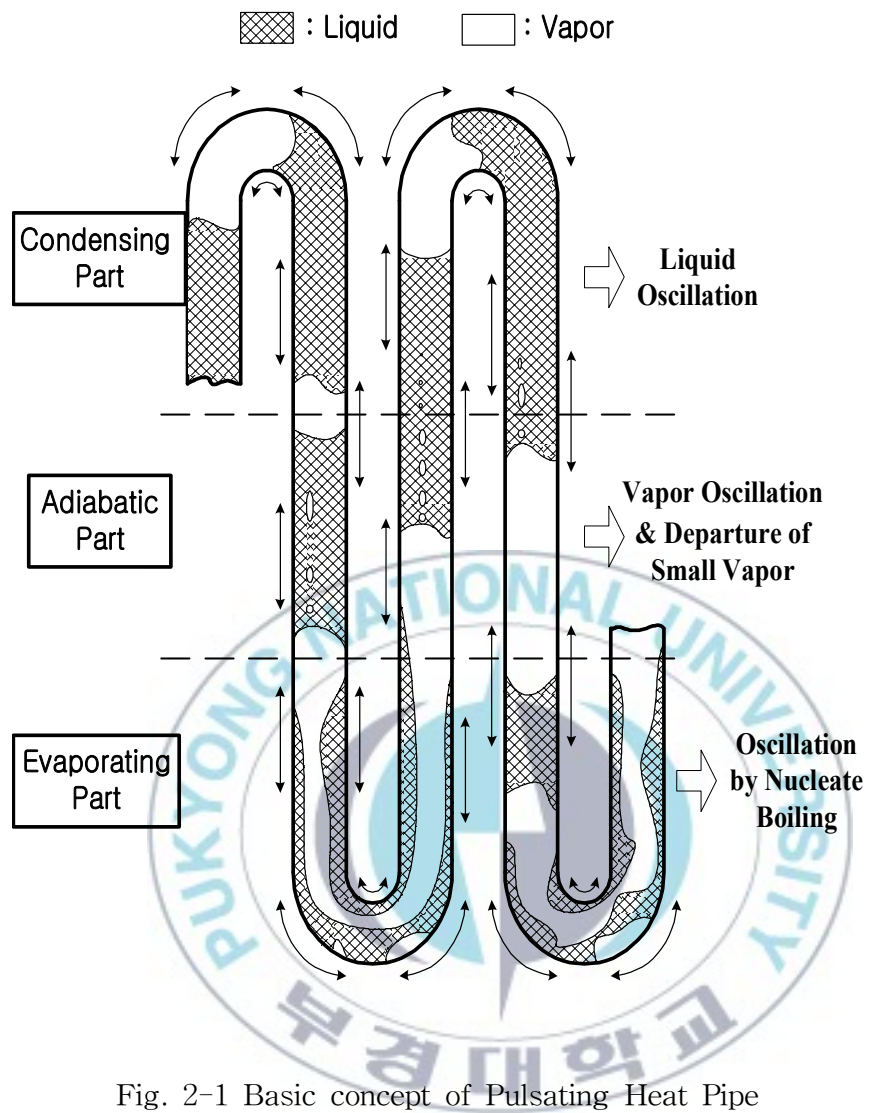


Fig. 2-1 Basic concept of Pulsating Heat Pipe

2.2 작동유체의 선정

히트파이프의 근본적인 작동 요소가 작동유체의 증발과 응축이기 때문에 적절한 작동유체의 선정은 히트파이프의 설계 및 제조에 있어 가장 중요한 요소이다. 작동유체의 선정 시 고려해야 될 사항에는 작동온도 범위, 증기압, 증발 잠열 및 점성 계수 등과 같은 작동유체의 열·물리적 물성과 관 재료와의 상용성, 안정성 및 독성이 있다. 또한 작동 유체의 온도 범위는 고체와 액체 그리고, 기체가 공존하는 삼중점(Triple point)과 임계점(critical point)사이이며, 기-액 상변화 선도의 포화곡선을 따라서 증발과 응축을 반복하므로 작동유체의 작동 온도에 따라 내부의 압력이 결정되어진다.[10]

Table 2-1은 히트 파이프에 적용되는 여러 가지 작동유체의 적용 온도 범위를 나타낸 것이며, 극저온용(273K 미만), 저온용(273~500K) 그리고 고온용(500~3000K)으로 분류되어지고 있다. 극저온용으로는 헬륨, 아르곤 등이 대표적인 작동유체이며, 저온용으로는 물과 프레온계 냉매를 비롯한 많은 종류의 작동유체가 있다. 또한, 고온용으로는 나트륨, 칼륨, 리튬 등과 같은 액체 금속이 사용된다. 하지만 이러한 온도 범위는 매우 넓기 때문에 효과적인 히트파이프 성능을 얻기 위해서 이러한 작동 온도에 따른 열수송 성능에 미치는 작동유체 열물성의 영향을 알 필요가 있다. 그러므로 히트파이프의 정확한 설계를 위해, 작동 유체의 열물성을 통해서 열수송 성능을 예측할 수 있는 평가지수인 Merit Number가 있으며, Merit Number의 값이 클수록 열수송 성능이 우수하다는 것을 의미한다. 히트파이프의 경우는 식 (8)과 같으며,

$$M_h = \frac{\rho_l \sigma h_{lg}}{\mu_l} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (8)$$

서모사이폰(thermosyphon)의 경우는 식 (9)과 같다.

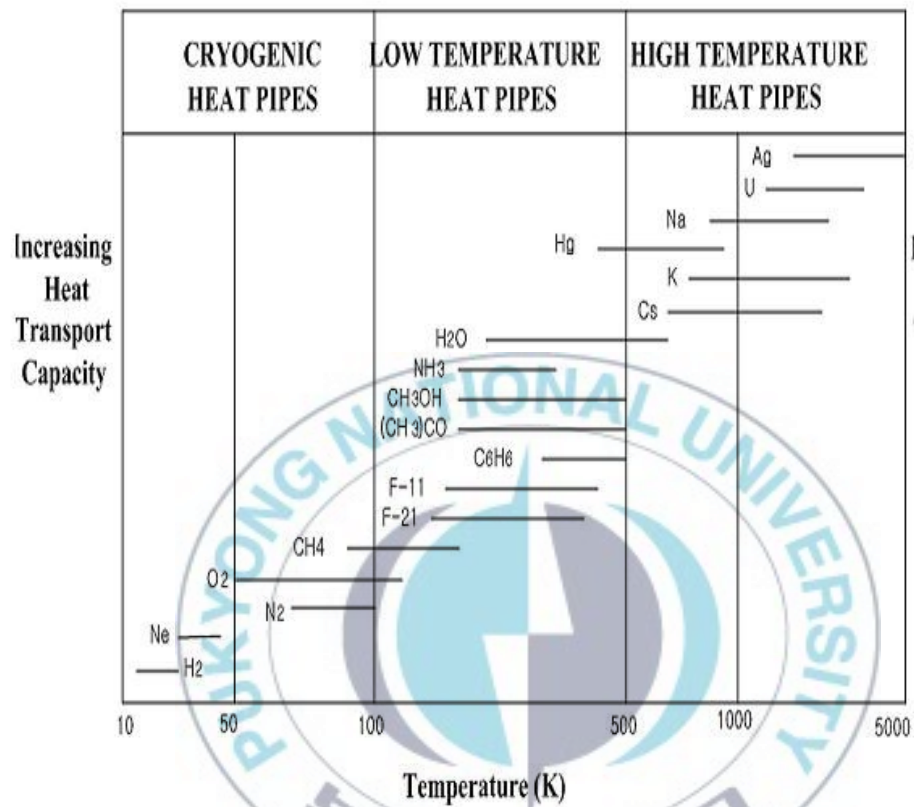
$$M_t = \left(\frac{(kl)^3 (\rho_l)^2 h_{lg}}{\mu_l} \right)^{1/4} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (9)$$

그러나 기존의 Merit number는 워형 히트파이프나 서모사이폰의 경우에 적용이 가능하도록 각각 제시되어 있으며 진동형 히트파이프에 적용할 수 있는 기준이 아직까지는 명확하게 정립되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 저온용(150~750K)으로 사용되어지는 작동 유체 중에서 열적, 물리적으로 안정 상태에 있으며, 시험부의 재료인 동과 알루미늄에 화학적 반응을 보이지 않는 R-134a, R-141b, R-142b와 Etyl Alcohol을 작동 유체로 선택하였다. Etyl Alcohol의 경우 알루미늄과 고온에서 반응을 하기 때문에 응축부의 알루미늄 Fin을 동으로 대체하여 실험에 사용하였다. 물의 경우는 적용 온도범위에 비해 비점(boiling point)이 매우 높기 때문에 적용 대상에서 제외하였다.

Fig. 2-2는 각 작동 유체에 대한 평가 지수를 나타낸 것이다.

Table 2-2는 각 작동 유체와 재료 용기와의 친화성을 나타낸 것이다.

Table. 2-1 Possible working temperature range of various heat pipe fluids 10



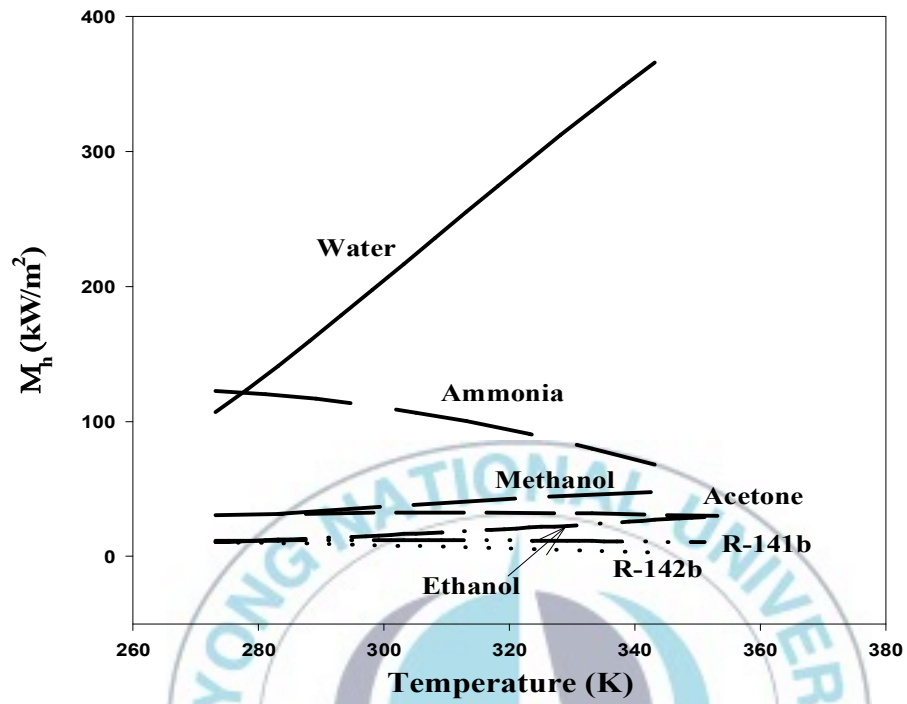


Fig. 2-2 Merit number of selected working fluids for heat pipe

Table 2-2 Working fluid & container material suitability

	Recommended	Not Recommended
Ammonia	Aluminum Carbon Steel Nickel Stainless Steel	Copper
Acetone	Copper Silica Aluminum Stainless Steel	
Methanol	Copper Stainless Steel Silica Nickel	Aluminum
Water	Copper Monel 347 Stainless Steel Refrasil fiber	Aluminum Silica Inconel Nickel Carbon Steel
Thermex	Copper Silica Stainless Steel	

제 3 장 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

본 실험에서는 14개의 이중진공관 속에 전열면적을 확장하기 위하여 알루미늄 Fin이 있는 Fin tube로 구성된 PHP를 삽입하였다. 본 실험에 사용된 집열기의 개략적인 구성은 시험부로서 이중진공관에 PHP를 삽입한 태양열 집열판과 집열기에 의해 발생하는 온수를 저장하기 위한 온수 탱크로 구성되며 제어부는 집열기에 물을 공급하기 위해 Pump와 Pump의 유량을 제어하기 위한 Control valve Stop valve로 구성되어있다. 그리고 제어부로서 집열기의 입출구 온도를 측정하기 위해 T-type 열전대를 사용하였다. Fig. 3-1은 본 실험에 사용된 태양열 집열판의 개략도를 나타낸 것으로 집열기는 주위로부터 일사의 방해를 받지 않는 옥외에 설치하였다. 집열기의 방향과 각도는 각각 동일하게 정남향 35°로 경사시켜 설치하였으며, 일사계(MS-602)는 집열기의 설치각도와 동일하게 설치하였다. PHP의 응축부는 Fig. 3-2에서 보는 바와 같이 열매체의 입·출구를 갖는 수배관을 둘러싼 Fin이 결합된 이중관 형태를 하고 있다. 시스템의 자세한 제원은 Table. 3에 정리했다.

실험에 사용된 이중진공관은 Fig. 3-6과 같다. 여기에 알루미늄 Fin이 있고 내부에는 익이 없는 PHP를 삽입하여 사용하였으며 재질은 구리이고 작동유체로는 선행연구의 결과로서 에탄올을 사용한다. 본 실험에 사용된 히트파이프의 작동원리는 Fig. 3-4에 나타내었다. Photo. 1은 실제 건물 옥상에 설치된 태양열 집열기의 모습을 나타낸다.

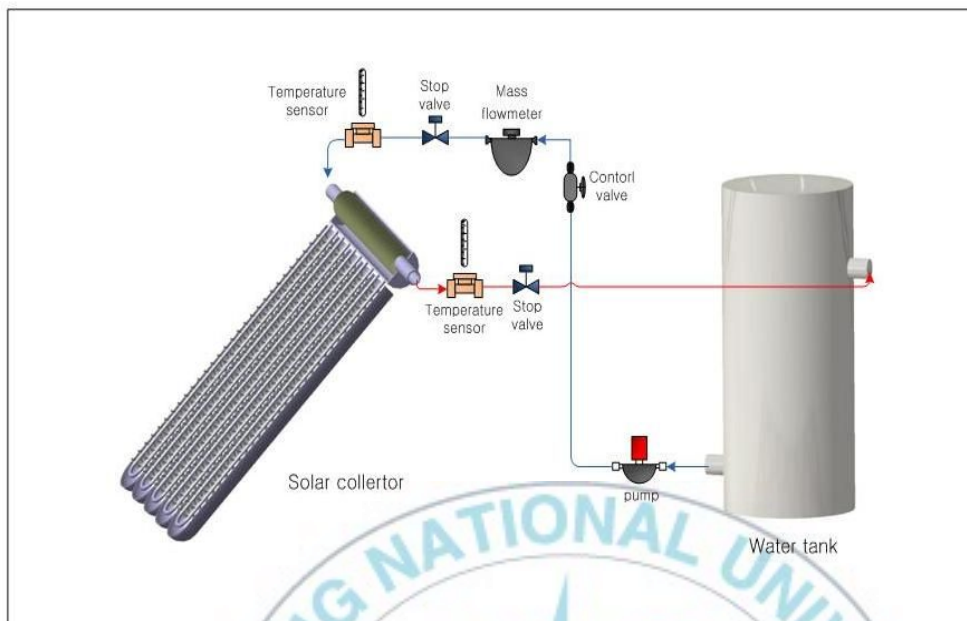


Fig. 3-1 Schematic diagram of experimental apparatus

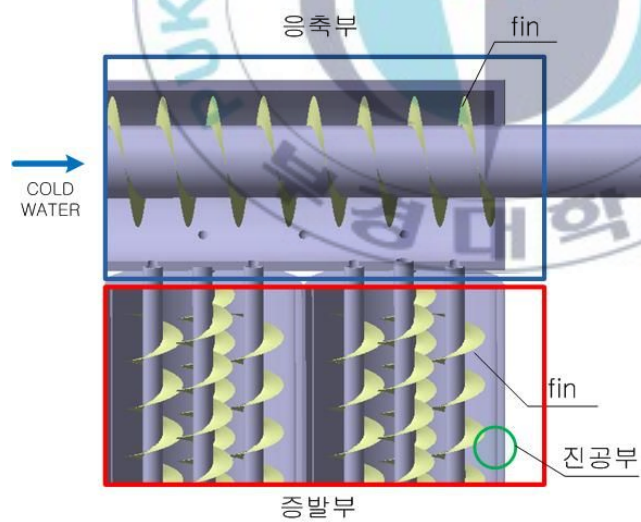


Fig. 3-2 Internal shape of solar collector using PHP

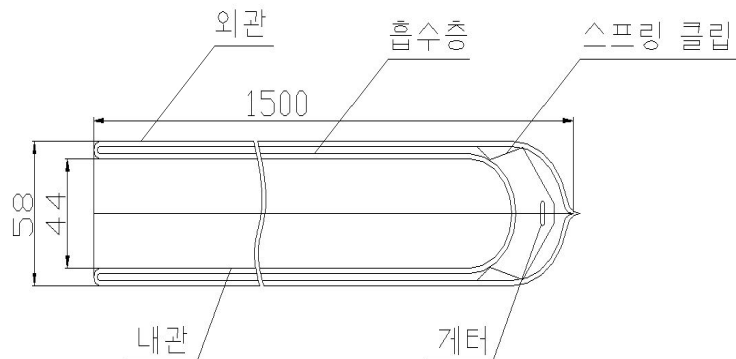


Fig. 3-3 A Structural of evacuated solar collector

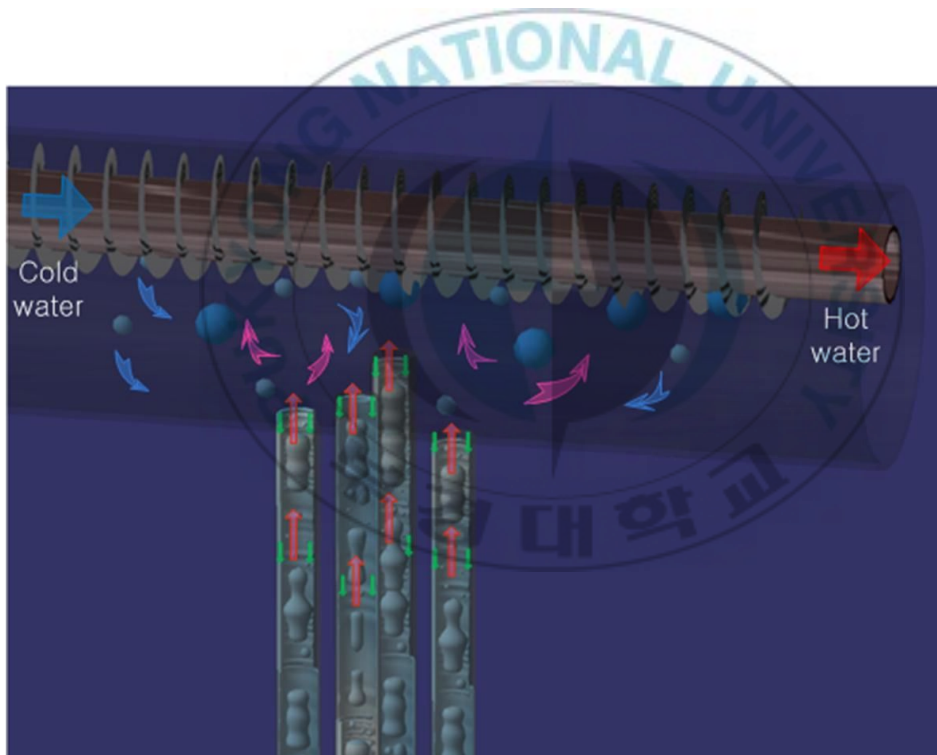


Fig. 3-4 Operating method of solar collector using PHP



Photo. 1 Solar collector using PHP on the
loop top

Table 3 Specification of Solar collector using th PHP

Parameter		Specification
Aperture Area(A)		$1.500 \times 0.812 \text{ [m}^2\text{]}$
Storage Tank Volume		300 [ℓ]
Glass Concentric Evacuated Tube		$\phi 58 \text{ [mm]}$
Selective Surface		Black chrome coating
PHP	Evaporator	Length 2942 [mm]
		Pipe Diameter(O.D) 4.76 [mm]
		Pipe Diameter(I.D) 3.6 [mm]
		Fin Diameter 14.65 [mm]
		Fin pitch 2.2 [mm]
	Condenser	Length 1165 [mm]
		Pipe Diameter(O·D) 15.88[mm]
		Pipe Diameter(I·D) 13.84[mm]
		Fin Diameter 35.4 [mm]
		Fin pitch 2.0 [mm]

3.2 실험 방법

본 실험에 사용되는 집열판 내부에 들어가는 히트파이프에 작동 유체를 충전하기 위해 로터리 펌프(RP)와 디퓨저 펌프(DP)로 구성된 고진공 펌프로 4.0×10^4 까지 진공상태로 만들었다. 작동유체의 충전률은 증발부 체적에 대해서 100%_{vol}를 충전하였다. 시스템의 주요 온도 측정은

T-type열전대를 사용하여 다점의 온도를 측정하기 위하여 Hybrid Recorder (yokogawa, DR-230)와 인터 페이스를 위한 PC로 구성되어졌다. 측정은 낮 시간대의 집열특성을 알아보기 위해 오전 10시부터 오후 4시까지의 시간대에 진행 하였다. 실험은 집열기의 온도변화 특성과 효율에 초점을 두어 수행하였으며, 일반적으로 태양열 집열에 이용되는 유량은 펌프를 이용하여 1~2 kg/min으로 고정하여 지속적으로 관찰하였다. 데이터의 수집은 각 측정 위치에서의 데이터를 매 10초마다 수집하여 실험을 수행한 시간의 평균으로 정리하였다..



제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 PHP의 충전율에 따른 집열판의 회수열량

PHP를 이용한 집열기 실험 시간대는 오전 10시부터 오후 3시까지 약 다섯 시간 동안 실험을 실시하였다. 충전율은 진동형 히트파이프 증발부 체적의 50%, 70%, 100%로 하였다. 그 결과 충전율이 50%인 경우 집열면적당 회수 열량이 $122.36 \text{ kcal/h} \cdot \text{m}^2$ 으로 회수하는 열량이 가장 낮았으며 충전율이 100%에서 집열판의 회수 열량이 $179.60 \text{ kcal/h} \cdot \text{m}^2$ 으로 가장 높다는 것을 알 수 있었다. 이것은 작동유체가 증발하여 응축부로 이동하여 응축된 작동유체가 다시 증발부로 고르게 돌아오지 못하고 14개의 분기관마다 다른 비율로 귀환하면서 히트파이프의 작동이 원활히 이루어지지 않았다고 생각된다. 응축부가 Chamber 형태로 되어 있기 때문에 응축부에서 진공관에 삽입되어 있는 분기관으로 골고루 작동유체가 귀환 하기 위해 가장 좋은 방법은 증발부를 만액으로 채우는 것이라 사료 된다.

그리고 충전율이 50%인 경우 출구 온도값이 일정하지 못하고 심하게 변동하는 것을 확인 할 수 있었다. 이것 또한 50%의 충전율에서 Heat pipe의 작동이 원활하지 않은 것을 알 수 있다. Fig. 4-1 ~ Fig. 4-3은 각각 작동유체의 충전량이 50%, 70%, 100%일 경우 입출구의 온도 변화를 나타낸 그래프 이고, Table. 4-1와 Table. 4-2, Table. 4-3은 충전량에 따른 회수열량을 나타내었다.

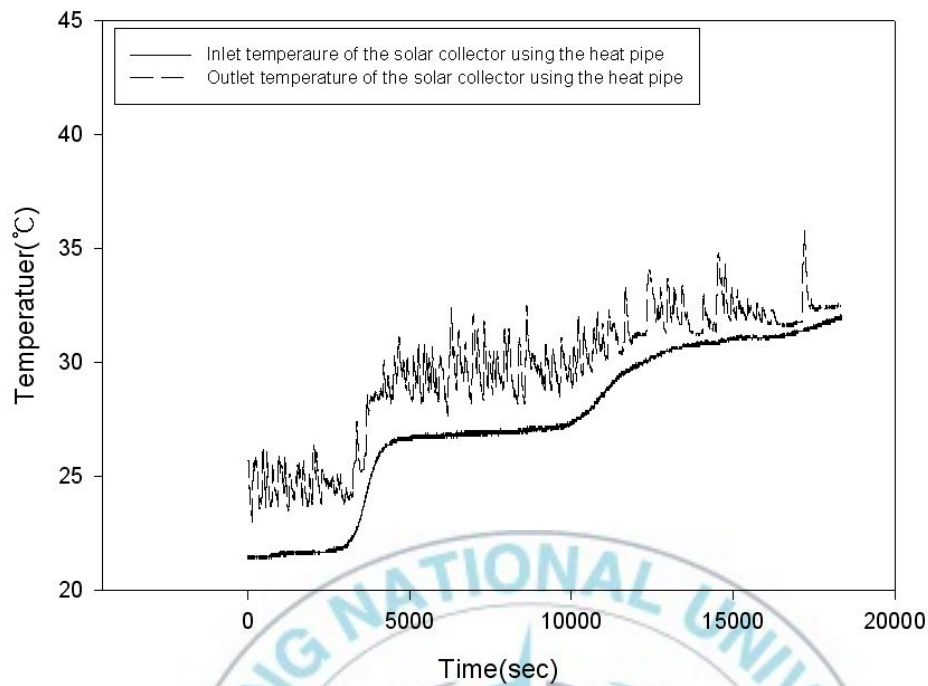


Fig. 4-1 Temperature profile with charging ratio at 50%_{vol}

Table. 4-1 Temperature difference and collected heat with charging ratio at 50%_{vol}

	PHP type solar collector
flow rate (kg/min)	2.06
Temperature difference(°C)	3.1
Charging ratio (% _{vol})	50
Collector area (m ²)	3.1
Collected heat (kcal/h • m ²)	122.36

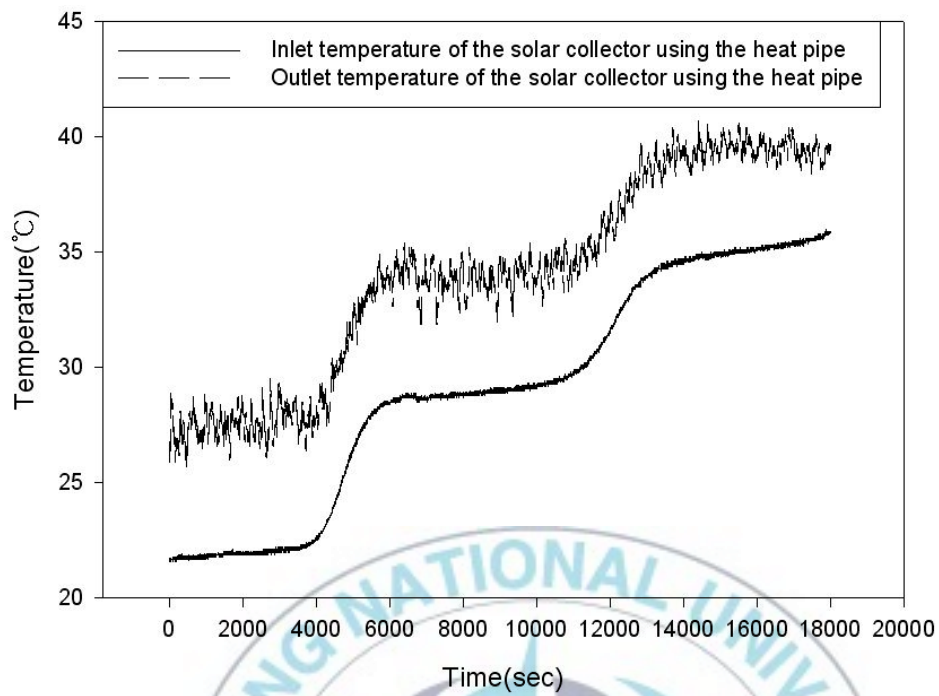


Fig. 4-2 Temperature profile with charging ratio at 70%_{vol}

Table. 4-2 Temperature difference and collected heat with charging ratio at 70%_{vol}

	PHP type solar collector
flow rate (kg/min)	2.01
Temperature difference(°C)	4.5
Charging ratio (% _{vol})	70
Collector area (m ²)	3.1
Collected heat (kcal/h • m ²)	179.60

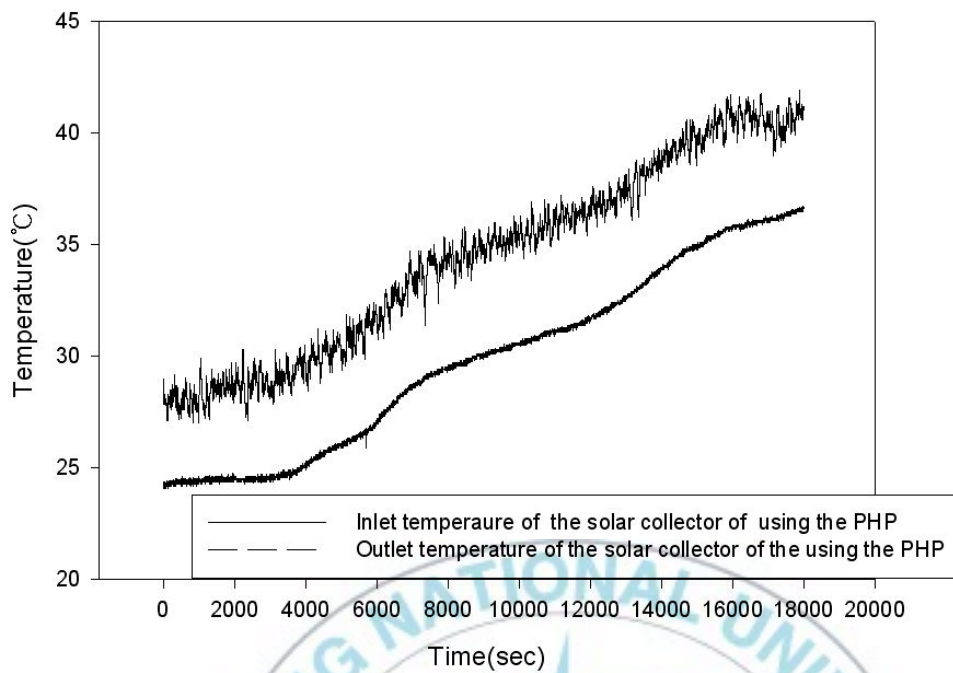


Fig. 4-3 Temperature profile with charging ratio at 100%_{vol}

Table. 4-3 Temperature difference and collected heat with charging ratio at 100%_{vol}

	PHP type solar collector
flow rate (kg/min)	2.01
Temperature difference(°C)	5.6
Charging ratio (% _{vol})	100
Collector area (m ²)	3.1
Collected heat (kcal/h • m ²)	225.63

4.2 작동유체의 종류에 따른 회수열량

작동유체에 따른 진동형 히트파이프의 회수열량 실험을 위해서 R-134a 와 R-142b 그리고 앞서 실험 하였던 에탄올을 대상으로 하였다. 그 결과 R-134a 는 집열기의 입·출구 온도차가 4.2 ℃이며 회수 열량이 156.07 kcal/h·m²으로 가장 낮게 나왔으며 에탄올의 경우 집열기의 입·출구 온도차가 5.6 ℃로 집열기의 회수열량이 225.63 kcal/h·m²으로 가장 높게 나왔다. 하지만 에탄올의 경우 응축부의 알루미늄 Fin과 고온에서 반응하여 응축부를 손상시키는 결과를 발생시켰다. 따라서 에탄올을 사용 할 경우 응축부의 재질을 알루미늄이 아닌 동과 같은 재질을 선택해야 할 것으로 생각된다. 그리고 에탄올의 경우 출구의 온도가 다른 작동유체에 비해 변동이 심한 것을 알 수 있었다. 이것은 응축부에서 응축된 작동유체가 증발부로 제때 귀환하지 못하여 발생하는 현상인 것으로 추측된다. Fig. 4-4 ~ Fig. 4-5는 작동유체 R-134a와 R-142b를 사용하였을 경우 집열기의 입·출구 온도 분포를 나타낸 그래프이다. 그리고 Table. 4-4는 작동 유체에 따른 입·출구 온도차와 회수열량을 나타내고 있다.

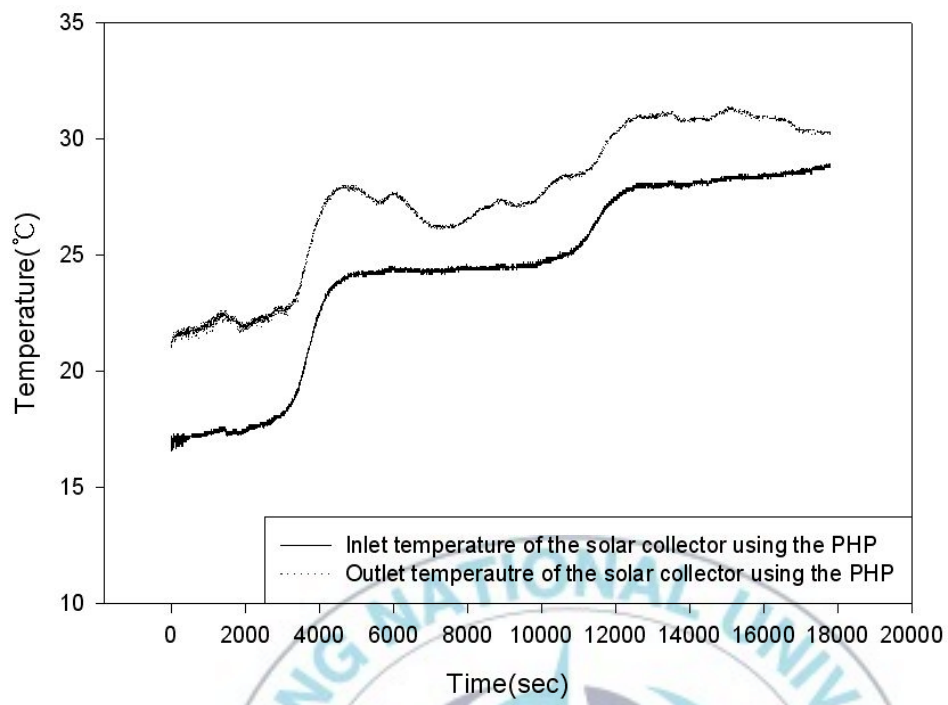


Fig. 4-4 Temperature profile with R-134a

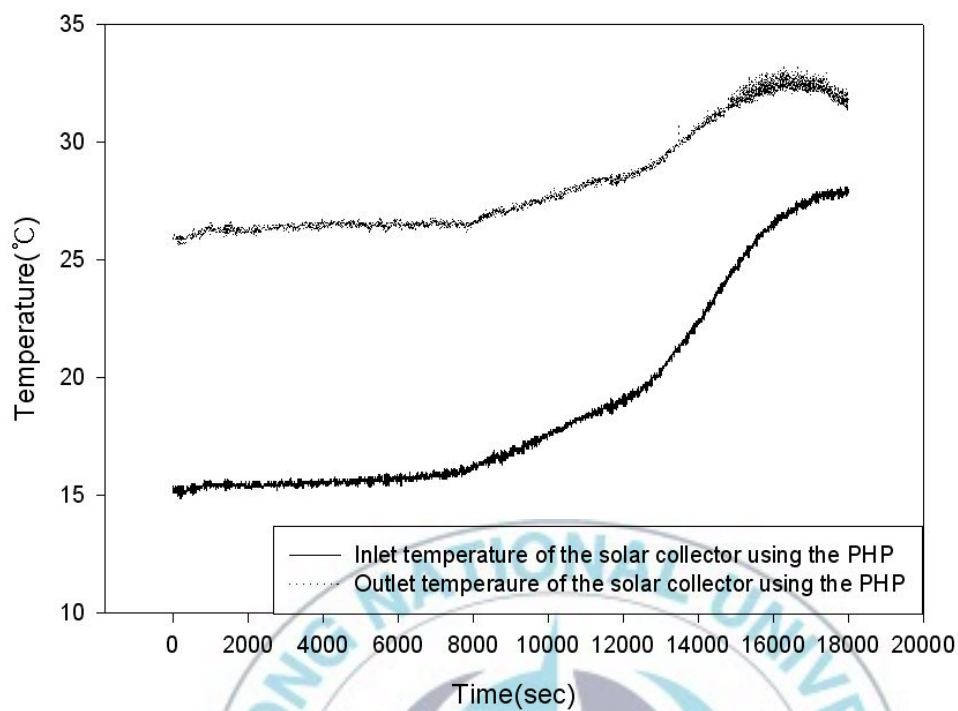


Fig. 4-5 Temperature profile with R-142b

Table. 4-4 Temperature difference and collected heat with working fluid

	R-134a	R-142b	Etyl Alcohol
flow rate (kg/min)	1.92	1.05	2.01
Temperature difference(°C)	4.2	10.9	5.6
Charging ratio (% _{vol})	100	100	100
Collector area (m ²)	3.1	3.1	3.1
Collected heat (kcal/h • m ²)	156.07	190.40	225.63

제 5 장 결 론

PHP를 이용한 집열기의 성능시험을 위해 PHP를 이용한 태양열 집열기의 입·출구온도를 측정한 결과를 토대로 하여 이에 대한 PHP의 적용 가능성 여부에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) PHP를 이용한 태양열 집열기의 실험 시간대 작동유체의 충전량에 따른 회수 열량은 50 %_{vol}의 경우 122.36 kcal/h·m² 이고, 70 %_{vol}의 경우 179.60 kcal/h·m²이다. 그리고 100%_{vol}의 경우 225.63 kcal/h·m²으로 나타나 충전량이 100%_{vol}일 경우 집열효율이 가장 높은 것으로 나타났다.

(2) PHP를 이용한 태양열 집열기의 실험 시간대 온도차는 50 %_{vol}의 경우 3.1 °C, 70 %_{vol}의 경우 4.5 °C, 100%_{vol}의 경우 5.6 °C이다.

(3) PHP를 이용한 태양열 집열기의 출구 온도의 변화량은 50 %_{vol}의 경우 2 °C ~ 5 °C로 나타났으며, 70 %_{vol}의 경우 2 °C ~ 3 °C로 나타났다. 그리고 충전량이 100%_{vol}일 경우 1 °C ~ 2 °C로 충전량이 100%_{vol}일 경우가 출구 온도가 가장 안정적인 것으로 나타났다.

(4) 작동유체에 따른 PHP를 이용한 태양열 집열기의 성능시험에서는 R-134a를 사용하였을 경우 유량이 약 2 kg/min일 때 온수의 입·출구 온도차가 4.2 °C이며 회수 열량은 156.07 kcal/h·m²이며 R-142b를 사용하였을 경우 유량이 약 1 kg/min 일 때 온수의 입·출구 온도차는 10.9 °C으로 회수 열량은 190.40 kcal/h·m²으로 나타났다. 그리고 에탄올을 사용하였을 경

우 입·출구 온도차는 $5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이며 회수열량은 $225.63\text{ kcal/h}\cdot\text{m}^2$ 으로 나타났다.

(5) 작동유체로 에탄올을 사용하였을 경우 고온에서 알루미늄과 반응하여 응축부의 손상시키는 결과를 가져왔다.



참고문헌

- [1] 주흥진, 김정배, 김종보, 곽희열, 2007, “단일 진공관형 집열기 히트파이프 작동유체에 따른 열성능 연구”, 한국태양에너지학회 논문집, pp. 98-99
- [2] 오승진, 현준호, 김남진, 이윤준, 천원기, 2008, “비유리식(Nonglass) 진공관형 태양열 집열기 개발에 관한 연구”, 한국 태양에너지학회 논문집 pp. 67-69
- [3] John A. Duffie, William A. Beckman, 1980, "Solar Engineering of Thermal Processes", Wiley, pp. 277-281
- [4] K. Chen, R. W. Shorthill, S. S. Chu, P. Chailapo, and Narasimhan, 1995, "An Energy-Efficient construction Module of Variable Direction of heat Flow, Heat Capacity, and Surface Absorptivity", USAF Report WL-TR-95-3046
- [5] 천원기 등, 2001, “진공복사관식 태양열 집열기의 최적모델 개발 연구”, 포항산업과학연구원, pp. 45-48
- [6] John A. Duffie, William A. Beckman, 1980, "Solar Engineering of Thermal Processes", Wiley, pp. 348-349
- [7] 천원기 등, 2001, “진공복사관식 태양열 집열기의 최적모델 개발 연구”, 포항산업과학연구원, pp. 50-53
- [8] 천원기 등, 2001, “진공복사관식 태양열 집열기의 최적모델 개발 연구”, 포항산업과학연구원, pp. 55-57
- [9] Yin, z. Q., 1997, "Chinese All-Glass Evacuated Solar Collector Tubes during the Past 18 Years", Chinese Journal of Solar Energy, No.1
- [10] Lee wookhyun, Kim jongsoo, 2000, "진동 세관형 히트 파이프의 연전달 및 유동 특성에 관한 연구" 공학박사 학위논문, pp. 21-25

감사의 글

지난 2년을 뒤돌아 보면 정말 짧았지만, 또 한편으로는 정말 뜻 깊고 오래도록 가슴에 남을 시간들이었다고 생각합니다. 어떤 일을 끝내면 항상 그렇듯 ‘좀 더 잘 할 수 있었는데..’, 하는 아쉬움이 많이 남습니다. 하지만 여러분들과 함께 생활하고 호흡할 수 있었기에 지난 2년은 저에게 너무나도 소중한 시간 이었습니다.

부족한 저를 제자로 받아주시고 항상 변함없는 지도와 격려, 그리고 사랑을 아끼지 않으셨던 김종수 교수님의 깊은 은혜에 고개 숙여 감사드립니다. 그리고 논문 심사를 위해 애써 주시고 학문적인 조언을 주셨던 오후규 교수님, 금종수 교수님, 최광환 교수님, 윤정인 교수님, 정석권 교수님, 김은필 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

실험실의 선배로서 그리고 인생의 선배로서 많은 것들을 가르쳐 주셨던, 하수정 박사님, 권용하 박사님께 감사드립니다.

항상 친구처럼 때론 형처럼 많이 이야기 하고 많은걸 가르쳐 주셨던 정완형, 그리고 우리 동기 중에서 가장 큰형 이면서도 항상 즐거움을 주었던 종호형, 저의 실험을 가장 많이 도와 주었던 현직이, 실험실에서 유일한 유학과 재호형, 이제는 누구보다 친해진 동광이 형, 그리고 아직 까지 실험실 막내 지원이 모두들 정말 감사합니다.

마지막으로 오늘날 저를 이 자리에 있게 해주시고, 부족한 저를 항상 믿어 주시고 책임감과 성실함을 몸소 보여주신 아버님, 어머님 그리고 누나 정말 감사드립니다. 지금부터 제가 받은 은혜를 갚아 나가겠습니다. 다시 한 번 감사드립니다.