태양열 집열용 써모사이폰의 Geyser boiling에 대한 실험적 연구

홍정규†·배찬효*·정경택**·서정세***
†경상대학교 대학원,*** 경상대학교

Experimental investigation of Geyser boiling in Thermosyphon for Solar Collector

J.K. Hong, C.H. Bae, K.T. Chung, J.S. Suh
Department of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Gyeongnam, 660-701, Korea

Key Words: Thermosyphon(써모싸이폰), Geyser boiling(가이즈 보일링)

Abstract

This study has been carried out to investigate thermosyphon's geyser boiling phenomenon used to solar collector. evaporator section of thermosyphon used to solar collector is very much longer than that of condenser section. From the results from this study, Geyser boiling's cycle depends on cooling water, tilt angle and the applied heat load at the evaporator. In this study, according to heat load, the geyser boiling frequency is lower, but the amplitude higher. For the high tilt angle of heat pipe, the frequency and amplitude are lower and higher in the evaporator region, respectively. Whereas, these phenomena is in contrast in the condenser region.

1. 서 론

최근 히트파이프의 연구개발이 활발히 진행되면서 히트파이프의 적용분야 또한 다양해지고 있다. 기존 열교환기로서의 활용뿐만 아니라 전자부품의 냉각장치, 인공위성의 냉각기, 태양열 집열기 등 열을 컨트롤해야 하는 모든 분야에 적용되고 있다. 적용분야의 다양성은 히트파이프의 적절한 설계를 필요하며, 최상의 기능을 발휘하도록 하여야 한다. 시스템에서 히트파이프가 안정적이고 연속적으로 작동하여야 한다는 것이다. 써모사이폰은 윅이 없는 히트파이프로 증발부에서 증발한 증기가 응축부에서 응축되어 액체의 상태로 증발부로 중력에 의하여 귀환하여 작동된다.

†,*,**경상대학교 대학원
*** 정회원, 경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구센터
E-mail: jssuh@gsnu.ac.kr
TEL: 055)751-5312 FAX 055)757-5622

일반적인 써모사이폰의 사용은 열교환기로 대부분 증발부의 길이가 응축부의 길이 보다 작거나 같다. 본 연구에서는 증발부가 응축부보다 긴 태양열 집열용 써모사이폰을 대상으로 한다. 수직으로 세워진 써모사이폰 아랫부분은 작동유체가 정적온도를 지니고 채워져지며 이것을 액체 폴이라 한다. 증발부에 낮은 열량은 액체 폴에서의 핵비등을 발생시키기에는 부족하여 액체 폴의 온도는 과열될 때까지 증가한다. 지속적인 가열은 액체 폴에서 부분적으로 핵비등을 발생시키고 핵비등은 점점 커져 증기기포를 형성하게 되며 크기는 급속도로 써모사이폰의 직경까지 커진다. 이 기포는 증기압력차에 의하여 응축부로 이동하게 되는데 Fig. 1과 같이 증기기포의 윗부분에 액체 슬러거를 밀면서 응축부의 끝단으로 이동한다. 액체 슬러거가 응축부의 끝단에 도착할 때, 액체 슬러거는 응축부의 끝단을 찰싹 때리는 소리와 함께 순식간에 붕괴한다. 이때를 물 해머 또는 증기 해머라 한다. 응축부의 끝단을 때린 후 붕괴한 액체 슬러거는 써모사이폰 벽면을 얇

은 막을 형성하여 중력에 의하여 증발부로 귀환한다. 다시 액체 폴에서 재과열 되고 가이즈 보일링 현상이 반복 된다. 이 반복되는 기간은 써모사이폰의 상태에 따라 일정한 특성을 지닌다. 가이즈 보일링이 일정한 진동을 가지고 발생될 때 써모사이폰과 공명하여 써모사이폰을 파괴 할 수도 있다. Fig. 1은 가이즈 보일링 현상의 메커니즘을 간략하게 나타낸 것이다. Fig. 2는 본 연구에서 측정한 써모사이폰의 벽면 온도를 일정시간동안 측정한 것으로 가이즈 보일링 현상을 보여주고 있다.

Nogishi[1]는 가이즈 보일링의 사이클은 응축부의 길이와 증발부의 열부하에 관련이 있다는 것을 알아냈다. 그 사이클은 응축부의 길이가 길수록 길었으며, 증발부의 열부하가 증가 할 수 록 감소하였고 끝단을 치는 힘 또한 작아졌다. 이 경우 다수의 기포가 액체 폴 안에 존재하기 때문이다. 이 상태로 기포는 응축부 끝단에 도달하여 부서지며, 노이즈가 감소한 것을 들을 수 있다. 파이프에서 아무런 소음이 들리지 않을 때 액체 폴은 과열되기 시작하며, 응축부에서 증기압력의 감소를 일으킨다. 그렇기 때문에 그 간격의 길어지면 액체 슬러그를 중심으로 증기기포 응축부와의 압력차는 커진다. 이때 슬러그는 강한 힘으로 끝단을 치게 된다. 만일 액체 폴의 윗부분에서 핵비등이 일어나면 증기기포는 충분히 성장하지 못한 상태에서 응축부 쪽으로 분출된다. 이 때문에 압력차는 감소하고, 그리고 끝단을 치는 힘 또한 작아진다.

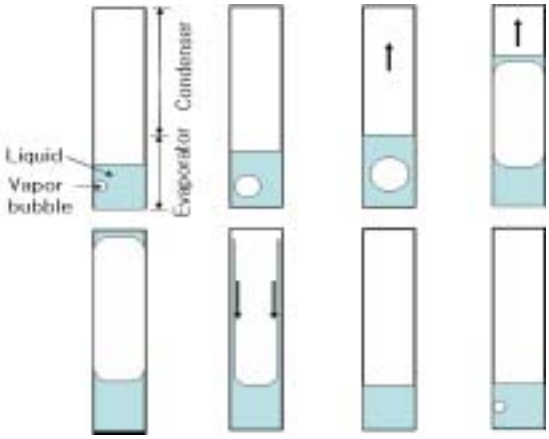

Fig. 1 Geyser boiling in the conventional thermosyphon.

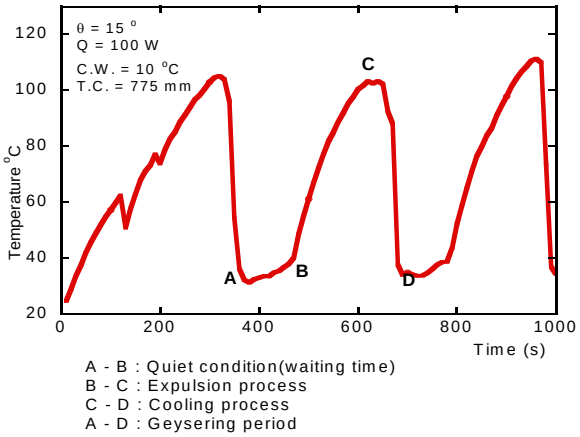

Fig. 2 Geysering in one cycle.

2. 실 험

2.1 실험장치

써모사이폰의 실험은 Faghri[1]가 제안한 워터자켓형으로 Fig. 3과 같이 구성하여 실험하였다. 써모사이폰의 재질은 구리이며 작동유체로서 증류수 9cc를 충전하였다. 써모사이폰의 총길이는 1500㎜ 이며, 응축부는 200㎜, 증발부는 응축부보다 약 6배 긴 1250㎜이다. 써모사이폰의 외경은 8.16㎜이며, 내경은 7.94㎜이다. 써모사이폰의 자세한 사양은 Table 1과 같다.

Table. 1 Specification of heat pipe (단위 ㎜)

Properties	Values
Pipe Material	Copper
Working Fluid	Water (9cc)
Out Diameter of Pipe	7.94
Total length	1500
Evaporator length	1250
Adiabatic length	50
Condenser length	200

서모커플은 오메가사의 T-type 서모커플을 사용하였다. T-type 서모커플은 73K부터 673K까지 ±0.2K 이내의 오차범위에서 온도 측정이 가능하므로 정밀한 온도측정이 요하는 써모사이폰의 실험에 적합하다. 서모커플의 위치는 증발부에서는 150㎜간격으로 응축부에서는 50㎜간격으로 하고 단열부에서는 중간지점에 한 개의 서모커플을 위치 시켰다. 서모커플의 위치는 Fig. 4과 같이 증발부에 9개, 단열부에 1개 그리고 응축부에 4개를 위치 시켰다. 서모커플은 써모사이폰의 벽면

온도를 측정하는데 목적이 있으므로 증발부와 응축부에서 외부의 열간섭이 일어나지 않도록 하였다. 벽면의 온도를 정확히 측정하기 위해서 열전도 구리스를 서모커플에 도포하고 은박테이프로 고정시켰다. 외부의 열이 서모커플에 열간섭을 일으키지 않도록 단열테이프로 수회 감아 외부의 열을 차단하였다. 또한 열선에 의한 열간섭을 최소화시키기 위해 열선은 서모커플의 측정점 위를 지나지 않도록 아래쪽으로 향하도록 하였다. 응축부에서도 증발부와 같은 방법으로 냉각수의 영향을 최소화 하였다.

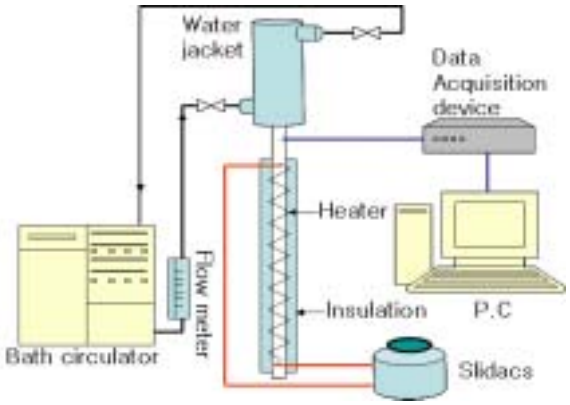

Fig. 3 Schematic of an experimental apparatus.

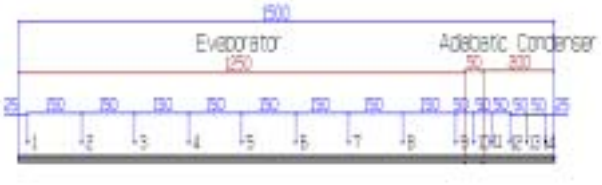

Fig. 4 Schematic diagram of the thermocouple positions marked on the well of heat pipe.

2.2 실험방법

써모사이폰의 상태 변화가 가이즈 보일링에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수평과의 기울기, 증발부에서의 열량변화, 응축부의 냉각수 변화를 통해 써모사이폰의 벽면 온도를 측정하였다. 기울기는 15°, 30°, 90°으로 변화시키고 , 열량변화는 13W, 53W, 100W 그리고 냉각수는 5°C, 10°C, 20°C로 변화시키면서 써모사이폰의 벽면온도를 10시간 동안 10초 간격으로 측정하였다. 각 측정점에서 온도변화에 따른 가이즈 보일링의 진동수와 진폭 파악하기 위하여 그래프 툴인 Origin의 FFT(Fast Fourier Transform)을 이용하였다.

3. 결과 및 분석

써모사이폰의 작동 중 발생하는 가이즈 보일링의 주기적인 요소를 증발부의 775 mm 지점과 응축부의 1225 mm 지점에서의 가이즈 보일링 현상을 모니터링 하였다. Fig. 5와 Fig.6은 열량변화 시 증발부와 응축부에서의 가이즈 보일링을 보여주고 있다.

Fig. 7와 Fig. 8은 기울기 변화 시 증발부와 응축부에서의 가이즈 보일링을 보여주고 있다. 써모사이폰의 수평과의 기울기가 30°와 90°일때는 거의 비슷한 온도범위에서 가이즈 보일링 현상이 나타남을 볼 수 있으며, 기울기가 15°일 때는 온도차가 20°C차로 크게 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 냉각수를 변화 시 증발부와 응축부에서의 가이즈 보일링이다. 냉각수 온도가 낮을 수 록 가이즈 보일링 현상이 뚜렷하게 나타남을 볼 수 있다.

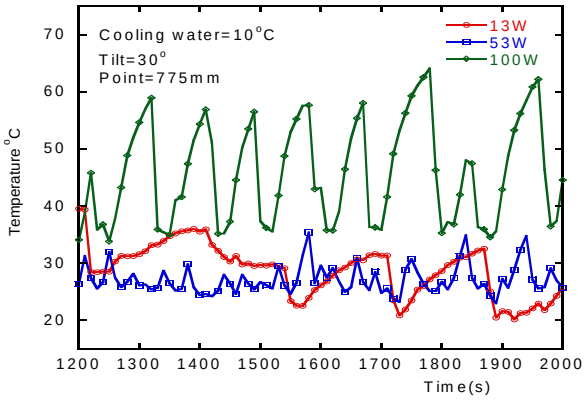

Fig. 5 The time variations of the evaporator wall temperatures according to heat flow

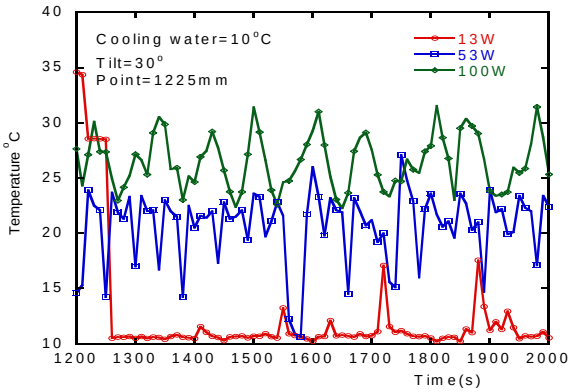

Fig. 6 The time variations of the condenser wall temperatures according to heat flow

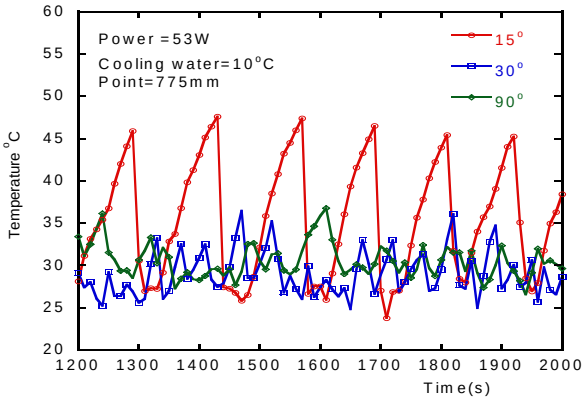

Fig. 7 The time variations of the evaporator wall temperatures for various tilt.

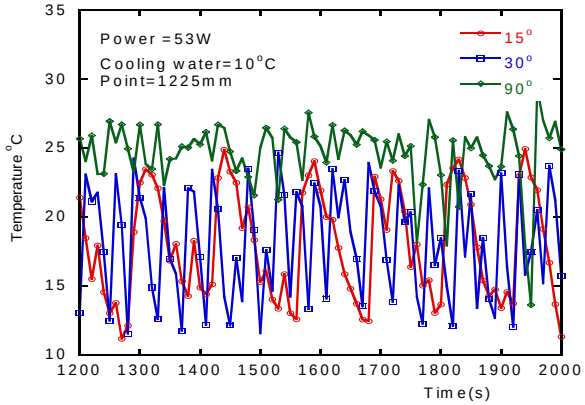

Fig. 8 The time variations of the condenser wall temperatures for various tilt.

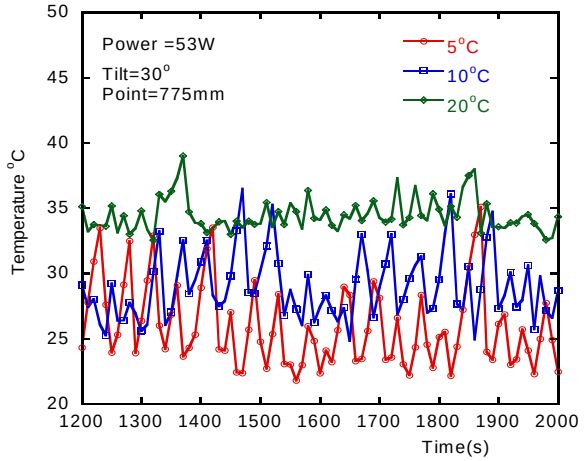

Fig. 9 The time variations of the evaporator wall temperatures for various cooling water.

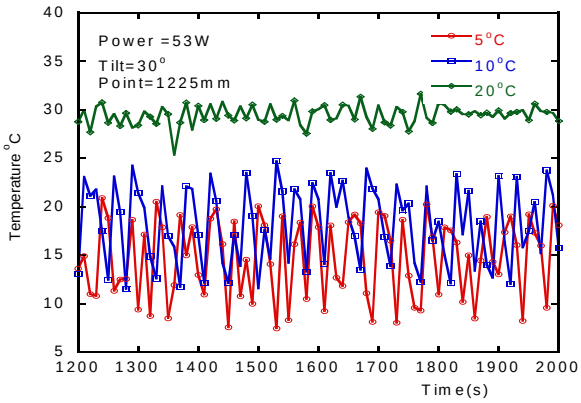

Fig. 10 The time variations of the condenser wall temperatures for various cooling water.

각각의 상태에서 일정 시간동안 특정 위치에서 온도분포로 가이즈 보일링 현상에 대한 경향을 살펴보았다. 위의 결과로는 가이즈 보일링 현상에 대한 정확한 검토가 부족하여 위의 결과를 토대로 FFT를 실행하여 각 상황에 대한 진동주기와 진폭을 찾았다. Fig. 11은 입력열량 변화 시 증발부에서의 진동주기와 진폭을 나타낸 것이다. 증발부에서 열량이 높을수록 진동주기는 저헤르츠, 진폭은 크게 나타났다. 입력 열량이 13W일 때는 진동주기가 저헤르츠(0.004Hz)에서 0.25의 진폭을 발생하고 고헤르츠로 갈수록 낮은 진폭을 발생하였다. 53W일 때는 저헤르츠 부근에서 약간 높은 진폭이 발생하였으나 고헤르츠로 갈수록 일정한 진폭을 가지고 진동주기가 발생함을 알 수 있었다. 100W 일 때 저헤르츠(0.01Hz)에서 진폭이 가장 높게 나타났다. 증발부에 입력되는 입력 열량이 높을수록 진동주기는 저헤르츠에서 높은 진폭을 발생시킴을 알 수 있었다. 이는 증발부에서의 증기기포가 증발부의 아래쪽에서 발생하여 넓은 면적을 차지하고 천천히 응축부로 이동함을 뜻한다. Fig. 12는 응축부에서의 가이즈 보일링의 진동주기와 진폭을 보여주고 있다. 그래프에서 보는바와 같이 증발부보다 낮은 진폭을 발생하였다. 증발부와는 다르게 53W일 때 응축부에서는 고헤르츠에서 높은 진폭을 발생하였다.

Fig. 13은 기울기를 15°, 30°, 90°C로 변화 시켰을 때 가이즈 보일링이다. 기울기가 수평과 15°일 때 진동주기 저헤르츠(0.008Hz)로 진동함을 알 수 있다. 30°, 90°일는 특정범위의 진동을 보이지 않으며 전체적으로 고른 진동을 보임을 알 수 있

다. 응축부의 진동은 15°일 때 저헤르츠(0.008 Hz) 부근에서 발생하였으며, 30°일 때는 중헤르츠(0.02 Hz)부근에서 고헤르츠로 갈수록 높은 진폭을 나타남을 볼 수 있었고, 90°일 때는 특정범위의 진동이 없이 전체적으로 고른 진동을 보였다. 즉 기울기를 변화 시켰을 경우 낮은 기울기에서 고유진동을 가지고 가이즈 보일링이 발생함을 볼 수 있으며, 진폭은 기울기가 수직에 가까울수록 작아짐을 알 수 있었다. 진동과 진폭은 가이즈 보일링의 주기적인 특성을 나타냄으로 기울기가 작을 때 긴 시간 동안 높은 온도에서 드라이 아웃됨을 알 수 있다.

Fig. 15는 써모사이폰의 냉각수를 5°C, 10°C, 20°C로 변화 시켰을 때 가이즈 일링 현상을 살펴 보았다. 그림에서 보는 것과 같이 냉각수의 온도가 낮을수록 가이즈보일링 현상이 발상함을 볼 수 있다. 냉각수 온도가 5°C 일 때 진동주기는 중헤르츠(0.024 Hz) 부근에서 진폭이 높았다. 10°C일 때는 저헤르츠에서 진폭이 다소 높았다. 냉가수 온도가 20°C일 때는 전체적으로 고른 헤르츠에서 일정한 진폭을 보여주고 있다. Fig. 16의 응축부에서는 증발부와는 다른 진동주기와 진폭을 보여주고 있다. 냉각수 온도 5°C 일 때 진동주기 0.024 Hz 외에 0.048 Hz 가 발생하였다. 냉각수 온도 10°C, 20°C일 때는 증발부와는 반대로 고헤르츠 쪽에서 진폭이 높게 나타났으며 진폭은 증발부에 비하여 작게 나타남을 볼 수 있다.

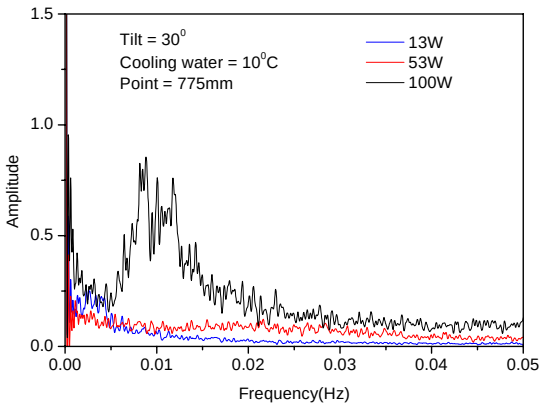

Fig. 11 Character of Geyser boiling period at evaporator for various heat flow.

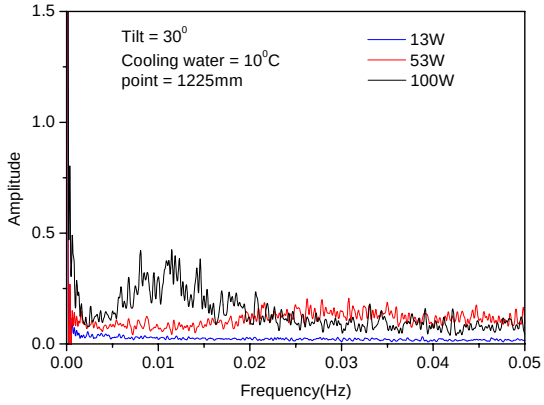

Fig. 12 Character of Geyser boiling period at condenser for various heat flow.

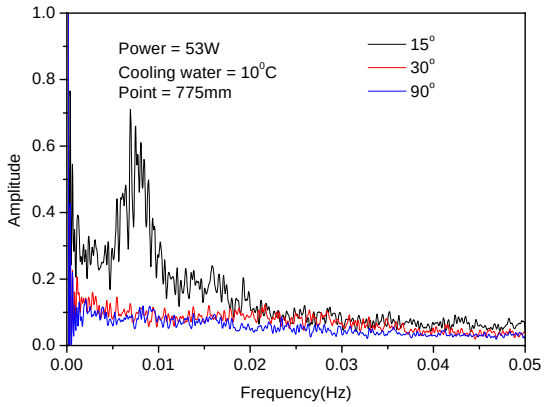

Fig. 13 Character of Geyser boiling period at evaporator for various tilt angle.

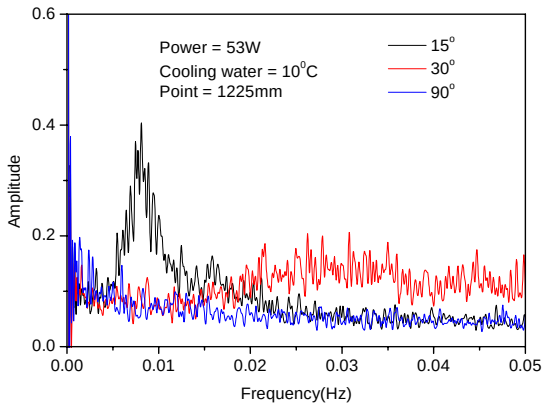

Fig. 14 Character of Geyser boiling period at condenser for various tilt angle.

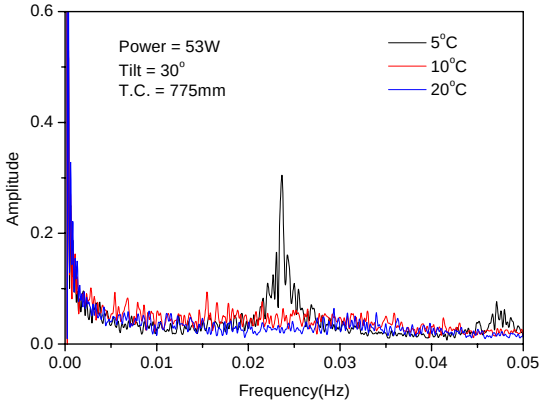

Fig. 15 Character of Geyser boiling period at evaporator for various cooling water.

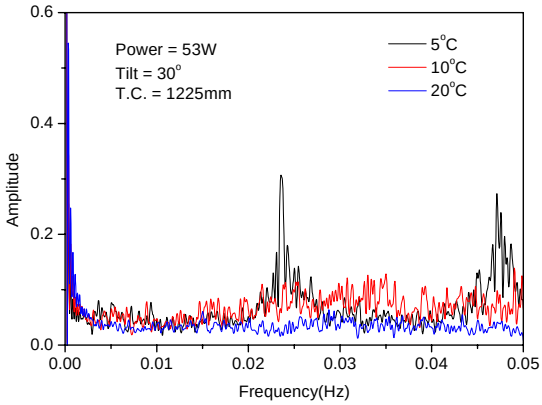

Fig. 16 Character of Geyser boiling period at condenser for various cooling water.

4. 결 론

본 연구에서 단면적이 작고 증발부가 응축부보다 긴 써모사이폰에서 발생하는 가이즈 보일링에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1)증발부에 입력열량이 높을 수 록 증발부에서의 가이즈 보일링은 진동주기는 저헤르츠, 진폭은 크게 나타났으며, 응축부에서는 진동주기가 고헤르츠, 진폭은 작게 나타났다.

(2)수평과의 기울기가 수직에 가까울 수 록 증발부에서의 가이즈 보일링은 진동주기는 저헤르츠, 진폭은 크게 나타났으며, 응축부에서는 진동주기는 고헤르츠, 진폭은 크게 나났다.

(3)냉각수 변화 시 증발부에서의 가이즈 보일링은 낮은 온도에서 특정 진동주기가 발생하였으며 진폭은 크다. 응축부에서 진동주기는 고헤르츠 범위에서 작은 진폭을 나타냈다.

후 기

본 연구의 일부는 BK21 지역대학육성사업, 항공기부품기술연구센터 및 산업자원부의 지역혁신인력양성사업, NURI의 지원으로 이루어 졌으며, (주)세운전재의 협력에 감사드린다.

참고문헌

(1) Amir Faghri, 1999, "Heat Pipe Science and Technology," Tanlor &Francis

(2) H.Kuncoro, Y.F.Rao and K. Fukuda, 1995 "An experimental study on the mechanism of geyser in a closed two-phase thermosyphon. Int. J. Multiphase Flow Vo1.21 No. 6, pp. 1243-1252

(3) T.F.LLIN, W.T.LIN, y.L.TSAY and J.C.WU, 1995, "Experimental investigation of geyser boiling in an annular two-phase closed thermosypho" Int J. Heat Mass Transfer. Vol.38, No.2, pp 295-307

(4) H. Imura, H. Kusuda, j. Ogata, T. Mijazak and N. Sakamoto, "Heat transfer in two-phase closed-type thermosyphon" Trans, jap. Soc. Mech. Engers B, 712-722

(5) Burkhalter, J. E., Sforzini, R. h. & Tinsley, C. R. 1968 "Investigations of geysering in vertical tubes" J. Spacecraft 5, 854-857

(6) Gaugler, K. S., 1942, Heat Transfer Device. US patent. 2350348 April. 21 Dec. published 6 June, 1944

(7) S. W. Chi, 1976, Heat Pipe Theory and Practice, McGraw-Hill, New York.

(8) D.E. Kim, Y.S. Park, J-S. Suh, K. W. Lee and K.H.Park, 2002, Thermal Analysis of Water-Copper Variable Conductance Heat Pipe with a screen mesh, KSME 2002 spring proceedings, pp. 1185-1190.