

핵비등 촉진 전열면 증발부를 이용한 고성능 Bubble Jet Loop Heat Pipe 개발

김중수[†] · 신종석[†]

(Received April 17, 2015 ; Revised May 15, 2015 ; Accepted May 20, 2015)

Development of a High Performance Bubble Jet Loop Heat Pipe Using the Enhanced Nucleate Boiling Surface in Evaporating Section

Jong-Soo Kim[†] · Jong-Seok Shin[†]

요약: 본 연구는, 증발부에 핵비등 촉진 전열면을 사용하여 수평상태에서도 작동 가능한 고성능 버블젯 루프 히트파이프(BJLHP)의 개발에 관한 것이다. 비등 촉진 전열면은 소결관과 GEWA-T 전열관을 사용하였으며, 평활관을 사용한 BJLHP와 유효열전도도를 사용하여 열성능을 비교, 검토하였다. 작동유체로는 R-141b를 사용하였으며, 충전량은 BJLHP 내부 체적의 50%, 입열량은 75W와 100W로 하였다. 그 결과 소결관을 사용한 BJLHP의 열성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 소결관을 사용한 BJLHP의 유효열전도도가 평활관 BJLHP보다 300% 이상 향상되었다.

주제어: 버블젯 루프 히트 파이프, 핵비등 촉진 전열면

Abstract: In this study, a high performance Bubble Jet Loop Heat Pipe (BJLHP) was developed using the enhanced nucleate boiling surfaces in an evaporating section. A sintered tube and GEWA-T(Wieland) tube were used enhance nucleate boiling. The thermal performance of these BJLHP was compared with the conventional smooth tube BJLHP with an effective thermal conductivity. This experiment was conducted under the following conditions : working fluid, charging ratio and input power of R-141b, 50%vol., 75W and 100W, respectively. As a result, the effective thermal conductivity of BJLHP with a sintered tube in the evaporating section was 300% higher than the smooth tube BJLHP.

Keywords: Bubble Jet Loop Heat Pipe, Enhanced nucleate boiling surface

1. 서론

히트파이프 내부 작동유체의 순환은 중력의 영향을 크게 받기 때문에 경사각(기울기)에 의해 성능이 좌우되며 특히 수평 상태에서는 성능이 저하되어 응용 범위가 한정된다는 단점을 가지고 있다[1]. 따라서, 히트파이프를 온돌 난방[2]이나 식물의 뿌리난방[3]에 적용하기 위해서는 수평 상태에서도 워(wick)없이 히트파이프가 정상적인 동작을 할 수 있도록 고안하는 것이 과제이다. Kim *et al.* [4]은 히트파이프의 증발부에서 작동유체의 기포가 원활히 생성될 수 있도록 하고, 이들 기포의 펌핑력(pumping force)에 의하여 기-액 2상 유동이 히트파이프 내부에서 순환, 진동함으로써 수평상태에서도 열전달 속도 및 효율의 한계를 극복할 수 있는 고성능 Bubble Jet Loop Heat Pipe(이하 BJLHP)를 개발하였다.

그러나, BJLHP를 고성능화하기 위해서는 작동유체의 비

등이 발생하는 증발부에 고성능 핵비등 촉진 전열면을 사용할 필요가 있다[5]. 본 연구에서는 핵비등 촉진 전열면으로 다공성의 소결전열관(sintered tube)과 GEWA-T (Wieland 사) 전열관을 사용하여 BJLHP를 제작하였으며, 유효 열전도도(effective thermal conductivity)를 사용하여 평활관(smooth tube)을 사용한 기존의 BJLHP와 열성능을 비교, 평가하였다.

2. BJLHP 작동원리

BJLHP의 개략적 형상 및 작동원리는 Figure 1과 같다. BJLHP는 증발부와 루프형태의 응축부로 구성되어 있으며, 핵비등이 발생하는 증발부는 좁은 환상 크레비스(annular crevice)의 이중관 형태로 제작되어있다. 열원인 전기 히터는 환상공간을 이루는 내측(증발관)에 삽입하고 끝단을 히트파이프 본체관과 용접하였다. 히터로부터 열

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7969-5081>): Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, Yongdang-dong, Nam-gu, Busan 608-739, Korea, E-mail: jskim@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6176

¹ Graduate school of Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: 88sjs04@hanmail.net, Tel: 051-629-6176

이 공급됨에 따라 작동유체와 접하고 있는 고성능 전열관 외표면에서 핵비등이 발생한다[6]. 이렇게 발생한 기포가 증발부와 연결된 U자형의 관(응축부)내부를 순환, 진동하며 잠열 및 현열의 형태로 대량의 열이 전달되게 된다.

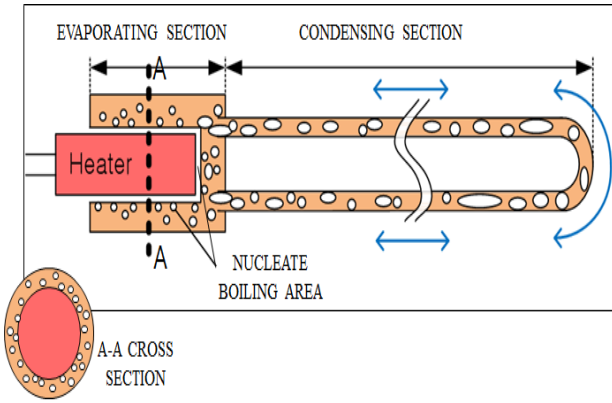


Figure 1: Operation Principle of BJLHP

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 연구에서는 증발관으로 평활관, 소결관 및 비등촉진관을 사용하였다[7]. 증발관 중 비등촉진 전열면을 가진 소결관과 GEWA-T 관의 외표면 형상은 Figure 2와 같다. 비등촉진 관은 reentrance cavity를 가진 상용의 GEWA-T 전열관을 사용하였으며, 소결관은 동관에 동입자(0.18-0.25 mm)를 소결하여 사용하였다. 소결은 기공형성제와 바인더부자재를 적당한 비율로 혼합하여 바인더를 제조하고, 소결 할 표면에 바인더를 코팅 후 동입자를 환원 처리하여 분산 성형하였다. 소결코팅은 1차와 2차로 각각 나누어져 800~850℃에서 소결되며, 연속로와 진공로에서 이루어졌다. 소결관과 GEWA-T 관의 제원은 Table 1에 나타내었다. Table 2는 본 연구에서 사용된 BJLHP의 제원이다.

작동유체는 R-141b를 사용하였으며, BJLHP 내부를 $2.0 \times 10^{-5} \text{ torr}$ 로 진공시킨 후에 최적조건인 BJLHP 내부체적의 50%로 충전하였다[8]. Figure 3은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 BJLHP와 온도측정장치 및 입열량 계측장치(HAMEG HM8115K, 정도 ± 0.1)로 구성되어 있으며, 가열원으로 카트리지 타입의 전기히터를 사용하였다.

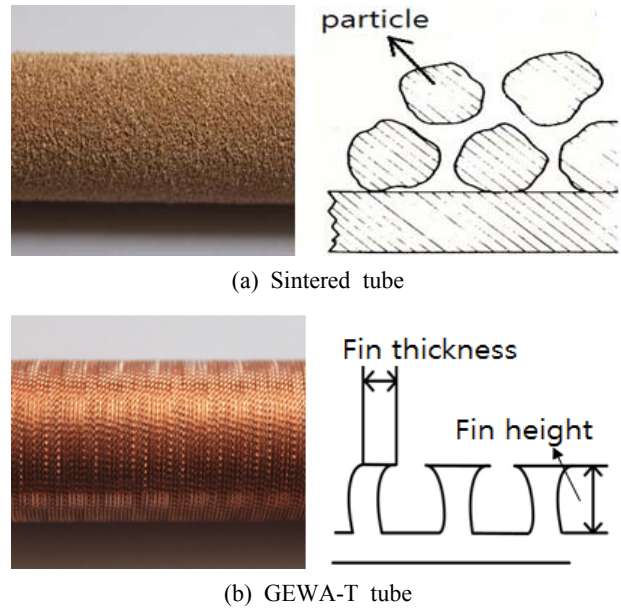


Figure 2: Enhanced boiling surface

Table 1: Specifications of a sintered and HIGH FLUX tube

Sintered tube	Powder	Sn (10%), P (0.35%), Cu (89.65%)
	Particle size (mm)	0.18~0.25
	Sintering temp. (°C)	800-850
GEWA-T tube	Fin thickness (mm)	0.3
	Fin height (mm)	0.75
	FPI (EA)	40

Table 2: Specification of BJLHP

Parameter		Specification		
Heater		220V, 100W		
B J L H P	Material		Copper	
	Evapo- rating section	Outer tube (mm)	Length	90.0
			Pipe [O.D.]	25.4
	Boiling tube (mm)	Length	50.0	
		Pipe [O.D.]		
		Smooth tube	19.0	
Sintered tube		18.2		
	GEWA-T tube	19.0		
Condensing section (mm)		Length [Loop]	1,700	
		Pipe [O.D.]	12.7	

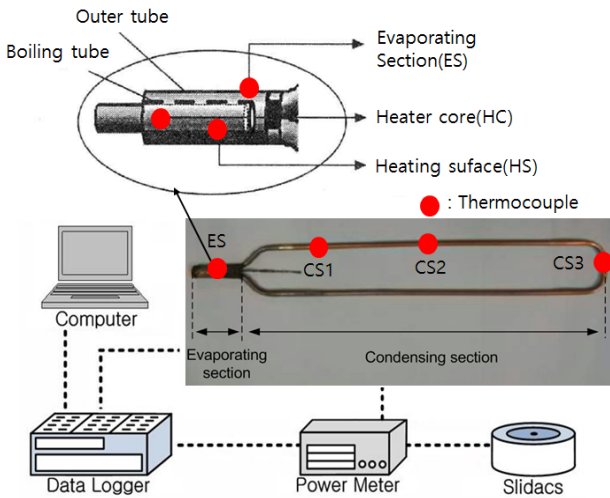


Figure 3: Schematic diagram of the experimental equipment

3.2 실험방법

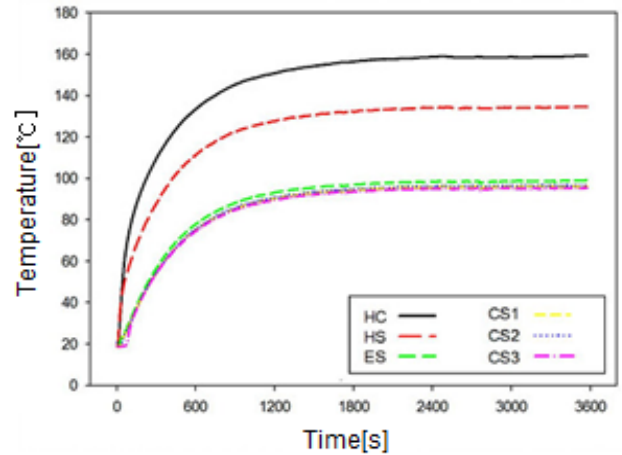
실험은 각각의 증발관에 대해 히터 입열량을 75W (23 kW/m^2)와 100W(30 kW/m^2)로 변화시켜 수행하였다. Figure 3에서와 같이 각각 히터 내부온도(t_{HC}), 히터 표면온도(t_{HS}), 증발부 표면온도(t_{ES}) 및 응축부 표면온도($t_{CS\ 1-3}$)를 측정하기 위하여 6개 지점에 T-type 열전대를 부착하였으며, 데이터 로그(Yokogawa MX 100, 정도 $\pm 0.1^\circ\text{C}$)를 사용하여 온도 평형 상태에 도달 후 까지 5초 간격으로 측정하여 데이터를 처리하였다.

본 연구에서는 증발부의 충분한 단열을 통해 증발부 표면온도(t_{ES})를 작동유체의 포화온도(t_{SAT})로 사용 가능하게 하였다.

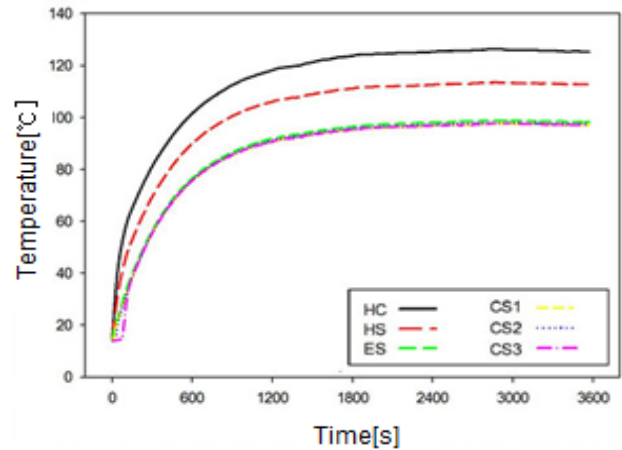
4. 실험결과 및 고찰

Figure 4는 입열량 75W인 경우의 BJLHP 각부 온도분포고, Figure 5은 입열량 100W의 온도분포를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 증발부의 충분한 단열을 통해 증발부 표면온도(t_{ES})를 작동유체의 포화온도(t_{SAT})로 사용 가능하게 하였다. 실험 결과에서 사용된 온도는 각부의 온도가 변동하지 않게 되는 열적 안정화 시간(1,800초) 이후의 온도를 사용하였다. Figure 4,5에서 알 수 있듯이 평활관에서의 과열도($t_{HS}-t_{ES}$)는 $42\sim 50^\circ\text{C}$ 정도이고, GEWA-T 전열관 및 소결관의 과열도($t_{HS}-t_{ES}$)는 15°C 이다. 이는 GEWA-T 관과 소결관 보다 평활관의 과열도($t_{HS}-t_{ES}$)가 약 3 배 큰 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 비등촉진 GEWA-T 전열관의 reentrance cavity 및 소결관의 다공층 내에 남아있는 기포가 핵비등 site가 되어 작은 과열도에서도 기포가 팽창하여 핵비등을 촉진시키기 때문이다[3]. 1,800초 이후의 증발부(t_{ES})와 응축부(t_{CS1} , t_{CS2} , t_{CS3} 의 평균 온도)의 안정화 온도 및 그 온도차를 Table 3에 나타내었다.

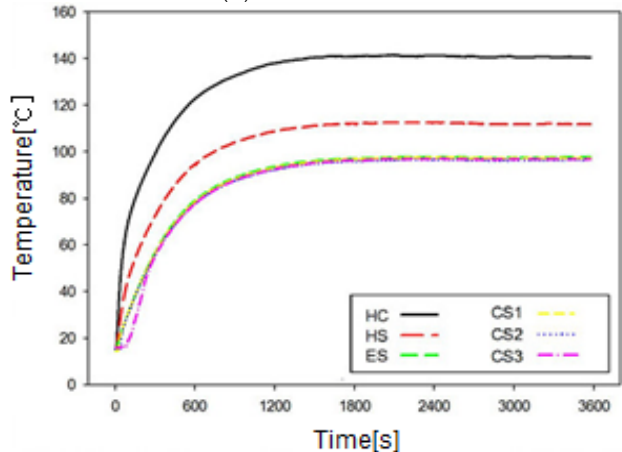
평활관의 응축부와 증발부의 온도차($t_{ES}-t_{CS}$)는 $2.7\sim 3.4^\circ\text{C}$ 와 비교하여 GEWA-T 전열관 및 소결관의 온도차($t_{ES}-t_{CS}$)는 $0.8\sim 1.9^\circ\text{C}$ 로서 1.8~3.3배 정도 작기 때문에 이들 BJLHP의 유효열전도도가 매우 우수하다는 것을 알 수 있다.



(a) Smooth tube



(b) GEWA-T tube



(c) Sintered tube

Figure 4: Temperature profile of BJLHP (75W)

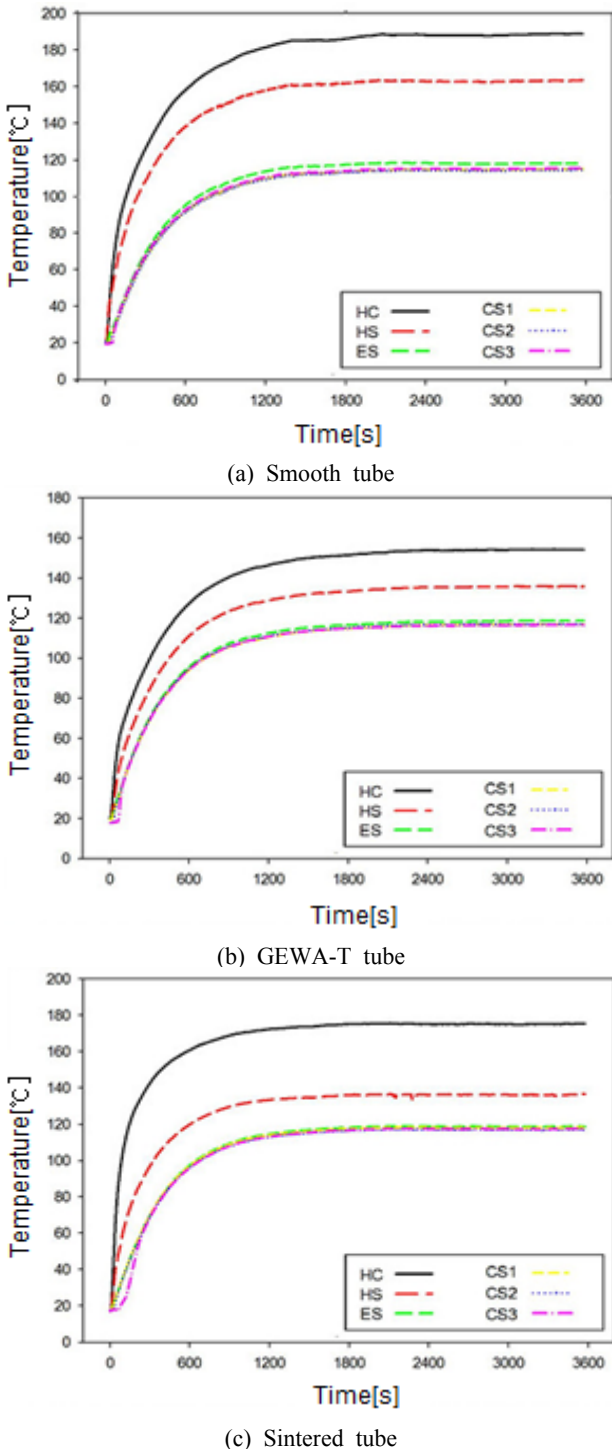


Figure 5: Temperature profile of BJLHP (100W)

Table 3: Final temperature (1,800s~)

		$t_{ES}(^{\circ}C)$	$t_{CS}(^{\circ}C)$	$\Delta T(^{\circ}C)$
75W	Smooth tube	98.6	95.9	2.7
	GEWA-T tube	98.2	97.2	1.0
	Sintered tube	97.7	96.9	0.8
100W	Smooth tube	118.1	114.7	3.4
	GEWA-T tube	118.4	116.5	1.9
	Sintered tube	118.8	117.5	1.3

BJLHP의 유효열전도도(K_e)는 Equation (1), 증발부 히터 표면의 열유속(heat flux)은 Equation (2)로 계산하였다.

$$K_e = \frac{q \cdot L_{eff}}{\Delta T} \quad (1)$$

$$q = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

여기서, Q는 히터 입열량(W), q는 히터 표면 열유속 (W/m^2)이며, L_{eff} 는 (증발부길이+응축부길이)/2 이며, ΔT 는 증발부(t_{ES})와 응축부($t_{CS1}, t_{CS2}, t_{CS3}$ 의 평균 온도)의 온도차(K)이다. 증발관 형상별 유효열전도도 계산 결과 값은 Table 4와 같다.

유효열전도도(K_e)는 소결관, GEWA-T 전열관, 평활관 순으로 크게 나타났다. 이는 평활관에 비해 소결관과 GEWA-T 전열관에서 핵비등이 촉진되었기 때문이다.

입열량을 75W에서 100W로 증가시켰을 경우, 평활관은 유효열전도도(K_e)가 각각의 입열량에서 유사하게 측정되었다. 이는 평활관에서 열유속이 증가하는 것과 비례하게 과열도($t_{HS}-t_{ES}$)가 증가하였기 때문이다. 그러나 GEWA-T 전열관과 소결관의 경우, 100W 보다 75W에서 유효열전도도(K_e)가 크게 나타났다. 이는 100W의 경우 열유속이 과대하여 전열면의 일부가 간헐적으로 dry-out이 발생되기 때문인 것으로 판단된다.

Table 4: Effective thermal conductivity (K_e)

		75W	100W
K_e (kW/m·K)	Smooth tube	10.1	10.7
	GEWA-T tube	27.4	19.2
	Sintered tube	36.1	32.1

5. 결론

증발부에 핵비등 촉진 전열관인 GEWA-T 관 과 소결관을 적용한 BJLHP를 개발하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 고성능 전열관을 사용한 BJLHP의 증발부 및 응축부 표면온도가 매우 균일하며, 양호하게 작동되었다.
- 소결관 BJLHP에 히터 입열량 75W를 가했을 때 유효 열전도도가 36.1 kW/mK로 가장 우수한 열전달 성능을 나타내었다.
- 소결관 BJLHP의 유효열전도도가 평활관 BJLHP 보다 300% 이상 향상되었다.

후기

이 논문은 2012학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임. (C-D-2012-0565)

References

- [1] Japanese Heat Pipe Association, Practical Heat Pipe, Japan: Nikkan Kogyo Shimbunsha, pp. 29~30, 2001 (in Japanese).
- [2] J. S. Kim, W. H. Kwon, and J. W. Kim, "Development of high performance bubble jet loop heat pipe for hot water floor heating system," Journal of the Korean Society for Power System Engineering, vol. 18, no. 4, pp. 23-28, 2014 (in Korean).
- [3] J. W. Kim, Y. H. Kwon, and J. S. Kim, "The study of root heating system for green house using the bubble jet loop heat pipe," Proceedings for the SAREK 2014 Summer Annual Conference, pp. 22~25, 2014 (in Korean).
- [4] H. J. Lee, S. U. Gong, S. J. Ha, J. H. Hwang, J. W. Jang, G. J. Son, and J. S. Kim, "Flow visualization of bubble jet loop heat pipe," Proceedings of the SAREK 2009 Summer Annual Conference, pp. 279-283, 2009 (in Korean).
- [5] R. L. Webb, Principles of enhanced heat transfer, John Wiley & Sons, INC, pp. 322-332, 1994.
- [6] J. H. Hwang, Y. U. Gu, O. F. Imhanmhenisi, S. U. Gong, Y. H. Kwon, and J. S. Kim, "Development of a novel defrost device for a unit cooler using bubble jet loop heat pipe," Journal of Applied Science and Engineering, vol. 15, no. 2, pp. 111~116, 2012.
- [7] A. E. Bergles, "High-flux processes through enhanced heat transfer," Keynote at the Fifth International Conference on Boiling Heat Transfer, pp. 1~13, 2003.
- [8] D. G. Jung, J. H. Woo, and J. S. Kim, "A study on heat transfer and flow characteristics of bubble jet loop heat pipe," Proceedings of the KSME 2011 Spring Annual Meeting, pp. 175-180, 2011 (in Korean).