

루프형 2상 유동 열사이폰의 유동 불안정에 관한 실험적 연구

이 석 호[†]

한국에너지기술연구원

Experimental Study on Instability of Two-Phase Loop Thermosyphon

Seok-ho Rhi[†]

Korea Institute of Energy Research, Waste Heat Utilization Research Center,
Jang-dong 71-2, Yusong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received March 5, 2002; revision received April 17, 2002)

ABSTRACT: The instability of two-phase loop thermosyphons (TLTs) was investigated experimentally. Three orifice type inserts were used to study the effect of change in the pressure drop in the flow channel of the TLT on the flow instability and temperature fluctuation. It is observed that a decrease in the size of the orifice insert from 3.7 mm (no insert) to 0.71 mm drastically reduced the fluctuation of the temperature, especially at the evaporator section of the TLT. With the orifice type insert of 0.71 mm for the TLT, the overall temperature fluctuation was almost completely eliminated, especially at higher power input to the TLT.

Key words: Two-phase loop thermosyphon(루프형 2상 유동 열사이폰), Instability(불안정), Orifice insert(관 삽입)

기 호 설 명

하첨자

l : 길이 [m]
 P : 압력 [Pa]
 Q : 열전달량 [W]
 t : 온도 [°C]
 t_c : 냉각유체온도 [°C]
 t_{h-c} : 열원과 냉각유체 사이 온도차 [°C]
 u : 속도 [m/s]
 V_{WF} : 체적 [ml]
 WF : working fluid

c : condenser section, cold
 h : heater
 max : maximum
 tp : two phase flow

1. 서 론

2상 유동 루프형 열사이폰(two-phase loop thermosyphon)은 펌프 같은 기계적 요소 없이 증발부와 응축부 사이의 열에 의해 발생한 밀도 차이에 의해 유체유동이 일어나는 열전달장치이다. 2상 유동 루프형 열사이폰은 보통 자연순환 루프(natural circulation loop), 자연대류 루프(natural convection loop), 혹은 분리형 루프 히트 파이프(separate loop heat pipe)라고도 한다. 2상 유동 루프형 열사이폰이 어떤 외부로부터의 동력 공급

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3165; fax: +82-42-860-3133

E-mail address: srhi@kier.re.kr

없이 자연대류에 의해 작동한다는 사실 때문에 다양한 이름이 붙여져 있다.

2상 유동 루프형 열사이폰은 크게 증발부, 응축부, 그리고 두 부분을 연결해 주는 수송부로 나누어져 있다. Wick을 가진 히트 파이프와는 달리, Wick을 갖지 않는 단순 파이프의 연결체이기 때문에 루프형 열사이폰은 증발부와 응축부 사이의 유체순환을 위한 압력차를 발생시키기 위해 응축부가 어느 정도의 거리를 두고 증발부보다는 상부에 위치하는 것이 일반적인 형태이다.

2상 유동 루프형 열사이폰은 증발부와 응축부 사이에서 발생하는 밀도 차이의 결과인 루프 내의 부력(buoyancy force)에 의해 유체유동이 발생한다. 그렇기 때문에 응축부 부근의 유체는 밀도가 조밀하며, 증발부 쪽으로 이동하려는 성질이 있다. 반대로 증발부 부근의 유체는 가열해짐에 따라 상승하려는 경향이 발생하게 된다. 이는 결과적으로 유체는 루프 전체를 따라서 증발부에서 응축부로 그리고 다시 증발부로 순환하게 된다. 그러나 유체는 순환하면서 루프형 열사이폰의 각 부분에서 발생하는 마찰력 때문에 유체의 순환은 언제나 연속적으로 원활히 순환하는 것은 아니다. 마찰력은 유체순환을 방해하는 방향으로 유체의 순환방향과 반대방향으로 작용하게 되며, 그 크기는 유체속도가 증가함에 따라 커지게 된다. 마찰력이 부력과 동일할 정도로 커지면 유체 유동방향에서 유체에 작용하는 힘은 영(0)이 된다. 그러므로 더 이상의 유체의 가속은 없게 되며, 증발부와 응축부의 열적 상태에서 일정한 유량을 갖게끔 유지된다. 또한 증발부로 유입되는 유체는 항상 일정한 온도를 유지하게 되며, 유체의 유동속도는 증발부와 응축부의 밀도차에 의해 지배된다. 어떤 상황에서는 이런 상태의 루프 시스템은 불안정해질 수 있으며, 즉 온도분포의 작은 변동은 유동속도의 큰 변동을 야기할 수 있다. 이런 현상은 루프형 열사이폰의 작동시 발생하는 일반적인 현상이다.

2상 유동 열사이폰에서의 상변화 열전달은 속도, 온도, 압력 등의 변동을 항상 수반하며, 특히 상변화가 일어나는 조건에서는 비평형 현상이 나타나므로 2상 유동에서는 유동의 안정화를 유지한다는 점이 매우 중요하다.

루프 내의 유동 불안정현상을 이해하기 위해서는 먼저 유동 불안정현상의 종류를 알아보면, 2

상 유동의 불안정은 크게 정적 불안정과 동적 불안정으로 나눌 수 있다. 정적불안정은 유동에 교란이 생겼을 때, 한 평형상태에서 다른 평형상태로 옮겨 가서 원래의 상태로는 복귀하지 않는 불안정이며, 정적 불안정은 일반적으로 루프 내의 유속의 감소로 2상류의 건도가 증가하고 이로 인해 체적유속이 증가하게 되어 마찰에 의한 압력강하의 증가가 그 원인일 것이다. 동적 불안정은 한 루프의 평형상태를 중심으로 유동이 진동하는 불안정을 의미한다. 동적 불안정의 경우는 작동 유체의 증발부로의 유입량, 밀도, 그리고 압력강하 사이의 피이드백 시간지연에 따라 발생하는 불안정현상이다. 2상 유동 루프형 열사이폰에서의 유동 불안정은 정적 혹은 동적 어느 한쪽에 의한 불안정 요인이 발생한다기보다는 복합적인 요인으로 발생하게 된다.⁽¹⁾ 루프의 유동 불안정을 이해하기 위해서는 루프 내의 압력강하와 유량 사이의 관계, 작동유체의 특성 등을 이해한다면 이를 줄이는 방법을 찾을 수 있으며, 본 연구에서는 오리피스를 증발부 입구에 삽입하는 방법을 통하여 증발부 유입 작동유체의 유속을 증가시켜 압력강하를 줄이는 방법으로 유동 불안정 요인을 줄이고자 하였다. 이런 현상의 이해를 위한 많은 노력들이 이루어졌으며, 참고문헌^(2,3,4,5)을 통해 알아볼 수 있다.

2상 유동 열사이폰에서의 오리피스를 사용한 유동 불안정 현상의 감소시키려는 시도는 Imura et al.⁽⁶⁾에 의해 시도된 바 있으나, 14 mm와 20 mm의 관 규격을 가진 루프에서의 하나의 정해진 규격을 통한 실험적 연구였다. 본 연구에서는 2상 유동 열사이폰의 작동에 있어서 유동 불안정 현상을 실험적으로 연구하였으며, 이런 유동 불안정 현상을 줄이기 위한 방법을 연구하였다. 여러 가능성에 대한 실험적인 연구를 수행하였으며, 증발부 입구에 다양한 규격의 오리피스를 사용함으로써 불안정 현상을 감소시키는 방법을 연구하였다.

2. 실험장치

Fig. 1에 보이는 것처럼 본 연구에서 수행된 루프형 열사이폰은 전자부품 냉각용으로 개발된 시스템으로 열원(heat source)과 냉각유체 사이의 온도차가 50℃일 경우에 최대 150 W(12 W/cm²)

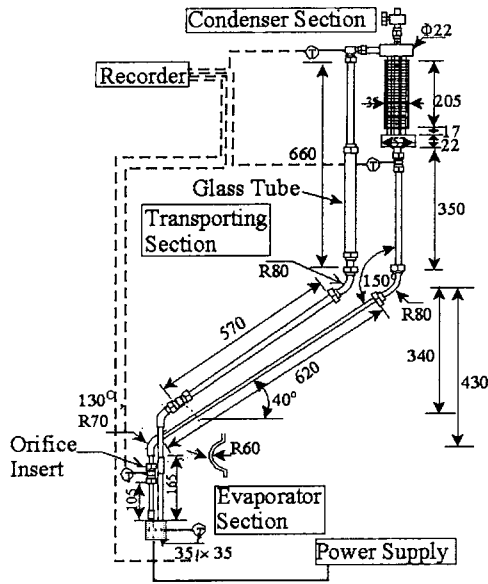


Fig. 1 Experimental setup.

이상의 열전달성능을 갖도록 설계되었다. 실험장치에 대한 자세한 설명은 참고문헌^(7,8)에 잘 기록되어 있다. 실험을 위해 개발된 루프형 열사이폰은 크게 증발부와 응축부, 그리고 그 사이를 유체가 이동할 수 있도록 연결된 수송부로 구성되어 있다.

증발부는 구리(copper)를 재료로 하여 35 mm × 35 mm × 9.5 mm로 사각형 상자의 형태를 하고 있으며, 유효 열전달면적은 35 mm × 35 mm이다. 증발부는 제작과정을 간편하게 하기 위하여 내부에 5.6 mm 드릴로 위로부터 4개 그리고 측면으로부터 4개로 합이 8개의 작은 터널을 만들었으며, 이는 증발부 내부에 여러 개의 연결된 미세 유로를 형성하도록 하였다. 증발부는 상부에 두 개의 구멍을 만들어 황동관으로 된 수송부와 연결되도록 하였다.

발열체는 3.5 mm × 3.5 mm 크기로 발열면적을 갖도록 전자 칩(chip)을 모사하기 위한 형태로 특별히 제작되었으며, 최대발열량 200 W까지의 열원을 공급할 수 있도록 제작되었다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 응축부는 직사각형 핀(fin)이 황동관 외벽에 접착된 형태로 3.2 mm 간격으로 63개의 핀을 접착하였다. 응축부는 7.9 mm 외경인 3개의 관이 응축부의 입구와 출구에 헤더(header)에 연결된 형태이다.

증발부를 기준으로 출구 쪽으로 연결된 수송부

는 외경 7.9 mm 황동관을 연결하였고, 증발부 입구 쪽에는 외경 6.4 mm의 황동관을 연결하였다. 증발부 입출구 쪽에는 루프 내의 유동 불안정을 해소하기 위한 목적으로 서로 다른 직경의 관을 연결하도록 했다.

증발부 입구 쪽에는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 오리피스 insert를 삽입할 수 있도록 만들었다. 이는 루프의 유동 불안정을 줄이기 위한 목적이다. 오리피스가 없을 경우 관 내경은 3.7 mm였으며, 오리피스 insert는 내경이 0.51 mm, 0.71 mm, 그리고 1.2 mm의 3가지 규격을 삽입할 수 있도록 설계되었다.

작동유체는 물, 에탄올, 아세톤, R-11, R-113, FC-72, FC-87 등 7가지의 작동유체를 사용하였으나, 본 논문에서는 물을 작동유체로 사용하여 얻은 실험결과만을 제시하고자 한다.

루프형 열사이폰의 유동 불안정 현상을 실험하기 위하여 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 4곳에 열전대를 삽입하였다. 루프 전체에 17개의 열전대가 연결되었으나, 본 유동 불안정 현상을 관찰하기 위해서는 Fig. 1에 보이는 것처럼 4곳의 열전대에서 얻어지는 온도를 관찰하였다. 열전대로부터 얻어진 온도변동은 루프의 작동시간 동안 연속적으로 기록지에 기록되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2은 루프형 열사이폰의 가열을 시작하여 일정시간 동안의 증발부에 삽입한 열전대의 온도변화를 보여주고 있다. 가열을 시작하여 온도는 70°C 가까이 상승하였다가 다시 50°C로 떨어져서 일정주기를 갖고 연속적인 온도진동(oscillation)이 관찰되었다. 가열을 시작하여 최고점까지 상승하는 시점이 증발이 시작되어 기포가 형성되기

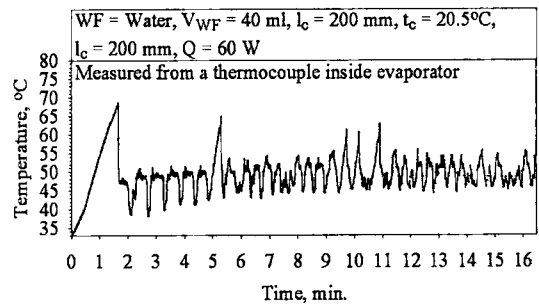
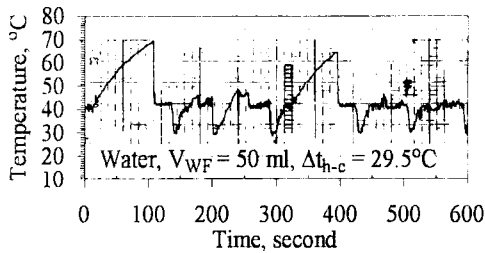


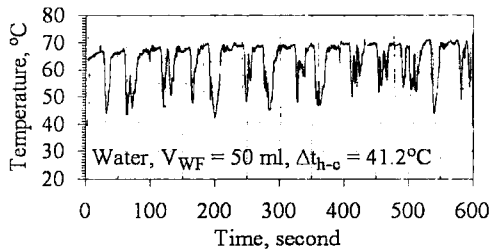
Fig. 2 Temperature fluctuation from startup.

시작하는 점이리라 예상되며, 계속되는 온도진동은 기포의 형성과 성장, 그리고 다시 소멸되는 과정에서 발생하는 현상일 것이다. 증발부 벽면에서 형성된 기포의 이탈속도도 증발부의 열전달속도를 증가시킨다. 증가된 증기유동은 응축부의 응축액막의 두께를 얇게 만들며, 응축부에서의 열전달능력을 증가시킨다. 반면에 유체유동의 온도변동(fluctuation)은 루프형 열사이폰 전체를 통하여 유동저항을 증가시키는 경향이 있으며, 유체유동속도를 감소시키고, 결국은 루프 시스템의 열 및 물질전달능력을 저하시킨다. 온도변동폭이 커질 경우에는 루프의 진동(vibration)을 야기시키고 소음을 유발하게 된다.

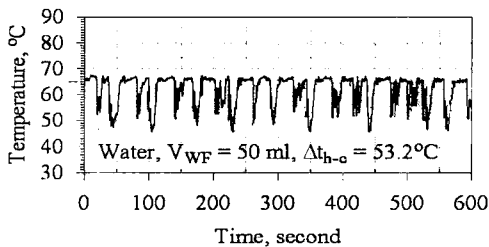
Fig. 3은 오리피스가 삽입되지 않았을 경우에



(a) $Q=30$ W, no insert



(b) $Q=100$ W, no insert

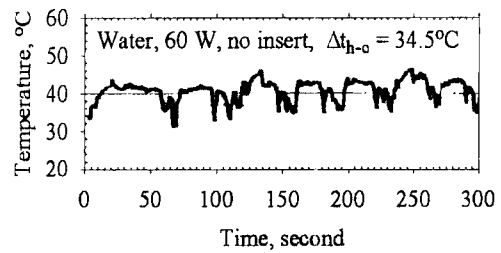


(a) $Q=120$ W, no insert

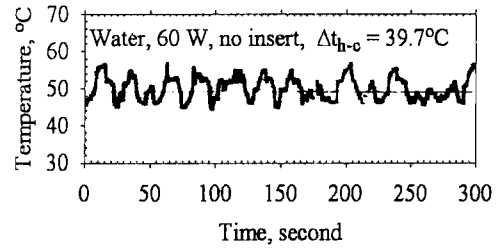
Fig. 3 Temperature fluctuation with different heat transfer rate thermocouple inside evaporator.

대하여 증발부 내부 온도진동의 심각함을 보여주고 있다. 진동하는 온도변동에 공급되는 열량이 미치는 영향을 보여주고 있다. 물을 작동유체로 사용하였을 경우 루프 시스템의 온도변동은 전체 작동범위에서 심각하였다. 그림에서 보이는 것처럼 공급열량의 증가와 함께 온도변동의 주기가 짧아졌을 뿐, 온도변동은 크게 감소하지 않았다.

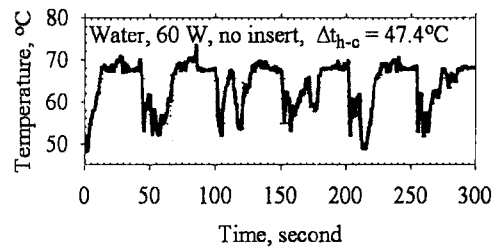
본 연구에서는 루프형 열사이폰의 유동 불안정에 관한 실험적인 연구를 통하여 유동 불안정에 영향을 미치는 응축부 길이, 응축부의 냉각유체의 공급유속, 그리고 작동유체의 주입량 등 다양한 요인에 대한 실험이 수행되었다. 실험을 통하여 응축부 길이와 응축유체의 유속은 유동 불안정을 감소시키는 데 별다른 영향이 없었으며, 응



(a) $V_{WF}=30$ ml



(b) $V_{WF}=40$ ml



(c) $V_{WF}=50$ ml

Fig. 4 Temperature fluctuation with different working fluid amount thermocouple inside evaporator.

축부 길이와 유속의 증가는 열전달능력은 다소 증가되었으나 온도변동은 계속되었다.

Fig. 4에서는 동일한 열량을 공급하였을 경우에 작동유체의 주입량이 유동 불안정에 미치는 영향을 보여주고 있다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 물이 40 ml 주입되었을 경우에 온도변동폭은 감소하였으며, 50 ml 주입시 변동폭이 증가하는 것으로 나타나 있다. Ishii⁽⁹⁾는 작동유체의 증가와 함께 유동 불안정은 감소하는 것으로 보고하였으나, 본 실험에서 볼 수 있듯이 작동유체의 주입량에 따라 유동 불안정이 영향을 받고 있으므로 루프의 가정 안정된 작동을 위한 작동유체의 최적 주입량을 찾아야 함을 알 수 있다.

실험을 통하여 루프형 열사이폰의 유동 불안정은 작동유체가 물일 경우에는 공급열량의 전체범위를 통하여 심각하였다. 본 실험적인 연구에서는 이러한 루프형 열사이폰의 유동 불안정을 감소시키기 위한 방법으로 증발부 입구부에 오리피스 insert를 삽입하는 방법 통하여 유동 불안정을 크게 감소시킬 수 있음이 관찰되었다.

본 실험에서 내경이 0.51 mm, 0.71 mm, 그리고 1.2 mm인 3가지 종류의 오리피스 insert가 사용되었으며, 실험결과는 1.2 mm일 경우는 여전히 유동 불안정 현상이 관찰되었으며, 0.51 mm일 경우

에는 유동 불안정 현상은 감소되었으나 내부의 작동유체의 유동이 원활치 않아 오히려 작동이 멈추는 현상이 발생하였으며, 0.71 mm의 오리피스 insert를 삽입했을 경우에 유동 불안정 현상도 감소하였으며, 루프의 작동도 원활하였다. Fig. 5는 0.71 mm 오리피스 insert를 삽입했을 경우 공급열량에 따른 가열부의 온도변동폭의 변화를 보여주고 있다. 작동유체주입량이 50 ml일 경우 Fig. 3과 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 오리피스 insert가 없을 경우에 공급열량에 상관없이 유동 불안정상태가 심각하여 증발부 내부의 온도진동이 심각하였으나, 그림에서 볼 수 있듯이 0.71 mm의 insert를 삽입시는 30 W 이상의 열량에서는 온도진동폭이 거의 사라지는 것으로 관찰되었다.

Fig. 6은 서로 다른 규격의 오리피스 insert를 사용시에 열전달성능과 유동 불안정 현상을 실험한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 0.71 mm의 insert를 사용시에 유동 불안정 현상도 많이 감소했으며, 열전달성능 또한 향상되었음을 볼 수 있다. 그러므로 오리피스 insert를 사용하는 것이 유동 불안정 현상을 감소시킬 수 있을 뿐 아니라, 열전달성능에도 영향을 미치는 것으로 관찰되었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 오리피스 내경이 작아짐에 따라 유동 불안정 현상이 감소할 것

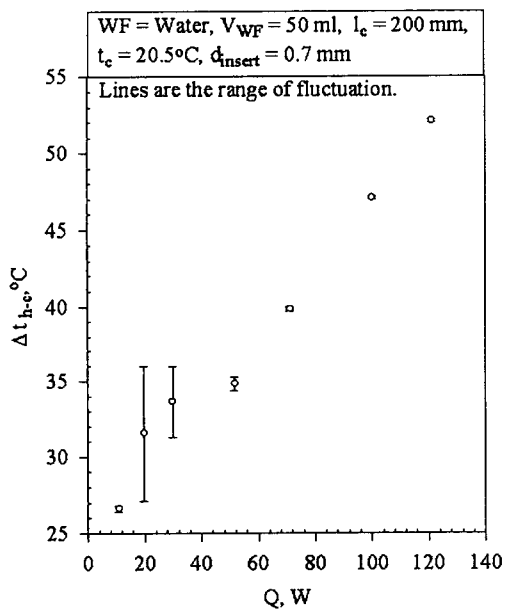


Fig. 5 Effect of Q on temperature fluctuation.

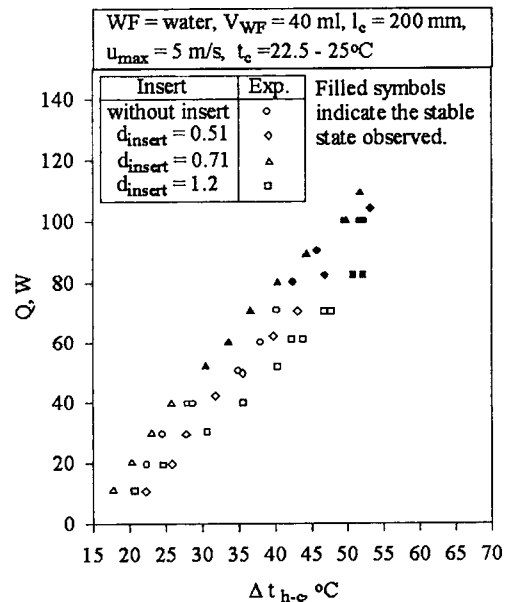


Fig. 6 Instability map with different orifice insert sizes.

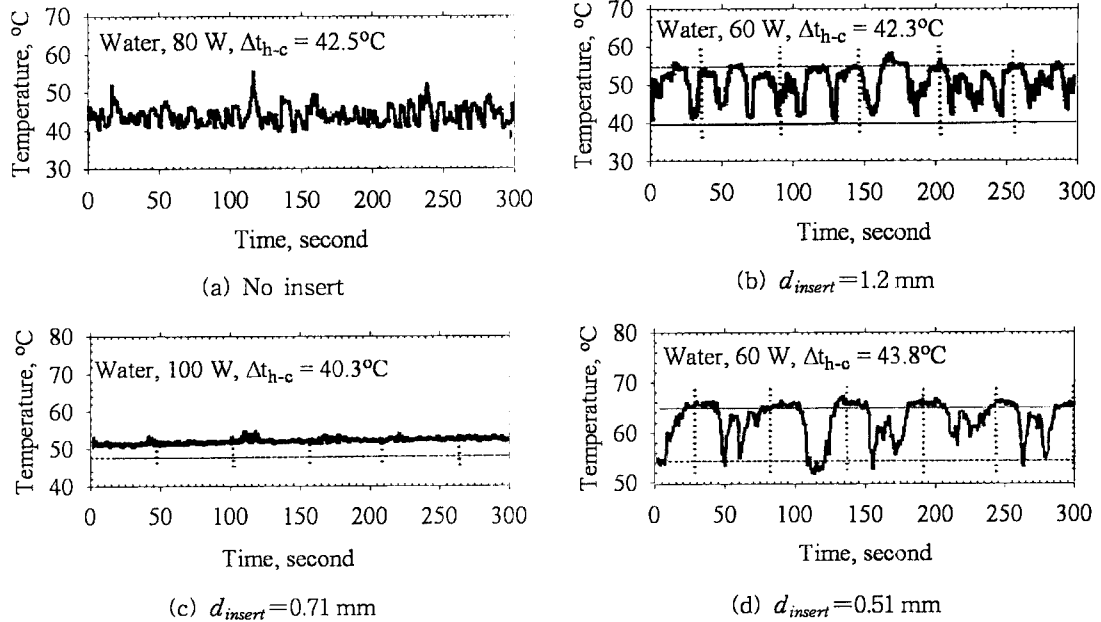


Fig. 7 Effect of insert size thermocouple inside evaporator.

이라는 예상과는 달리 0.51 mm와 1.2 mm insert 를 사용시는 insert를 사용치 않았을 경우보다 루프의 불안정 현상은 크게 감소하지 않았으며, 열전달성능 면에서는 오히려 성능이 떨어지는 경향을 보여주고 있다. 이런 경향은 Fig. 6과 Fig. 7에서 쉽게 관찰할 수 있다. Fig. 7에서는 Δt_{h-c} 가 40~45°C의 범위에서 오리피스 insert의 영향을 비교하였다. 그림에서처럼 동일한 Δt_{h-c} 범위에서 0.71 mm 오리피스를 삽입했을 경우 온도진동 현상이 현저히 사라지는 것으로 관찰되었다. 이는 다시 0.51 mm일 경우 오히려 온도진동이 증가하는 것으로 관찰되었다. 이는 0.51 mm와 1.2 mm 오리피스 insert를 삽입했을 경우는 오히려 유동을 방해하는 효과로 인해 유체순환이 원활치 않은 것으로 관찰되었으며, 열전달성능 역시 감소하는 경향을 보였다. 루프의 열전달은 유체의 순환이 원활하여 증발부로부터 열을 응축부를 통해 빨리 방출할 경우에 루프의 열전달성능은 향상하게 된다. 그러므로 루프의 열전달성능 향상을 위해서는 루프 내부의 유체의 안정된 순환이 이루어져야 함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 유동 불안정 현상을 감소시키기 위해서는 최적의 insert 규격이 선택되어야 함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 2상 유동 루프형 열사이폰의 유동 불안정 현상과 그 감소방법에 대하여 실험을 통하여 알아보았다.

작동유체가 물일 경우에 유동 불안정 현상은 공급열량에 관계없이 심각하였으며, 증발부 입구에 오리피스 insert를 삽입하였을 경우에 유동 불안정 현상이 현저히 감소하는 것으로 관찰되었다. 세 가지 오리피스 insert를 삽입하여 실험을 하였으며, 0.71 mm 내경의 insert를 삽입하였을 경우에 열전달성능이 향상되었으며, 유동 불안정 현상이 현저히 감소하여 최적의 안정된 작동상태를 보여주는 것으로 관찰되었다.

참고문헌

1. Yadigaroglu, G. and Bergles, A. E., 1972, A Fundamental and Higher-Mode Density-Wave Oscillations in Two-Phase Flow, J. of Heat Transfer, Vol. 94, pp. 189-194.
2. Wissler, E. H., Isbin, H. S. and Amundson, N. R., 1956, Oscillatory Behavior of a Two-Phase Natural-Circulation Loop, AIChE J.,

- Vol. 2, pp. 157-162.
3. Welander, P. A., 1967, On the Oscillatory Instability of a Differentially Heated Fluid Loop, *J. Fluid Mech.*, Vol. 29, pp. 17-30.
 4. Lorenzini, E., 1981, A Simplified Method Proposal for Practical Determination of Aperiodic Two-Phase Flow Instability, *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. 7, No. 6, pp. 635-645.
 5. Chen, K. A., 1985, On the Oscillatory Instability of Closed-Loop Thermosyphons, *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 107, pp. 826-832.
 6. Imura, H., Takeshita, K. and Nakamura, K., 1994, Experimental Study on Flow Instability in Two-Phase Loop Thermosyphons, 4th Int. Heat Pipe Symposium, Tsukuba, Japan, pp. 85-94.
 7. Rhi, S. H., Kim, W. T., Song, K. S. and Lee, Y., 1998, A Design of Two-Phase Loop Thermosyphon for Telecommunications System (I): Experiments and Visualization, *KSME int. J.*, Vol. 12, No. 5, pp. 926-941.
 8. Rhi, S. H., 2000, An Experimental and Analytical (Simulation) Study on Two-Phase Loop Thermosyphons; Very Small to Very Large Systems, Ph.D Dissertation, University of Ottawa.
 9. Ishii, M. and Lee, S. Y., 1992, Thermally Induced Flow Oscillation in Vertical Two-Phase Natural Circulation Loop, *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 122, pp. 119-132.