

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 22, No. 2, 2002

루프형태의 밀폐형 Thermosyphon의 작동특성과 시스템 모델링에 관한 연구

A Study on the Operating Characteristics and System Modelling of Closed Loop Type Thermosyphon

강명철*, 강용혁*, 이동규**

M. C. Kang*, Y. H. Kang*, D. G. Lee**

Key words : 태양열(Solar Energy), 밀폐형 Thermosyphon(Closed Loop Type Thermosyphon)

Abstract

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 to the condenser area in the loop.

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. It is observed that, in the thermosyphon with low volume of working fluid, such as 30% or 40%, the fluid was dried out.

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.

* 한국에너지기술연구원,

* *Korea Institute of Energy Research*

** 모인에너지

** *More-in Energy*

기호설명

- T_{i_n} : collector inlet temperature
- T_{amb} : ambient temperature
- A_{co_i} : collector area
- U_L : overall loss coefficient
- F_R : heat removal factor
- $\tau\alpha$: transmittance-absorptance
- Q_{aux} : auxiliary energy
- Q_{draw} : draw energy
- Q_{dt} : temperature-difference loss
- Q_{loss} : tank loss energy
- Q_{other} : energy not included in Q_{dt} , Q_{sun}
- Q_{solar} : energy from the solar system
- Q_{sun} : solar gains

1. 서론

2상밀폐 서모사이편은 루프내의 작동유체가 열 공급에 따라 증발과 응축을 연속적으로 일으키며 자연 순환하는 장치로서 기-액 2상 유동에서 증발과 응축의 상변화 과정을 통하여 높은 열전달을 얻을 수 있다. 이는 증기 유동에 따라 열응답성이 대단히 빠르고, 작은 온도차에서 높은 열이송을 나타내는 전열소자이기 때문이다.

2상 밀폐 서모사이편은 증발과 응축의 잠열을 이용하는 작동원리인 히트파이프를 이용한 시스템으로 작동유체가 밀폐되어진 루프내에서 열이 적용되면 액체의 일부는 증발되어 상승하고 응축부에 설치된 열교환기에 의해서 열을 전달하여 중력으로 인하여 증발부로 이동되면서 구동력이 필요없이 연속적으로 자연 순환하게 된다.

2상밀폐 서모사이편은 자연대류형 태양열 집열

기에 비해 집열면적을 소형화하고 구조가 간단하며 열응답성이 빠르고 작은 온도차에서도 높은 열을 이송한다. 그리고 작동유체의 종류에 따라 작동온도의 범위를 넓힐 수 있다.

K. Negishi(1983)등은 2상 밀폐형 서모사이편의 열전달성능을 실험적으로 연구하였는데 실험변수로는 작동유체의 양과 설치 경사각을 사용하였다. 실험결과로서 총괄 열전달계수와 열특성을 얻었다.

Casaroas(1983)등은 작동유체로 물을 사용한 2상 밀폐형 서모사이편에 대한 실험적인 연구를 수행하였는데 실험과정에서 "Geyser effect"라 불리는 현상을 관찰하였다. 그리고 증발부에서의 열전달 계수를 계산하였고 비등현상을 관찰하였다.

김철주(1995)등은 2상 밀폐형 서모사이편의 액체풀에서 발생하는 핵비등 현상과 유동영역에서의 가시화 방법을 연구하였고 증발부 풀내부의 비등현상을 관찰하였다.

곽희열(1995)등은 작동유체로 비등점이 다른 2성분 혼합물을 사용한 2상 밀폐형 서모사이편에 대한 실험을 수행하여 혼합물을 사용한 경우의 작동특성을 고찰하였다.

2상 밀폐형 서모사이편에 대한 기존의 연구들을 보면 히트파이프를 이용한 시스템에 대한 열전달 특성을 고찰한 것이 대부분이다. 본 논문에서 연구한 루프형태의 시스템은 2상 밀폐 서모사이편의 작동원리는 유사하지만 히트파이프를 이용하지 않는다. 그리고 지금까지 루프형태의 밀폐형 서모사이편의 작동특성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 루프형태의 밀폐형 서모사이편에서 작동유체에 대한 작동특성과 성능실험을 수행하였고 작동유체에 대한 유동현상을 고찰하였다. 또한 성능실험에서 얻어진 성능 데이터를 이용하여 루프형태 밀폐형 서모사이편 시스템을 모델링 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실내 작동특성 실험

서모사이펀 시스템의 작동특성 분석을 위하여 실내 실험에 사용한 장치로는 평판형 서모사이펀, 축열조, 진공펌프(10⁻³ Torr.), 평판형 히터, 열 입력 장치, 항온조, 데이터 수집장치로 구성되어 있다. 실험에 사용된 서모사이펀 시스템의 개략도는 그림 1과 같다. 집열부에서의 서모사이펀은 구리관에 직경이 9.52mm인 구리관이 145mm 간격으로 구부러져 하나의 루프로 연결되어 있고 총 길이는 20m이다. 축열조에는 Spiral 형태의 열교환기가 있고 집열판의 구리관과 연결되어 있다. 평판위에는 일사량 조건과 유사하게 열을 공급하기 위해 평판형 히터가 있다. 히터에 가하는 열부하는 전압계와 슬라이드스를 이용하여 조절하였고 항온조와 온수탱크는 일정한 온도의 물을 축열조에 공급하기 위해서 사용되었다. 온수탱크에는 온도 조절기가 설치되어 온수의 온도를 조절할 수 있도록 하였다.

그림 1에서 서모사이펀의 온도 측정을 위해 판

위에 435mm간격으로 좌우 하나씩 10곳에, 유체가 흐르는 관에는 290mm간격으로 7곳에 thermocouple을 설치하였고 축열조에는 상중하로 나누어 3곳에 설치한 것을 나타낸다.

내부 진공 및 작동유체의 충진을 위해서 축열조로 들어가는 상승관에 구리관을 이용하여 진공 펌프와 작동유체 충진을 위해 3-way valve를 설치하였다. 그리고 집열판과 축열조의 상승관과 하강관은 작동유체의 내부 유동을 관찰하기 위해서 투명한 튜브로 연결하였다. 시스템 내부의 진공도에 따라 작동유체가 상변화 하는 경향이 달라질 수 있으므로 진공을 만들거나 진공을 유지하는 것은 중요하다.

진공을 만들기 위해서 축열조와 서모사이펀 사이의 상승관에 연결된 3-way valve에서 1개 라인인 진공펌프와 연결하고 나머지 라인인 작동유체의 충진을 위해 진공밸브를 장착하였다.

진공(진공도, 10⁻³ torr)를 만들기 위해서는 3-way valve중 진공펌프와 연결된 밸브를 열고 진공펌프를 이용하여 시스템과 연결된 모든 공간을 진공상태가 되게 한 후 시스템이 진공상태가

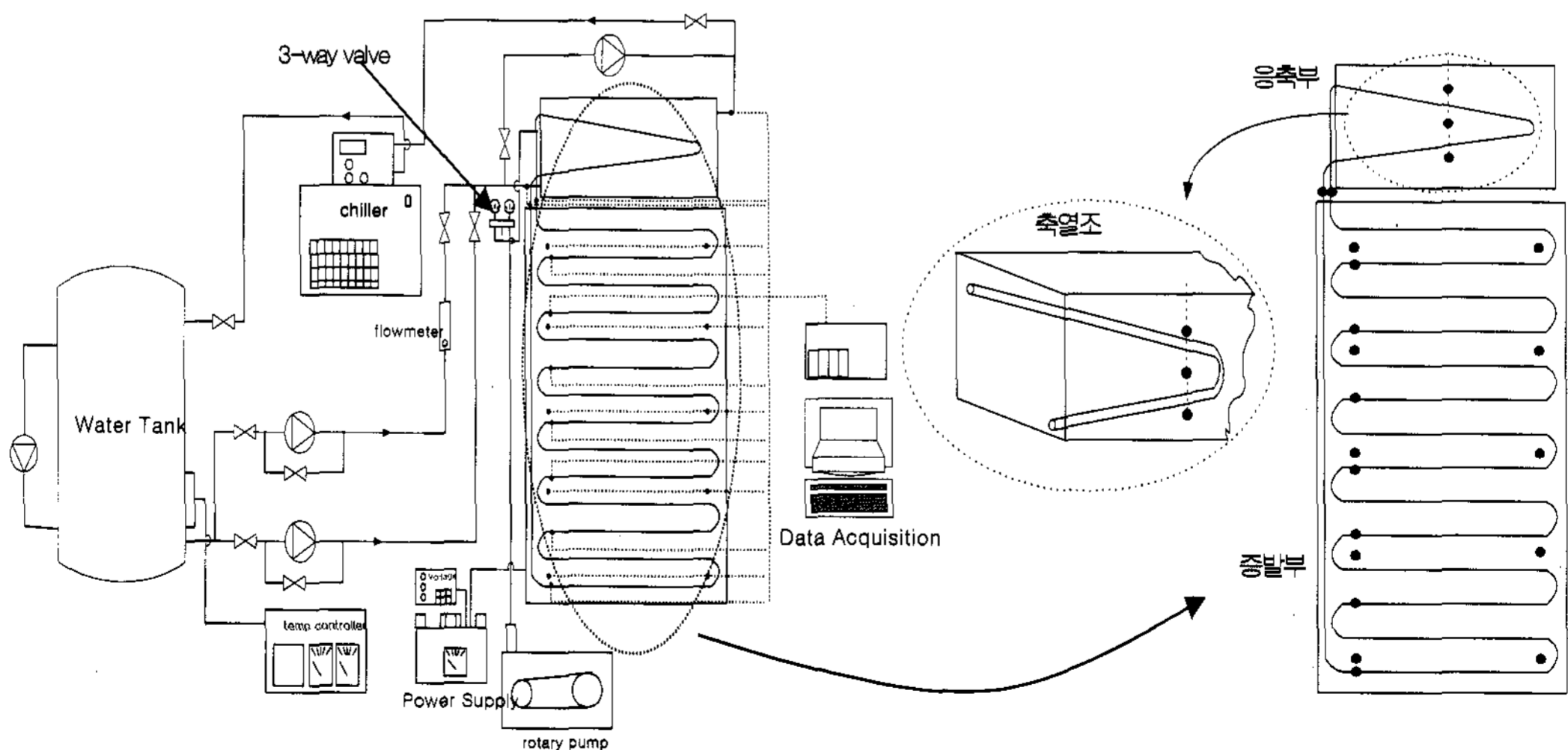


그림 1. Schematic diagram of the thermosyphon & vacuum system and Location of the thermocouples

되면 진공펌프와 연결된 밸브를 닫고 작동유체가 연결된 밸브를 열어 진공상태인 시스템 내부로 작동유체가 유입되도록 하였다.

주입되는 작동유체의 종류에는 99%의 순수 에탄올(C_2H_5OH), 증류수(H_2O), 에탄올+증류수의 혼합물을 사용하였고 작동유체의 양은 변수로서 증발부인 서모사이편 체적의 30%, 40%, 50%, 60%, 70%을 각각 주입하였다. 작동유체의 주입이 끝나면 축열조에 25°C의 시수를 채우고 시수를 채운 후에는 축열조내의 성층화를 없애기 위해 순환 펌프를 가동하였다. 히터에 가해주는 열부하는 일사량 조건을 고려하여 최소 220 W/m²에서 최대 880 W/m²인 범위에서 수행하였다.

2.2 실외 성능실험

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

3. 실험결과 및 분석

3.1 실내 특성분석

작동특성 실험은 서모사이편의 작동유체의 종류와 양을 결정하기 위해 두 가지로 나누어 수행하였다. 주입한 작동유체로는 에탄올, 증류수, 에탄올/증류수의 혼합물을 사용하였고 증발부 체적의 30%, 40%, 50%, 60%, 70%를

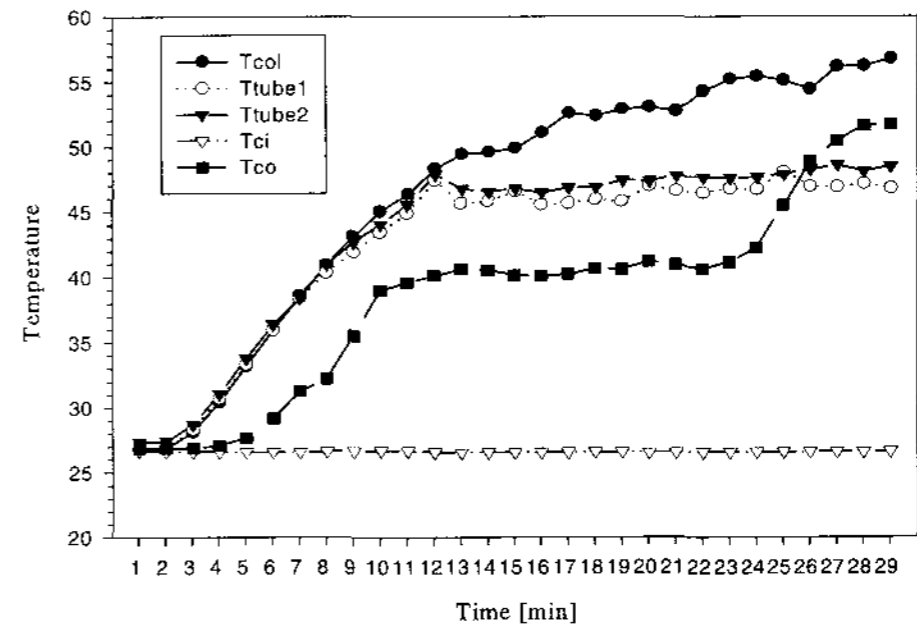


그림 2. Variation of System temperature at ethanol 30%

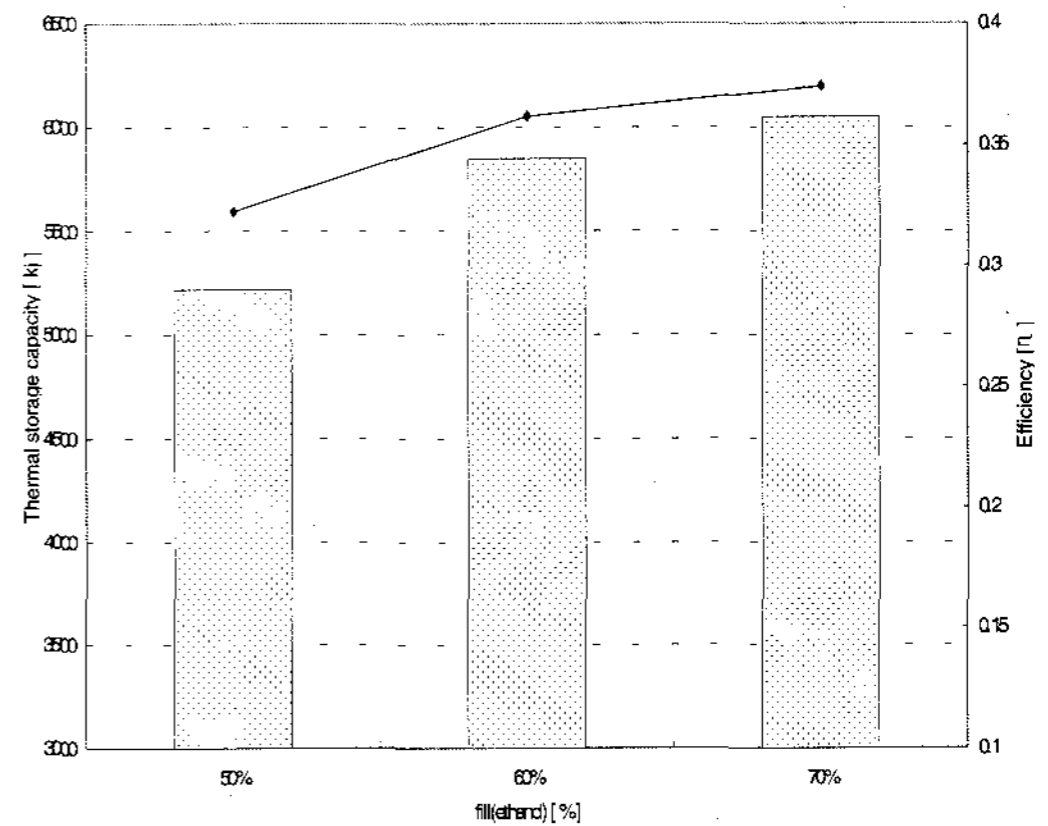


그림 3. Thermal storage capacity & efficiency of system at ethanol (50%, 60%, 70%)

그림 2에서 보여주는 것처럼 에탄올 30%와 40%를 주입하였을 때에는 작동유체가 상승하면서 dry-out현상이 나타났다.

그림 3는 에탄올 50%, 60%, 70%를 주입한 경우의 축열량과 축열효율을 나타내는 그림이다. 그림에서 보이는 것과 같이 50%인 경우보다는 60%, 70%인 경우가 축열량과 효율면에서 좋은 결과를 보이고 있다. 그러나 70%인 경우는 집열 시스템으로 되돌아오는 리턴측부분에서 액의 과다로 인해 액정체가 발생한다는 것을 알 수 있었다. 증기의 유동이 빠른 반면 응축후의 액의 많음으로 인하여 정체 발생하고 있다.

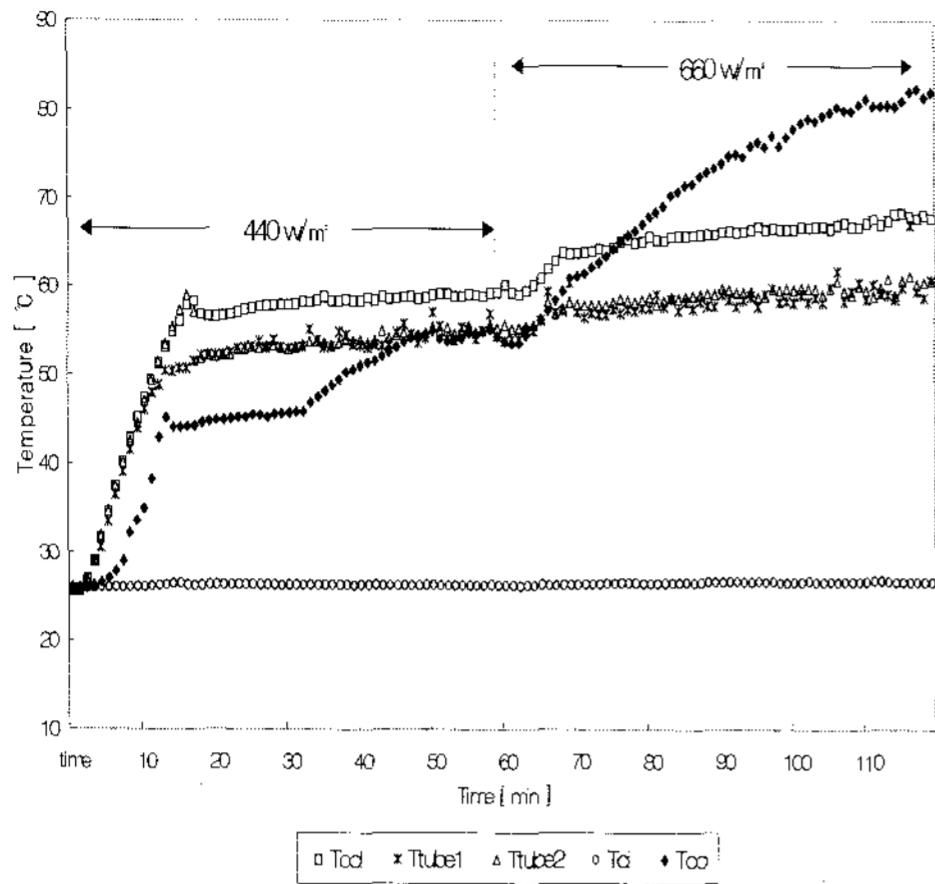


그림 4. Variation of System temperature at water 30%

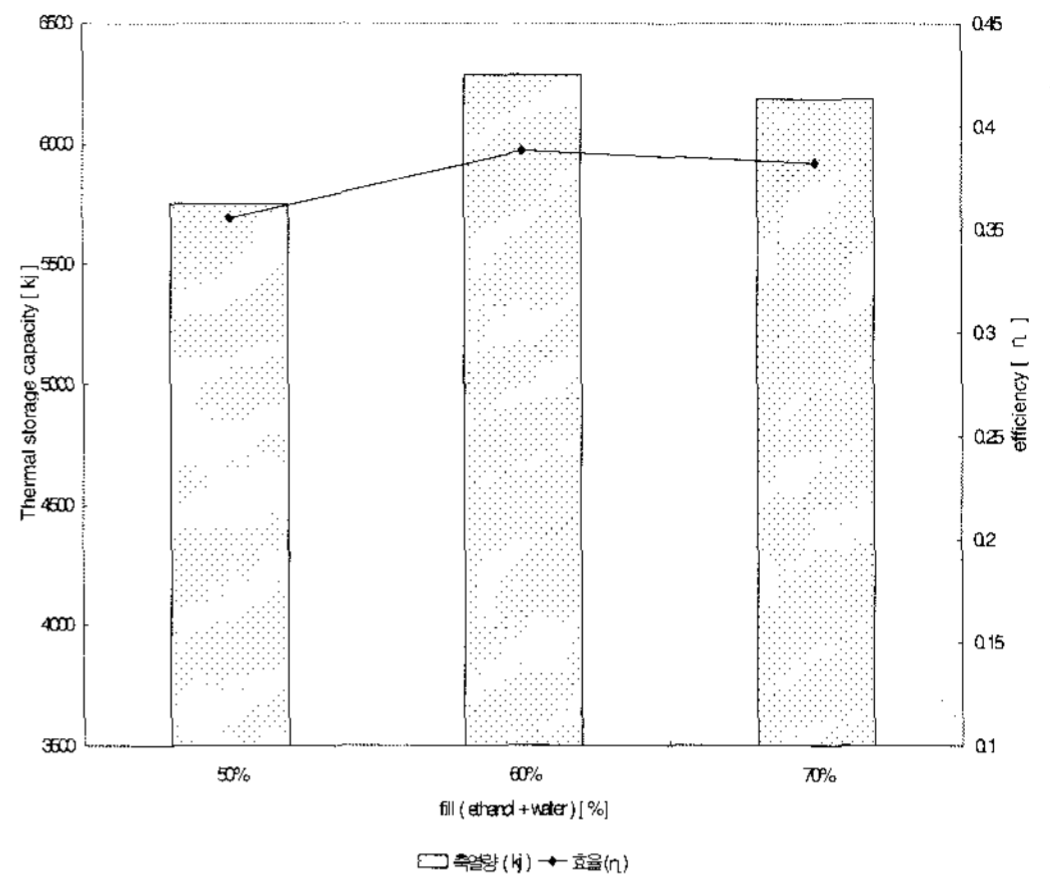


그림 6. Thermal storage capacity & efficiency of system at ethanol+water(50%, 60%, 70%)

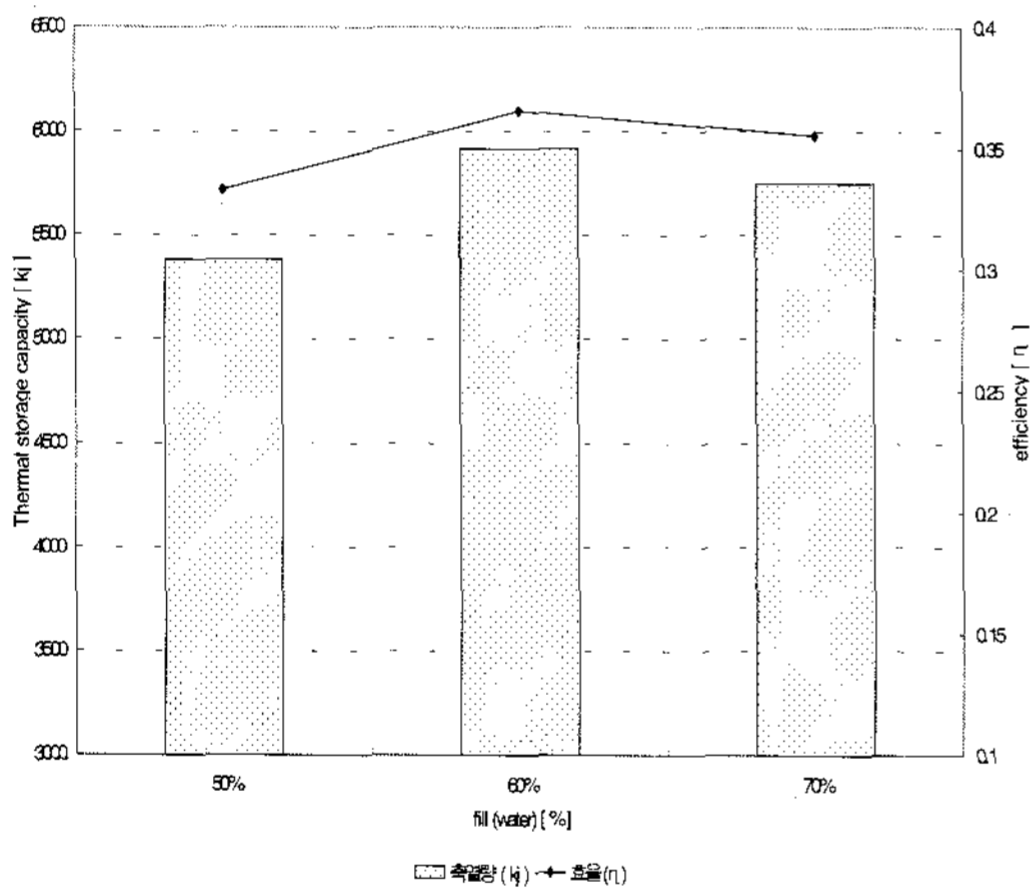


그림 5. Thermal storage capacity & efficiency of system at water (50%, 60%, 70%)

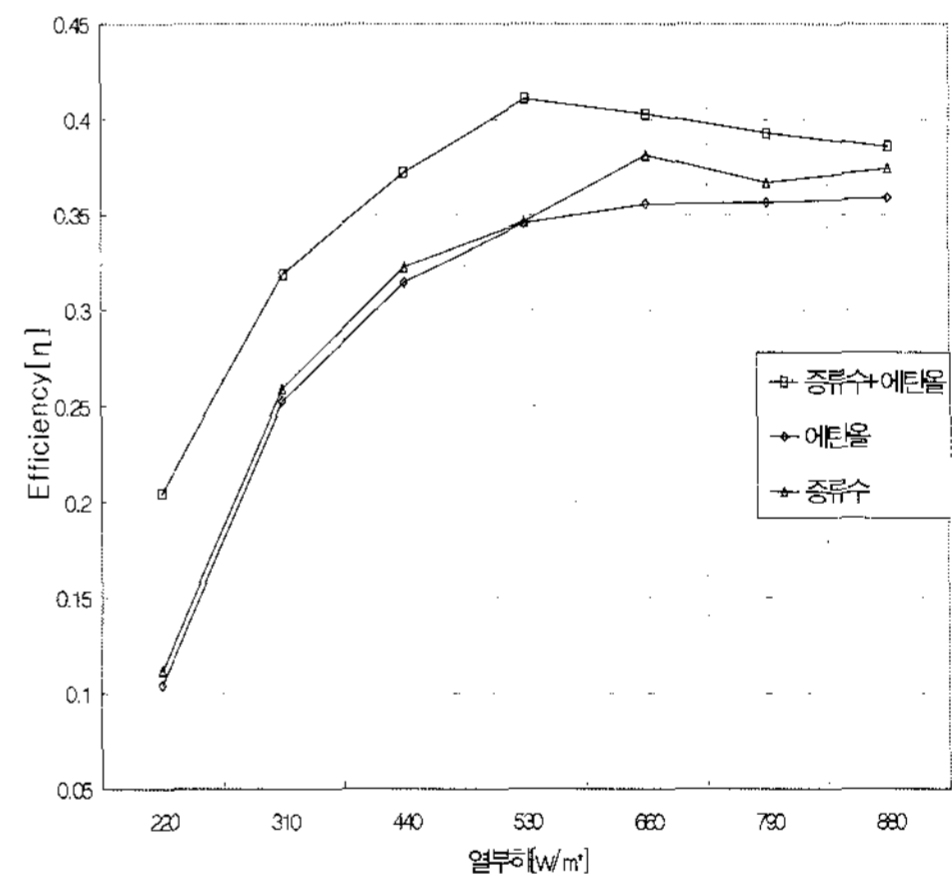


그림 7. System efficiency for heating capacity at different working fluid (60%)

그림 4는 증류수 30%와 40%를 주입한 경우인데 앞서 나타났던 dry-out 현상이 발생하였다.

그림 5은 증류수 50%, 60%, 70%를 주입하였을 때 보이는 축열효율과 축열량의 그림이다. 축열량과 효율면에서 50%보다 60%, 70%에서 높게 나타났으며 상대적으로 60% 주입한 경우가 조금 높은 것을 알 수 있다. 그리고 70%에서는 에탄올인 경우에도 액정체는 발생하였지만 증류수인 경우가 크게 나타나는 것을 관찰하였다.

그림 6은 에탄올과 증류수(50:50)의 작동유체를 50%, 60%, 70%를 주입한 경우의 축열량과 축열효율에 대한 그림이다. 혼합한 이성분인 경우는 60%로 주입한 경우 좋은 결과를 보인다는 것을 알 수 있었다.

그림 7은 작동유체를 세 가지 종류에 유체량을 60%로 주입하고 열공급을 변화시키면서 열부하에 따른 축열효율을 알아 보았다. 작동유체에 따른 결과를 보면 에탄올과 증류수의 혼합물이 상대

적으로 좋은 결과를 보인다는 것을 알 수 있었다.

3.2 유동 가시화

작동특성을 관찰하기 위해 증발부 출구에서의 유동을 관찰하였다. 작동유체로 에탄올과 증류수의 이성분 혼합물을 사용하여 주입량 40%와 60%를 충전한 경우의 유동현상을 촬영하였다. 그림 8은 작동유체로 에탄올과 증류수의 혼합물 40%를 주입한 경우에 나타나는 유동현상을 보여 주고 있다. 앞서 실험결과에 나타난 30%인 경우보다 높은 열공급이 660 W/m^2 으로 가하였을 때 dry-out현상이 일어난다는 것을 볼 수 있었다. 초기 열공급이 낮은 경우는 폭발적으로 액이 상승하는 것을 보여주고 있다. 그림 9는 작동유체를 에탄올과 증류수의 혼합물을 사용하고 증발부 체적의 60%를 주입한 경우의 작동유체의 유동을 촬영한 그림이다. 초기 6분 경과후에 나타나는 유동의 특징은 액체형태로 유동이 일어나고 있고 시간이 경과하면서 기체형태의 유동이 일어나고 있다. 초기 작동특성과 유동현상에 대하여 관찰하였고 열공급에 따른 유동형태에 대해서 고찰하였다.

작동유체를 60%로 많이 한 경우는 비등이 폭발적으로 일어나는 것을 알 수 있었다.

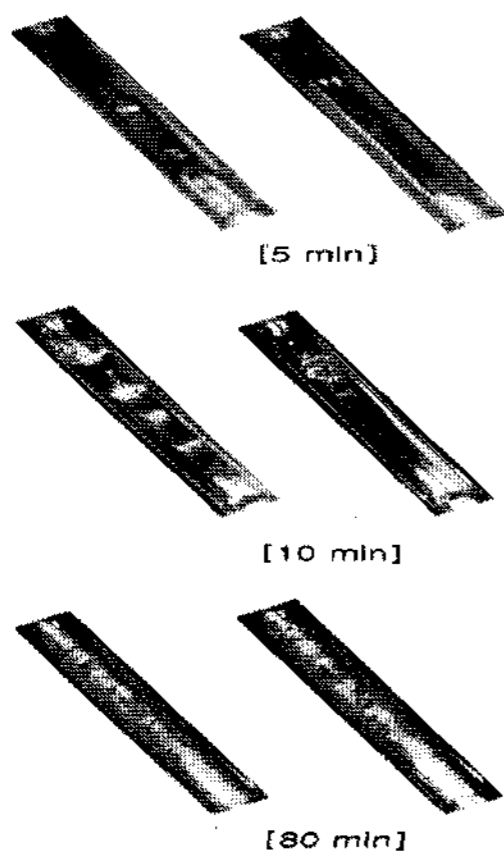


그림 8. Photograph of flow pattern in thermosyphon(ethanol+water, 40%)

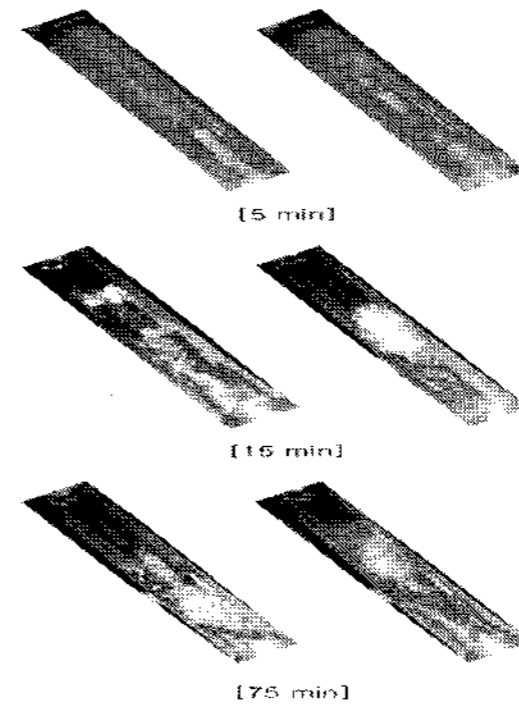


그림 9. Photograph of flow pattern in thermosyphon(ethanol+water, 60%)

4. 시스템 모델링

4.1 모델 설정

루프형태의 밀폐형 서모사이펀은 수학적 모델이 존재하지 않기 때문에 시스템 모델링을 위해서는 단기측정에 의한 실험 데이터를 근거로 시뮬레이션 결과와 데이터를 비교하면서 모델을 수정하게 된다. 서모사이펀 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 모델링하는 방법이 제시되었다. 본 연구에서는 J. D. Burch가 제안한 PSTAR(Primary and Secondary Term Analysis and Renormalization)방법을 적용하였다. PSTAR방법은 축열조 에너지 평형식을 구성하고 있는 에너지항들을 측정할 수 있는 항과 계산될 수 있는 항들로 구분하여 에너지 평형식을 만족하도록 계산될 수 있는 항들을 조절하는 방법이다.

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.

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

여기에서 Q_{aux} 와 Q_{draw} 는 단기측정시험으로부터 측정된 값이고 실제 시스템의 실제값이다. 나머지 항들은 시스템의 초기모델로부터 계산될 수 있다. 여기에서 핵심적인 단계는 Q_{solar} 를 1차항과 2차항을 구분하는 것이다. 식(1)에서 1차항은 시스템을 작동시키는 두 가지 주요 열전달 메커니즘에 의한 2개의 항이 존재한다. 즉, 태양열 획득항(Q_{sun})과 온도차에 의한 열손실항(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 Pi를 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.

$$Q_{sun} = F_R(\tau\alpha) \cdot IAM(T) \cdot I \cdot A_{col} \quad (3)$$

$$Q_{dt} = F_R U_L \cdot A_{col} \cdot (T_{in} - T_{amb}) \quad (4)$$

$$Q_{other} = 0 \quad (5)$$

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

$$Q_{aux} + Q_{draw} + Q_{loss} + P_{sun} \cdot Q_{sun} + P_{DT} \cdot Q_{dt} + Q_{other} = 0 \quad (6)$$

모델이 정확하다면 Pi항들은 1이 되고 에너지 평형식을 만족시킬 것이다. 그리고 모델에 오차가 있을 때 Pi항들이 1에 근접하도록 1차항 계산을 조절한다. 식(6)에 있는 Q_{other} 를 계산하려면 열흐름항들을 각각 분리해서 시뮬레이션을 수행하여야 한다. 이러한 시뮬레이션은 3가지 즉, exact, sun, DT 시뮬레이션을 의미한다. exact 시뮬레이션은 배관, 외기온도, 일사량, 배수량 측정치로 수행된다. 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.

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

4.2 시뮬레이션 결과

정확한 시뮬레이션을 수행하려면 여러 조건에서 실험한 데이터를 확보하여 시뮬레이션과 결과를 비교 분석하여야 한다. 그래서 본 연구에서는 시스템에 가장 큰 영향을 미치는 일사량 조건 즉, 일사량이 높고 낮을 때와 외기온이 높고 낮을 때로 나누어 시뮬레이션을 수행하였다. 실험 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)의 네가지 측정데이터를 사용하였다.

그림 10은 모델링 과정을 근거로 TRNSYS 프로그램의 IISiBat환경에서 서모사이편 태양열 온수기 초기모델을 구성한 그림이다. 구성요소를

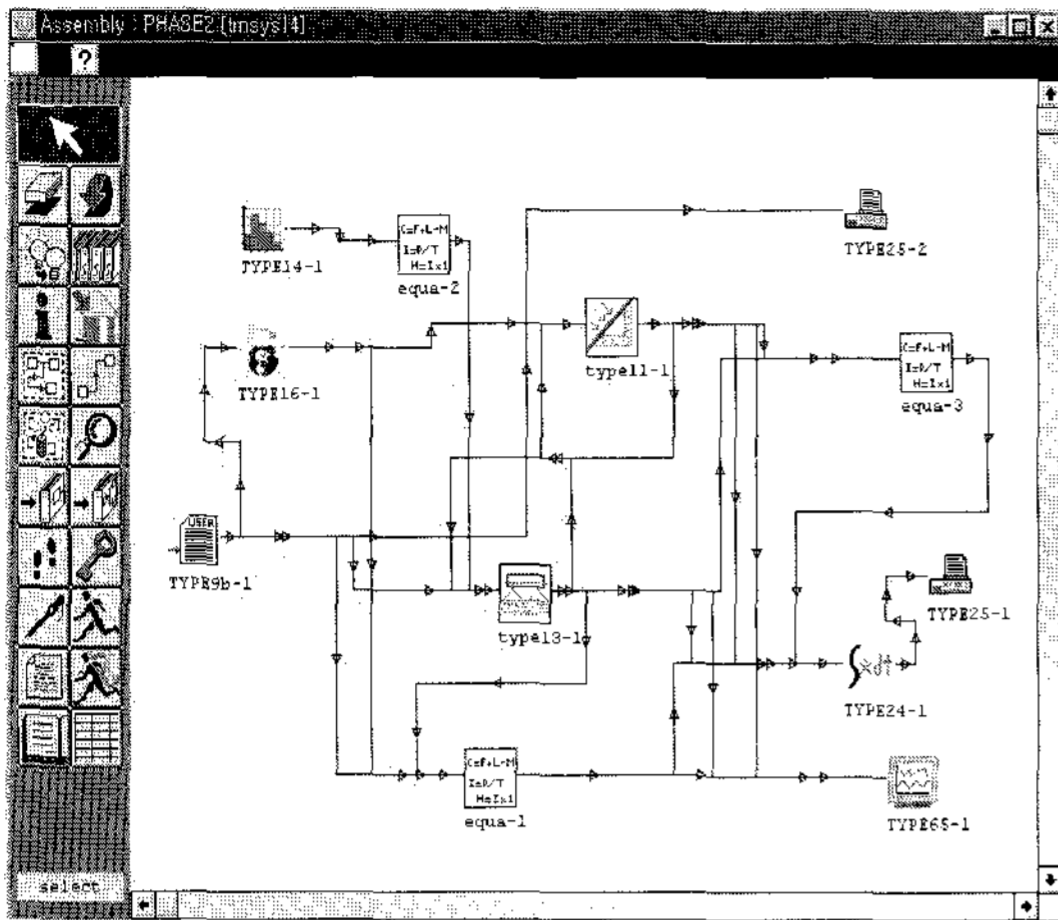


그림 10. Modelling of TRNSYS IISiBat Panel

보면 TYPE111 집열기 모델, TYPE138 축열조 모델이 핵심을 이루고 있다. 그림 11과 그림 12는 시뮬레이션을 통하여 얻어진 Q_{avail} 와 Q_{draw} 의 값을 측정된 데이터와 비교한 그림을 보여주고 있다. 이용가능한 에너지인 Q_{avail} 는 실험값과 매우 일치하는 것을 알수 있지만 배수에너지값은 조금 차이를 보이고 있다.

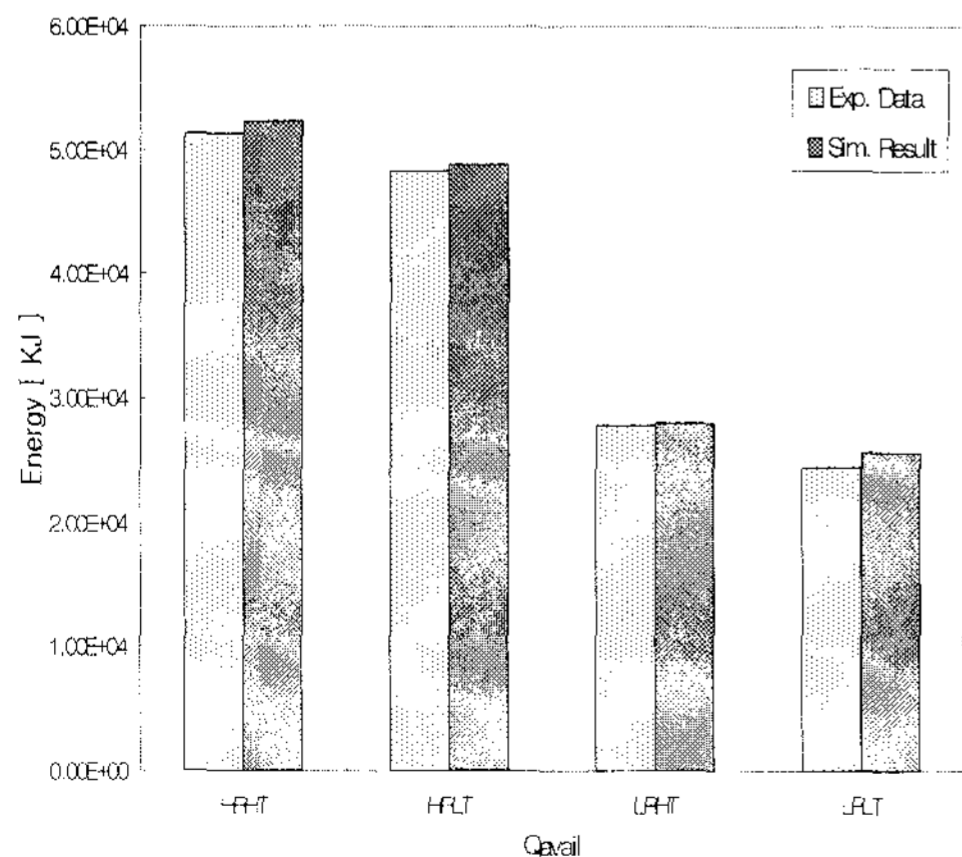


그림 11. Comparison of experiment data & simulation result (Q_{avail})

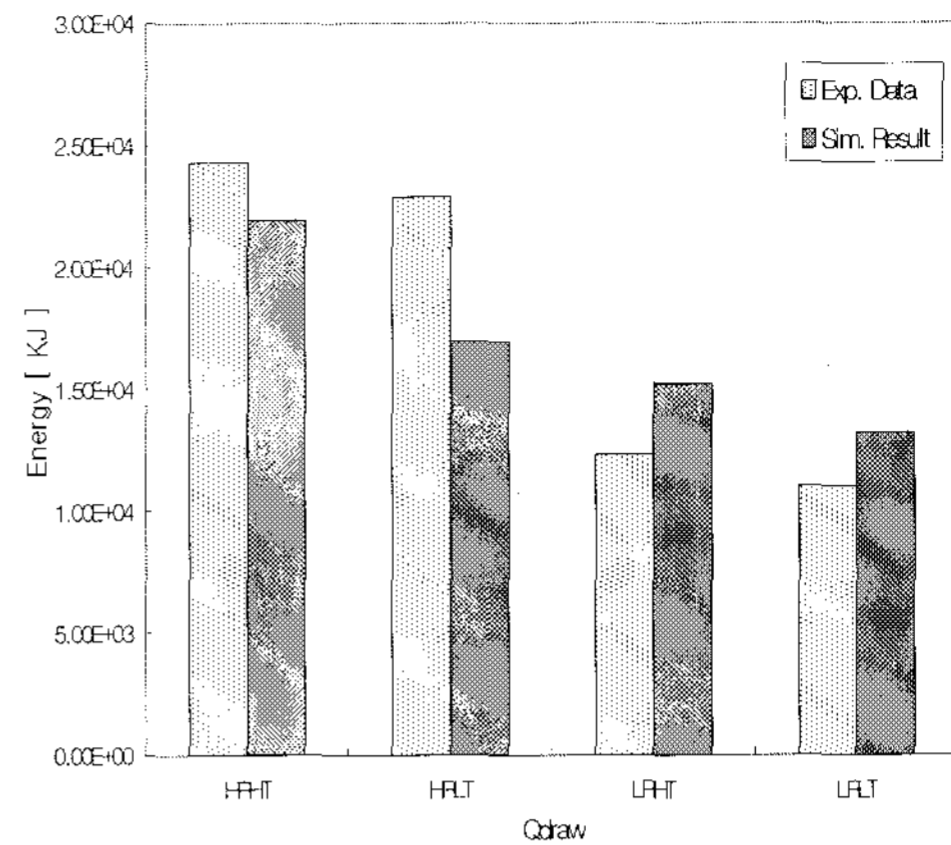


그림 12. Comparison of experiment data & simulation result (Q_{draw})

5. 결론

특성실험을 통하여 작동유체와 작동유체의 양에 따른 작동특성을 분석하였다.

1. 30%와 40%를 주입한 경우에는 어떤 작동유체를 사용하여도 열공급의 차이는 있지만 dry-out현상이 나타나는 것을 알 수 있었다. 50%, 60%, 70%를 주입하였을때는 거의 유사한 경향이 나타났지만 70%에서는 열교환을 거쳐 서모사이펀으로 들어가는 부분에서 액정체가 발생하였다. 이는 작동유체의 양이 많아서 생기는 현상으로 되돌아오는 리턴측부분에서 액의 과다로 인해 액정체가 발생한다는 것을 알 수 있었다.
2. 작동유체의 종류에 따라 작동특성을 비교하였는데 실제의 일사량과 같은 유사한 조건을 만들어 주기 위해서 열공급을 220W/m^2 에서 880W/m^2 로 증가하였다. 작동유체의 양은 60%로 주입하여 시스템 특성을 관찰하였다. 열공급을 증가하면 축열량과 효율도 증가하고 이성분인 경우가 다른 경우보다 조금 높게 나타난다는 것을 알 수 있었다.

3. 유동가시화실험에서는 40%와 60%를 주입하였는데 40%인 경우에 660 W/m²으로 증가하자 dry-out현상이 발생한다는 것을 관찰할 수 있었고 60%에서는 액흐름이 원활한 것을 볼 수 있었다.
4. 실외 성능 실험에서 얻어진 데이터를 기본으로 PSTAR방법을 적용하여 시스템 모델링을 수행하였다. 모델링은 TRNSYS 프로그램을 이용하여 구성인자들을 모델링하였다. 이용 가능한 에너지인 Q_{avail} 는 실험값과 매우 일치하는 것을 알 수 있지만 배수에너지값은 조금 차이를 보이고 있다. 이 원인은 실험에서 얻은 배수에너지와 프로그램상에서의 배수형태가 다른 것이 원인이 될 것이다. 그러므로 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 다양한 실험과 성능데이터를 통한 모델 구성으로 더욱 정밀한 모델링이 요구된다.

참고문헌

1. 곽희열, 김종보, 1995, "이성분 혼합물을 사용한 2상 밀폐 열사이폰의 작동특성에 관한 연구", 한국에너지공학회, Vol. 4, No. 1, pp. 95-102.
2. 강용혁등, 1998, "태양열 온수급탕 시스템 성능표준화 연구". 한국에너지기술연구소.
3. Burch, 1993, "Reconciliation of a simulation model with performance data for solar-hot-water systems", Building and Energy Systems Division, National Renewable Energy Lab.
4. TRNSYS MANUAL Univ, of Wisconsin Madison, 1994
5. J. A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar Energy Thermal Processes", Wiley, New York, 1974
6. 김철주, 강환국, 오광현, 1995, "밀폐형 2상 열사이폰내의 비등현상에 대한 가시 화 연구", 한국에너지공학회, Vol. 4, No. 2, pp. 261-269.
7. Casarosa C. and Latrofa E., 1983, "The geyser effect in a two-phase thermosyphon", Journal of the Heat Mass Transfer, Vol. 26, No. 6, pp. 933-941.
8. Kanji Negishi and Teruo Sawada, 1983, "Heat transfer performance of an inclined two-phase closed thermosyphon", Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 26, No. 8, pp. 1207-1213.k