

온수 가열 바닥 난방 시스템용 고성능 버블젯 루프 히트파이프 개발 Development of High Performance Bubble Jet Loop Heat Pipe for Hot Water Floor Heating System

김종수*† · 권용하* · 김정웅**

Jong-Soo Kim*† , Yong-Ha Kwon* and Jeong-Woong Kim**

(접수일 : 2014년 05월 01일, 수정일 : 2014년 07월 15일, 채택확정 : 2014년 07월 15일)

Abstract: In order to increase the performance of conventional hot water floor heating system, the bubble jet loop heat pipe for the system was developed. This experiment was conducted under next conditions : Working fluid was R-134a, charging ratio was 50%. A temperature of hot water, room temperature and flow rate were 60°C, 15°C and 0.5~1.5 kg/min, respectively. The experimental results, show that bubble jet loop heat pipe had a high effective thermal conductivity of 4714 kW/m°C and a sufficient heat flux of 73 W/m² to heat the floor to 35°C in case of the 1.5 kg/min of flow rate. So the bubble jet loop heat pipe has a possibility for applying of the floor heating system. Additionally, the visualization of bubble jet loop heat pipe was performed to understand the operating principle. Bubbles made by the narrow gap between inner tube and outer tube of evaporating part generate pulsation at liquid surface of working fluid. The pulsation had slug flow and wavy flow. So working fluid circulates in the bubble jet loop heat pipe as two phase flow pattern. And large amount of heat is transferred by the latent heat from evaporating part to condensing part.

Key Words : Bubble jet loop heat pipe, Hot water floor heating

— 기 호 설 명 —

A : 면적 [m ²]	m : 온수유량 [kg/min]
d : 직경 [mm]	q'' : 바닥 방열 열유속 [W/m ²]
C _p : 비열 [J/kg°C]	t _s : 정상상태 도달시간 [s]
k _e : 유효열전도도 [kW/m°C]	T : 온도 [°C]
L : 튜브 길이 [m]	ΔT : 온도차 (증발부 평균온도-응축부 평균 온도) [°C]

*† 김종수(교신저자) : 부경대학교 냉동공조공학과
 E-mail : jskim@pknu.ac.kr : 051-629-6176

*권용하 : 부경대학교 냉동공조공학과

**김정웅 : 부경대학교 냉동공조공학과 대학원

*† Jong-Soo Kim : Department of Refrigeration & Air-conditioning Engineering, Pukyong National University.
 E-mail : jskim@pknu.ac.kr , Tel : 051-629-6176

*Yong-Ha Kwon : Department of Refrigeration & Air-conditioning Engineering, Pukyong National University.

**Jeong-woong Kim : Graduate school of department of Refrigeration & Air-conditioning Engineering, Pukyong National University.

하첨자

- c : 히트파이프 응축부
- cs : 히트파이프 응축부 단면
- e : 히트파이프 증발부
- f : 난방 바닥
- i : 내관(inner tube)
- in : 입구(inlet)
- o : 외관(outer tube)
- out : 출구(outlet)

1. 서 론

기존의 바닥 난방 방식은 폴리에틸렌 파이프 및 동 파이프를 이용한 온수 난방방식이 이용되고 있으나, 온수관 입출구의 온도차가 크며, 열전달 성능이 나쁘고, 배관 내 수(水)량이 많아 초기 난방시간이 길어지는 단점이 있다. 또한 온수관의 길이가 크게 되어 압력손실이 증대되며, 온수 순환 펌프의 동력 또한 커지게 되어 에너지효율이 저하 된다.¹⁾ 이를 해결하기 위하여 열전도가 크며, 펌프 동력 없이도 많은 열량을 전달할 수 있는 히트파이프(heat pipe)를 이용하고자 한다. 종래의 히트파이프를 이용한 바닥 난방에 관한 연구에서 히트파이프가 기존의 폴리에틸렌 파이프에 비하여 온수 유량을 약 20% 줄일 수 있어 바닥 난방에 충분한 가능성을 확인하였다.²⁾ 그러나 기존의 써모사이폰 히트파이프(thermo syphon type heat pipe)의 경우에서 원활한 작동유체의 유동을 위하여 경사도를 주어야하는 문제점이 있었다.

여러 히트파이프 종류 중 버블젯 루프 히트파이프(bubble jet loop heat pipe, BJLHP)는 기존의 히트파이프에 비하여 구조가 간단하여 제작이 간편하며 수평상태에서도 내부의 작동유체를 유동시킬 수 있는 장치이다. 따라서 본 연구에서는 수평상태에서 작동하며, 구리의 수천 배 정도의 높은 열전도 성능을 가진 BJLHP를 이용하여 온수난방 방식의 단점을 보완하고 난방효율을 증대시키고자 한다. 이를 위해 온수 가열형의 바닥 난방용 히트파이프를 개발하고, 온수 유량에 따른 열전달 성능을 측정하여 온수 가열 바닥 난방 시스템

로의 가능성을 분석하였다. 또한 BJLHP의 작동유체 가시화 실험을 통하여 히트파이프 내부 작동유체의 유동양식을 관찰하여 작동원리를 규명하였다.

2. 실험장치 및 실험 방법

2.1 온수 바닥 난방용 BJLHP

2.1.1 실험장치

Fig. 1은 실험에 사용된 BJLHP의 형태를 상세히 나타낸 것이다. BJLHP는 증발부(evaporating part, EP)와 응축부(condensing part, CP)로 구성되어 있는 작동유체가 담긴 밀봉용기이다. 증발부는 온수가 지나가는 내관(inner tube)과 작동유체가 온수에 의해 증발되는 외관(outer tube)으로 구성된 동심 이중관으로 제작되었다. 응축부는 U자관 형상으로 증발부 외관과 직교 연결하여 작동유체가 응축부로 흘러들어갈 수 있도록 하였다. BJLHP의 기타 상세한 제원은 Table 1에 나타내었다.

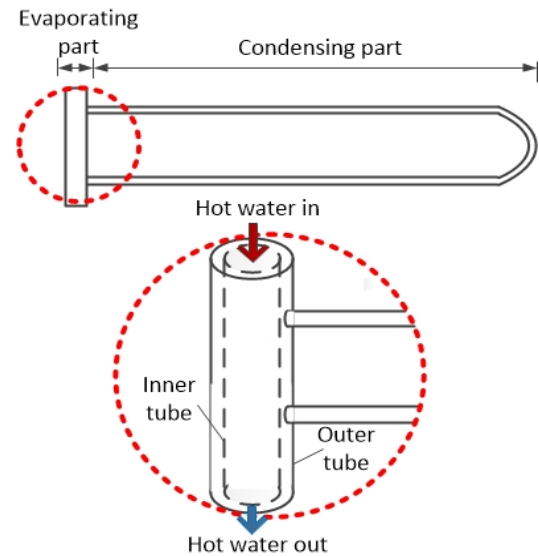


Fig. 1 Detail of BJLHP

Fig. 2는 온수 가열 바닥 난방용 BJLHP의 실험 장치를 나타낸 것이다. 실험 장치는 BJLHP와 BJLHP의 증발부 내관으로 온수 열원을 공급하기

Table 1 Specification of BJLHP

Parameter			Specification
Material			Copper
Evaporating part	Outer tube	L [mm]	350
		d _i [mm]	23.8
	Inner tube	L [mm]	350
		d _o [mm]	19.05
Condensing part		L [mm]	1500
		d _i [mm]	11.0

위하여 온수 순환 펌프 및 항온조(HMT-300)를 사용하였고, 유량 측정은 질량 유량계(D025S-SS-311, accuracy : ±0.2%, Oval)를 사용하였으며, 유량 조절 밸브로 온수유량을 조절하였다. 또한 온도 측정을 위하여 T-type 열전대(thermal couple)와 데이터 로거(GL800, Graptec)를 설치하였다. BJLHP의 작동유체는 R-134a를 사용하였으며, BJLHP 내부를 고진공 장치 이용하여 6.7×10^{-4} Pa의 고진공 상태로 만들고, BJLHP 내부 체적의 50%의 양으로 작동유체를 냉매충전실린더(HGC-96, Taiatsu)를 사용하여 주입 후 밀봉하였다.

2.1.2 실험방법

Table 2는 온수 가열 바닥 난방용 BJLHP의 실험 조건을 나타낸 것이다. 지역난방의 경우 일반 가정에 공급되는 난방 온수의 온도는 50°C~60°C이다.³⁾ 따라서 본 실험에서 BJLHP에 공급하는 온수의 온도는 항온조를 이용하여 60°C로 하였으며, 유량을 유량계와 밸브를 이용하여 0.5, 1.0, 1.5 kg/min으로 변경하여 실험하였다. 또한 실험장소의 온도는 15°C로 하였다. 온수 열원 타입 BJLHP는 수평상태로 설치하였으며 Fig. 2와 같이 T-type 열전대를 이용하여 응축부에 5개소, 증발부에 2개소를 BJLHP 표면 상단에 부착하고, 온수 입·출구 지점에 각각 1개소를 설치하여 1초 간격으로 10분간 데이터로거를 사용하여 온도를 측정하였다.

2.2 BJLHP 가시화 실험

2.2.1 실험장치 및 실험 방법

본 실험에서는 BJLHP의 작동원리를 규명하기

위하여, 작동유체의 내부유동 상태를 가시화하였다. 내부 유체 유동을 파악하여 작동유체의 액체 수송 원리를 확인하였다. Fig. 3은 BJLHP 가시화 장치를 나타낸 것이다. 가시화 실험에서의 BJLHP는 투명한 석영 유리관으로 제작하였으며, 증발부는 열의 공급을 위한 전기 히터를 삽입할 수 있도록 응축관과 평행 방향의 이중관 형태로 설계하였다. 작동 유체는 가시화 장치의 내압강도를 고려하여 유동상태가 크게 변하지 않고, 상대적으로 압력이 낮은 동일 HFC계 냉매 R-141b를 사용하였다. 작동유체는 고진공 시스템을 이용하여 5.0×10^{-2} Pa의 진공 상태를 만들어 BJLHP 내부체적의 50%를 주입하였다. 또한 전기 히터를 사용하여 30W의 열량을 증발부에 인가하였으며, 수평상태에서 실험을 진행하였다.

증발부와 응축부에서의 유체 유동은 고속도 비디오카메라로 촬영하여 유동 양식을 확인할 수 있도록 하였다. 가시화 장치에 대한 상세 제원은 Table 3에 나타내었다.

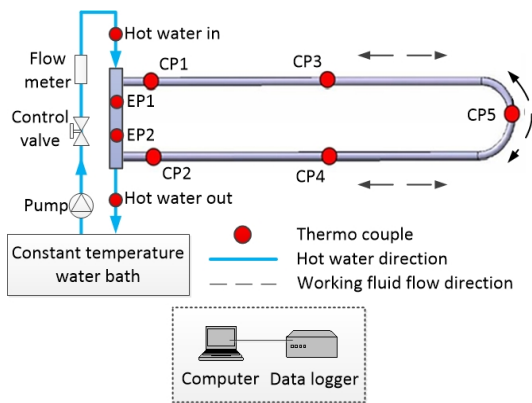


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

Table 2 Experimental condition

Parameter	Value
Hot water temperature (°C)	60
Room temperature (°C)	15
Water flow rate (kg/min)	0.5
	1.0
	1.5
Orientation	Horizontality

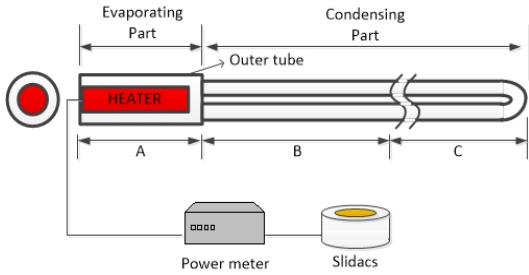


Fig. 3 Schematic diagram of the visualized BJLHP

3. 실험결과 및 고찰

3.1 온수난방용 BJLHP 실험

온수난방용 BJLHP의 성능확인을 위하여 각 유량에 따른 BJLHP 표면 온도 변화, 방열량 및 바닥 방열 열유속을 구하였다. 정상상태 도달 시간은 정상상태 온도의 $\pm 2^\circ\text{C}$ 에 도달하는 최초의 시간으로 하였다. BJLHP를 사용한 바닥 난방 방열 열유속의 계산은 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, BJLHP의 유효열전도율에 대한 계산은 식(2)와 같다.⁴⁾

$$q'' = \frac{m C_p (T_{in} - T_{out})}{A_f} \quad (1)$$

$$k_e = \frac{m C_p (T_{in} - T_{out})(L_e + L_c)}{2A_{cs} \Delta T} \quad (2)$$

여기서, A_f 는 BJLHP의 1개당 크기를 고려한 건축물의 바닥면적 $0.6\text{m} \times 1.6\text{m}$ 을 말한다. Fig. 4는 온수 유량 1.5 kg/min 상태에서의 BJLHP의 응축부 및 증발부 온도분포를 나타내며, 응축부의 평균 온도차가 1°C 이하로 작아 작동유체의 유동이 원활히 이루어지는 것을 확인 할 수 있으며, 난방장치로 적용 시 균일한 온도로 난방이 가능함을 알 수 있다. 이 결과를 진동형 히트파이프(pulsating heat pipe, PHP)를 이용한 기존의 연구⁴⁾와 비교해 보았을 때, 동일 온수온도와 유량조건(온수 온도 60°C , 유량 1.5 kg/min)에서 BJLHP의 정상상태 도달 시간이 PHP에 비하여 약 7분 빠르며, 응축부의 평균온도는 약 10°C 높게 나타났다. 이것은 구

조상 증발부와 온수가 접하는 면적이 BJLHP가 크며, 증발부에서의 열유속이 크기 때문이다. 이를 통해 BJLHP의 수평상태에서의 열전달 성능이 진동형 히트파이프에 비해 뛰어나다는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 유량 변화에 따른 BJLHP의 표면 평균 온도를 비교한 그래프이다. 유량의 증가에 따라 정상상태 도달시간이 감소하며, BJLHP 표면 평균 온도가 높게 측정되었다.

이는 온수 유량 증가에 따라 BJLHP 증발부에서의 열유속이 증가했기 때문이다. 증발부에서의 열유속 증가는 증발부의 좁은 환형공간내의 버블의 생성량, 압력, 온도가 증가되어 작동유체를 응축부로 유동시키는 맥동능력이 증가하기 때문에 BJLHP가 정상상태에 도달하는 시간이 단축된 것으로 판단된다.

Table 3 Specification of the visualized BJLHP

Parameter		Specification	
Material		Quartz glass	
Evaporating Part	Outer Tube	L [mm]	70
		d_i [mm]	23.5
	Heater	L [mm]	50
		d_o [mm]	16.5
Condensing Part		L [mm]	700
		d_i [mm]	9

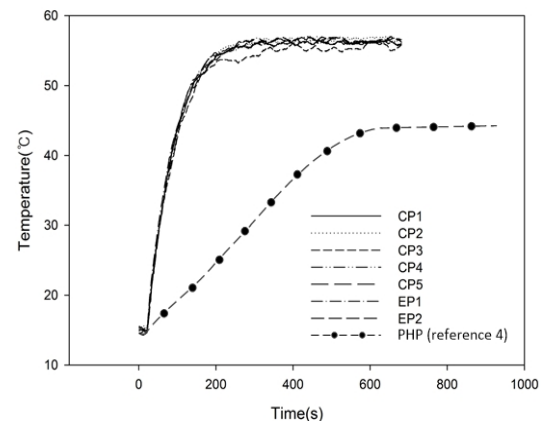


Fig. 4 Comparison of temperature distribution profiles between BJLHP and PHP at flow rate of 1.5 kg/min

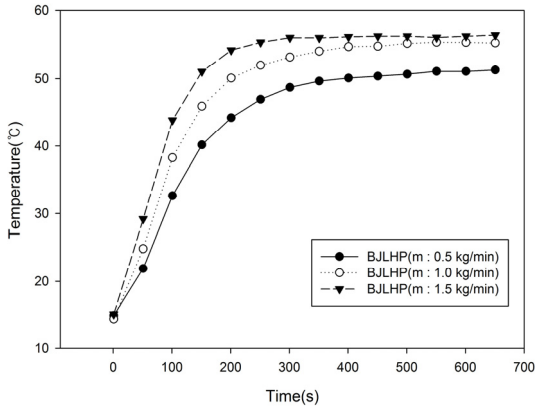


Fig. 5 Temperature profiles of average temperature of BJLHP surface

Table 4는 각 유량에 따른 바닥 방열 열유속, 정상상태 도달시간, 증발부와 응축부의 온도차와 유효열전도율을 나타낸다. 난방 바닥으로의 방열 열유속 및 유효열전도율은 유량 증가에 따라 값이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 정상상태 도달 시간은 4분~6분이며 유량이 커질수록 정상상태 도달 시간이 단축되는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 바닥 온도 35°C를 기준으로 난방 시 필요한 방열량(온수 유량 3 kg/min 기준, 약 60 W/m²)을 1.5 kg/min의 적은 유량에서도 73 W/m²의 열을 전달하여 충분히 바닥 난방에 적용 가능한 것으로 나타났다.³⁾

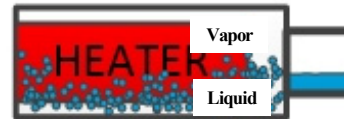
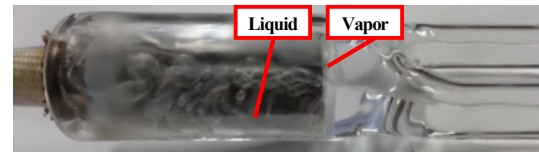
3.2 BJLHP 내부 유동 가시화

Fig. 6은 Fig. 3에서 구분한 A, B, C에서의 내부 유동을 촬영한 사진과 스케치를 부분별로 나누어 놓은 것이다. ‘A’는 BJLHP의 증발부에 해당하는 부분으로, 전기 히터에 의해 작동유체의 핵비등(nucleate boiling)이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이때, 다량의 고온 기포(bubble)가 발생한다. 응축부로 기포가 유입되면서 고속의 증기 기류가 생성되며, 응축부의 작동유체 액면을 밀어 맥동을 생성시킨다. 이 맥동은 ‘B’부분에서 보이는 유동 형태와 같은 기체와 액체의 동시적 흐름인 슬러그류(Slug flow)로, 일부 액면이 관의 윗부분까지 붙어서 이동하는 형태이다.^{5,6)} 이러한 슬러그류가

발생할 때 작동유체가 ‘C’로 밀려 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 한편, ‘C’는 ‘B’에 비해서 액면의 높이가 낮으며, 맥동이 약한 파도의 물결과 같은 파형류를 나타내었다. 따라서 BJLHP의 작동유체의 순환은 기포에 의해 생성된 맥동에 의해서 이루어지며, 그 유동양식은 슬러그류, 파형류와 같은 이상 유동으로 확인되었다.

Table 4 Heat flux, time to steady state and effective thermal conductivity according to hot water flow rates

Flow rate (kg/min)	q'' (W/m ²)	t_s (s)	ΔT (°C)	k_c (kW/m°C)
0.5	31.2	327	0.13	1344
1.0	52.4	318	0.13	2281
1.5	73.0	209	0.09	4714



(a) A sketch of part ‘A’



(b) A sketch of part ‘B’



(c) A sketch of part ‘C’

Fig. 6 Photos and sketches of inner flow in the visualized BJLHP

4. 결 론

온수 가열 바닥 난방용 BJLHP를 개발하여 다음과 같은 실험 결과를 얻었다.

1) BJLHP는 수평상태에서 증발부와 응축부의 평균 표면 온도차가 1℃ 이하로 매우 작아, 바닥 난방 장치로 사용시 균일한 온도로 난방이 가능하다.

2) 진동형 히트파이프(PHP)를 이용한 바닥 난방 장치에 비해 BJLHP의 정상상태 도달 시간이 약 7분 빠르고, 두 배 이상의 높은 열유속과 유효 열전도율을 확인하였다. 또한, BJLHP가 진동형 히트파이프에 비해 표면 온도가 약 10℃ 가량 높아 바닥 난방효과가 진동형 히트파이프에 비하여 우수하다.

3) 가시화실험을 통하여 BJLHP 증발관의 좁은 틈새에서 발생한 고온-고압의 기포가 고속으로 응축관을 지나며 관내의 작동유체 액면에 맥동을 발생시키는 작동 메카니즘을 규명하였으며, 응축부에서의 맥동에 의한 유동양식은 슬러그류 및 파형류가 주류였다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.

Reference

1. D. K. Jeong, J. H. Woo and J. S. Kim, 2011, "A Study on Heat Transfer and Flow Characteristics of Bubble Jet Loop Heat Pipe", KSME spring annular conference, pp. 175-180.
2. C. S. Kang, M. I. Cho, Y. K. Kim, S. J. An, J. K. Seo and J. J. Lee, 2004, "A Preliminary Study on Floor Heating System that Uses Thermo Siphon Type Heat Pipe", SAREK summer annular conference, pp. 160.
3. T. K. Lee, J. Y. Lee, M. J. Song and S. W. Kim, 2013, "The Comparison of Thermal Characteristics of New Han-ok Floor Heating for

Applying Modern On-dol system", KIEAE, Vol. 13, No. 3, pp. 61-69.

4. S. H. Lee, J. S. Kim, S. W. Gong and Y. B. Im, 2006, "An Experimental Study on the Performance of Floor-Heating Device Using Pulsating Heat Pipe", KSME spring annular conference, pp. 2448-2453.
5. John G. Collier and John R. Thome, 1994, "Convective Boiling and Condensation", Clarendon Press OXFORD, pp. 14-17.
6. S. Y. Lee, 1993, "Two-phase flow heat transfer", Dae Young Sa, pp. 8-19.