碩士學位論文

太陽熱을 利用한 相變化 熱사이폰의 作動特性과 시스템 모델링에 관한 硏究

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

濟州大學校 大學院

에너지工學科

康 銘 哲

1999年 12月

太陽熱을 利用한 相變化 熱사이폰의 作動特性과 시스템 모델링에 관한 硏究

指導敎授　　李 潤 俊

康 銘 哲

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1999年　12月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

康銘哲의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員長　이 헌 주

委　　員　이 윤 준

委　　員　강 용 혁

濟州大學校 大學院

1999年　12月

Study on the Operating Characteristics and System Modelling of Loop type Thermosyphon for Using Solar Thermal Energy

Myeong-Cheol Kang
(Supervised by professor Yoon-Joon Lee)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

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

1999. 12.

목 차

LIST OF FIGURES iii

LIST OF TABLES v

NOMENCLATURE vi

SUMMARY viii

I. 서론 1

1. 연구 배경 1

2. 연구 목적 2

II. 이론적 배경 4

1. 연구 동향 4

2. 작동원리 6

3. 작동유체 8

III. 실험 및 데이터 측정 10

1. 실험 장치 10

2. 실험 방법 15

IV. 실험결과 및 데이터 분석 17

1. 작동특성 실험 17

1) 작동유체 주입량에 따른 작동특성 17

2) 작동유체의 종류에 따른 작동특성 비교 40

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2. 성능실험 46
3. 가시화 실험 52

Ⅴ. 시스템 모델링 55
1. 모델 설정 55
2. 모델링 과정 58
3. 시뮬레이션 결과 61

Ⅵ. 결론 65

Ⅶ. 참고문헌 68

부록1. 열전대 보정자료 71

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Mechanism of heat transportation in thermosyphon 7

Fig. 2 Phase equilibrium diagram of binary mixture(water & ethanol) 9

Fig. 3 Schematic diagram of Thermosyphon & vacuum system 11

Fig. 4 Thermosyphon system experimental apparatus 12

Fig. 5 Loop type thermosyphon system in field 13

Fig. 6 Thermocouples location of the Thermosyphon 14

Fig. 7 System temperature variation of liquid charge 30%(ethanol) 19

Fig. 8 System temperature variation of liquid charge 40%(ethanol) 20

Fig. 9 System temperature variation of liquid charge 50%(ethanol) 21

Fig. 10 System temperature variation of liquid charge 60%(ethanol) 22

Fig. 11 System temperature variation of liquid charge 70%(ethanol) 23

Fig. 12 Thermal storage capacity and efficiency of system 24

Fig. 13 System temperature variation of liquid charge 30%(water) 26

Fig. 14 System temperature variation of liquid charge 40%(water) 27

Fig. 15 System temperature variation of liquid charge 50%(water) 28

Fig. 16 System temperature variation of liquid charge 60%(water) 29

Fig. 17 System temperature variation of liquid charge 70%(water) 30

Fig. 18 Thermal storage capacity and efficiency of system 31

Fig. 19 System temperature variation of liquid charge 30% 33

Fig. 20 System temperature variation of liquid charge 40% 34

Fig. 21 System temperature variation of liquid charge 50% 35

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 22 System temperature variation of liquid charge 60% 36

Fig. 23 System temperature variation of liquid charge 70% 37

Fig. 24 Thermal storage capacity and efficiency of system 38

Fig. 25 Thermal storage capacity and efficiency of system 39

Fig. 26 System temperature variation of heating capacity 42

Fig. 27 System temperature variation of heating capacity 43

Fig. 28 System temperature variation of heating capacity 44

Fig. 29 System efficiency for heating capacity during different working fluid 45

Fig. 30 Thermal performance characteristics of thermosyphon(HRHT) ...48

Fig. 31 Thermal performance characteristics of thermosyphon(HRLT) ...49

Fig. 32 Thermal performance characteristics of thermosyphon(LRHT) ...50

Fig. 33 Thermal performance characteristics of thermosyphon(LRLT) 51

Fig. 34 Photograph of flow pattern in thermosyphon(ethanol+water) 53

Fig. 35 Photograph of flow pattern in thermosyphon(ethanol+water) 54

Fig. 36 Schematic flowchart of Modelling process 59

Fig. 37 Modelling of TRNSYS IISiBat Panel 60

Fig. 38 Comparison of experimental data & Simulation result 63

Fig. 39 Comparison of experimental data & Simulation result 64

Fig. A-1 Graph of Thermocouples Calibration 72

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

LIST OF TABLES

Table 1 Operational temperature range of various working fluids 9

Table 2 Experimental parameters 16

Table 3 Simulation result and error range 62

Table A-1 Thermocouples Calibration data 71

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

NOMENCLATURE

T_{col} : Collector Temperature

T_{tube} : Tube Temperature

Tci : Temperature of working fluid in downcomer

T_{co} : Temperature of working fluid in riser

T_{in} : Initial water Temperature

T_{out} : Final water Temperature

T_{amb} : Ambient Temperature

Q : Storage Energy

Q_{aux} : auxiliary heat

Q_{draw} : draw energy

Q_{loss} : loss energy

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Q_{sun} : solar gains

Q_{dt} : temperature-difference losses

Q_{other} : other gains

Q_{avail} : available energy

F_R : collector heat removal factor

F' : collector efficiency factor

$(\tau\ \alpha)_n$: effective transmittance-absorptance

U_L : overall heat transfer coefficient

I_t : radiation

m : flow rate

c_p : specific heat

A_c : collector area

η : efficiency

ϕ : collector slope

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

SUMMARY

Solar energy is one of the promising resources of renewable energy. It is of particular interest due to the energy shortage and environment pollution problems. Water heating by solar energy for domestic use is one of the most successful and feasible applications of solar energy. The thermosyphon SDHWS and the loop type thermosyphon systems are widely used for domestic hot water system.

The loop type thermosyphon is a circulation device for transferring the heat produced at the evaporator area to the condenser area in the loop by a working fluid. The system has the advantage of high heat transfer rate. A phase change of the working fluid occurs at the evaporator section and the vapor is transported to the condenser by the density gradient. The loop type thermosyphon collector can be made of smaller area and has higher efficiency than the present thermosyphon SDHWS.

In this study, the operating characteristics of various working fluids being used have been identified. The working fluids employed in the study were ethanol, water and a binary mixture of ethanol and water. The volume of working fluid used in this study were 30%, 40%, 50%, 60% and 70% of evaporator volume. An increased heat was applied with the increased volume of working fluid. It is observed that, in the thermosyphon with low volume of working fluid, such as 30% or 40%, the fluid was dried out. The average efficiency of the loop type thermosyphon was 46% with high solar

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

irradiation and 43% with low irradiation.

The flow pattern and mechanism of the heat transfer were identified through this study. Flow patterns of the binary mixture working fluid were also investigated, and the patterns were recorded in the camera.

The system parameters were calculated using the thermal performance data. Modelling of the system was carried out using PSTAR method and TRNSYS program.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅰ. 서론

1. 연구 배경

전세계적으로 무분별한 화석에너지 사용에 따른 환경오염과 에너지원 고갈로 인하여 대체 에너지원으로써 태양에너지가 각광을 받는 시점이다 무한정이고 무공해인 대체 에너지원으로의 태양에너지는 다양한 이용분야가 개발되어 실용화되고 있다. 이런 태양에너지의 다양한 이용분야 중에서 온수급탕을 위한 연구와 실용화로 자연형 태양열 온수급탕 시스템과 상변화형 시스템이 주류를 이루고 있다. 자연형 시스템의 개발과 실용화에서 얻어진 기술을 바탕으로 기후에 적합한 상변화를 이용하는 시스템 개발을 추진하고 있는 실정이다. 상변화형 써모사이폰은 루프내의 작동유체가 열 공급에 따라 증발과 응축을 연속적으로 일으키며 자연 순환하는 장치이다. 이 밀폐형 2상 열사이폰은 기-액 2상 유동에서 증발과 응축의 상변화 과정을 통하여 높은 열전달율을 얻을 수 있다는 사실이 알려져 왔다. 이것은 증기 유동에 따라 열 응답성이 대단히 빠르고, 작은 온도차에서 높은 열 이송을 나타내는 전열소자이기 때문이다. 열사이폰의 작동원리는 간단히 증발부와 응축부 사이의 증기압차와 중력장에 의하여 작동유체의 유동이 일어난다. 열사이폰은 증발과 응축의 잠열을 이용하는 작동원리는 열파이프와 비슷하지만 작동유체가 응축되어 증발부로 귀환하는 방법에서 커다란 차이가 있다. 열사이폰은 작동유체가 밀폐되어진 루프의 튜브안에 주입되어지고 열이 적용되면 액체의 일부는 증발하여 상단부로 상승하고 탱크안에 설치된 열교환기에 의해서 열을 전달한다. 열교환기에서 응축되어진 액체는 중력으로 인하여 증발부의 하단으로 이동되어진다. 상변화 시스템은 이상과 같이 작동유체가 증발과 응축을 반복하여 변화하면서 시스템이 구동된다.

이런 작동원리로 인하여 자연대류형 시스템보다 우수한 점이 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

첫째 소형이고 구조가 간단하다.

둘째 열에 대한 응답성이 빠르고 작은 온도차에서도 높은 열을 이송한다.

셋째 작동유체의 종류에 따라 작동온도의 범위를 넓힐 수 있다.

이런 우수한 열전달 특성에 의하여 열사이폰은 폐열회수, 전자부품의 냉각, 태양열 분야등 다양하게 이용되어지고 있다. 그리고 상변화형 시스템은 국내기후와 같은 동절기 사용의 문제점을 해결하고 높은 효율을 유지할 수 있는 시스템이다. 게다가 자연대류형 시스템에 비해 집열면적 및 시스템 중량을 소형화하면서 보다 높은 효율을 얻을 수 있다. 상변화 시스템이 갖는 우수한 특성에 의해 태양열 분야에서 다양하게 연구가 진행되고 있다.

2. 연구 목적

상변화형 써모사이폰은 기존의 유체순환형 시스템에 비하여 빠른 열응답성, 잠열수송이 가능하다는 장점들 때문에 성능의 우수성이 입증되었다. 그래서 써모사이폰을 태양열 분야에 적용하는 연구가 많이 진행되었지만 거의 일체형에 대한 것이 대부분이었다. 지금까지 연구되어진 논문들을 보면 일체형에 대한 작동특성이나 열전달 현상을 많이 다루었는데 태양열 적용을 위해서 루프 형태의 써모사이폰에 대한 작동유체의 양이나 작동유체의 종류를 결정하는 연구는 진행된 적이 거의 없는 실정이다.

제주대학교 중앙도서관

따라서 본 연구에서는 다음과 같은 몇 가지 경우에 대해서 알아보고자 한다.

첫째, 태양열 적용을 위한 루프형태 써모사이폰의 작동유체의 양에 따른 작동특성을 비교하여 최적의 작동유체의 양을 결정한다.

1) 작동유체 → 에탄올, 증류수, 에탄올+ 증류수(x=0.5)

2) 작동유체 주입량 → 써모사이폰 내부 체적의 30%, 40%, 50%, 60%, 70%

3) 열입력 → 440w/㎡, 660w/㎡, 880w/㎡

둘째, 작동유체의 종류로 많이 사용하고 있는 세 가지 즉, 에탄올, 증류수, 에탄올+증류수인 혼합물로 나누어 시스템에 맞는 작동유체를 찾는다

1) 작동유체 → 에탄올, 증류수, 에탄올+ 증류수(x=0.5)

2) 작동유체 주입량 → 써모사이폰 내부 체적의 60%

3) 열입력 → 220w/㎡, 310w/㎡, 440w/㎡, 530w/㎡, 660w/㎡, 790w/㎡, 880w/㎡

셋째, 에탄올+증류수인 이성분 혼합물을 사용한 상변화형 써모사이폰의 작동특성에 대해서 많이 연구된 적은 없지만 이성분인 경우가 종종 우수한 성능을 나타낸다. 혼합물인 경우 몇 가지 몰분율에 따라 특성을 비교하였다.

1) 작동유체 → 혼합물 (몰분율 x=0.4, 0.5, 0.6)

2) 작동유체 주입량 → 써모사이폰 내부 체적의 60%, 70%

3) 열입력 → 440w/㎡, 660w/㎡, 880w/㎡

넷째, 각 주입량에 따른 작동현상을 가시화 실험을 통하여 고찰하였다

다섯째, 성능 데이터로 시스템 모델링을 수행하였다

실내 작동특성 실험을 통하여 얻어진 데이터를 갖고 실외 실험에 적용하여 성능 실험을 수행하였다. 성능 실험에는 직접 태양 일사량에 적용하면서 시스템의 여러 가지 구성인자를 도출하고자 하였다. 시스템에 대한 모델링이 되지 않고는 최적의 제품 생산과정을 도출할 수 없을 뿐만 아니라 사용조건에 따른 에너지 절약이나 장기성능과 같은 경제성 분석자료를 제공할 수가 없다. 일단 모델링이 되면 구성요소별 측정치에 기초한 입력데이터는 시스템 시뮬레이션을 통해 여러 조건하에서 장기성능을 예측할 수 있고 설계나 평가를 위해서 시스템을 최적화하기 위한 시뮬레이션 모델을 사용할 수 있다. 그러므로 작동특성 실험과 성능실험을 수행하여 시스템 모델에 필요한 구성인자를 도출하고 모델링을 수행하였다.

제주대학교 중앙도서관

Ⅱ. 이론적 배경

1. 연구 동향

상변화형 써모사이폰은 기존의 유체순환형 시스템에 비하여 여러 가지 장점들 때문에 성능이 우수하다. 이런 이유로 인하여 집열기에 사용되는 써모사이폰의 성능이 시스템의 열성능에 직접 영향을 미치므로 지금까지 연구, 발표된 논문을 중심으로 연구동향을 고찰해 보았다.

Imura(1983)등은 일체형 써모사이폰에서의 임계 열유속에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 임계 열유속에서 내부직경, 가열길이, 작동유체, 주입량과 내부온도의 영향에 대하여 조사하였다 기존의 실험 데이터에 의한 실험식과 실험데이터를 보여주고 있다.

Faghri(1989)등은 일체형 써모사이폰의 응축부에서의 열전달량을 실험과 해석적으로 연구하였다 작동유체를 프레온-113과 아세톤을 사용한 써모사이폰의 유동현상을 조사하였다 서로 다른 작동유체의 유동에 대한 실험 데이터를 이용하여 실험식을 입증하였고 성능 한계를 예측하였다.

Negishi(1983)등은 일체형 써모사이폰의 열전달 성능을 실험적으로 연구하였다. 작동유체로는 물과 에탄올을 사용하였고 실험적인 변수로는 주입되는 작동유체의 양과 써모사이폰의 경사각을 사용하였다. 그리고 써모사이폰의 열전달 구조를 명확히 하기 위하여 증기유동, 물방울의 분산, 증기응축의 이동에 대한 가시화를 보여주었다. 게다가 총괄 열전달 계수와 열 다이오드 특성들이 얻어졌다 실험 결과에서 작동유체로 물을 사용하는 경우에는 높은 열전달량을 얻기 위해서 증발부의 25%-60%를 주입하는 것이 좋고 에탄올인 경우에 있어서는 40%-70%로 주입할 때 높은 열전달량을 보인다는 특성을 얻게 되었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Casarosa(1983)등은 작동유체로 물을 사용한 2상 써모사이폰에 대한 실험적인 연구의 수행동안에 흥미로운 과정을 관찰하였다. 이 현상은 낮은 압력에서 주기적인 비등으로 이것을 Geyser effect라 불리어지게 되었다. 그리고 써모사이폰 증발부에서의 열전달 계수를 구하였고 증발부에서의 비등현상을 카메라를 이용하여 관찰하였다.

Gross(1985)등은 일체형 써모사이폰의 증발, 응축부에서의 열전달을 실험적으로 연구하였다. R-115를 작동유체로 사용하였고 유체압력, 열부하량(175<Q<1975), 경사각($0 \leq \psi \leq 60^{\circ}$)을 변수로 하여 증발, 응축부의 성능을 구하였다.

Dobran(1985)등은 일체형 써모사이폰에서의 정상 상태 특성과 안정적인 시동을 결정할 목적으로 해석적인 연구를 수행하였다. 해석적인 모델은 중기 중심, 액막(liquid flim), 증발부의 액체풀의 열수력학적인 것을 포함한 시스템의 집합 변수를 바탕으로 한다. 지배방정식의 정상해와 선형 안정화 해석에서 두 개의 작동한계가 존재하는데 하나는 유체와 관련된 것이고 다른 또 하나는 증발부에서 액체의 액마름과 관련되었다. 기하학적인 형상, 주입량, 작동한계에 있어서 유체특성의 영향을 결정하기 위해 변수적인 연구(parametric study)를 수행하였다. 그리고 유동의 열부하 한계와 실험데이터를 갖는 드라이 아웃을 비교하여 연구를 수행하였다

제주대학교 중앙도서관

Soin(1987)등은 증발부에서 열전달계수의 변화를 계산할 수 있는 상변화 온수기에 대한 모델을 연구하였다. 이 모델은 집열기판과 축열되는 온수의 온도변화를 관찰할 수 있다 실험적인 결과로는 집열기의 액체량이 80%이상인 경우에 좋은 성능을 얻었고 낮은 액체량에서는 과열 현상이 발생하여 성능도 낮아졌다. 그리고 상변화 온수기와 써모사이폰을 비교하여 성능실험을 수행하였다

Bong(1993)등은 단일 집열기와 평판형 히트 파이프 집열기 배열의 효율, 열수송 인자(F_R), 출구온수 온도를 결정하기 위한 이론적인 모델을 나타내었다. 이 모델은 국부적인 기후 조건하에서 16개의 히트 파이프 집열기를 테스트하였다. 모델은 높은 온수온도의 작동범위안에서 집열기 배열의 정상 성능을 보여주었다

Chen(1984)등은 2상 밀폐 써모사이폰의 응축 역류현상에 대하여 증기와 액체간의 역류를 고려하여 실험과 해석적으로 조사하였다. 열전달이 감소하는 결과로 인하여

액막의 두께는 증기변형에 의해 증가함을 해석적으로 예측하였다.

김철주(1995)등은 일체형 써모사이폰의 액체풀에서 발생하는 핵비등 현상과 유동영역에서의 가시화 방법을 연구하였다. 실험용 써모사이폰은 스텐레스와 유리관을 이용하여 제작하였고 열공급은 증발부 주위에 설치된 가열 코일에 의해 열을 공급하였다. 이 장치로 증발부 풀내부의 비등현상을 관찰하였다.

곽희열(1995)등은 작동유체로 비등점이 서로 다른 2성분 혼합물을 사용한 2상 밀폐 써모사이폰에 대한 실험을 수행하였다. 상분리가 일어나지 않는 안정적인 혼합물인 물/에탄올 혼합물을 작동유체로 사용한 써모사이폰의 작동특성에 관해서 고찰하였다.

위와 같이 써모사이폰에 대한 연구는 일체형에 대하여 이루어져 왔다. 써모사이폰에 대하여 연구된 논문들을 보면 열전달 특성과 유체역학적인 연구가 다수를 이루고 써모사이폰의 작동 특성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 그러므로 본 눈문에서는 루프형태로 연결된 써모사이폰에서 작동유체와 작동유체량에 따른 작동특성을 규명하고자 한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2. 작동원리

전열소자의 초기 연구에는 우주항공용으로 개발되었기 때문에 중력의 영향이 없어 윅(wick)의 존재는 필연적이라 할 수 있었다. 그러나 지상용으로 적용할 경우의 써모사이폰은 윅을 제거하고 중력을 이용하여 작동된다.

액체상태의 작동유체는 증발부에서 온도가 상승하여 액체상태에서 기체상태로 상변화가 일어나 상당한 비체적의 팽창을 가져온다 기화된 작동유체는 증발부와 응축부의 압력차에 의하여 증기유동로인 관을 따라 응축부로 이동한다. 응축부로 이동된 기체상태의 작동유체는 응축부에서 잠열을 전달하고 중력에 의해서 증발부로 되돌아온다. 증발부와 응축부의 증기의 압력차는 증발부와 응축부의 온도차에 기인하고 응축부에서 열을 잃은 액체상태의 작동유체는 응축부의 온도와 거의 같거나 조금 낮은 상태로 증발부로 되돌아오게 된다. 이런 순환 과정이 연속적으로 진행되면서 작동유체

의 상변화도 반복적으로 일어나고 외부로부터 동력의 공급없이 증발부에서 응축부로 계속적인 잠열 수송이 일어난다.

태양열 집열기의 열성능은 실제 축열조에 집열되는 축열량과 효율에 의해서 특징지어진다. 집열되는 에너지는 Hottel-Whiller식으로 표현되며 에너지 균형식은 다음과 같이 표현된다.

$$Q = A_c F'[I_t(\tau\alpha)_e - U_L(T_h - T_a)] \quad (1)$$

여기서 열교환기와 외기 사이의 열손실이 없다고 가정하면

$$Q = mC_p(T_o - T_i) \quad (2)$$

으로 표현된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

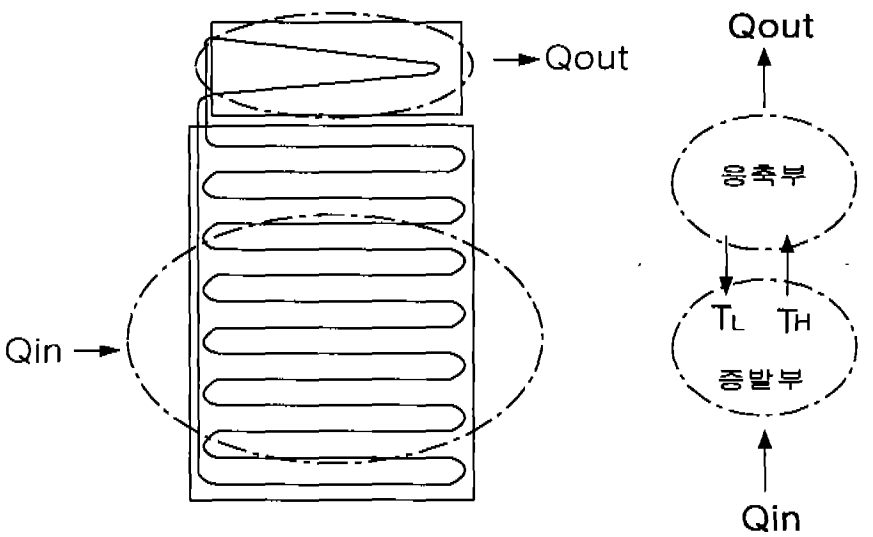


Fig. 1 Mechanism of heat transportation in thermosyphon

시스템 효율은 열량을 일사량과 집열면적으로 나누어 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{mC_p(T_o - T_i)}{I_t A_c} \quad (3)$$

3. 작동유체

작동유체는 전열소자의 성능은 물론 시스템 전체의 효율과 밀접한 관계가 있으므로 이의 선정에는 제반 작동조건을 고려해야 한다. 일반적으로 전열소자는 그 작동 범위에 따라 극저온용, 저온용, 고온용 등으로 구분되며 작동유체 또한 빙점과 비등온도에 따라 적용범위가 정해진다

작동유체는 다음과 같은 물성을 고려해야 한다.

- 잠열이 클 것
- 밀도가 클 것
- 열전도가 클 것
- 점도가 작을 것
- 빙점과 비등이 작동범위에 적당할 것
- 화학적인 안정성(독성 및 폭발성이 없을 것)
- 구하기 쉽고 가격이 저렴할 것

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 1.은 1기압 하에서 몇 가지 유체의 작동온도 범위를 나타내고 있다.

써모사이폰의 작동유체로 단일성분의 유체를 사용하는 경우는 많은 연구가 진행되었지만 2성분 혼합물인 경우의 작동과 열특성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 그러나 작동온도 범위의 확장이란 측면에서 혼합물은 단일성분보다 여러

Table 1 Operational temperature range of various working fluids(1기압하)

Working fluid	Melting temp.(℃)	Boiling temp.(℃)	Useful range(℃)
Ammonia	-78	34.4	-60~100
Freon 113	-35	47 6	-10~100
Acetone	-95	56.5	0~120
Methanol	-98	65	10~130
Ethanol	-112	78.5	0~130
Water	-0	100	30~200

장점이 있다. 물과 에틸렌 글리콜이나 물과 에탄올 등은 서로 잘 혼합할 뿐만 아니라 비등 온도와 결빙 온도의 범위를 넓힐 수 있으므로 추운 지방의 적용에 적합하다. 이런 이성분 혼합물의 작동특성과 열성능에 대한 연구가 이루어지고 있는 추세이다. Fig. 2는 물과 에탄올 이성분 혼합물의 상평형도를 나타내고 있다 그림에서 공비점은 mole fraction이 0.88이며 이 이상에서는 단일 성분과 같은 특성이 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

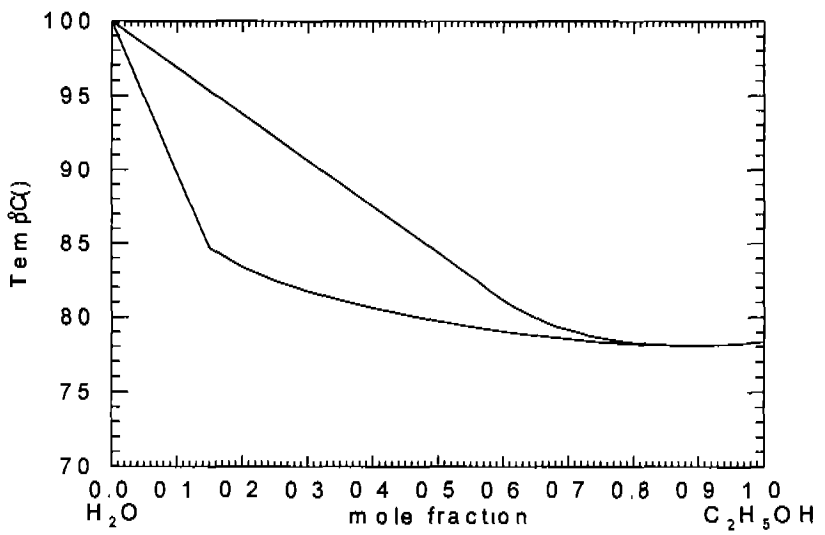


Fig. 2 Phase equilibrium diagram of binary mixture(water and ethanol)

Ⅲ. 실험 및 데이터 측정

1. 실험 장치

상변화형 시스템의 작동특성 분석을 위하여 실내 실험에 사용한 주요한 장치로는 평판형 써모사이폰, 축열조, 진공장치(rotary pump, 10^{-3}Torr), 평판형 히터, 열입력 장치(power supply), 온수탱크, 항온조, 데이터 수집장치등으로 구성되어 있다. 실험에 사용된 상변화형 시스템의 개략도는 Fig. 3과 같다. 집열부에서의 써모사이폰은 구리관에 직경이 9.52mm인 구리관이 145mm 간격으로 구부러져 하나의 루프로 연결되어 있고 총 길이는 20m이다 축열조에는 Spiral 형태의 열교환기가 집열판의 구리관과 연결되어 있다. 집열판의 평판 위쪽에는 일사량 조건과 유사하게 가열을 하기 위해서 평판형 히터가 있다. 히터에 가하는 열부하는 전압계와 슬라이닥스를 이용하여 조절하였고 항온조와 온수탱크는 일정한 온도의 물을 축열조에 공급하기 위해서 사용되었다. 온수탱크에는 온도 조절기가 설치되어 온수의 온도를 조절할 수 있도록 하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

전체적인 시스템의 설치 각도는 태양의 고도각과 관련이 있는데 태양 빛을 많이 받기 위해 경사지게 설치한다. 본 실험에서는 40 °로 경사지게 설치하였다. 축열조에는 초기 성층화를 없애주기 위해서 온수 순환 펌프가 이용되었다. 내부 진공 및 작동유체의 주입을 위해서 축열조로 들어가는 상승관에 구리관을 이용하여 진공 펌프와 작동유체 주입용 매스실린더를 연결하는 3-way valve를 설치하였다. 그리고 집열판과 축열조의 상승관과 하강관은 작동유체의 내부 유동을 관찰하기 위해서 투명한 튜브로 연결하였다

Fig. 3은 써모사이폰의 실내실험을 위한 개략도를 보여주고 있다. Fig. 4는 써모사이폰의 작동특성 실험을 위하여 제작한 실내 실험장치이다

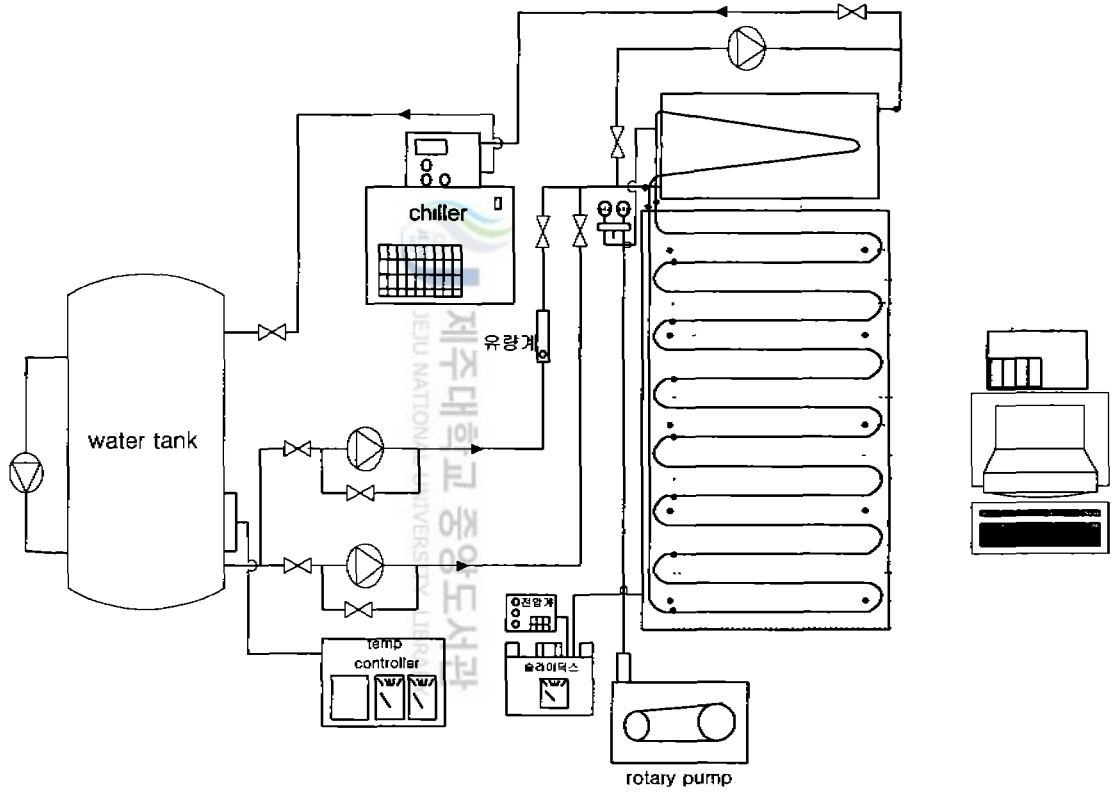


Fig 3 Schematic diagram of Thermosyphon & vacuum system

Fig. 4 Thermosyphon system experimental apparatus

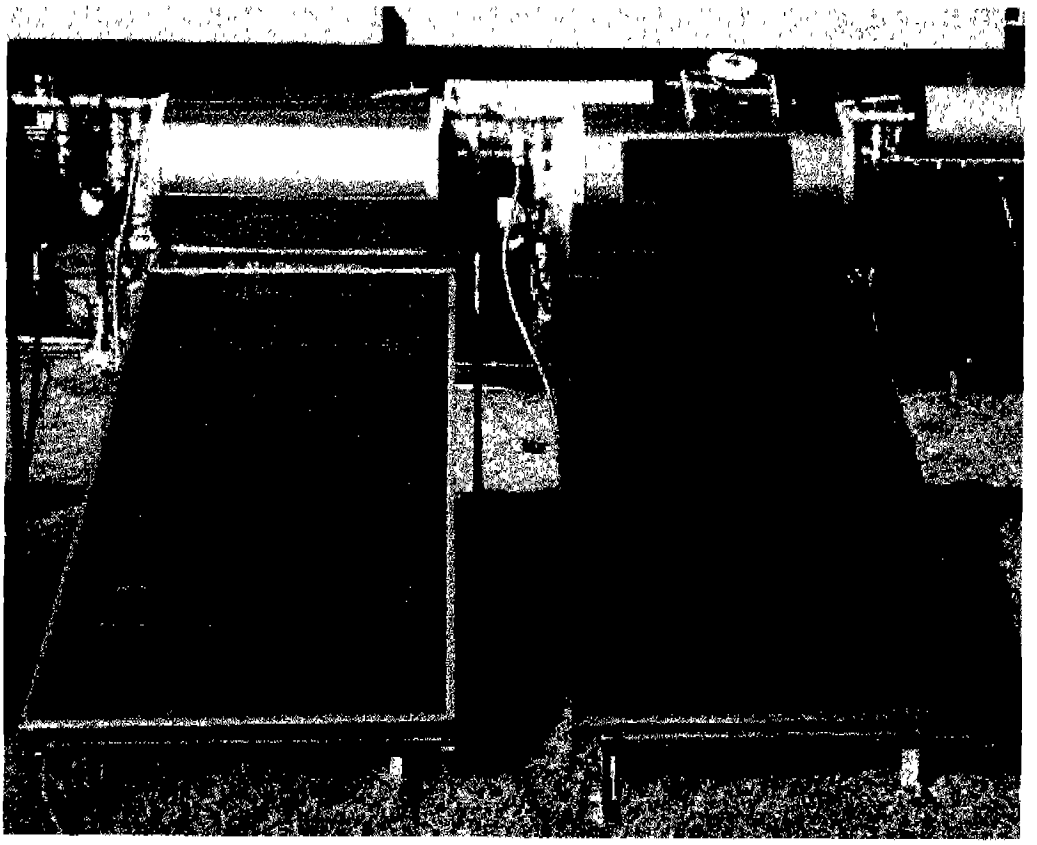


Fig. 5 Loop type thermosyphon system in field

Fig. 5는 실외 열성능 실험을 위한 상변화 태양열 집열기를 보여주는 사진이다. Fig 6은 집열판과 축열조의 온도측정을 위한 열전대의 위치를 보여주고 있다. 집열판에는 판과 작동유체가 흐르는 관의 온도를 측정하기 위하여 판 위에 435mm 간격으로 좌우 하나씩 10곳에 열전대와 관위에는 290mm 간격으로 7곳에 열전대를 설치하였다 축열조에는 입구와 출구, 내부에는 상중하로 나누어 3곳에 열전대를 설치하였다. 시스템의 온도분포를 측정하기 위해서 각 지점에 T-type 열전대를 설치하였고 데이터 수집 장치는 Fluke사의 Helios를 이용하였고 PC에 연결하여 관찰하였다.

성능 실험을 위한 실외 실험은 작동유체가 흐르는 관이 하나의 루프형태의 집열판과 축열조에 열교환기가 내장되어 있는 시스템을 사용하였다. 이 루프에는 진공상태를 유지한 상태로 작동유체인 상변화 물질이 들어있다. 그리고 루프에는 작동유체를 교환하기 위해 3-way valve를 사용하였다. 시스템은 40 °로 경사지게 설치하였고 설치각과 같은 각도로 일사량을 측정하기 위한 pyranometer를 설치하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

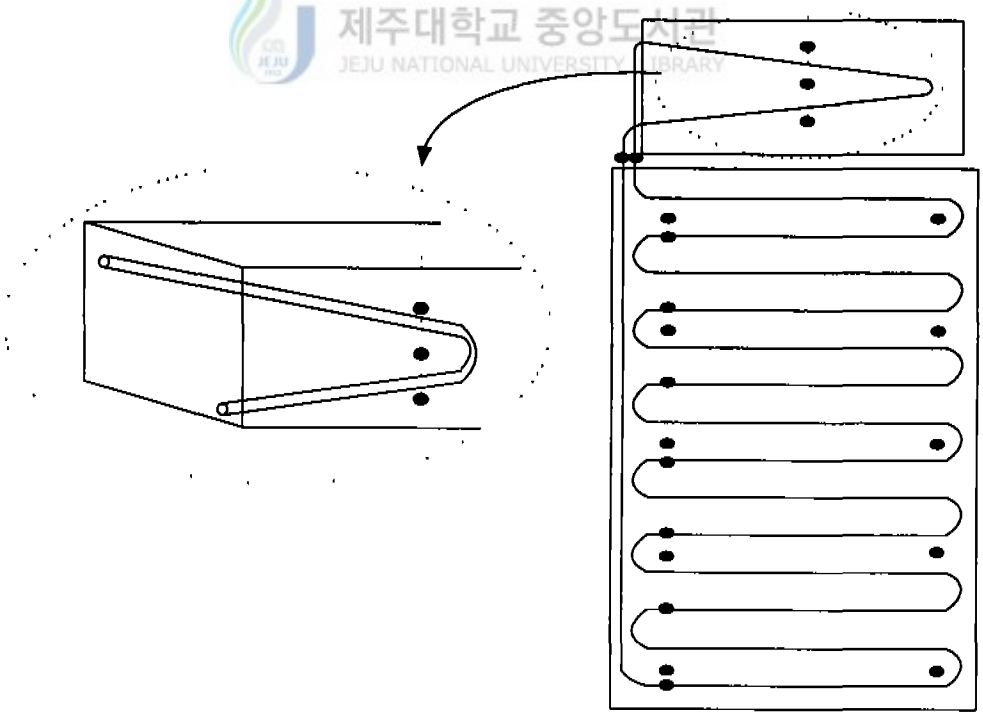


Fig. 6 Thermocouples location of the Thermosyphon

데이터 수집 장치로는 Fluke사의 NetDAQ을 사용하였다.

써모사이폰내에서 작동유체의 유동 및 특성을 관찰하기 위하여 가시화 실험을 수행하였다. 증발부와 응축부의 중간부분에 유동을 관찰할 수 있도록 투명한 튜브로 연결하였다. 관찰된 유동현상은 카메라를 사용하고 모터 드라이브에 의해 연속 촬영하였다. 조명은 관찰창 위에 200 watt와 100 watt의 전구 4개와 후면에 1개를 설치하여 촬영하는데 이용하였다.

2. 실험 방법

1) 실내 작동특성실험

써모사이폰 내부는 공기가 전혀 없게 진공을 유지하기 위해서 rotary pump을 이용하였다. 시스템 내부의 진공도에 따라 작동유체가 상변화 하는 경향이 달라 질 수 있으므로 진공을 만들거나 진공을 유지하는 것은 중요하다. 써모사이폰에서 응축부인 축열조로 작동유체가 상승하는 부분에 진공과 작동유체를 주입하기 위하여 미리 만들어진 구리관에 튜브를 사용하여 3-way valve와 결합하였다. 3-way valve의 1개 라인은 진공펌프와 연결하고 나머지 라인은 매스실린더를 연결하였으며 매스실린더 앞에는 진공밸브를 장착하였다.

진공(진공도, 10^{-3} torr)을 만들기 위해서는 3-way valve을 열고 매스실린더의 밸브만 닫힌 상태에서 진공펌프를 이용하여 시스템과 연결된 모든 공간을 진공상태가 되게 하였다. 시스템이 진공상태가 되면 진공펌프와 연결된 밸브를 닫고 매스실린더에 주입하고자 하는 알맞은 양의 작동유체를 넣고 매스실린더의 밸브를 천천히 열어 진공상태인 시스템 내부로 작동유체가 유입되도록 하였다.

제주대학교 중앙도서관

주입되는 작동유체의 종류에는 99%의 준수 에탄올(C_2H_5OH), 증류수(H_2O), 동일한 혼합비의 에탄올+증류수의 혼합물을 사용하였고 작동유체의 양은 증발부인 써모사이폰 체적의 30%, 40%, 50%, 60%, 70%을 각각 주입하였다. 작동유체의 주입이 끝나면 축열조에 25℃의 시수를 채운다. 시수를 채운 후에는 축열조내의 성층화를 없애기 위해 순환 펌프를 가동하였다. 히터에 가해주는 열부하는 일사량 조건을 고려하여 최소 220 W /m^2에서 최대 880 W /m^2인 범위에서 수행하였다. 실험에 적용된 실험 변수는 Table 2와 같다.

실험과정중에서 작동유체의 유동이 일어나는 시점과 내부 유동현상을 관찰하기 위해서 상승관에 투명한 튜브를 설치하여 육안으로 관찰하고 메모하였다. 그리고 특징적인 현상에 대해서는 순간 사진촬영을 통하여 현상을 관찰하였다.

Table 2 Experimental parameters

작동유체 종류	작동유체량(%)	열부하(W/m^2)
에탄올	30%, 40%, 50%, 60%, 70%	220, 310, 440, 530, 660, 790, 880
증류수		
에탄올+증류수		

제주대학교 중앙도서관

2) 실외 성능 실험

먼저 하루동안의 집열량을 구하기 위해서 전날 저녁에 축열탱크의 물을 완전히 배수하여 축열탱크에 잔여 열량이 남지 않게 한다 다음날 아침 8시경에 축열탱크에 물을 채우고 측정기기를 동작시키고 시수의 초기 온도를 정확하게 측정하기 위해 시수 입구와 출구에 연결된 펌프를 돌려 축열탱크 안의 성층화를 없앤다 실험을 시작하여 일사량과 측정포인트의 온도를 측정하고 저장한다. 하루 8시간 집열이 끝나면 축열탱크에 설치된 펌프를 동작하여 온수를 골고루 섞어 측정하고 하루동안 얻은 열량을 계산하였다. 이 계산된 열량을 시스템 모델링에 이용하였다.

Ⅳ. 실험결과 및 데이터 분석

1. 작동특성 실험

상변화형 써모사이폰의 작동특성을 관찰하기 위하여 루프형태의 써모사이폰을 제작하였고 열교환기가 부착되어 있는 축열조를 연결하였다. 작동특성 실험은 써모사이폰의 작동유체의 종류와 양을 결정하기 위해 두 가지로 나누어 수행하였다.

1) 작동유체 주입량에 따른 작동특성

먼저 써모사이폰의 작동유체량을 결정하기 위해서 몇 가지 종류로 나누어 열특성을 알아보았다. 주입한 작동유체로는 에탄올, 증류수, 에탄올/증류수 혼합물을 사용하였고 증발부 체적의 30%, 40%, 50%, 60%, 70%를 주입하였다. 공급된 열부하는 평판형 히터를 사용하여 440w/m^2, 660w/m^2, 880w/m^2의 열을 연속적으로 가해주면서 시스템의 작동특성을 분석하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

작동유체를 30%에서 70%까지 변화시키고 증발부에 가해주는 열공급은 440w/m^2에서 880w/m^2로 열을 가해주면서 시스템의 판과 관의 온도를 측정하여 그림으로 나타내었다. 그림에서 T_{col}은 판의 다섯 번째 중앙부분, T_{tube1}은 관의 하부에서 두 번째 부분, T_{tube2}은 관의 네 번째 부분, Tco은 증발부 출구, Tci은 증발부 입구의 온도를 나타내었다.

(1) 에탄올

써모사이폰에 에탄올 30%을 주입한 경우의 온도분포는 Fig 7에 보여주고 있다. 응축부인 축열조의 온도를 26.6℃로 정하였고 히터에 440w/m^2의 열공급을 가해주었다. 그림에서 보이는 것과 같이 15분까지 계속하여 시스템의 온도가 증가하다가 정상상태

에 도달하였고 증발부 출구 온도도 증가하여 정상상태에 도달하였다가 24분 이후로 판과 관의 온도보다 갑자기 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 작동유체가 너무 적음으로 인하여 액마름(Dry-out) 현상이 발생한다는 것을 알 수 있다. 액은 가열을 하기 시작하여 6분이 경과한 후에 간헐적으로 액이 축열조로 상승이 시작되고 정상상태에 도달하는 시점에서는 2상형태로 상승하는 것을 알 수 있었다. 에탄올 30%에서는 액마름 현상으로 인하여 실험을 중단하였다.

Fig. 8은 에탄올 40%를 주입한 경우의 시스템 온도분포를 나타낸 그림이다. 40%인 경우에는 간헐적인 액상승과 증기형태로의 액상승을 거쳐 30%에서 보이는 액마름 현상이 나타나고 있다 에탄올인 경우에는 액마름 현상이 아주 빠르게 일어난다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9에서 Fig 11까지는 증발부 체적의 50%, 60%, 70%를 주입한 경우의 시간에 따른 시스템의 온도변화를 보여주는 그림이다. 60%를 주입한 경우의 그림을 보면 공급열에 따라 판과 관의 온도는 정상상태에 도달한다는 것을 볼 수 있다. 증발부 입, 출구 온도는 열공급이 증가할수록 조금씩 증가하고 있다 70%인 경우 50%, 60%인 경우와 같은 경향을 보이고 있지만 앞서 관찰되지 않은 현상이 나타났다. 액이 많음으로 인하여 상승되어진 액이 증발부로 이동하는데 정체가 발생한다는 것을 관찰할 수 있었다

Fig. 12는 작동유체를 증발부 체적의 50%, 60%, 70%를 주입하였을 때 얻어지는 축열조에서의 축열량과 효율을 나타낸 그림이다. 그림에서 보이는 것과 같이 50%인 경우보다는 60%, 70%인 경우가 축열량과 효율면에서 좋은 결과를 보이고 있다. 70%인 경우가 60%보다도 결과는 좋지만 시스템 작동면에서는 70%인 경우에 증발부로 되돌아오는 증발기 입구부분에서 액이 많으므로 인해 액정체가 발생한다는 것을 알 수 있었다.

제주대학교 중앙도서관

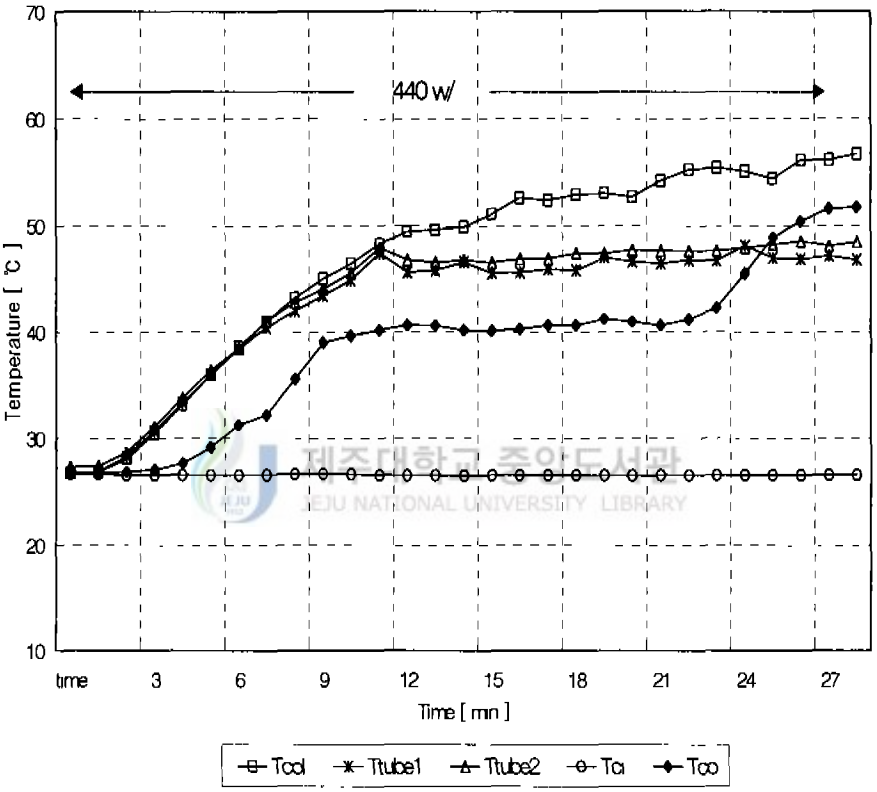


Fig. 7 System temperature variation of liquid charge 30%(ethanol)

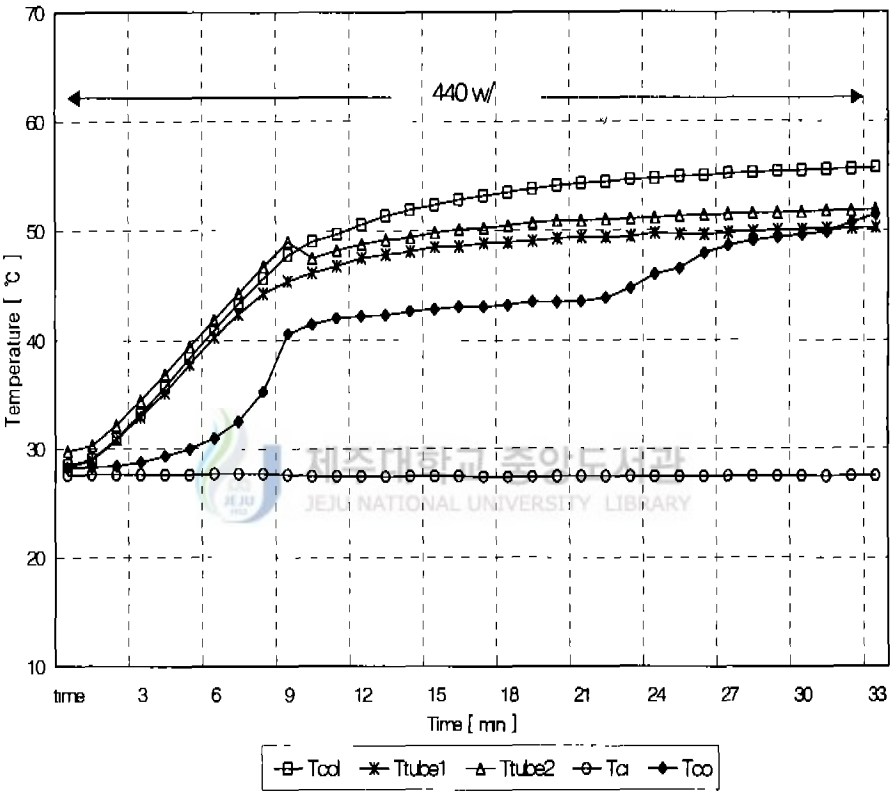
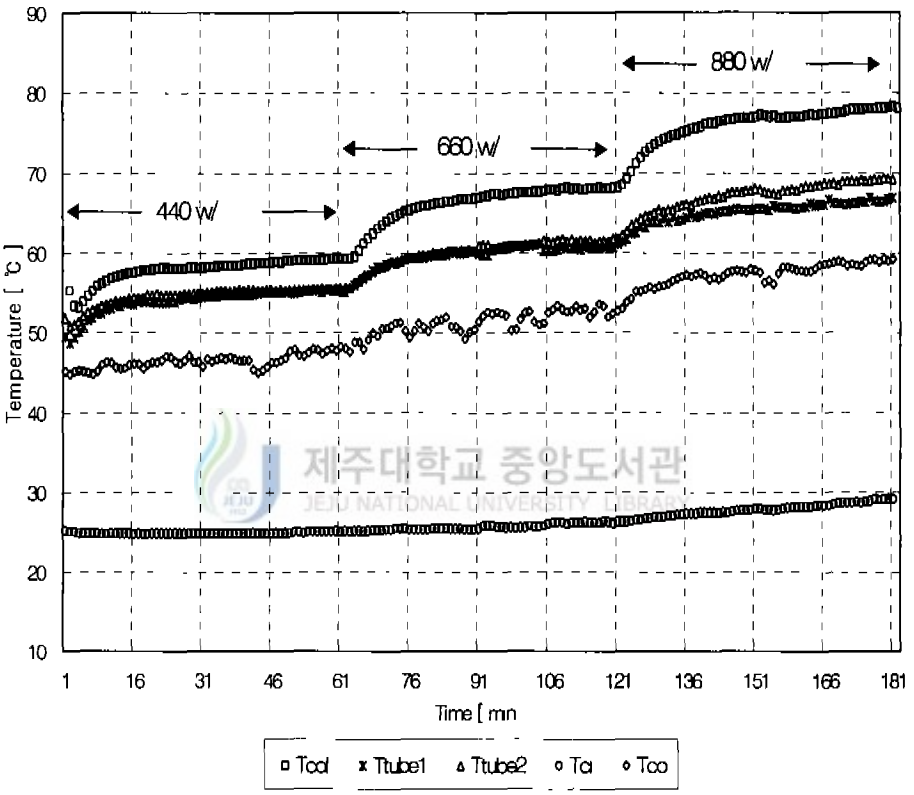


Fig. 8 System temperature variation of liquid charge 40%(ethanol)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 9 System temperature variation of liquid charge 50%(ethanol)

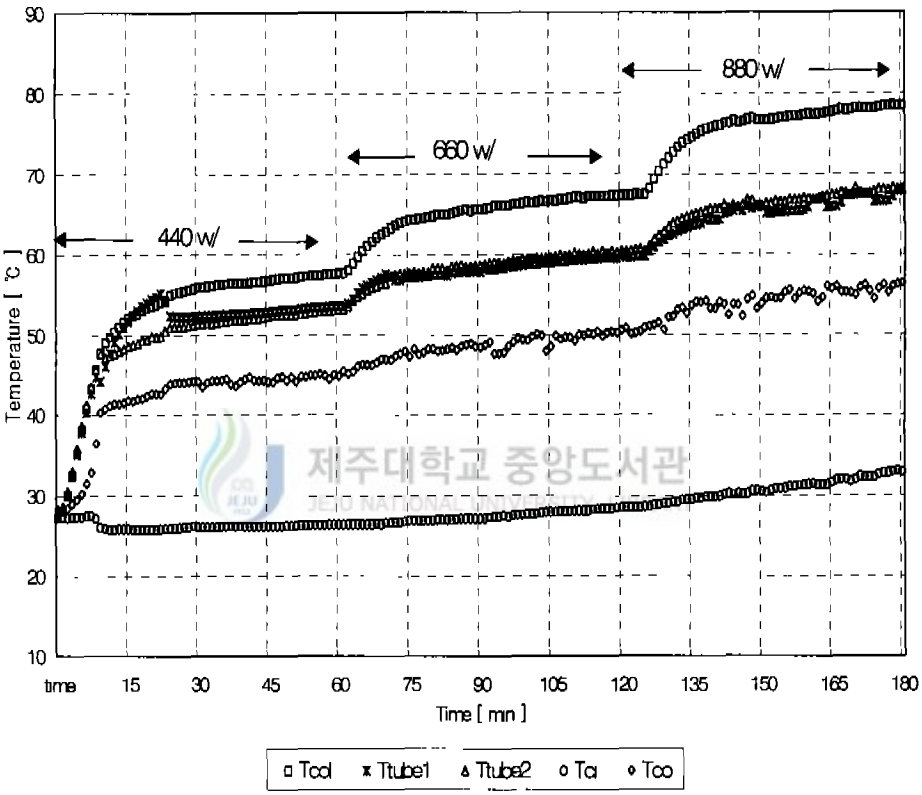


Fig. 10 System temperature variation of liquid charge 60%(ethanol)

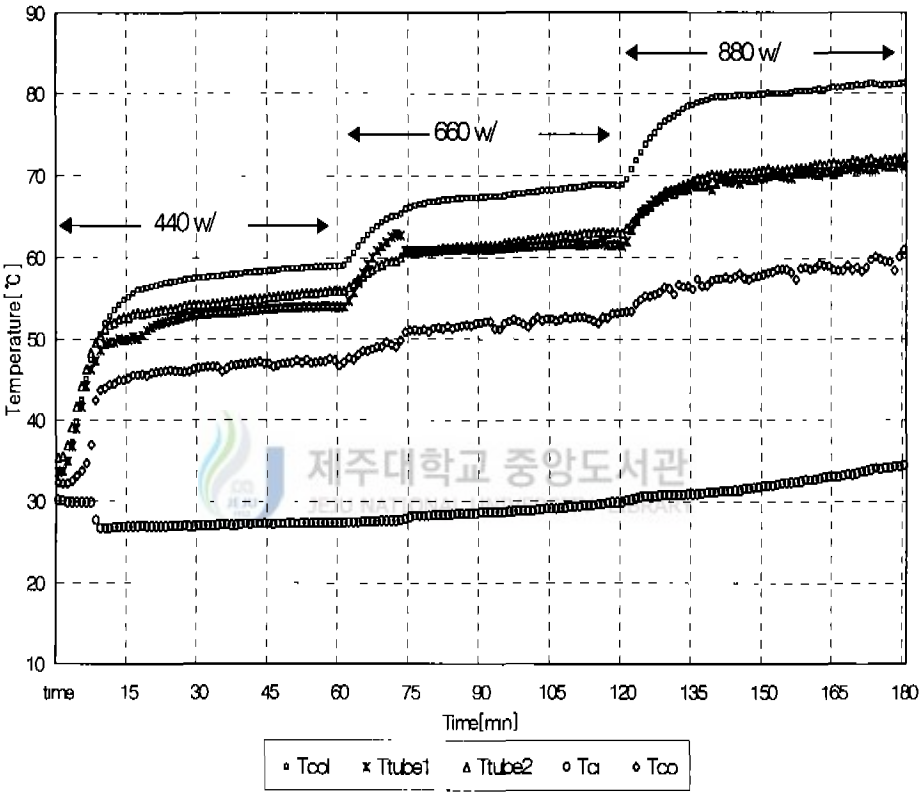
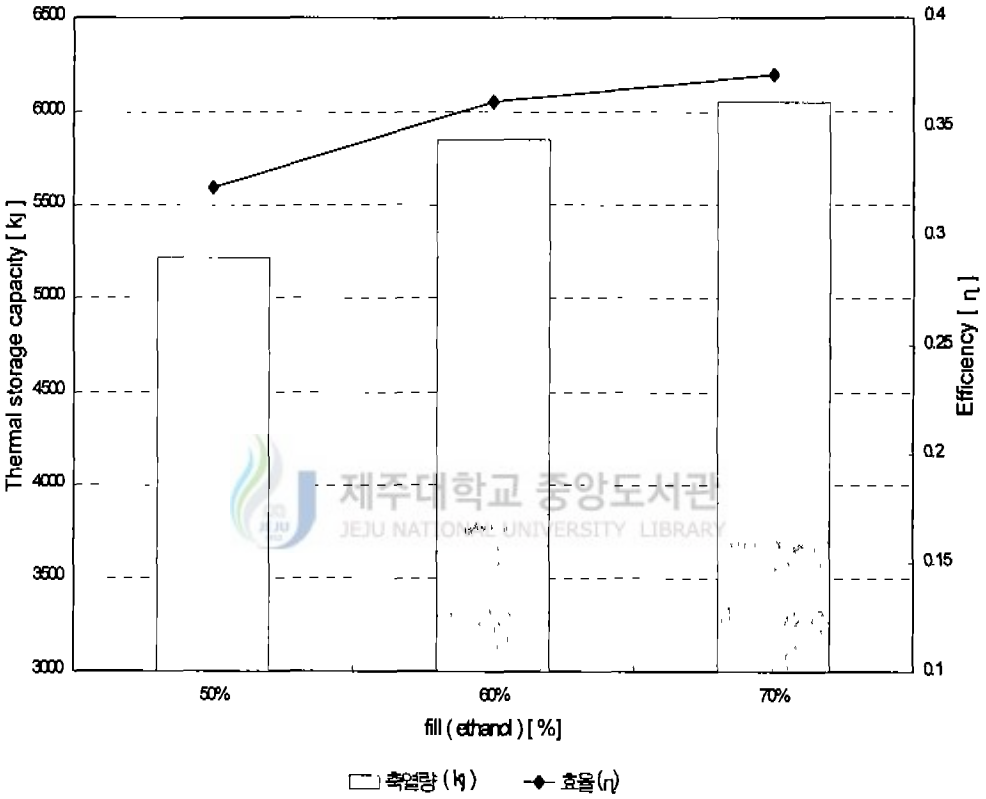


Fig. 11 System temperature variation of liquid charge 70%(ethanol)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 12 Thermal storage capacity and efficiency of system at fill charge (ethanol 50%, 60%, 70%)

(2) 증류수

증류수를 작동유체로 사용한 경우에도 에탄올을 사용한 경우와 마찬가지로 작동유체의 양을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 증류수인 경우는 에탄올과 비교하여 조금 다른 특징이 나타났다. 에탄올인 경우는 판과 관의 온도변화, 액체 상승 온도가 뚜렷한 차이를 보이는데 반하여 증류수인 경우에서는 에탄올인 경우보다 차이가 적게 나타났다. 증류수를 증발부 체적의 30%와 40%를 주입하였을 경우에는 에탄올에서 나타났던 액마름 현상이 그대로 나타나고 있다. Fig 13에서 Fig. 14는 증류수 30%와 40%를 주입한 경우의 시스템 온도변화와 액마름 현상을 보여주고 있다.

증류수 30% 주입했을 때는 초기 작동특성은 에탄올과 거의 유사하게 진행되다가 50~60분이 경과하면서 액마름 현상이 발생한다는 것을 알 수 있었다. 에탄올과 비교하면 액마름 현상이 늦춰졌다는 것을 알 수 있다. 증류수가 에탄올보다 비등점이 높기 때문에 작동이 늦게 일어나고 액상승도 더디게 일어나며 액마름 현상이 에탄올에 비해 늦어졌다. 40%인 경우에서도 액마름 현상이 일어난다는 것을 그림에서 볼 수 있다. 40%를 주입하고 660w/m^2의 열을 가한 경우에는 액마름 현상이 나타나고 있지 않지만 880w/m^2로 공급열을 높였을 때 갑자기 액마름 현상이 일어나고 있다.

제주대학교 중앙도서관

Fig. 15에서 Fig. 17까지는 증발부 체적의 50%, 60%, 70%의 증류수를 주입하여 시스템의 온도변화를 알아보았다. 50%와 60%에서는 에탄올과 비교하여 특징적인 차이를 발견하지 못하였고 다만 판과 관, 증발기 출구 온도의 차이가 적다는 것을 볼 수 있었다. 그러나 70%에서는 물론 에탄올인 경우에도 액정체는 발생하였지만 증류수인 경우가 액정체가 크게 나타났다 그림에서 보면 관하부 온도(T_{tube1})가 요동을 보이고 있고 T_{tube1} 부분이 70%를 주입했을 때 액이 항상 존재하는 곳이므로 인하여 증발부 출구 온도보다 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다.

Fig. 18은 증류수를 증발부 체적의 50%, 60%, 70%를 주입하여 얻어진 축열량과 효율을 비교한 그림이다. 축열량과 효율면에서 50%보다 60%, 70%에서 높게 나타났으며 상대적으로 60% 주입한 경우가 조금 높은 것을 알 수 있다.

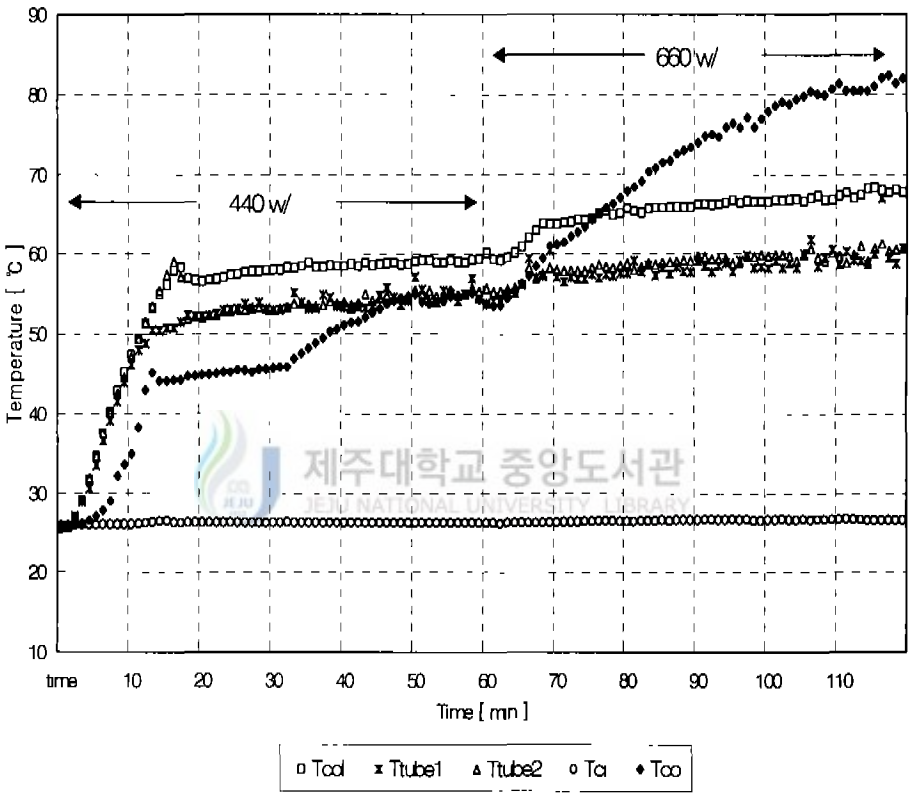


Fig 13 System temperature variation of liquid charge 30%(water)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

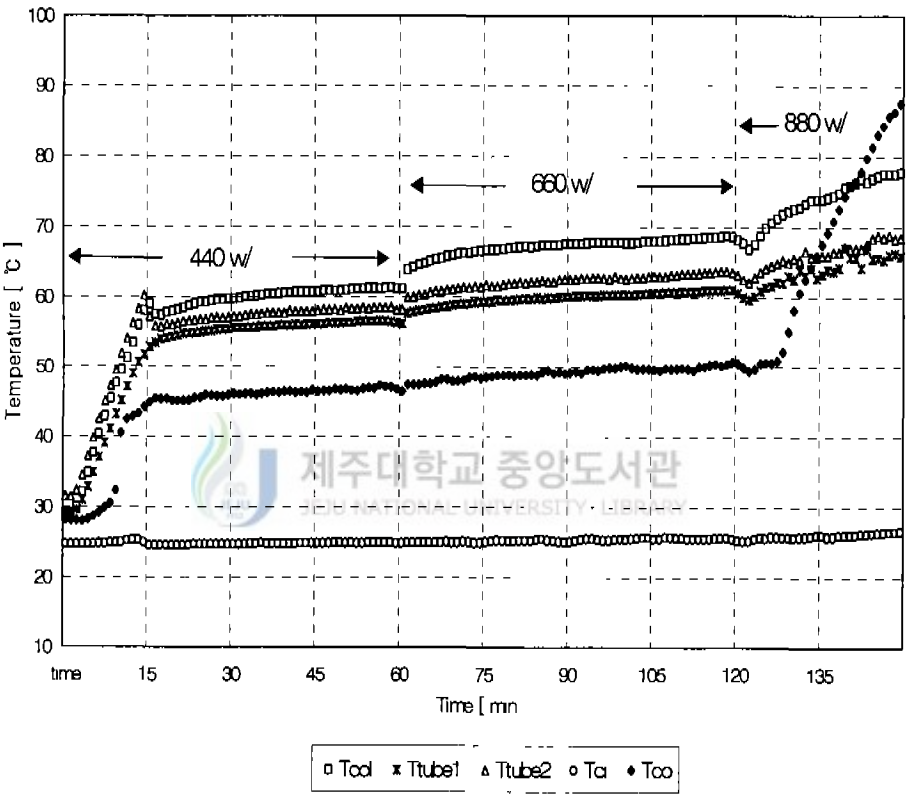
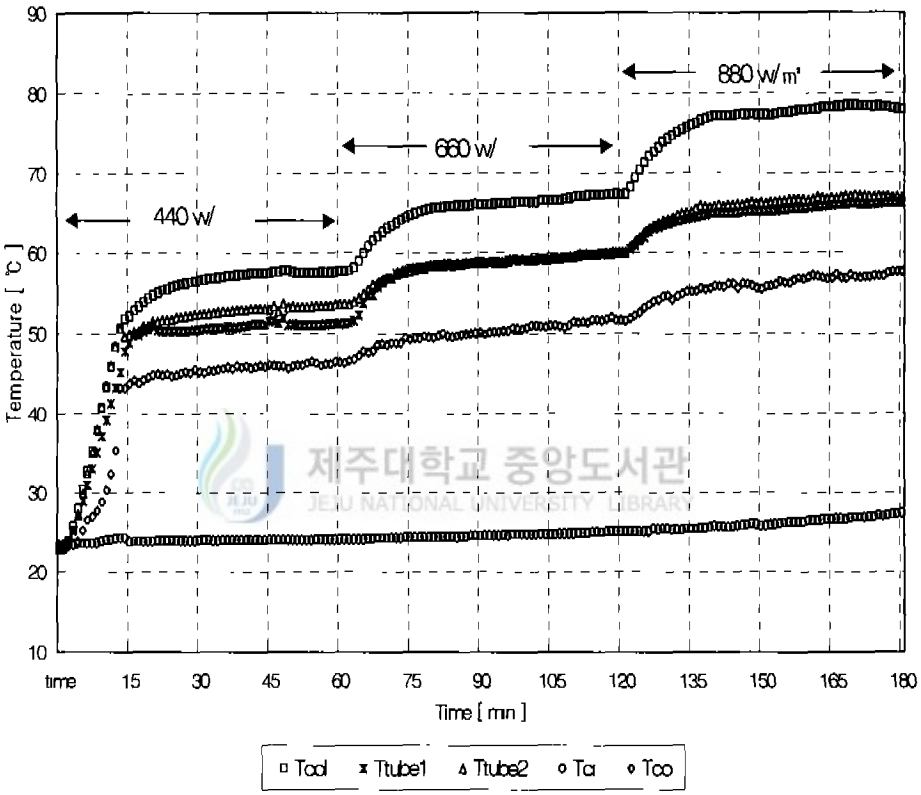
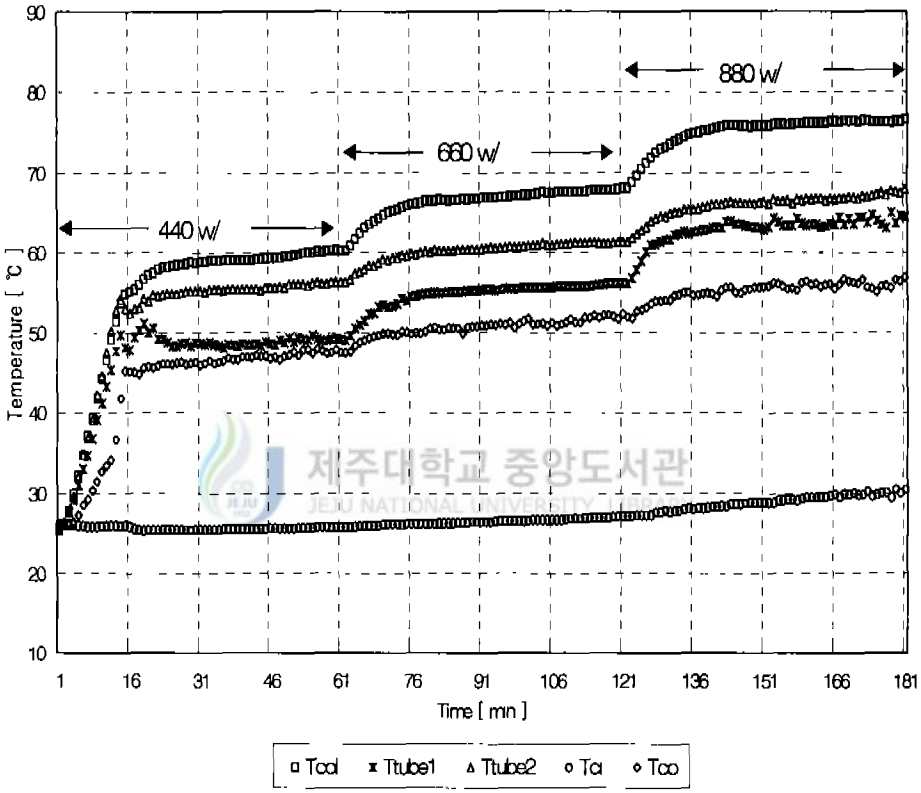


Fig. 14 System temperature variation of liquid charge 40%(water)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 15 System temperature variation of liquid charge 50%(water)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 16 System temperature variation of liquid charge 60%(water)

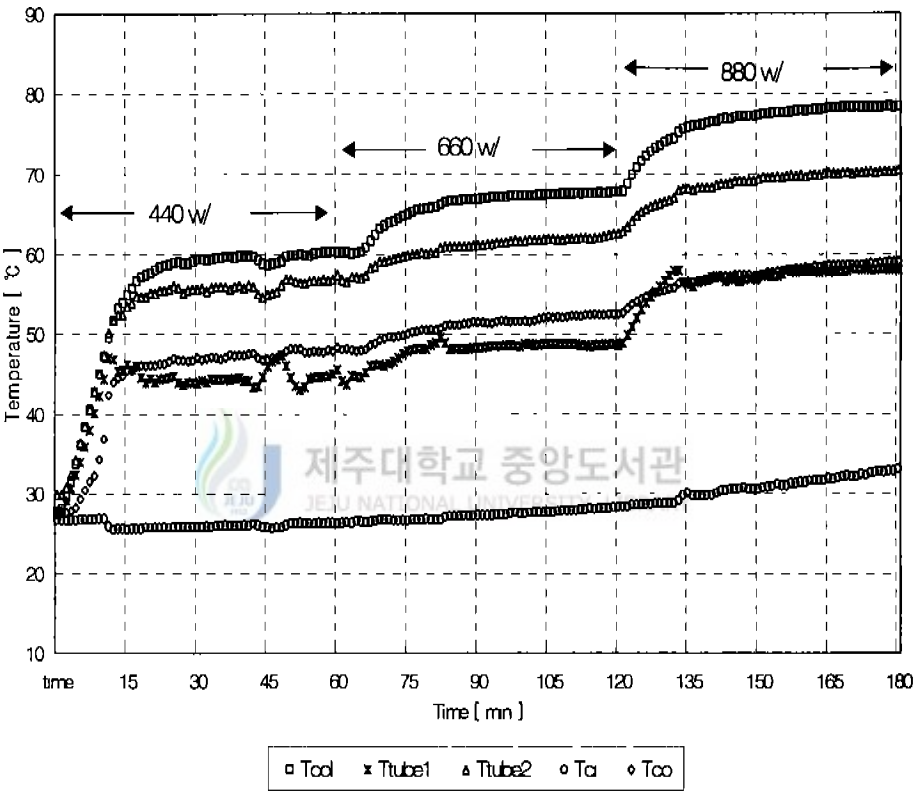
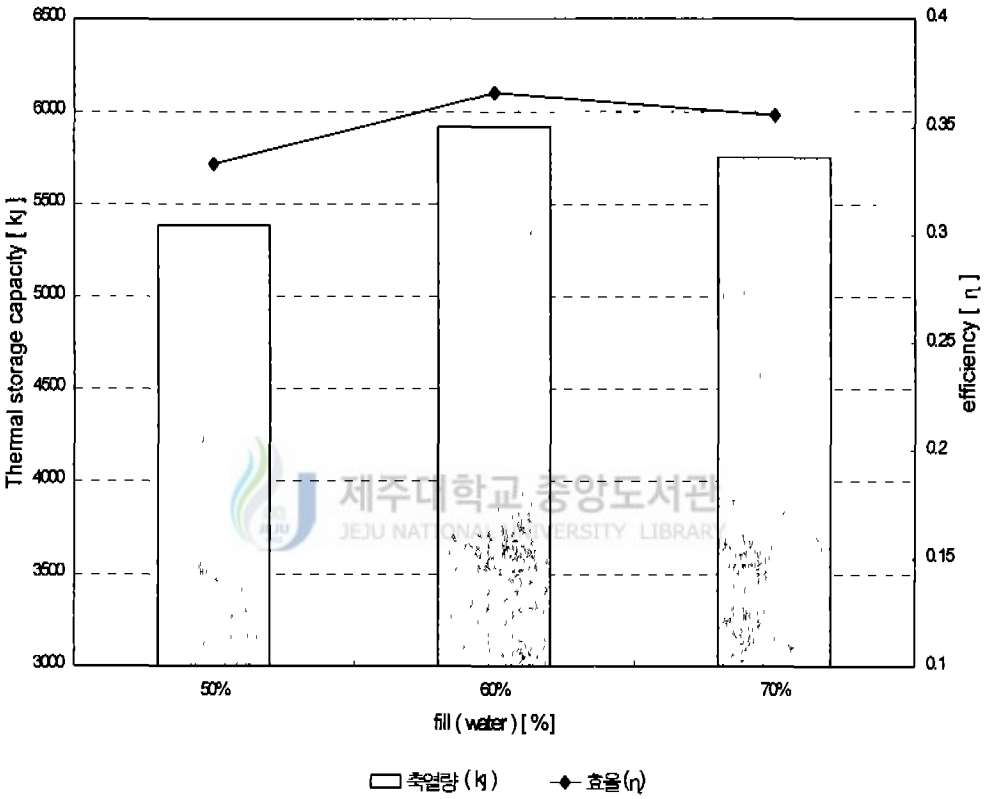


Fig. 17 System temperature variation of liquid charge 70%(water)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 18 Thermal storage capacity and efficiency of system at fill charge (water 50%, 60%, 70%)

(3) 이성분 혼합물(에탄올+증류수)

작동유체로 이성분 혼합물을 사용하는 경우는 비등점이 다르기 때문에 단일성분 유체와 비교할 때 다른 작동특성을 나타난다는 사실이 알려져 있다. 이성분 혼합물을 사용하는 것은 작동유체의 작동범위를 넓힐 수 있다.

이성분 혼합물에서는 증발부 체적의 30%, 40%, 50%, 60%, 70%를 주입했을 때 시스템의 온도변화를 알아보고 에탄올과 증류수의 몰비에 따른 작동특성을 비교하였다.

증발부 체적의 30%와 40%의 혼합물을 사용한 경우에도 앞서와 마찬가지로 액마름 현상이 나타나고 있다 Fig. 19에서는 30%의 혼합물을 주입한 경우의 시스템의 온도변화와 액마름 현상을 알 수 있다. 시스템 온도가 서서히 증가하다가 20분이 경과하면서 액마름 현상이 나타나고 있다. 액마름 현상이 나타나는 시간적인 흐름은 에탄올과 증류수를 비교하면 에탄올보다는 느리고 증류수보다는 빠른 경향을 보이고 있다. Fig. 20은 40%인 경우를 보이고 있는데 시스템의 온도분포가 거의 유사하게 흐르다가 660w/m^2로 열공급을 증가하면서 액이 마르기 시작하였다.

Fig. 21에서 Fig. 23까지는 증발부 체적의 50%, 60%, 70%를 주입한 경우의 시스템 온도분포를 보여주고 있다. 이성분인 경우에서는 다른 작동유체와 달리 시스템 온도분포가 거의 유사하게 진행되고 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 작동유체의 양을 증가할수록 시스템 온도도 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 70%에서는 온도가 요동치는 것을 볼 수 있는데 이것은 작동유체의 양이 과다로 인하여 리턴측에서 정체현상이 발생한다는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 24에서는 이성분 혼합물을 사용한 경우의 작동유체의 양에 따른 축열량과 효율을 보여주고 있다. 효율과 축열량 모두에서 60%인 경우가 조금 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. Fig. 25는 세 가지 작동유체를 50%, 60%, 70%를 주입한 경우의 축열량과 효율에 대한 그림이다. 커다란 차이는 없지만 에탄올과 증류수를 혼합한 이성분인 경우가 조금 좋은 결과를 보이고 있다.

제주대학교 중앙도서관

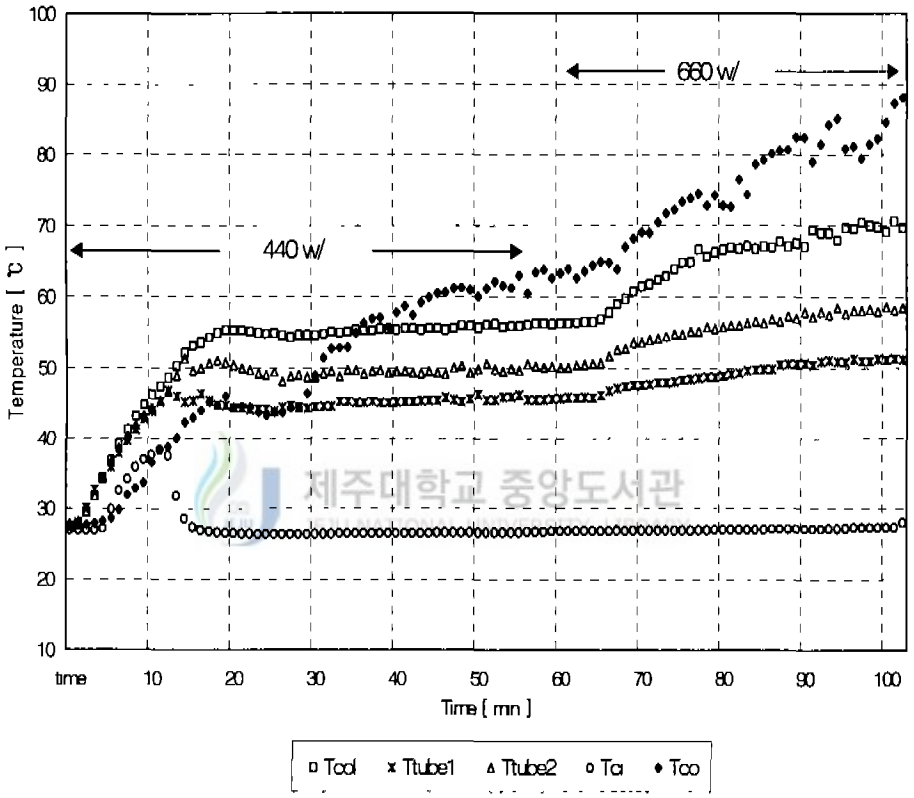


Fig. 19 System temperature variation of liquid charge 30%
(ethanol + water)

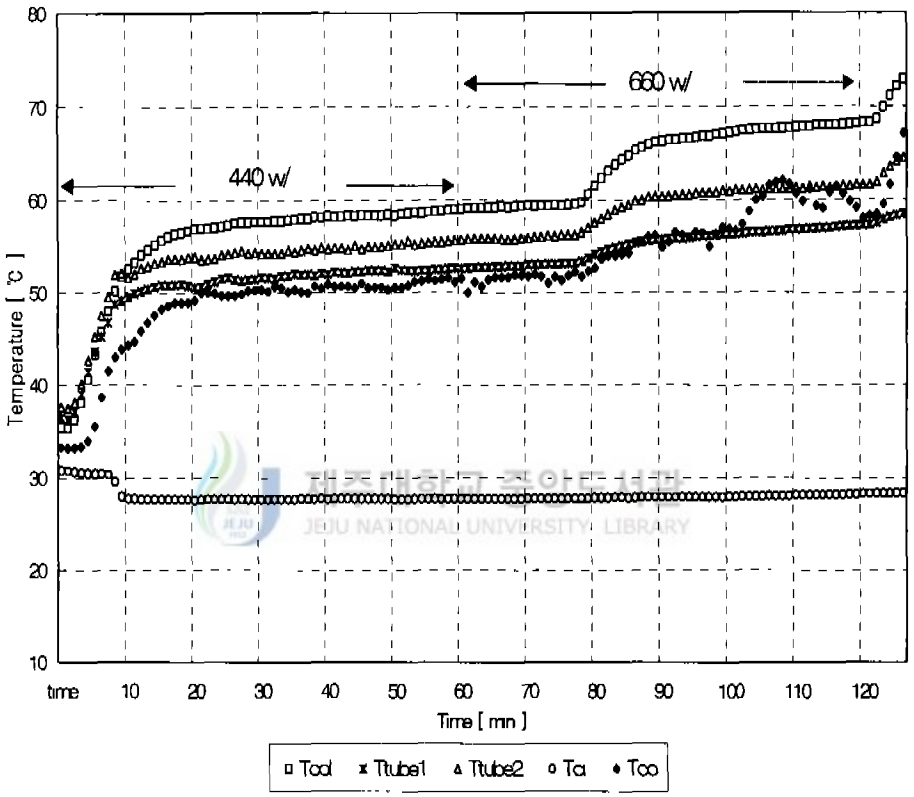


Fig. 20 System temperature variation of liquid charge 40%
(ethanol + water)

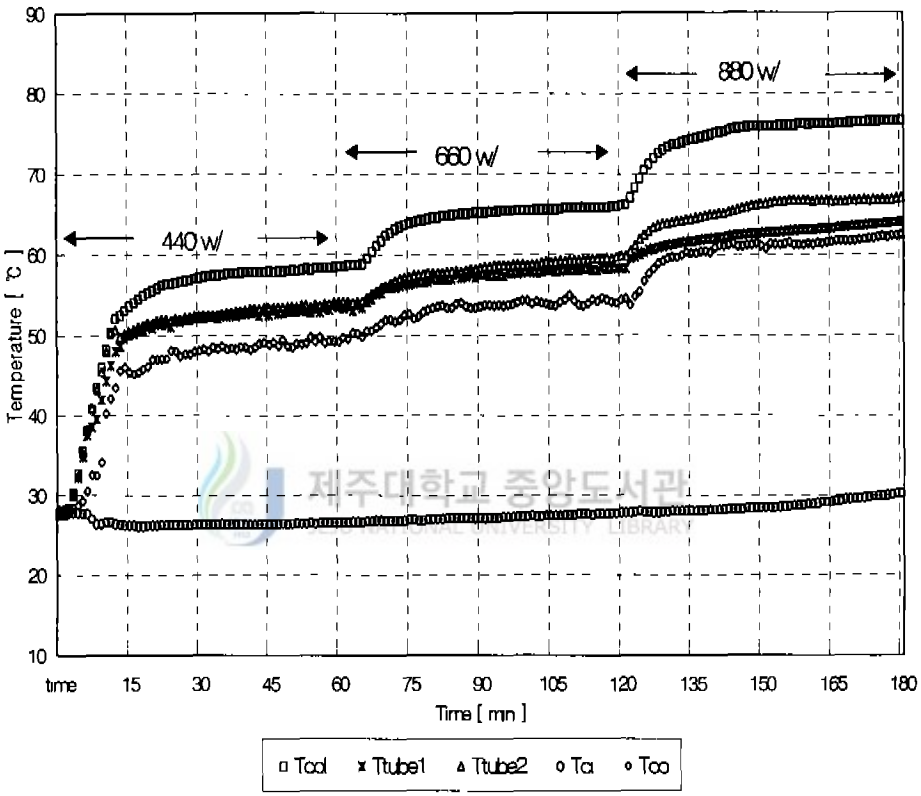


Fig. 21 System temperature variation of liquid charge 50%
(ethanol + water)

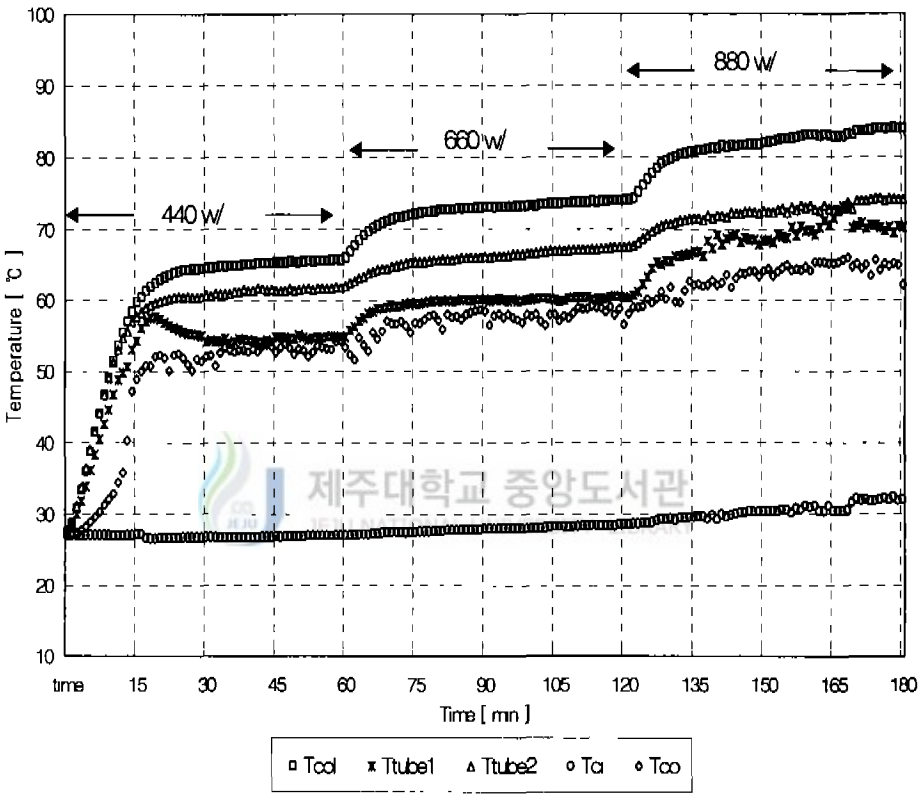


Fig 22 System temperature variation of liquid charge 60%
(ethanol + water)

제주대학교 중앙도서관

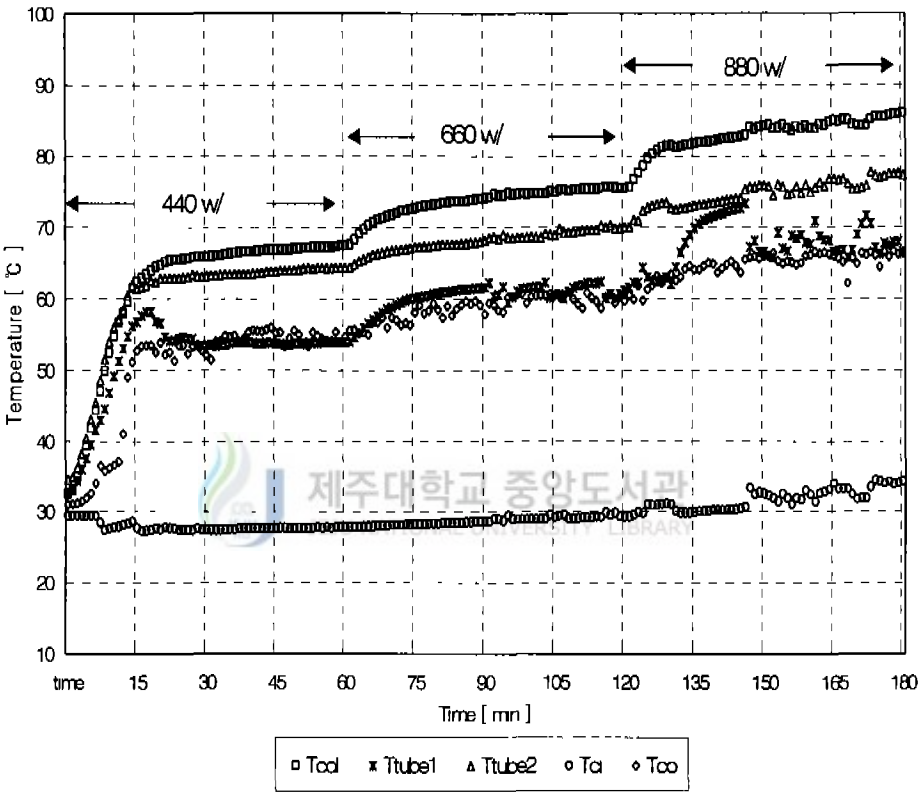


Fig. 23 System temperature variation of liquid charge 70%
(ethanol + water)

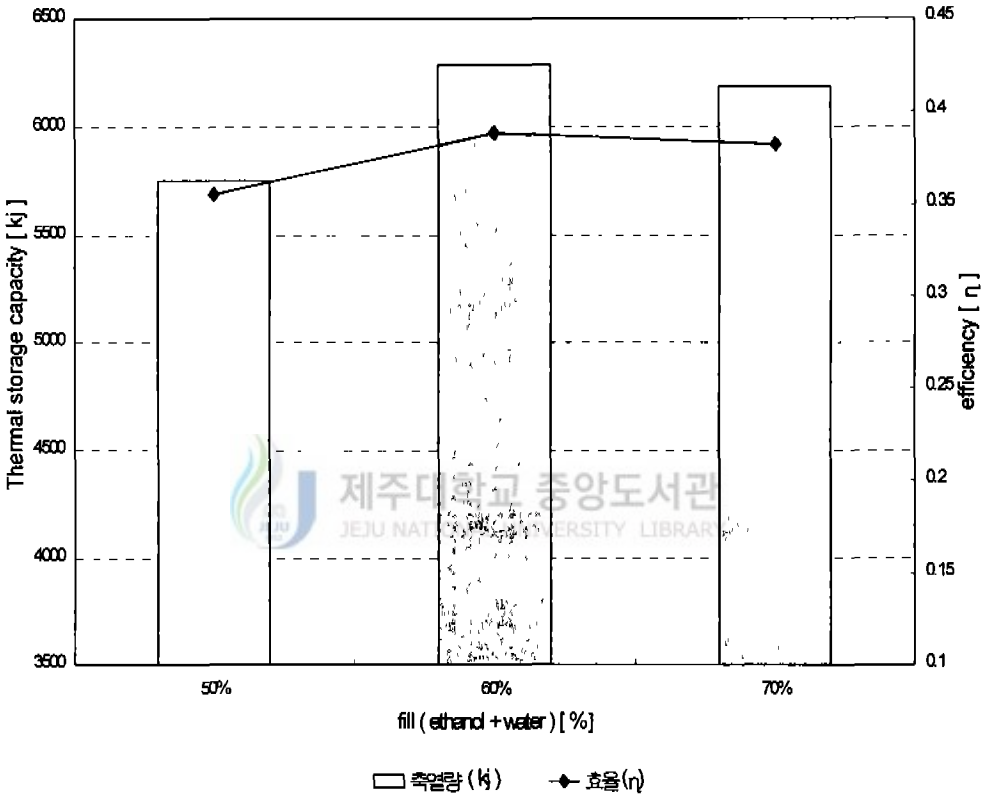


Fig. 24 Thermal storage capacity and efficiency of system at fill charge (ethanol+water 50%, 60%, 70%)

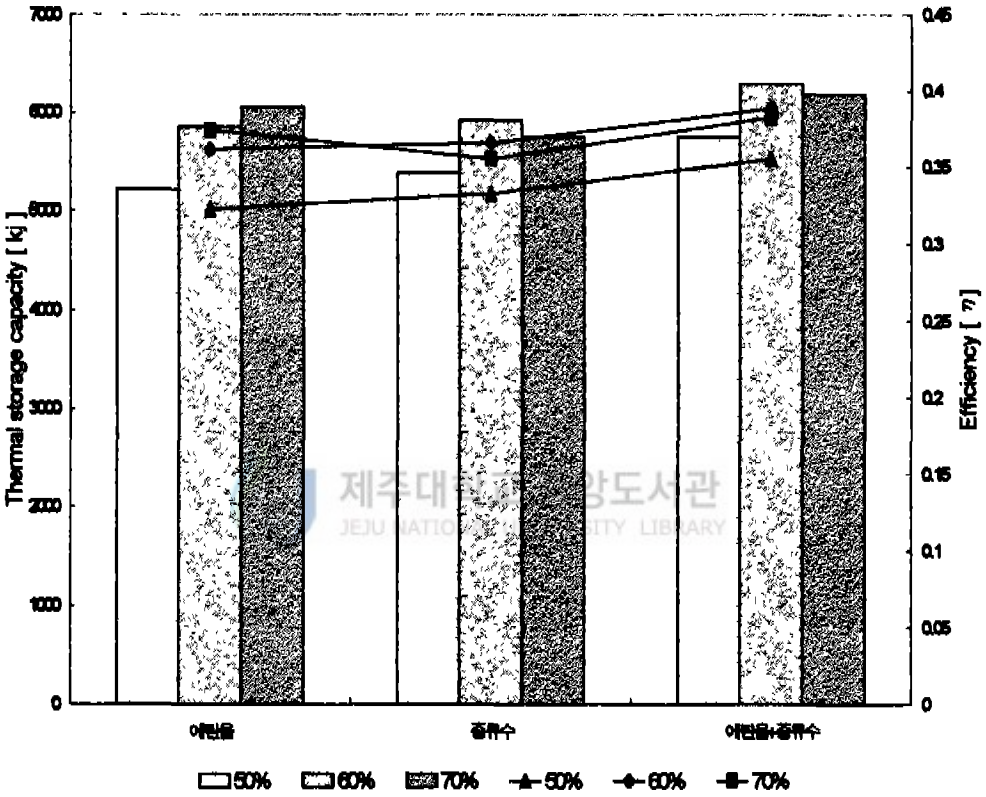


Fig. 25 Thermal storage capacity and efficiency of system at fill charge (ethanol, water, ethanol+water 50%, 60%, 70%)

2) 작동유체의 종류에 따른 작동특성 비교

작동유체에 따라 작동특성이 어떻게 달라지는지 알아보기 위해서 세 가지 작동유체, 에탄올, 증류수, 이성분 혼합물을 사용하였다 작동유체량은 앞서 실험에서 액마름현상이 발생한 30%, 40%을 제외한 나머지 경우에 대해서 비교한 결과 60%인 경우가 축열량 및 효율면에서 나은 결과를 보이기 때문에 60%의 에탄올, 증류수, 혼합물을 주입하면서 시스템의 정상상태의 온도를 관찰하였다

열공급은 실제 일사량과 같은 조건을 맞추어 주기 위해서 앞 실험에서 보다 세분하여 가해 주었고 실험 시간도 하루중 일사량을 받는 조건을 맞추었다. 처음 응축부인 축열조의 온도를 일정하게 유지하고서 열공급량은 220w/m^2, 310w/m^2, 440w/m^2, 530w/m^2, 660w/m^2, 790w/m^2, 880w/m^2를 가해주면서 시스템의 정상상태에 도달한 온도를 측정하였다.

Fig. 26에서 Fig 28까지는 에탄올, 증류수, 에탄올+증류수의 작동유체를 주입하였을 경우의 시스템에 나타나는 정상상태에 도달한 온도를 보여주고 있다. Fig. 26은 에탄올 60%를 작동유체로 주입하여 열공급을 증가하면서 나타나는 시스템의 정상상태의 온도를 나타낸 그림이다 열공급을 증가시키지만 응축부의 온도는 항상 일정하게 유지하여 각 열공급에 따른 정상상태에 도달한 온도를 보면 20.8℃에서 27.5℃까지 변화하는 것을 알 수 있다.

Fig. 27은 작동유체로 증류수를 사용하고 60%를 주입한 경우의 열공급을 변화시키면서 시스템의 정상상태의 온도를 측정한 그림이다. 증류수인 경우는 응축부인 축열조의 온도가 20.6℃에서 28.2℃로 변화함을 알 수 있다. 시스템 전체적인 작동온도가 에탄올보다 조금 높게 나타나는 경향을 보이고 있다

Fig. 28에서는 작동유체를 에탄올과 증류수의 혼합물인 이성분을 주입하였을 때 측정되는 시스템 정상상태에 도달한 온도를 나타내고 있다 각 열공급시 마다 응축부인 축열조의 온도를 20℃로 일정하게 유지한 경우의 시스템이 정상상태에 도달한 온도를 보여주고 있다 열공급을 220w/m^2에서 880w/m^2로 증가하면 축열조의 온도는 21℃에서 28.4℃로 증가하는 것을 볼 수 있었다 혼합물을 사용한 경우가 다른 작동유체에

제주대학교 중앙도서관

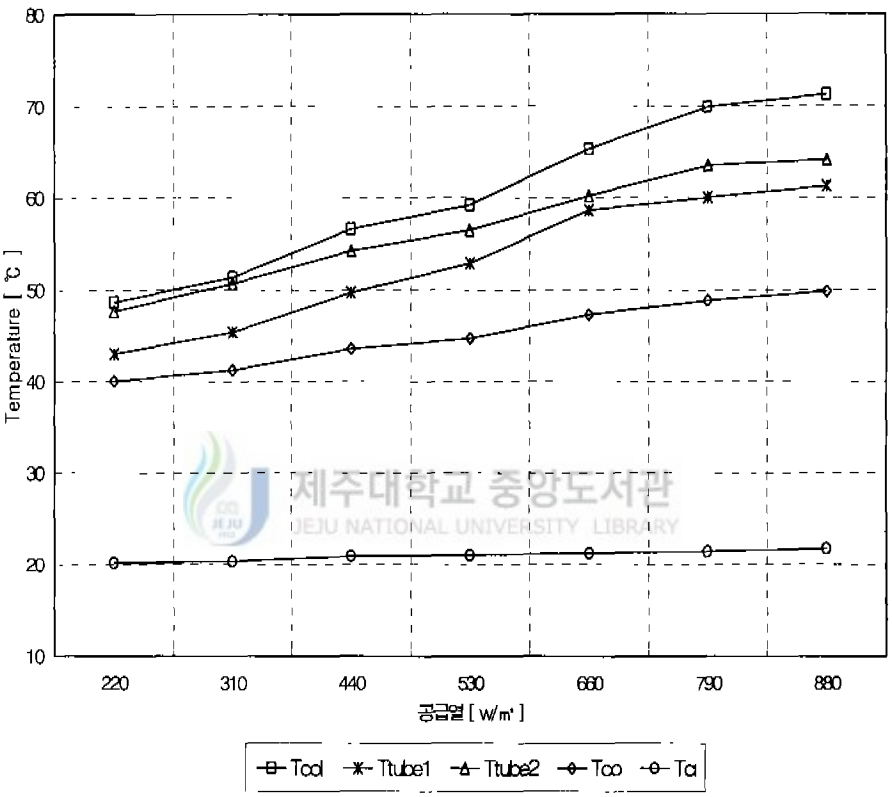
비하여 정상상태에 도달한 온도는 낮게 나타나고 있지만 실제 축열되는 온도는 높게 나타났다.

에탄올, 증류수, 에탄올+증류수의 혼합물을 각각 나누어 실험하였을 때 집열판과 관의 온도는 에탄올과 증류수인 경우가 높게 나타나고 있다. 그러나 작동유체가 응축부로 들어가는 입구온도의 범위는 혼합물인 경우에서 넓게 측정되었다. 이는 혼합물이 작동온도 범위를 넓힐 수 있다는 것을 보여준다.

Fig. 29는 열공급을 증가하면서 측정되어진 온도를 이용하여 얻어지는 축열 효율을 보이고 있다. 축열 효율이 혼합물인 경우에서 다른 작동유체를 사용한 경우보다 높게 나타난다는 것을 알 수 있었다.

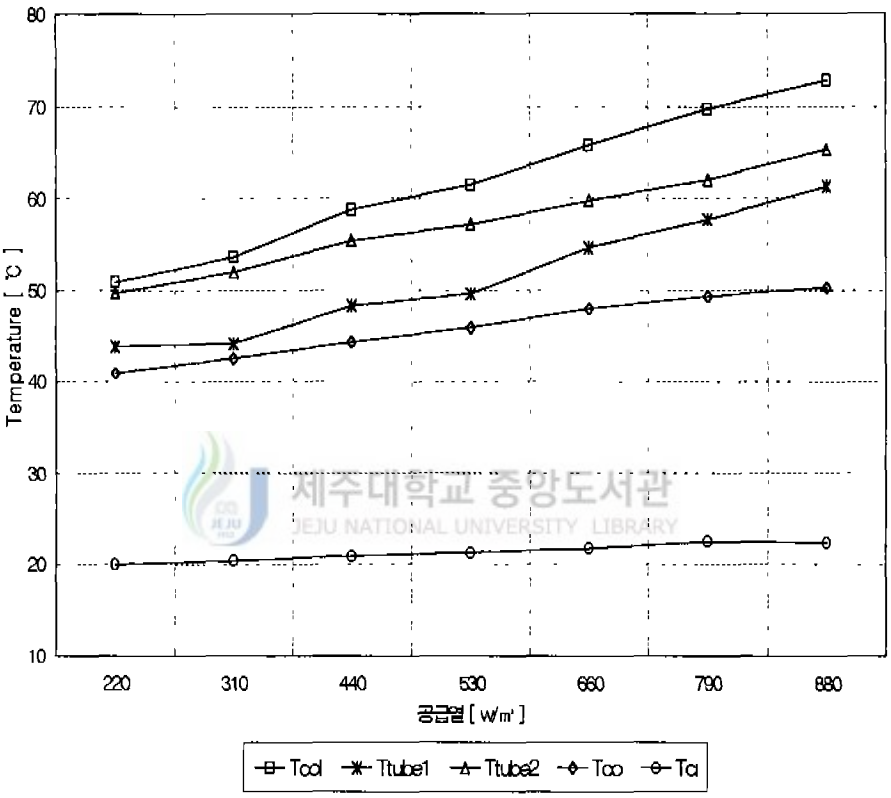
이렇게 작동유체로 에탄올과 증류수의 혼합물을 사용하고 작동유체량은 60%를 주입하여 나은 결과를 보이고 있다. 그래서 실외에서는 작동유체 에탄올과 증류수 혼합물 60%를 주입하여 성능실험을 수행하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



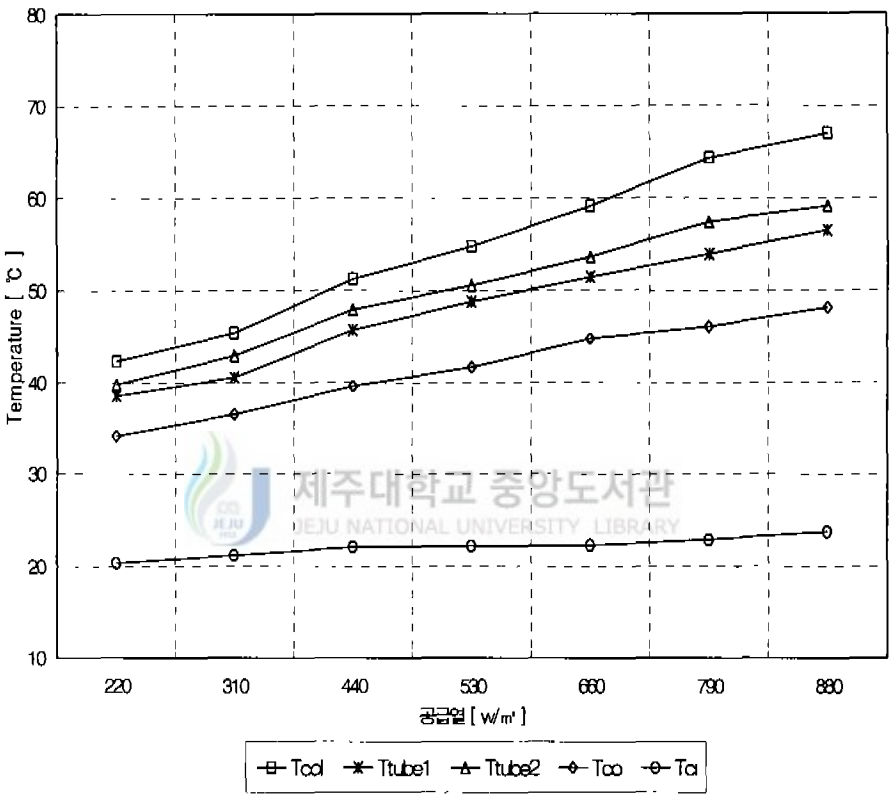
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig 26 System temperature variation of heating capacity
(fill charge = 60%, ethanol)



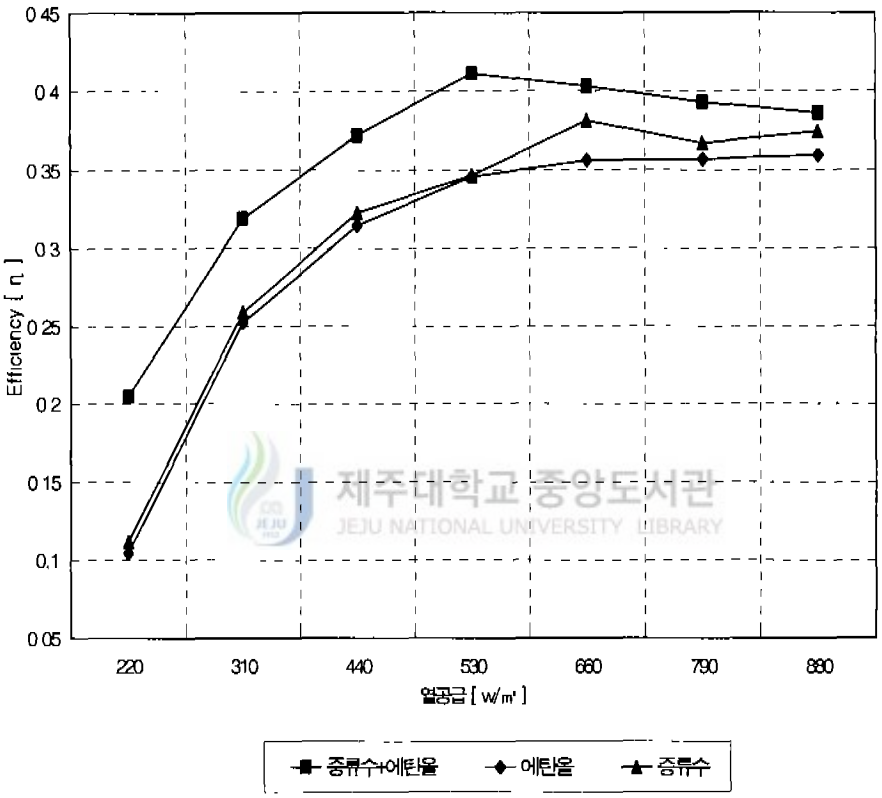
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig 27 System temperature variation of heating capacity
(fill charge = 60%, water)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 28 System temperature variation of heating capacity
(fill charge = 60%, ethanol+water)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 29 System efficiency for heating capacity during different working fluid (fill charge = 60%, ethanol, water, ethanol+water)

2. 성능실험

작동특성 실험에서 결정된 작동유체의 양을 실제 시스템에 적용하여 실외에서 실험을 수행하였다. 하루동안의 집열열량을 구하기 위해서 먼저 전날 저녁에 축열탱크의 물을 완전히 배수시켜 축열탱크안에 잔여 열량이 남지 않게 만든다. 실험시간은 아침에서 오후까지 8시간동안 측정하였다. 아침에 시수를 채워 성층화를 없애고 측정기기를 동작시켜 실험에 들어간다. 하루 8시간 측정을 한 후 펌프를 돌려 축열조의 평균온도를 측정하고 하루동안 얻은 열량을 계산하였다. 일사량은 집열각과 동일하게 pyranometer를 설치하여 측정하였고 시스템의 온도는 앞 실험과 같이 열전대를 이용하여 측정하였다. 열전대는 열교환기 입구, 열교환기 출구, 시수구, 온수구, 축열조의 중앙부에 각각 설치하였다. 데이터를 측정하기 위한 측정기기로는 Fluke사의 NetDAQ을 사용하여 1분 간격으로 측정, 저장하였다.

측정한 데이터는 일사량이 높고 초기온도도 높은 경우(HRHT), 일사량이 높고 초기온도는 낮은 경우(HRLT), 일사량이 낮고 초기온도는 높은 경우(LRHT), 일사량이 낮고 초기온도도 낮은 경우(LRLT)에 대하여 분석하였고 모델링에 이용하였다

제주대학교 중앙도서관

Fig. 30은 일사량이 높고 초기온도가 높은 경우(HRHT)에 측정한 데이터이다. 그림을 보면 일사량에 따라 액체 상승온도가 증가하고 있고 축열조의 온도도 일정하게 상승하였다 축열조의 온도는 중앙부에서 측정하였기 때문에 열교환을 거친 작동유체의 온도보다 높게 나타나고 있다. 처음 시수온도는 23℃이고 나중 온도는 60.5℃을 보이고 있으며 ΔT는 36.5℃를 나타내었다.

Fig. 31은 일사량이 좋고 초기온도를 낮게(HRLT) 하여 측정한 데이터의 그림을 나타낸다. 초기 시수온도는 14.5℃에서 시작하여 나중에 축열조의 온도는 49.2℃를 나타내었으며 ΔT는 34.7℃을 보였다.

Fig 32는 일사량이 상대적으로 불규칙하여 나쁘고 시수온도를 높게 한 경우(LRHT)에 측정한 데이터를 나타낸 그림이다. 초기 시수온도는 22.3℃이고 실험후의 온도는 40.9℃로 ΔT는 18.6℃를 보이고 있다. 액이 상승하는 온도가 일사량의 변화에

따라 불규칙하게 나타난다는 것을 볼 수 있었다. 집열기 상승관의 온도가 축열조내 온수 온도보다 높은 시간대에 열교환이 이루어지므로 초기 측정시간에서는 온수 온도의 변화가 없다.

Fig. 33은 일사량이 낮고 초기온도도 낮은 경우(LRLT)의 측정한 데이터이다. 초기 온도는 15.7℃이고 실험후의 온도는 32.3℃를 나타내었다.

하루동안 얻은 열량을 계산하여 시스템 효율을 알아보면 일사량이 높고 초기 온도가 높은 경우에는 효율이 46%를 보이고 일사량이 높으면서 초기 온도도 낮은 경우는 상대적으로 효율이 47%를 보였다. 그리고 일사량이 낮고 초기 온도는 높은 경우는 43%의 효율을 보이고 일사량과 초기온도가 모두 낮은 경우는 37%를 보였다 시스템 효율은 일사량과 외기온에 영향을 받고 있다. 시스템의 열손실 계수를 측정하기 위해서 일사량의 영향을 받지 않는 야간동안에 측정하였다. 축열탱크에 온수를 채우고 야간 동안 측정한 결과 열손실 계수는 1.3 Kcal/hr ℃를 얻었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

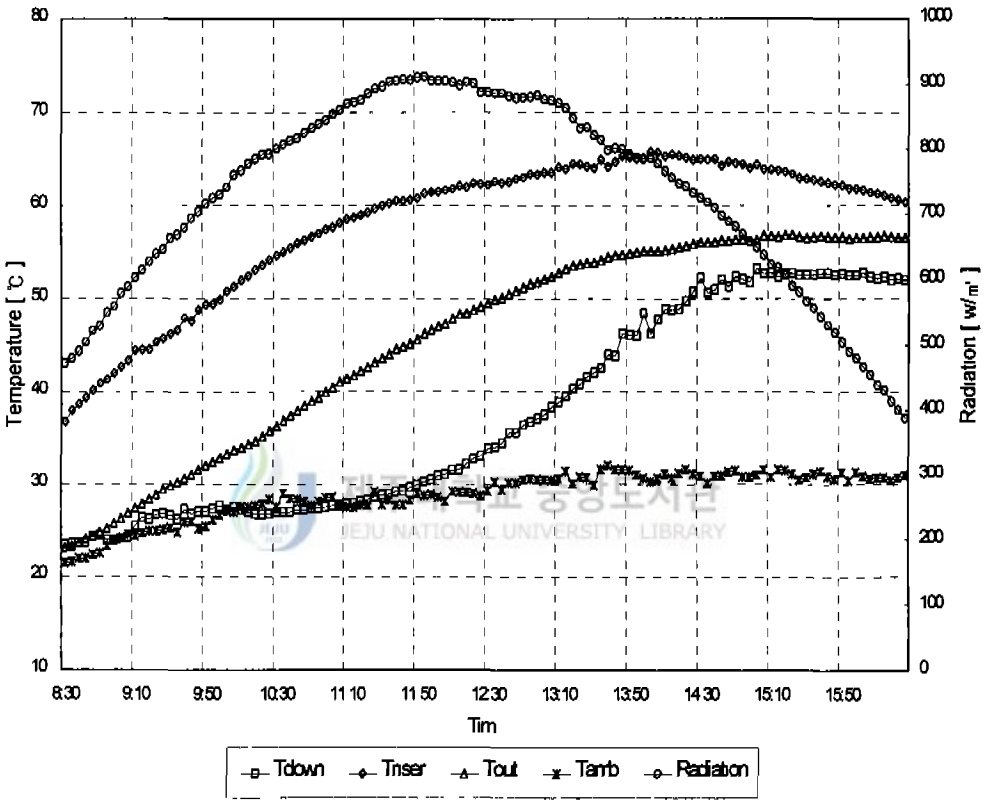


Fig 30 Thermal performance characteristics of thermosyphon (HRHT= High radiation, High temperature)

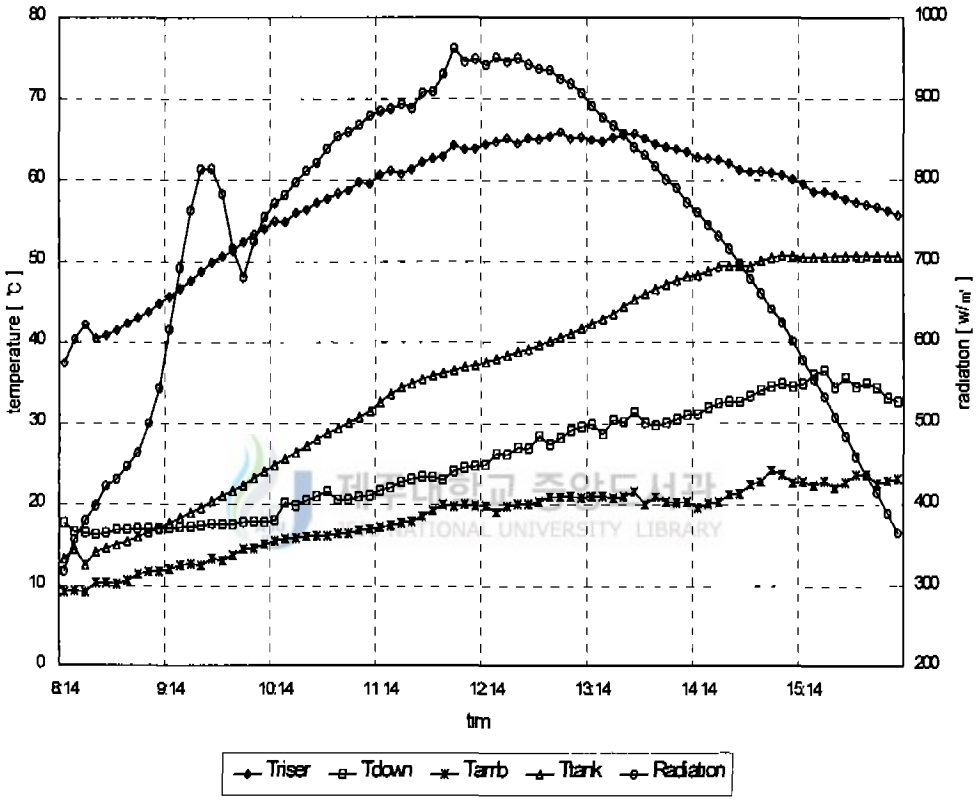


Fig 31 Thermal performance characteristics of thermosyphon (HRLT= High radiation, Low temperature)

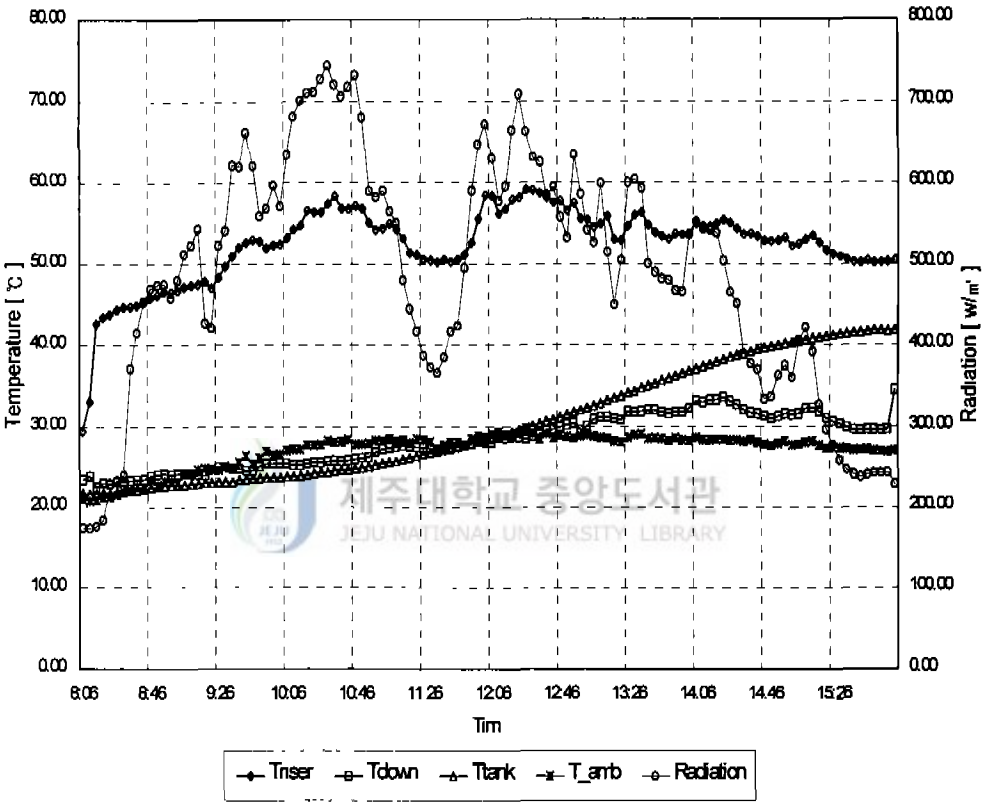


Fig. 32 Thermal performance characteristics of thermosyphon (LRHT= Low radiation, High temperature)

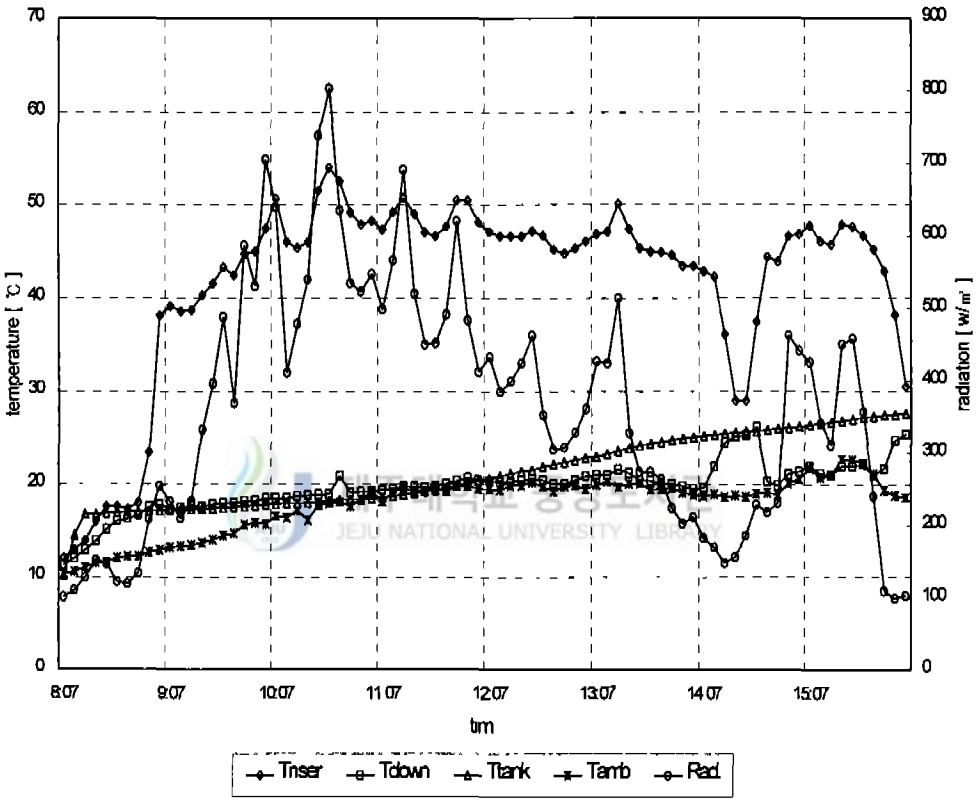


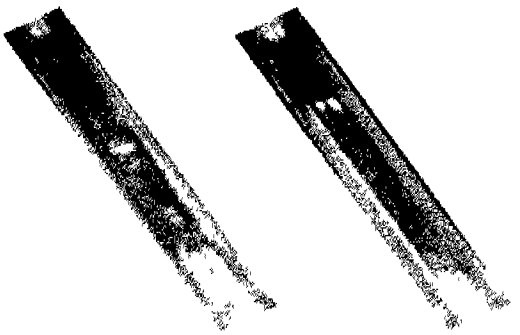
Fig. 33 Thermal performance characteristics of thermosyphon (LRLT= Low radiation, Low temperature)

3. 가시화 실험

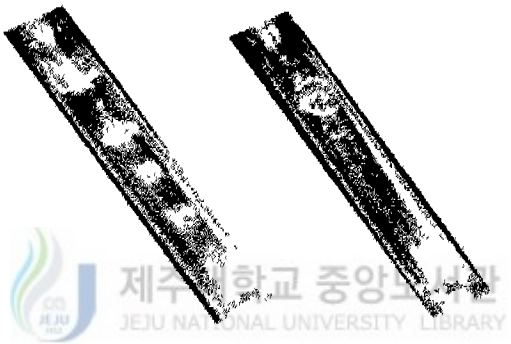
상변화형 써모사이폰에서 작동유체의 작동특성과 유동현상을 관찰하기 위해서 가시화 실험을 수행하였다. 작동유체가 응축부인 축열조로 들어가는 상승관과 축열조를 나와 증발부로 들어가는 하강관에 각각 유동을 관찰할 수 있도록 투명한 튜브로 연결하였다. 작동유체의 주입은 앞서 행한 실험과 마찬가지로 튜브로 연결한 후에 진공을 잡고 작동유체를 주입하였다. 작동유체의 주입이 끝나면 열을 가해주기 위해서 히터에 열을 공급하고 작동유체가 상승하면 수동 카메라에 모터 드라이브를 연결하여 연속으로 촬영하였다.

이 실험에서는 작동유체로 에탄올과 증류수의 이성분 혼합물을 사용하여 주입량 40%와 60%의 경우를 사용하였다. Fig. 34는 작동유체로 에탄올과 증류수의 혼합물 40%를 주입한 경우에 나타나는 유동현상을 보여주고 있다. 열공급이 660w/m^2를 가하였을 때 액마름 현상이 일어난다는 것을 볼 수 있다. Fig. 35는 작동유체를 에탄올과 증류수의 혼합물을 사용하고 증발부 체적의 60%를 주입한 경우의 작동유체의 유동을 촬영한 그림이다. 초기 6분 경과 후에 나타나는 유동의 특징은 액체형태로 유동이 일어나고 있고 시간이 경과하면서 기체형태의 유동이 일어나고 있다. 초기 작동특성과 유동현상에 대하여 관찰하였고 열공급에 따른 유동형태에 대해서 고찰하였다. 작동유체의 주입량이 40%로 상대적으로 적을 경우에는 열공급이 낮은 경우에는 폭발적으로 액이 상승하지만 열공급이 많은 경우에 드라이 아웃 현상이 관찰되었다. 작동유체를 60%로 많게 한 경우는 비등이 폭발적으로 일어나는 것을 알 수 있었다. 그리고 열공급을 많게 하면 드라이 아웃이 일어나지는 않지만 대체로 액상승이 적어지는 것을 볼 수 있었다.

제주대학교 중앙도서관

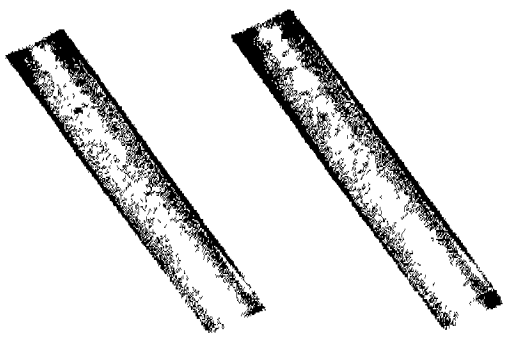


[5 min]



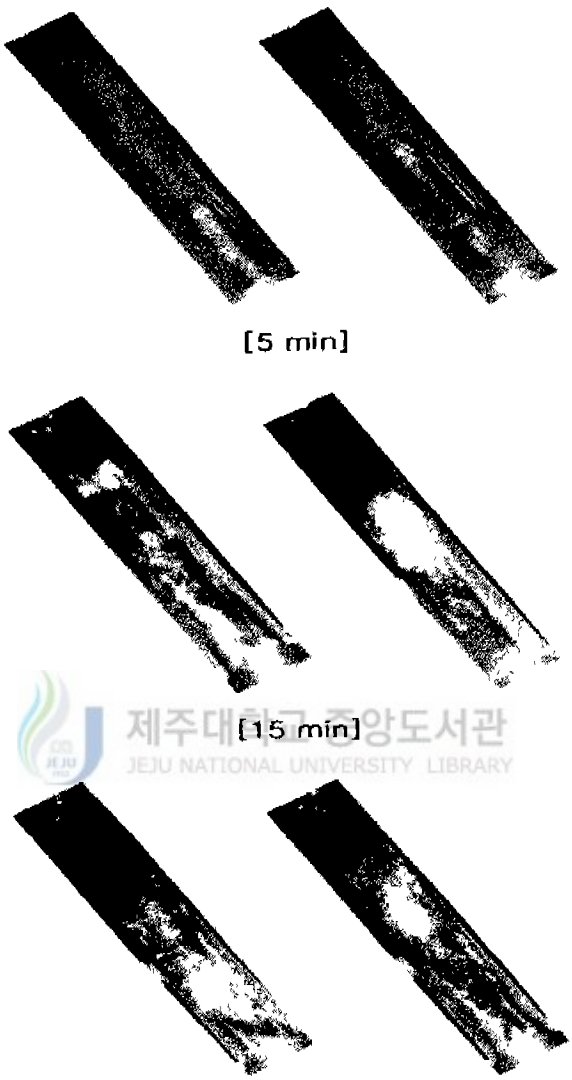
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

[10 min]



[80 min]

Fig. 34 Photograph of flow pattern in thermosyphon (ethanol + water, fill=40%)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 35 Photograph of flow pattern in thermosyphon (ethanol + water, fill=60%)

V. 시스템 모델링

1. 모델 설정

상변화형 써모사이폰은 수학적 모델이 존재하지 않기 때문에 시스템 모델링을 위해서는 단기측정에 의한 실험 데이터를 근거로 시뮬레이션 결과와 데이터를 비교하면서 모델을 수정하게 된다. 상변화형 시스템은 단일회로로 구성된 히트파이프식 작동특성에 의해서 시스템이 구동되므로 집열부에서 열전달 유체는 액체와 기체가 공존하는 구역이 존재하게 되고 이러한 현상을 모델링하기 위해서는 충분한 실험 데이터가 확보되어야 한다. 그러나 시스템의 작동원리가 수학적 모델로 표현하기 어려운 경우는 전체 시스템을 단일 시스템으로 가정하여 시스템의 입력변수와 출력변수만으로 모델링 하는 방법이 제시되었다.

모델과 데이터의 관계는 데이터의 사용형태에 따라 크게 두 가지로 구분된다. 첫째로 전진적인 관계는 시스템의 모든 변수를 알고 있을 경우 이론에 근거한 예측을 실측 데이터와 비교하여 모델을 검증하는 방법이다 이러한 전진적 문제를 "white box"라고 한다. 이 방법은 시스템 형태에 대한 모델 형성이 잘 입증되었고 모든 구성요소 입력 변수들이 구성요소 시험을 통해서 잘 알려져 있을 때 사용된다. 둘째로 후진적인 관계는 구성된 실측 데이터를 근거로 하여 시스템 변수를 추측하는 방법이다. 이러한 후진적 문제는 모델을 유도, 보정, 재표준화하는 과정이며 “grey box” 또는 "block box"라 한다. 이러한 문제는 어떤 시스템을 묘사하고자 하는 대상 또는 구성요소에 다음과 같은 불확실성이 존재할 때 사용된다

1) 구성요소를 묘사하는 입력변수들

2) 어떤 중요한 구성요소의 모델링

3) 시스템 모델이 충분하게 입증이 안되었을 경우

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

후진적인 문제는 시간에 따라 동적인 분석방법과 시간적산(time-integrated) 분석방법으로 구분되고 규모에 따라 구성요소(component)기준 방법과 시스템 기준방법으로 구분된다. 시스템 기준은 시스템 구동인자(기상 데이터, 배수량, 배수형태)와 시스템 반응인자(보조열원, 배수온도)를 포함하고 구성요소 기준은 집열기 회로 온도와 유량과 같은 개개의 요소들을 포함해야 한다.

본 연구에서는 후진적 방법으로 동적 단기 시스템 기준 데이터(dynamic short-term system-level data)를 가지고 동적 구성요소를 근거로 한 시스템 성능을 묘사하는 방법 중에서 J D Burch가 제안한 PSTAR(Primary and Secondary Analysis and Renormalization)방법을 적용하였다. PSTAR방법은 축열조 에너지 평형식을 구성하고 있는 에너지 항들을 측정할 수 있는 항과 계산될 수 있는 항들로 구분하여 에너지 평형식을 만족하도록 계산될 수 있는 항들을 조절하는 방법이다..

1) PSTAR 방법

모든 구성요소 모델들과 입력변수들이 먼저 연구되고 모델과 데이터 사이의 불일치 이유를 모를 경우 매우 유용한 방법이다. 이 방법은 축열조 에너지 평형식을 기본으로 구성된다. 순간 축열탱크 에너지 평형식은 다음과 같다.

$$Q_{aux} + Q_{draw} + Q_{loss} + Q_{solar} - dQ_{int}/dt = 0 \qquad (1)$$

여기에서, Q_{aux}와 Q_{draw}는 단기측정시험으로부터 측정된 값이고 실제 시스템에서의 실제 값이다. 나머지 항들은 시스템의 초기모델(audit model)로부터 계산될 수 있다. 여기에서 핵심적인 단계는 Q_{solar}를 1차항(primary term)과 2차항(secondary term)으로 구분하는 것이다. 식(1)에서 1차항은 시스템을 작동시키는 두 가지 주요 열전달 메카니즘에 의한 2개의 항이 존재한다. 즉, 태양열 획득항 (solar gains : Q_{sun})과 온도차에 의한 열손실항(temperature-difference losses : Q_{dt})을 의미하고 2차항은 다양한

다른 열흐름이나 시뮬레이션의 비선형을 설명하는 Q_{other}로 표현된다.

2개의 1차항을 계산하는데 따른 오차를 설명하기 위해서 간단한 스칼라 변수 P_i를 도입하면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$Q_{solar} = P_{sun} \cdot Q_{sun} + P_{DT} \cdot Q_{dt} + Q_{other} \quad (2)$$

여기에서 각 항은 Hottel-Whillier-Bliss에 의해서 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Q_{sun} = F_R(\tau\alpha) \cdot IAM(T) \cdot I \cdot A_{col}$$

$$Q_{dt} = F_R U_L \cdot A_{col} \cdot (T_{in} - T_{amb})$$

$$Q_{other} = 0$$

식(2)을 식(1)에 대입하고 dQ_{int}가 무시될 수 있도록 시간에 대해 적분을 수행하면 PSTAR방법론에 기초가 되는 다음과 같은 회귀분석식을 유도할 수 있다.

제주대학교 중앙도서관

$$Q_{aux} + Q_{draw} + Q_{loss} + P_{sun} \cdot Q_{sun} + P_{DT} \cdot Q_{dt} + Q_{other} = 0 \quad (3)$$

P_{sun}과 P_{DT}는 간단한 선형 회귀분석으로부터 결정될 수 있다. 즉, 시험으로부터 측정된 양, Q_{aux}와 Q_{draw}, 그리고 시험 데이터로부터 계산된 양, Q_{loss}는 종속변수를 형성하고 Q_{sun}과 Q_{dt}는 독립변수를 형성한다.

모델이 정확하다면 P_i항들은 1이 되고 에너지 평형식을 만족시킬 것이다. 그리고 모델에 오차가 있을 때 P_i항들이 1에 근접하도록 1차항 계산을 조절한다

식(3)에 있는 Q_{other}를 계산하려면 열흐름항들을 각각 분리해서 시뮬레이션을 수행하여야 한다. 이러한 시뮬레이션은 3가지 즉, exact, sun, DT 시뮬레이션을 의미한다. exact 시뮬레이션은 배관, 외기 온도, 일사량, 배수량 측정치로 수행된다. 즉, Q_{other}=0

으로 설정하고 다른 모든 항들을 고려하여 수행한다. sun 시뮬레이션은 열손실항을 없애기 위해서 sink 온도를 집열기 온도로 설정한다. DT 시뮬레이션은 일사량을 0으로 설정하여 수행한다. 이렇게 3가지 시뮬레이션을 수행하여 얻은 결과로 다음의 식을 이용하여 Q_{other}를 계산한다.

$$Q_{other} = Q_{exact} - (Q_{sun} + Q_{dt}) \quad (4)$$

2. 모델링 과정

모델링이 안된 상변화형 시스템은 모델링의 입증을 위한 재표준화 작업을 수행하여야 하며 이 시스템 또한 자연형 시스템으로 OG-100과 OG-200 기준에 의한 시험을 수행한 시험 결과 데이터가 필요하다. OG-100기준은 태양열 집열기의 시험 및 평가에 관한 기준으로 집열기 시험에 대한 방법과 성능평가를 나타내고 있다. 그리고 OG-200은 태양열 온수기의 검증 및 평가에 관한 기준을 말한다. 이 기준에 맞는 시험을 수행하고 집열기나 온수기에 대한 결과 데이터가 모델링에 이용된다 모델링은 TRNSYS프로그램을 이용하여 수행하였다. TRNSYS은 열에너지 시스템의 시간에 따른 열성능을 평가하기 위해서 개발된 프로그램이다. 시스템을 구성하고 있는 구성요소들은 FORTRAN 서브루틴에 의해서 모듈 형태로 되어 있다 이러한 모듈을 갖고 실제 시스템이 구성되어져 있는 형태로 묘사할 수 있다. 그리고 각 구성요소들은 TYPE의 형태로 구분이 되어 존재한다. TYPE들은 각각 input, output, parameter로 변수들이 설정되어 있다. input은 다른 구성요소의 output과 연결되어 정보를 교환하고 시간에 따라 변하는 값이다. 그리고 output은 다른 구성요소의 input으로 연결되거나 원하는 형태로 출력을 할 수 있다. parameter는 시뮬레이션 시간동안 일정한 상수값을 갖는 변수이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

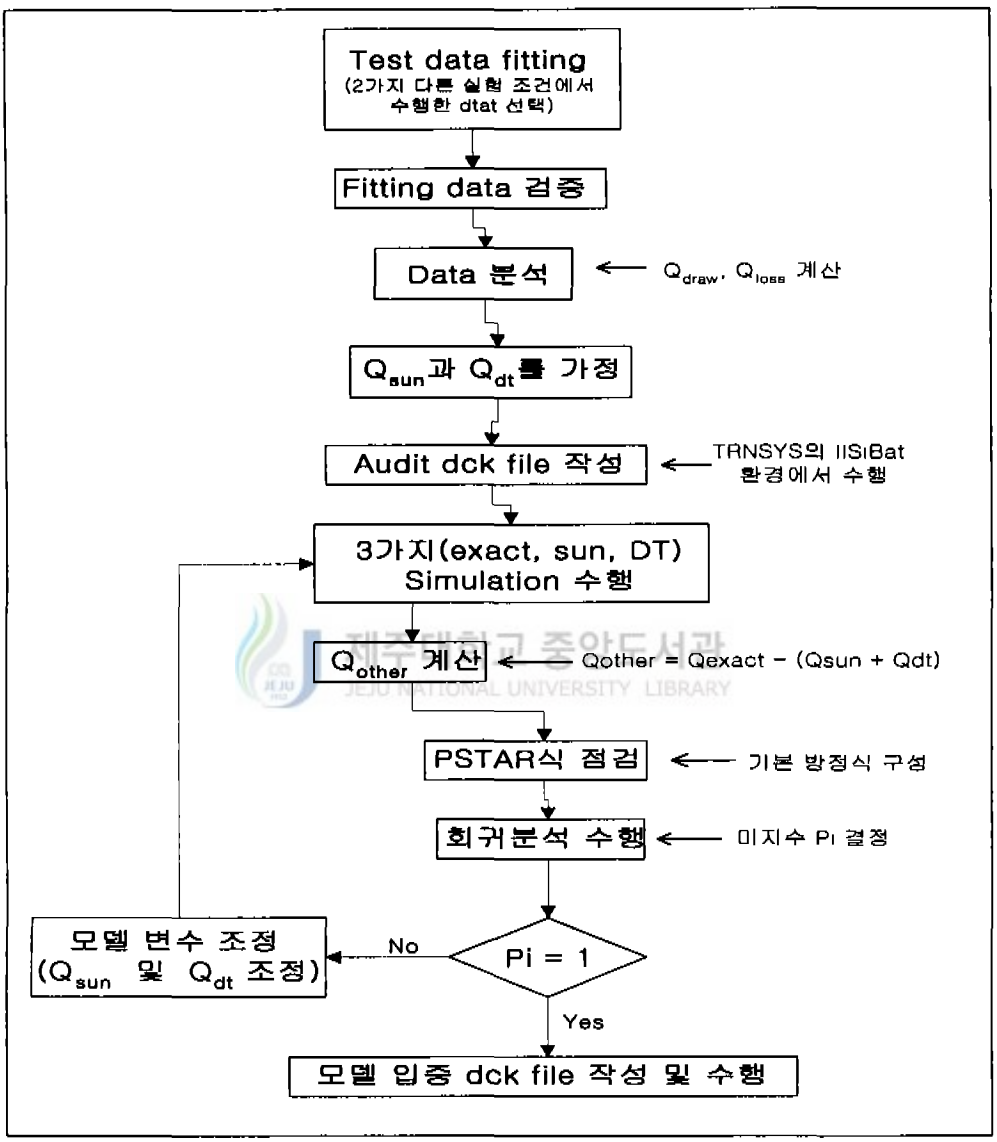


Fig. 36 Schematic flowchart of Modelling process

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

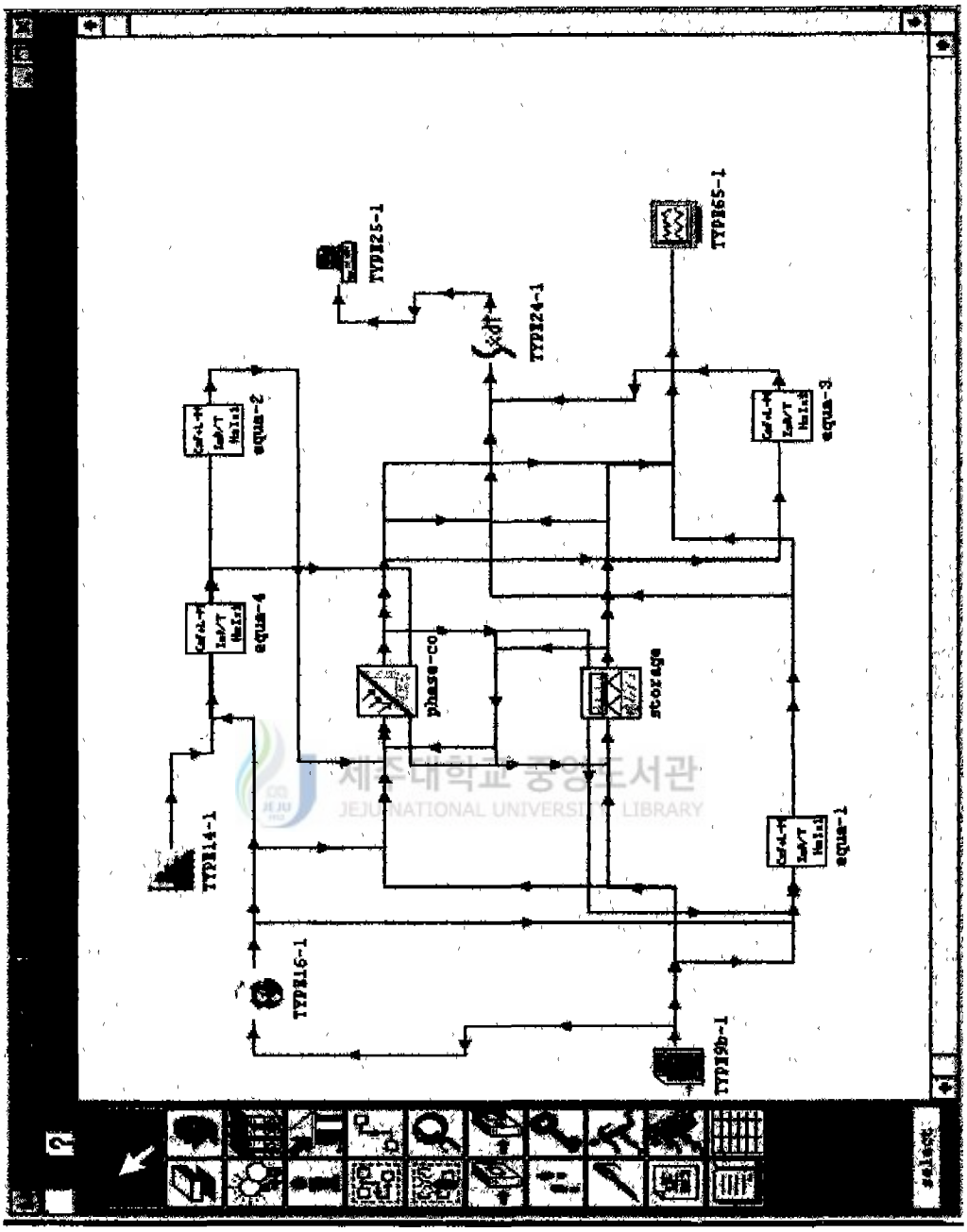


Fig. 37 Modelling of TRNSYS IISiBat Panel

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

IISiBat 환경에서는 각 구성요소들이 아이콘(icon)형태로 존재하기 때문에 보다 쉽게 묘사하고자 하는 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 그래픽 환경에서 각 구성요소들이 묘사가 가능하므로 실제 구성요소들간의 정보 흐름을 쉽게 알 수 있다.

Fig. 36은 상변화 시스템의 실험 데이터를 근거로 한 PATAR식 모델링 과정을 보여준다. 모델링에 필요한 데이터를 선정하고 검증과정을 거치고 데이터분석을 통하여 실측되는 값을 계산한다. 모델링 과정의 핵심은 Qsun과 Qdt를 축열조 에너지 평형식이 만족하도록 조정하는 것이다.

Fig. 37은 앞의 모델링 과정을 근거로 하여 TRNSYS의 IISiBat 환경에서 상변화형 태양열 온수기 초기 모델을 구성한 그림이다. 구성요소를 보면 TYPE 111, 집열기 모델과 TYPE138, 축열조 모델이 핵심을 이루고 있다. 집열기 모델과 축열조 모델은 parameter에서 시스템에 맞는 값을 설정하게 된다. 특히 축열조 모델은 열교환 형태가 히트파이프의 응축부 형태로 모델링 되었다. 집열기 모델은 선형 효율식과 비선형 효율 식을 모두 이용할 수 있는 모델이다. IISiBat 환경에서의 모델을 간단히 살펴보면 기상데이터를 읽어들이는 TYPE 9의 Data Reader와 TYPE 9에서 읽은 수평면 전일사량을 직달 성분과 산란 성분으로 구분하고 전 일사량을 계산하는 TYPE 16의 Radiation Process가 있다. 그리고 계산된 값들을 원하는 형태로 출력하게 하는 TYPE 28을 구성하였고 열흐름항들의 계산은 equation tool를 사용하였다.

제주대학교 중앙도서관

3. 시뮬레이션 결과

상변화형 써모사이폰을 PSTAR방법에 의한 TRNSYS 시뮬레이션을 수행하였다. 정확한 시뮬레이션을 수행하려면 여러 조건에서 실험한 데이터를 확보하여 시뮬레이션과 결과를 비교 분석하여야 한다. 예를 들면 일사량이 높을 때와 낮을 때, 축열조의 초기 온도가 높고 낮을 때에 대한 데이터가 필요한 것이다. 그래서 본 연구에서는 시스템에 가장 큰 영향을 미치는 일사량 조건 즉, 일사량이 높고 낮을 때와 외기 온이 높고 낮을 때로 나누어 시뮬레이션을 수행하였다. 실험 데이터는 일사량이 높고 초기

온도도 높은 경우(HRHT), 일사량이 높고 초기온도는 낮은 경우(HRLT), 일사량이 낮고 초기온도는 높은 경우(LRHT), 일사량이 낮고 초기온도도 낮은 경우(LRLT)의 네 가지 측정 데이터를 사용하였다.

Table 3은 실험 결과치와 시뮬레이션 결과 값의 오차 값을 나타내고 있다.

Table 3 Simulation result and error range

	Qavail	오차값	Qdraw	오차값
HRHT	5.23E+04	9.73E+02	2.19E+04	2.36E+03
HRLT	4.88E+04	5.16E+02	1.7E+04	5.94E+03
LRHT	2.8E+04	2.18E+02	1.52E+04	2.93E+03
LRLT	2.57E+04	1.19E+02	1.32E+04	2.2E+03

Fig 38은 집열면에서 이용할 수 있는 에너지량인 Qavail을 실험데이터와 비교한 그림이다. 그림에서 보이는 것과 같이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 38은 Qdraw을 비교한 그림인데 조금 차이가 나타났다. 이것은 실험데이터의 한계와 여러 구성인자들의 불확실성에서 기인한 것이라 생각한다. 다양한 실험에 의해서 정확한 모델링이 필요하다.

제주대학교 중앙도서관

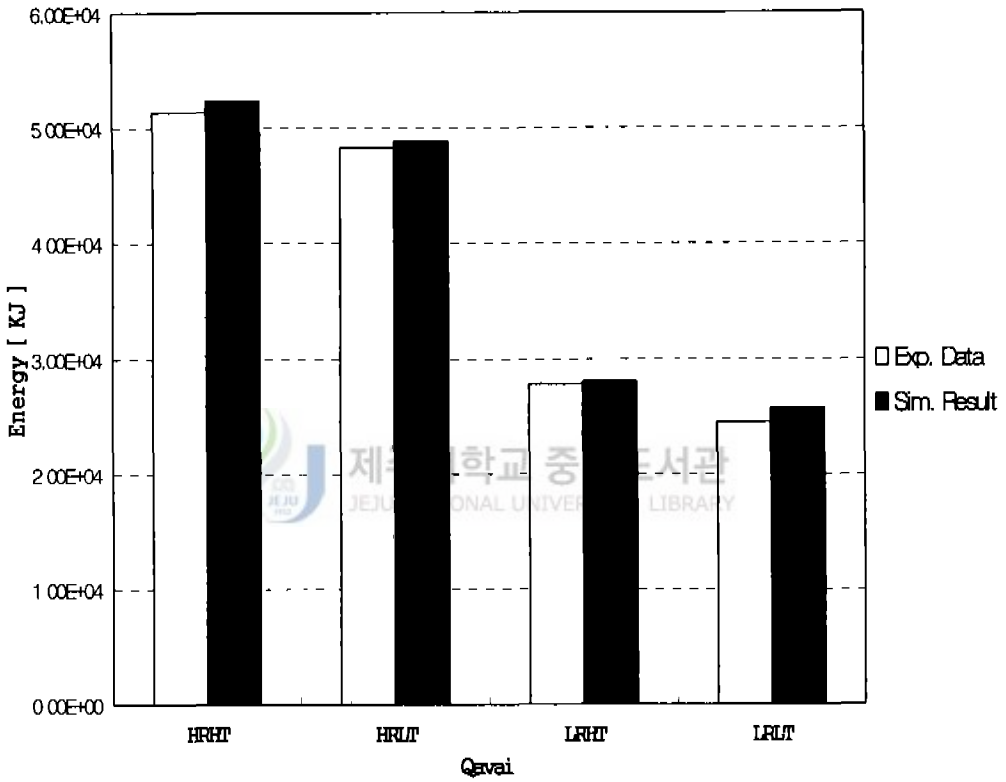


Fig. 38 Comparison of experimental data & simulation result(Qavail)

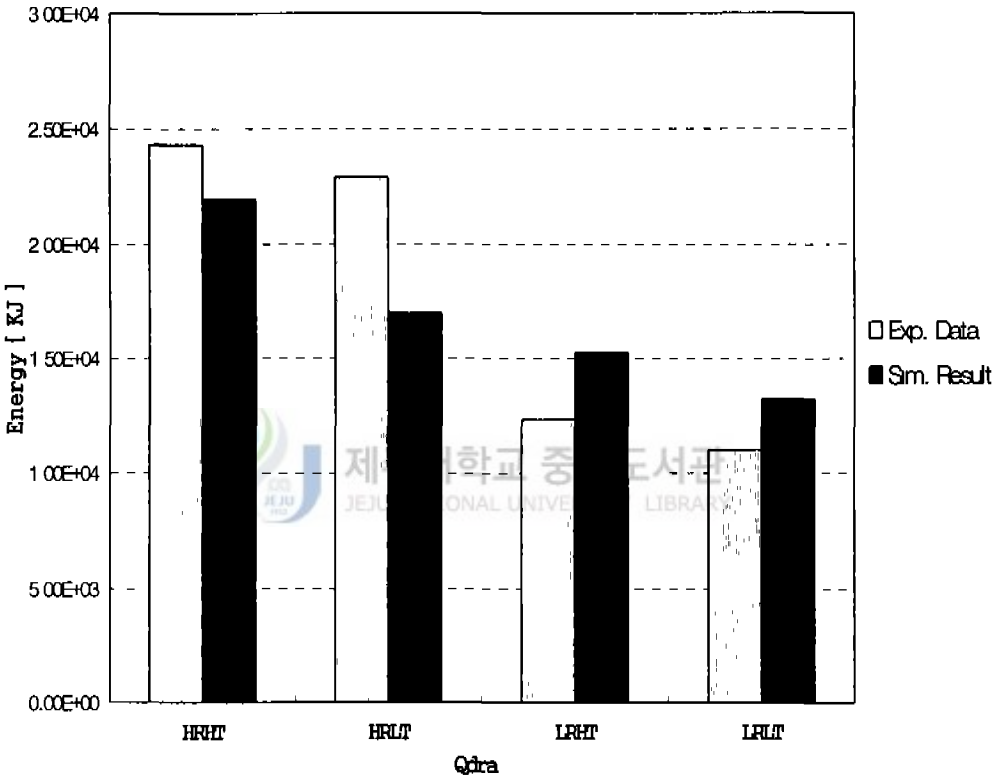


Fig. 39 Comparison of experimental data & simulation result(Qdraw)

Ⅵ. 결론

상변화형 써모사이폰 시스템의 작동특성을 규명하기 위해서 실내 특성실험을 통해 작동유체 주입량과 작동유체의 종류에 따라 다른 작동특성을 보이는 것을 알 수 있었다. 작동유체로는 에탄올, 증류수, 에탄올과 증류수의 혼합물을 사용하였고 작동유체량으로는 증발부 체적의 30%, 40%, 50%, 60%, 70%를 주입하여 작동특성을 관찰하였다. 실내 실험에서는 써모사이폰에 사용할 작동유체와 양을 결정하는데 중점을 두었다.

실내 실험을 통하여 얻어진 작동유체로 실제 실외에 적용하여 성능 특성을 고찰하였다. 실외에서 얻어진 데이터는 시스템 모델링에 사용되었다.

본 연구에서는 실내 작동특성 실험과 실외 성능실험을 통하여 시스템 모델링을 수행하였다. 이상의 연구를 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

◈ 작동유체 주입량에 따른 작동특성 비교

작동유체로 에탄올, 증류수, 에탄올과 증류수의 혼합물을 사용하여 증발부 체적30%, 40%, 50%, 60%, 70%를 주입하고 열공급은 440w/㎡, 660w/㎡, 880w/㎡로 증가시키면서 시스템의 작동특성을 관찰하였다. 30%와 40%를 주입한 경우에는 어떤 작동유체를 사용하여도 열공급의 차이는 있지만 액마름 현상이 나타나는 것을 알 수 있었다. 50%, 60%, 70%를 주입하였을 때는 거의 유사한 경향이 나타났지만 70%에서는 열교환을 거쳐 써모사이폰으로 들어가는 부분에서 액 정체가 발생하였다. 그리고 작동유체에 따라 축열량과 효율이 조금씩 다른 결과가 나타났다 이성분인 경우 다른 유체보다 축열량과 효율면에서 나은 결과를 보였다.

◈ 작동유체의 종류에 따른 작동특성 비교

작동유체의 종류에 따라 작동특성을 비교하였는데 일사량과 같은 조건을 맞추기 위

해서 열공급을 220w/㎡, 310w/㎡, 440w/㎡, 530w/㎡, 660w/㎡, 790w/㎡, 880w/㎡으로 증가하였다 작동유체의 양은 60%를 주입하여 시스템 특성을 관찰하였다 열공급을 증가하면 축열량과 효율도 증가하고 이성분인 경우가 다른 경우보다 조금 높게 나타났다

◈ 가시화 연구

작동유체의 유동 및 특성을 이해할 목적으로 가시화 연구가 수행되었다. 작동유체로는 에탄올과 증류수의 혼합물을 사용하였고 작동유체의 유동현상을 카메라를 이용하여 촬영하였다. 주입량이 40%에서는 5분이 지나면서 액체상태의 유동이 일어나고 10분을 경과하여 기체가 생성되어 상승하는 것을 볼 수 있다 열공급을 660w/m^2으로 증가시키면 액마름 현상이 나타나는 것을 알 수 있었다. 60%를 주입한 경우에 유동은 6분이 지나면서 액체상태로 상승하기 시작하여 시간이 흐르면서 기체상태로 상승하였다. 열을 증가 시켜도 기체가 폭발적으로 상승하는 것을 볼 수 있었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

◈ 실외 실험을 통한 성능특성 분석

실외 성능실험은 모델링을 위한 시스템의 구성인자를 찾기 위해서 수행되었다 실내 실험에서 얻어진 결과를 토대로 실외에 적용하여 성능분석을 행하였다. 실외 실험에서는 일사량이 높은 경우와 낮은 경우로 나누어 수행되었고 실제 성능에는 일사량과 외기온이 커다란 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 시스템의 효율은 일사량이 높은 경우는 46%에서 일사량이 낮은 경우는 43%로 각각 측정되었다.

◈ 시스템 모델링

실외 성능 실험에서 얻어진 데이터를 기본으로 PSTAR방법을 적용하여 시스템 모델링을 수행하였다. 모델링은 TRNSYS 프로그램을 이용하여 구성인자들을 모델링하였다. 구성요소는 집열기 모델, TYPE 111, 축열조 모델, TYPE 138이 핵심을 이루고 있고 열흐름 항들은 equation tool을 사용하였다. 이렇게 시뮬레이션 결과를 실험 데

이터와 비교하면 Qavail은 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있었지만 Qdraw은 조금 차이가 있었다. 이런 원인은 모델이 정확하지 못하다는 것인데 이는 많은 데이터를 확보하여 시스템 기준이 아닌 구성요소 기준으로 정확한 모델링이 수행되어야 한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅶ. 참고문헌

H. Imura, K. Sasaguchi and H. Kozai, 1983, Critical Heat Flux in a closed two-phase Thermosyphon, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, No. 8, pp. 1181~1188.

A. Faghri, M. Chen and M. Morgan, 1989, Heat Transfer Characteristics in Two-Phase Closed Conventional and concentric annular Thermosyphons, J. Heat Transfer, Vol. 111, pp. 611~618.

Kanji Negishi and Teruo Sawada, 1983, Heat Transfer Performance of an inclined two-phase closed Thermosyphon, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, No. 8, pp. 1207~1213.

C. Casarosa and E. Latrofa, 1983, The Geyser Effect in a two-phase Thermosyphon, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, No 6, pp. 933~941.

U. Gross and E. Hahne, 1985, Heat transfer in a two-phase thermosyphon operating with a fluid in the near critical state, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, No. 3, pp 589~601

Flavio Dobran, 1985, Steady-state characteristics and stability thresholds of a closed two-phase Thermosyphon, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, No. 5, pp. 949~957.

R. S. Soin, S. Raghuraman and V. Murali, 1987, Two-phase water heater: Model

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

and long term Performance, Solar Energy, Vol. 38, No. 2, pp. 105~112.

S. J. Chen, J. G. Reed and C. L Tien, 1984, Reflux condensation in a two-phase closed Thermosyphon, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No. 9, pp. 1587~1594.

Karen R Den Braven, 1989, Two-phase Heat Transfer in Thermosyphon Evacuated-Tube solar collectors, Trans. of the ASME, Vol. 111, pp. 292~297.

T. Y. Bong, K. C. Ng and H. Bao, 1993, Thermal Performance of a Flate-plate Heat Pipe collector array, Solar Energy, Vol 50, No. 6, pp. 491~498.

Z. Pluta and W. Pomierny, 1995, The theoretical and Experimental investigation of the phase-change solar Thermosyphon, Renewable Energy, Vol. 6, No. 3, pp. 317~321.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Burch, J D., 1993, Reconciliation of a Simulation Model with Performance Data for solar hot water systems, Building and Energy Systems Division, National Renewable Energy Lab.

Klein, S., 1991, TRNSYS User Guide, University of Wisconsin, Solar Energy Laboratory.

김철주, 강환국, 오광헌, 1995, 밀폐형 2상 열사이폰내의 비등현상에 대한 가시화 연구, 한국에너지공학회, Vol. 4, No. 2, pp. 261~269.

곽희열, 김종보, 1995, 2성분 혼합물을 사용한 2상 밀폐 열사이폰의 작동특성에 관한

연구, 한국에너지공학회, Vol 4, No. 1, pp. 95~102.

강용혁, 1998, 태양열 온수급탕 시스템 성능표준화 연구, 한국에너지기술연구소

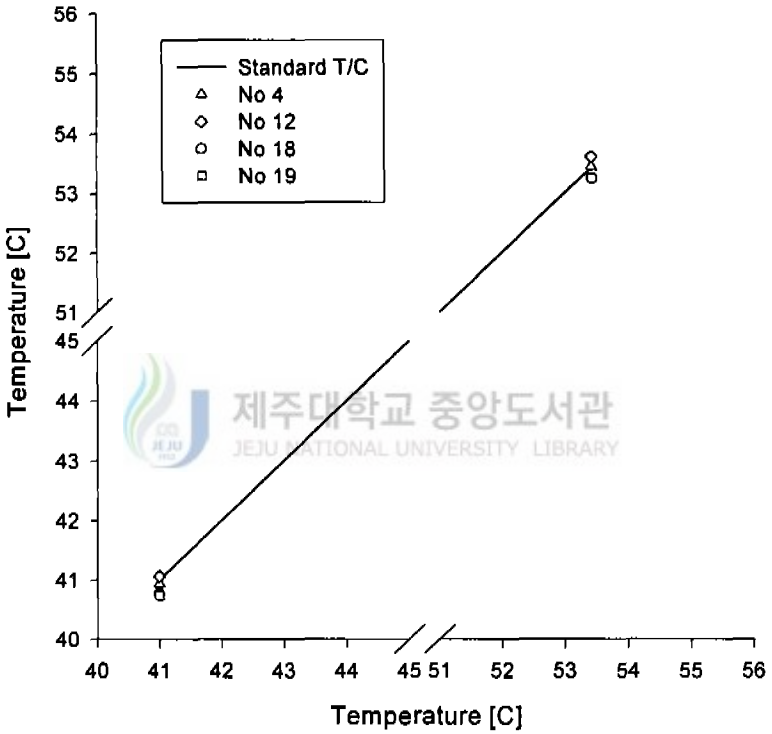
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

부록1. 열전대 보정자료

Table A-1 Thermocouples Calibration data

T/C No.	1. 설정값(℃)	2. 설정값(℃)	3. 설정값(℃)
표준 온도	0.065	41.0022	53 4281
# 1	-0.6374	40.8672	53.3928
# 2	-0.6287	40.9407	53.4874
# 3	-0 6396	40.9460	53.4821
# 4	-0.6126	40.9344	53.4396
# 5	-0.5891	40.8841	53.3529
# 6	0.5792	40.9993	53.5392
# 7	0 5677	41.0469	53.5957
# 8	0.5354	40.9642	53.4729
# 9	0.4450	40 9371	53.3964
# 10	0.5212	41.0602	53.5587
# 11	0.5000	41.0600	53.5525
# 12	0.5187	41.0651	53.6067
# 13	0.5504	41.0216	53.5527
# 14	0.5324	40.9476	53.4277
# 15	0.5387	40.9492	53.5653
# 16	0.5704	40.9677	53.5144
# 17	0.2738	41.0878	53.6165
# 18	0.6754	40.7655	53.2449
# 19	0.5885	40.7419	53 2469

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. A-1 Graph of Thermocouples Calibration

감사의 글

초록의 계절이 지나 벌써 하얀 눈이 내리는 겨울이 성큼 우리 곁에 다가와 있습니다. 항상 열린 마음을 갖고 주어진 모든 일에 열심히 해야지 했지만 실상은 그렇지 못해 아쉬기만 합니다. 어느덧 2년이란 세월이 흘렀네요. 어느 곳에도 이런 아쉬움은 항상 존재하는 것 같습니다.

한국에너지기술연구소에서 배움의 길을 열어주신 강용혁 박사님께 감사를 드립니다. 그리고 곁에서 보살핌과 많은 도움을 주신 곽희열 박사님, 이의준 박사님, 윤종호 박사님, 유창균 선생님, 윤환기 선생님께 진심으로 감사드립니다.

애정 어린 관심과 격려로 많은 가르침을 주신 이윤준 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그동안 학문적인 채찍질을 아끼지 않으셨던 천원기 교수님, 이헌주 교수님, 박재우 교수님, 김신 교수님, 조경호 교수님께도 감사드립니다. 또한 학교 소식을 전해주신 현종관, 박숙희 조교 선생님과 2년동안 모든 연락과 논문 검토를 해준 보안이에게 고마운 마음을 전합니다.

연구소에서 즐겁게 생활할 수 있도록 많은 관심과 도움을 주신 기세형, 준언이형, 명식씨, 창범씨, 진희씨에게도 고마움을 전합니다. 그리고 힘들고 어려울 때 많은 도움과 생활에 활력소를 준 동규에게 진심으로 고마움을 전하고 많은 도움을 준 후배 현식, 동언에게도 고맙다는 말을 전합니다. 따뜻한 우정으로 관심과 격려를 해주던 친구들 창훈, 대근, 병진, 준영에게 고마움을 전합니다.

항상 따뜻한 사랑으로 보살펴 주시고 격려해 주신 형님, 형수님과 큰누나와 매형께 감사드리고 작은누나에게 고마움을 전합니다. 마지막으로 막내의 뒷바라지를 해주신 존경하는 아버님, 어머님께 감사를 드리며 작은 이 결실을 올립니다.