

태양열을 이용한 상변화 Thermosyphon의 작동특성과 시스템 모델링에 관한 연구

김명철, 이윤준, 윤현식, 강용혁*, 윤환기*, 유창균*, 이동규*
제주대학교, *한국에너지기술연구소

Study on the operating characteristics and system modelling of loop type thermosyphon for using solar thermal energy

M. C. Kang, Y. J. Lee, H. S. Yoon,
Y. H. Kang*, H. K. Yoon*, C. K. You*, D. G. Lee*
Cheju National University, *KIER

1. 서론

전세계적으로 무분별한 화석에너지 사용에 따른 환경오염 문제와 에너지원의 고갈로 인하여 태양에너지는 대체에너지원으로 가장 유용한 에너지원이다. 대체에너지원으로의 태양에너지는 다양한 이용분야가 개발되어 실용화 되고 있는데 그중에서 온수급탕을 위한 연구로 자연형 태양열 시스템과 상변화형 시스템이 주류를 이루고 있다. 자연형 시스템의 개발과 실용화로 얻어진 기술을 바탕으로 기후에 적합한 상변화를 이용하는 시스템 개발을 추진하고 있는 실정이다.

상변화형 써모사이폰은 루프내의 작동유체가 열공급에 따라 증발과 응축을 연속적으로 일으키며 자연순환하는 장치이다. 써모사이폰은 기-액 2상 유동에서 증발과 응축의 상변화 과정을 통하여 높은 열전달을 얻을 수 있다. 이것은 증기 유동에 따라 열응답성이 대단히 빠르고, 작은 온도차에서 높은 열이송을 나타내는 전열소자이기 때문이다. 열사이폰의 작동원리는 증발부와 응축부 사이의 증기압차와 중력장에 의하여 작동유체의 유동이 일어난다. 열사이폰은 증발과 응축의 잠열을 이용하는 작동원리는 열 파이프와 비슷하지만 작동유체가 응축되어 증발부로 귀환하는 방법에서 커다란 차이가 있다. 열사이폰은 작동유체가 밀폐되어진 루프내에서 열이 적용되면 액체의 일부는 증발되어 상승하고 응축부에 설치된 열교환기에 의해서 열을 전달하여 중력으로 인하여 증발부로 다시 이동된다. 이런 원리로 인하여 열사이폰은 특별한 구동력이 필요없이 연속적으로 자연순환하게 된다.

이런 작동원리로 인하여 상변화형 써모사이폰은 자연대류형 태양열 집열기에 비하여 많은 장점이 있다. 집열면적을 소형화하고 구조가 간단하며 열응답성이 빠르고 작은 온도차에서도 높은 열을 이송한다. 그리고 작동유체의 종류에 따라 작동온도의 범위를 넓힐 수 있다.

열사이폰에 대한 기존의 연구들을 보면 일체형에 대한 열전달 특성을 고찰한 것이 대부분이다. 이런 루프형태의 작동특성에 대한 것은 거의 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 루프형태의 써모사이폰에서 작동유체에 대한 작동특성과 성능실험을 수행하였다. 그리고 작동유체에 대한 유동현상을 고찰하였다. 성능실험에서 얻어진 성능 데이터를 이용하여 상변화형 써모사이폰 시스템을 모델링 하였다. 시스템 모델링을 통하여 상변화형 써모사이폰을 제작, 보급하는데 도움이 될 것이다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실내 작동특성 실험

상변화형 시스템의 작동특성 분석을 위하여 실내 실험에 사용한 장치로는 평판형 써모사이폰, 축열조, 진공장치(rotary pump, 10^{-3} Torr.), 평판형 히터, 열입력 장치, 항온조, 데이터 수집장치로 구성되어 있다. 실험에 사용된 상변화형 시스템의 개략도는 Fig. 1과 같다. 집열부에서의 써모사이폰은 구리판에 직경이 9.52mm인 구리관이 145mm 간격으로 구부러져 하나의 루프로 연결되어 있고 총 길이는 20m이다. 축열조에는 Spiral형태의 열교환기가 있고 집열판의 구리판과 연결되어 있다. 평판위에는 일사량 조건과 유사하게 가열을 하기 위해 평판형 히터가 있다. 히터에 가하는 열부하는 전압계와 슬라이다스를 이용하여 조절하였고 항온조와 온수탱크는 일정한 온도의 물을 축열조에 공급하기 위해서 사용되었다. 온수탱크에는 온도 조절기가 설치되어 온수의 온도를 조절할 수 있도록 하였다.

전체적인 시스템은 실제로 설치되는 각도인 40° 로 경사지게 설치하였다. 축열조에는 초기 성층화를 없애주기 위해서 온수 순환 펌프가 이용되었다. 내부 진공 및 작동유체의 충진을 위해서 축열조로 들어가는 상승관에 구리관을 이용하여 진공 펌프와 작동유체 충전용 매스실린더를 연결하는 3-way valve를 설치하였다. 그리고 집열판과 축열조의 상승관과 하강관은 작동유체의 내부 유동을 관찰하기 위해서 투명한 튜브로 연결하였다.

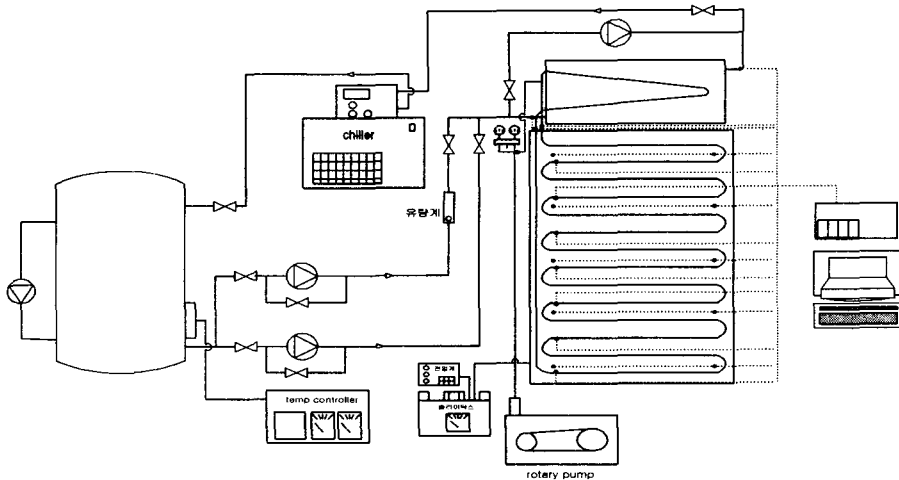


Fig. 1 Schematic diagram of Thermosyphon & vacuum system

써모사이폰 내부는 공기가 전혀 없게 진공을 잡기 위해서 rotary pump를 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 충전하기 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)를 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 넣어 매스실린더의 밸브를 천천히 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 증발부인 써모사이폰 체적의 30%, 40%, 50%, 60%, 70%를 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 최소220 W/m^2 에서 최대 880 W/m^2 인 범위에서 수행하였다.

2.2 실의 성능실험

먼저 하루동안의 집열량을 구하기 위해서 전날 저녁에 축열탱크의 물을 완전히 배수하여 축열탱크에 잔여 열량이 남지 않게한다. 다음날 아침 8시경에 축열탱크에 물을 채우고 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 온수를 끌고루 섞어 측정하여 하루동안 얻은 열량을 계산하였다. 이 계산된 열량을 시스템 모델링에 이용하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 실내 특성분석

작동특성분석에서는 상변화형 써모사이폰의 작동특성을 관찰하기 위하여 루프형태의 써모사이폰을 제작하였고 열교환기가 부착되어 있는 축열조를 연결하였다. 작동특성 실험은 써모사이폰의 작동유체의 종류와 양을 결정하기 위해 두가지로 나누어 수행하였다. 주입한 작동유체로는 에탄올, 증류수, 에탄올/증류수 혼합물을 사용하였고 증발부 체적의 30%, 40%, 50%, 60%, 70%를 주입하였다. 공급된 열부하는 평판형 히터를 사용하여 440 w/m^2 , 660 w/m^2 , 880 w/m^2 의 열을 연속적으로 가해주면서 시스템의 작동특성을 분석하였다.

30%와 40%를 주입하였을 때에는 응축부로 상승하는 부분에서 액마름 현상이 나타났다. Fig. 2은 에탄올 50%, 60%, 70%를 주입한 경우의 축열량과 효율을 나타내는 그림이다. 그림에서 보이는 것과 같이 50%인 경우보다는 60%, 70%인 경우가 축열량과 효율면에서 좋은

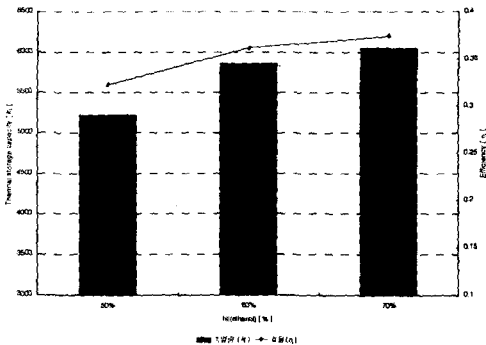


Fig. 2 Thermal storage capacity & efficiency of system at fill charge (ethanol 50%, 60%, 70%)

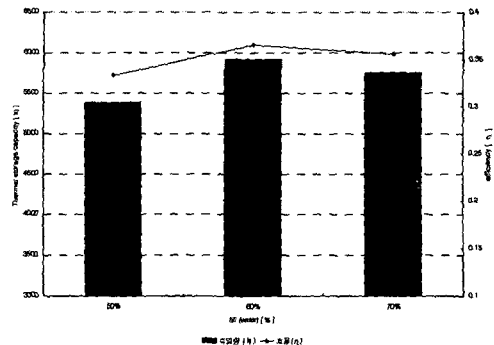


Fig. 3 Thermal storage capacity & efficiency of system at fill charge (water 50%, 60%, 70%)

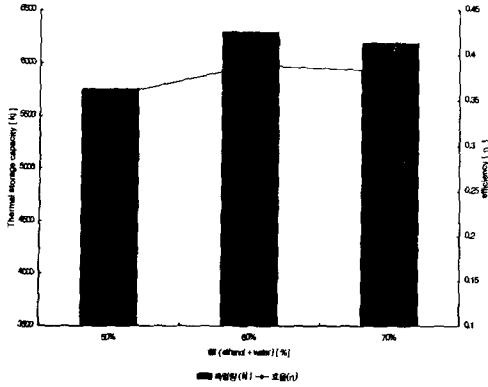


Fig. 4 Thermal storage capacity & efficiency of system at fill charge (ethanol+water 50%, 60%, 70%)

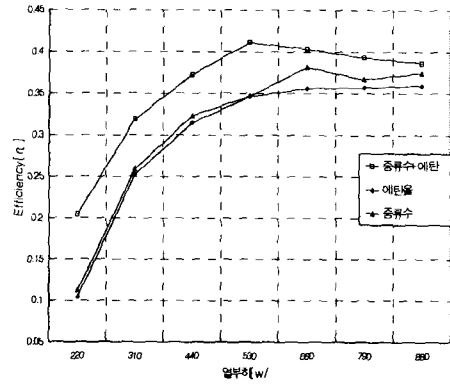


Fig. 5 System efficiency for heating capacity during different working fluid (fill charge = 60%, ethanol, water, ethanol+water)

결과를 보이고 있다. 70%인 경우가 60%보다도 결과는 좋지만 시스템 작동면에서는 70%인 경우에는 증발부로 되돌아 오는 리턴측부분에서 액이 많으므로 인하여 액정체가 발생한다는 것을 알 수 있었다. 증류수 30%와 40%를 주입한 경우도 앞서 나타났던 액마름 현상이 발생하였다. Fig. 3은 증류수 50%, 60%, 70%를 주입하였을 때 보이는 효율과 축열량의 그림이다. 축열량과 효율면에서 50%보다 60%, 70%에서 높게 나타났으며 상대적으로 60% 주입한 경우가 조금 높은 것을 알 수 있다. 그리고 70%에서는 물론 에탄올인 경우에도 액정체는 발생하였지만 증류수인 경우가 크게 나타났다. Fig. 4은 세가지 작동유체를 50%, 60%, 70%를 주입한 경우의 축열량과 효율에 대한 그림이다. 커다란 차이는 없지만 에탄올과 증류수를 혼합한 이성분인 경우가 조금 좋은 결과를 보이고 있다.

Fig. 5은 작동유체를 세가지 종류에 유체량을 60%로 주입하고 열공급을 변화시키면서 열부하에 따른 효율을 알아 보았다. 작동유체에 대한 결과를 보면 에탄올과 증류수의 혼합물이 상대적으로 좋은 결과를 보인다는 것을 알 수 있었다.

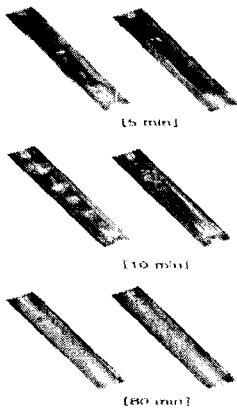


Fig. 6 Photograph of flow pattern in thermosyphon(ethanol+water, 40%)

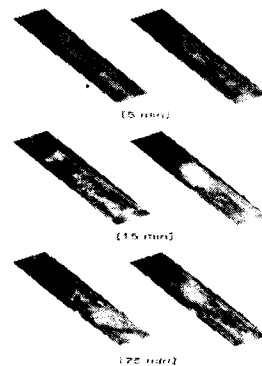


Fig. 7 Photograph of flow pattern in thermosyphon(ethanol+water, 60%)

작동유체로 에탄올과 증류수의 이성분 혼합물을 사용하여 주입량 40%와 60%의 경우를 사용하였다. Fig. 32은 작동유체로 에탄올과 증류수의 혼합물 40%를 주입한 경우에 나타나는 유동현상을 보여주고 있다. 열공급이 660w/m^2 을 가하였을 때 액마름 현상이 일어난다는 것을 볼수 있다. Fig. 33은 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. 작동유체의 주입량이 40%로 상대적으로 적을 경우에는 열공급이 낮은 경우에는 폭발적으로 액이 상승하지만 열공급이 많은 경우에 드라이 아웃 현상이 관찰되었다. 작동유체를 60%로 많이 한 경우는 비등이 폭발적으로 일어나는 것을 알 수 있었다.

4. 시스템 모델링

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. 본 연구에서는 J. D. Burch가 제안한 PSTAR(Primary and Secondary 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.

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

2개의 1차항을 계산하는데 따른 오차를 설명하기 위해서 간단한 스칼라 변수 P_i 를 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)를 식(1)에 대입하고 dQ_{int} 가 무시될 수 있도록 시간에 대해 적분을 수행하면 PSTAR방법론에 기초가 되는 다음과 같은 회귀분석식을 유도할 수 있다.

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

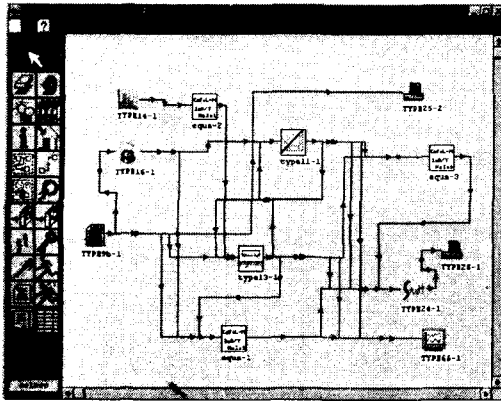


Fig. 8 Modelling of TRNSYS IISiBat Panel

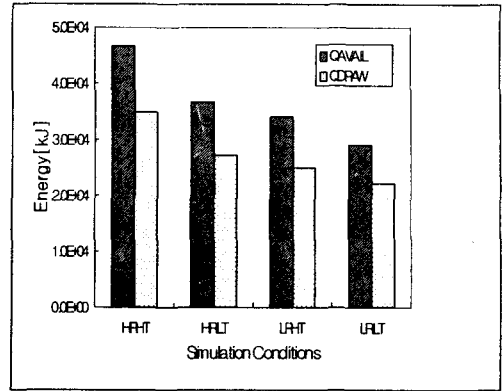


Fig. 9 Simulation result

Fig. 8은 TRNSYS 프로그램을 이용하여 모델링한 것을 나타내고 있다. Fig. 9은 시뮬레이션을 수행하여 얻어진 결과를 보여주고 있다.

5. 결론

작동특성실험을 통하여 작동유체와 작동유체의 양을 분석하였다.

1. 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.
2. 작동유체의 종류에 따라 작동특성을 비교하였는데 일사량과 같은 조건을 맞추기 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 나타났다.
3. 가시화에서는 40%인 경우에 660w/m^2 으로 증가하자 액마름 현상이 발생한다는 것을 관찰할 수 있었고 60%에서는 액 흐름이 원활한 것을 볼 수 있었다.
4. 실외 성능 실험에서 얻어진 데이터를 기본으로 PSTAR방법을 적용하여 시스템 모델링을 수행하였다. 모델링은 TRNSYS 프로그램을 이용하여 구성인자들을 모델링하였다. 이렇게 시뮬레이션 결과를 실험 데이터와 비교하면 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다.

참고문헌

1. 광희열등: "이성분 혼합물을 사용한 2상 밀폐 열사이폰의 작동특성에 관한 연구", 한국에너지공학회, (1995)
2. 강용혁등: "태양열 온수급탕 시스템 성능표준화 연구". 한국에너지기술연구소, (1998)
3. Burch: "Reconciliation of a simulation model with performance data for solar hot water systems", (1993)
4. Klein: "TRNSYS User Guide", University of Wisconsin, solar energy laboratory, (1991)