# 증발부에 편심 가열부를 사용한 버블젯 루프 히트파이프의 열성능

Thermal Performance of the Bubble Jet Loop Heat Pipe Using Eccentric Heater in Evaporating Section

김종수(Jong-Soo Kim)<sup>1†</sup>, 김성복(Sung-Bok Kim)<sup>2</sup>

1부경대학교 냉동공조공학과, <sup>2</sup>부경대학교 대학원 냉동공조공학과

<sup>1</sup>Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, Busan, 48547, Korea <sup>2</sup>Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Graduate School of Pukyong National University, Busan, 48547, Korea

(Received September 17, 2015; revision received November 4, 2015; Accepted: November 5, 2015)

Abstract The Bubble Jet Loop Heat Pipe (BJLHP) is designed to operate in the horizontal orientation. The motion of the bubble generated by boiling working fluid on a heater surface in the evaporating section of the BJLHP helps the working fluid transfer heat to the condensing portion. In this study, we changed the position of the heater in the evaporating section from concentric to eccentric. The concentric heater is located at the center of the tube in the evaporating part, and the eccentric heater is located at the bottom of the inner surface of the same tube. We used R-134a as the working fluid, and the charging ratio was 50%vol. We measured the temperatures of the evaporating and condensing sections by changing the input electric power from 50 W to 200 W, measuring every 50 W. The results of the experiment show that the effective thermal conductivity of BJLHP using an eccentric heater is four times higher than the BJLHP obtained using a concentric heater. Additionally, we conducted a visualization experiment on the evaporating portion of BJLHP to determine why the effective thermal conductivity was higher. The working fluid was water, and we took pictures of the flow visualization for BJLHP. Nucleate boiling with the eccentric heater was more intense and generated more bubbles. Therefore, the eccentric heater was more saturated by the liquefied working fluid.

Key words Effective thermal conductivity(유효열전도도), Bubble jet loop heat pipe(버블젯 루프 히트 파이프), Eccentric heater(편심 히터), Concentric heater(동심 히터)

\* Corresponding author, E-mail: jskim@pknu.ac.kr

## 기호설명

$k_{eff}$	: 유효열전도도 [kW/m・K]
$L_{eff}$	: 유효길이 [m]
L	:길이 [m]
A	: 단면적 [m²]
Т	: 온도 [℃]
Q	:히터 인가 전력 [kW]

## 하첨자

 ep
 : 증발부

 cp
 : 응축부

# 1. 서 론

버블젯 루프 히트파이프(Bubble Jet Loop Heat Pipe) 는 히트파이프의 한 종류로 wick이 없이도 수평 상태에 서도 안정적으로 작동하도록 설계된 고성능 열전달 장 치이다. BJLHP 증발부 내에 가열부인 히터가 설치되 고, 히터에 열이 공급됨에 따라 작동유체와 접하고 있 는 히터의 외표면에서 작동유체의 핵비등이 발생한다. 증발부에서 작동유체의 핵비등을 통해 버블이 생성될 수 있도록 하고, 버블의 순환 및 진동을 통해 수평상 태에서도 잠열 및 현열의 형태로 응축부로 열이 수송 될 수 있도록 한다. 종래의 연구에서는 BJLHP 열 성능 평가를 위해 작동 유체의 충진율을 변화시키고,<sup>(4)</sup> 증발부에서 히터와 외 관 사이의 간극(clearance)을 변화시켰다.<sup>(5)</sup> 또한 증발부 의 각도를 변화시켜 실험하였다.<sup>(7)</sup> 이 때 히터는 증발부의 외관과 동심으로 제작하여 실험이 진행되었기에 편심 히터가 적용된 BJLHP에 관한 연구는 이루어지지 않았다. 따라서 본 실험에서는 증발부에서 히터가 증발부 내 관에 아랫부분에 접하도록 설치하여, 편심 히터가 적 용된 BJLHP의 열적 성능을 동심 히터를 사용했을 때 와 비교 및 평가 하였다. 아울러 각각의 히터에 대하 여 증발부 가시화 실험을 진행하여 버블의 생성과 유 동 양식을 관찰하고 비교하였다.

# 2. 실험장치 및 방법

## 2.1 열성능 실험

2.1.1 실험장치

본 실험에 사용한 BJLHP의 개략도와 제원을 각각 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

BJLHP는 작동유체가 핵비등하여 버블이 발생하는 증 발부와 가열부로부터 받은 열을 방열하는 응축부로 구



Fig. 1 Schematic diagram of BJLHP.

Table 1 Specification of BJI	LHP
------------------------------	-----

	Evaporating part	Condensing part	Heater
Length(mm)	200	9,600(loop)	145
Outer diameter (mm)	28.5	12.7	20
Inner diameter (mm)	25.5	10.9	-
Capacity			220 V-200 W

Table 2	Ex	perimenta	1 co	ndition
---------	----	-----------	------	---------

Parameter	Value
Working fluid	R-134a
Charging ratio	50%vol
Orientation	Horizontality



Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup.

성되어 있다. 증발부에는 히터가 삽입되고, 응축부는 길 이 4.8 m인 2개의 구리관으로 구성되며 말단에서 U자 로 연결되는 루프형으로 제작되었다. BJLHP의 작동유 체는 선행연구 결과<sup>(9)</sup>를 토대로 R-134a를 사용하였으 며, BJLHP의 내부 진공도를 6.7×10<sup>-4</sup> Pa로 하여 BJLHP 의 내부 체적의 50%(101.3 kPa, 22℃)로 액상의 작동유 체를 주입한 뒤 밀봉하였다. 가열부에는 카트리지 타입 의 전기히터를 사용하였다. Fig. 1과 같이 동심 가열부 는 히터의 위치를 히터의 중심과 증발부 외관의 중심 을 일치시켜 히터를 삽입하여 제작하고, 편심 가열부 는 히터의 위치를 증발부의 밑바닥에 접촉시켜 바닥 쪽으로 치우쳐 제작하였다.

#### 2.1.2 실험방법

실험장치의 개략도는 Fig. 2와 같다. 증발부의 히터 입력 전력은 파워미터와 전압조절기를 사용하여 입력 하였다. 온도는 열전대(T-type)와 데이터 로거(GL800, Graphtec, 정도 ±0.1℃)를 사용하여 증발부에 1개소(EP), 응축부에 5개소(CP1~CP5)를 BJLHP 표면에 부착하여 1초 간격으로 3,600초 동안 측정하였다. 히터에 인가되 는 전력을 50 W(증발부 열유속 5.3 kW/m<sup>2</sup>), 100 W(10.6 kW/m<sup>2</sup>), 150 W(15.9 kW/m<sup>2</sup>), 200 W(21.2 kW/m<sup>2</sup>)로 변 경하면서 온도를 측정하고, 각 전력 조건에서의 실험 결과는 온도 정상 상태 구간(3,500 s~3,600 s)에서의 증발부와 응축부의 평균 온도차에 따른 유효 열전도도 를 식(1)을 이용하여 계산<sup>(3)</sup>한 후 비교하였다.

$$k_{eff} = \frac{Q \cdot L_{eff}}{A_{cp}(T_{ep} - T_{cp})} [kW/mK]$$
<sup>(1)</sup>

$$L_{eff} = \frac{L_{ep} + L_{cp}}{2} \tag{2}$$

식(1)에서 유효길이(*L<sub>eff</sub>*)는 식(2)와 같이 증발부 길 이(*L<sub>ep</sub>*)와 응축부 길이(*L<sub>q</sub>*)의 합의 절반이며, 증발부 온도(*T<sub>ep</sub>*)는 EP지점에서 측정한 값이고, 응축부 온도 (*T<sub>q</sub>*)는 CP1~CP5지점에서 측정한 값들의 평균값이다.

#### 2.2 증발부 가시화 실험

#### 2.2.1 실험장치

실험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 가시화를 위해 내열충격성이 우수한 파이렉스(Pyrex)를 사용하여 관을 제작하였으며, 파이렉스 관 내부에 카트리지 히 터를 삽입하였다. 동심 가열부는 히터의 위치를 히터의 중심과 파이렉스 관의 중심을 일치시켜 히터를 삽입하 고, 편심 가열부는 히터의 위치를 파이렉스 관의 밑바 닥에 접촉시켜 바닥 쪽으로 치우쳐 삽입한다. Pyrex관 내부에 수평 상태로 히터가 삽입되어 있으며, 히터는 발 열부(heating section)와 비발열부(non-heating section)로 구성되어 있다. 비발열부 위쪽에 물탱크를 설치하여 관 내에 작동유체(working fluid)가 원활히 공급되도록 하 였다. 작동유체는 물을 사용 하였으며, 실험은 대기압 상 태에서 진행하였다. 촬영은 고속촬영이 가능한 디지털 카메라(J4, Nikon)와 LED 램프(2,300 lm, 2개)를 광원으로



Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup.

Table 3 Specification of experiment

	Specification	
W	water	
Pyrex Tube	Material	Pyrex
	Diameter(mm)	15
	Length(mm)	800
	Diameter(mm)	10
	Length(mm)	125
	Capacity	220 V, 200 W
Heater	Heating section length(mm)	45
	Non-heating section length(mm)	80

사용하여 촬영하였다. 실험 장치의 제원은 Table 3과 같다.

#### 2.2.2 실험방법

히터 입력 전력은 파워미터와 전압조절기를 사용하여 100 W(증발부 열 유속 70 kW/m<sup>2</sup>), 140 W(100 kW/m<sup>2</sup>), 180 W(130 kW/m<sup>2</sup>)로 변경하면서 입력하였다. 각각의 입력 전력에서 정상상태에 도달하였을 때 히터의 발열 부를 400 fps로 3초간 촬영하였다.

# 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 열성능 실험

인가된 전력에 따라서 시간에 따른 BJLHP의 표면 온 도분포를 Fig. 4~Fig. 7에 나타내었다. 모든 실험에서 전력이 인가되면 BJLHP의 온도는 상승하다가 일정시 간 이후로는 온도의 변화가 거의 없는 정상상태에 도 달하여 안정적으로 작동을 하였다.

BJLHP의 표면 온도 분포는 열원인 히터가 있는 증 발부(EP) 지점의 온도가 가장 높으며, 응축부의 말단 부분(CP5)의 온도가 가장 낮았다. 증발부에서 응축부 말단 부분으로 갈수록 온도가 감소하지만 증발부와 응 축부 말단의 온도차(0.1~2.3℃)는 미세했다. BJLHP는 열원인 히터로부터 열을 공급받아 작동유체액이 비등 되어 버블을 발생하고, 압력차에 의해 버블이 응축부 로 이동되어 방열하고 응축함으로 열을 증발부에서 응 축부로 수송한다. 증발부에서 발생한 버블들이 응축부 말단까지 이동하면서 계속 방열하여 응축되기 때문에 응축부로 갈수록 온도가 낮아진다.

시간에 따른 온도의 변화율이 0.12℃/min 이하일 때 를 정상상태로 판단하였으며, 온도가 안정화된 정상상



Fig. 4 Temperature profiles of BJLHP(5.3 kW/m<sup>2</sup>).



Fig. 6 Temperature profiles of BJLHP(15.9 kW/m<sup>2</sup>).



Fig. 5 Temperature profiles of BJLHP(10.6 kW/m<sup>2</sup>).



Fig. 7 Temperature profiles of BJLHP(21.2 kW/m<sup>2</sup>).

태(3,500 s~3,600 s)에서의 증발부(EP)의 온도(*T<sub>ep</sub>*)와 응 축부(CP1~CP5)의 평균 온도(*T<sub>q</sub>*)와 각 부의 온도차(*T<sub>ep</sub>* -*T<sub>q</sub>*)를 Table 4에 나타내었다. 가열부에 편심 히터를 적용한 BJLHP는 열유속에 따른 평균 온도차가 약 0.15℃

Table 4 Temperature of each part at steady state

Heat Flux (kW/m <sup>2</sup> )	Туре	$T_{ep}$ (°C)	$T_{cp}$ (°C)	$T_{ep}$ - $T_{cp}$ (°C)
5.3 -	Concentric	32.2	31.90	0.30
	Eccentric	31.5	31.43	0.07
10.6	Concentric	40.3	39.8	0.50
	Eccentric	39.7	39.58	0.12
15.9	Concentric	48.7	47.85	0.85
	Eccentric	47.9	47.70	0.20
21.2	Concentric	55.5	54.56	0.94
	Eccentric	54.8	54.57	0.23

 Table 5 Effective thermal conductivities and time constants of each type

Heat Flux (kW/m <sup>2</sup> )	Туре	k <sub>eff</sub> (kW/m ⋅ K)	Time constant (sec)
5.2	Concentric	1,895	761
5.5	Eccentric	8,561	748
10.0	Concentric	2,293	682
10.0	Eccentric	9,289	692
15.0	Concentric	2,024	666
15.9	Eccentric	8,633	667
21.2	Concentric	2,436	625
	Eccentric	9,939	641



Fig. 8 Variations of effective thermal conductivity with heat flux.

로서 동심 히터를 적용한 경우(약 0.64℃)보다 작다. 식 (1)을 이용하여 구한 유효열전도도(k<sub>eff</sub>)와 정상상태의 온도에 도달하기까지의 시정수(Time constant)를 Table 5 에 나타내었다. 열유속이 증가할수록 시정수는 감소하 지만, 각각의 열유속에서 편심 히터를 적용한 BJLHP 와 동심 히터를 적용한 BHLHP의 시정수는 차이가 나 지 않았다.

열 유속에 따른 유효열전도도의 변화를 Fig. 8에 나 타내었다. 유효열전도도는 편심 히터를 적용한 BJLHP 가 동심 히터를 적용한 BJLHP에 비해 405%~452% 크게 나타났다. 이와 같이 유효열전도도가 4배 이상 차이 나는 것은, 편심된 히터와 액상의 작동유체가 접 촉하는 면적이 증가되었기 때문이다. 편심 히터일 경 우 히터 표면과 작동유체의 접촉 면적이 53.6 cm<sup>2</sup>으로 동심 히터일 경우인 45.53 cm<sup>2</sup>보다 약 17.72%가 증가 한다. 이는 히터 표면으로부터 작동유체액으로의 열전 달 면적이 더 크며, 이에 버블이 더 많이 발생함을 의 미한다.

또한 편심 히터를 적용한 BJLHP의 경우 히터와 증발 부 외부 원관의 좁은 틈새 공간에서 핵비등이 촉진되어, 작동유체를 원주방향으로 분사(jetting)하는 힘이 더 크 다. 분사하는 힘에 의해 액상의 작동유체가 히터의 원주 (circumference) 방향으로 분출되어 히터를 적시는데, 편 심 히터일 경우 분사하는 힘이 더 크고 히터가 증발부 바 닥에 접촉되어 액면에 비해 히터의 높이가 더 낮기 때 문에 분출된 액상의 작동유체가 히터를 더 많이 적신다. 따라서 편심 가열부를 적용한 BJLHP의 유효열전도도가 높게 나온 것으로 보인다.

## 3.2 가시화 실험

각 열유속에서 정상상태에서의 버블 양상을 촬영한 사진을 Fig. 9~Fig. 11에 나타내었다. 액상의 작동 유 체에 히터가 잠겨있는 수면의 높이는 동심히터에 비해 편심히터가 높으며, 히터와 파이렉스 관 사이에서 액 상의 작동유체가 핵비등을 하여 버블들이 발생함을 알 수 있다. 핵비등에 의해 발생한 작은 기포들은 액과 기체의 밀도차에 의해서 위로 올라오면서 다른 기포들 과 합쳐져 크기가 커지고, 위쪽에 모여서 압력차에 의 해 응축부로 분출되어 이동한다.

편심히터를 적용한 경우는 동심히터일 때 보다 작은 기포들이 비등하여 더 많이 발생하고, 기포의 크기가 더 빨리 커지면서 히터의 원주방향으로 이동하는 속도 가 더 빠르다. 이에 편심히터를 적용한 경우가 히터의 원주 방향으로 액을 분사하는 힘이 더 크며, 액상의 작동유체에 잠기지 않은 히터의 윗부분을 보다 더 격 렬하게 적신다. 그 결과로 동심히터일 경우는 히터의 윗부분이 부분적으로 Dry-out이 되는 현상이 관찰되며,



편심히터는 작동유체의 핵비등에 의한 분출력으로 인 해 히터 윗표면이 항상 작동유체 액에 적셔 있다. 따라서 편심히터를 적용한 BJLHP가 동심히터를 적 용한 경우비다 히터가 자동유체 액에 더 많이 정셔지

# 용한 경우보다 히터가 작동유체 액에 더 많이 적셔짐 으로 인하여 유효열전도도가 4배 이상 높게 나온 것으 로 사료된다.

# 4. 결 론

본 연구에서는 동심히터가 적용된 기존의 BJLHP와 편심히터가 적용된 BJLHP의 비교를 위해 실험을 하였 으며, 본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다. (1) 편심 가열부를 적용한 BJLHP가 동심 가열부를 적 용한 BJLHP보다 유효열전도도가 4배 이상 크다.

- (2) 열유속의 증가에 따라 유효열전도도는 증가하는 경 향을 나타내었으며, 시험 열유속 범위 내에서는 dryout은 발생하지 않았다.
- (3) 편심 가열부를 적용한 BJLHP가 동심가열부를 적용 한 BJLHP보다 좁은 틈새 내에서의 핵비등에 의해서 히터의 원주방향으로의 jetting하는 힘이 더 크며, 히터가 액상의 작동유체와 접하는 핵비등 전열면 적이 증대된다.

# 후 기

본 연구는 2015학년도 부경대학교의 자율창의학술연 구비 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(과제번호: C-D-2015-0855).

## References

- Kim, J. S., Kwon, Y. H., and Kim, J. Y., 2014, Development of High Performance Bubble Jet Loop Heat Pipe for Hot Water Floor Heating System, Journal of the KSPSE, Vol. 18, No. 4, pp. 23-28.
- Kim, J. S. and Shin, J. S., 2015, Development of a High Performance Bubble Jet Loop Heat Pipe Using the Enhanced Nucleate Boiling Surface in Evaporating Sec-

tion, Journal of the KSME, Vol. 39, No. 4, pp. 363-367.

- 3. Ready, D. A. and P. A. Kew., 2005, Heat pipes, Butterworth Heinemann, 5th ed.
- Jung, D. G., Woo, J. H., and Kim, J. S., 2011, A study on heat transfer and flow characteristics of bubble jet loop heat pipe, Proceeding of the KSME conference, pp. 775-780.
- 5. Shin, J. S., Kwon, Y. H., and Kim, J. S., 2013, The study of BJLHP performance according to the shape of evaporating section, Proceedings of the SAREK conference, pp. 21-25.
- 6. Hwang, J. H., 2009, An experimental study to bubble jet pulsating loop heat pipe, Proceedings of the KSME 2009 spring annual meeting, pp. 263-267.
- Hwang, E. H., Park, S. J., Kim, J. H., Kim, D. B., and Kim, J. S., 2015, Nucleate Boiling Flow Visualization of Enhanced Heat Transfer Surface in Narrow Annular Spaces, Proceedings of the SAREK conference, pp. 326-330.
- Jung, H. S., Bui, N. H., Kim, J. H., and Kim, J. S., 2001, Basic study on looped oscillating heat pipe, Proceedings of the KSME conference, pp. 169-173.
- Kim, J. W., 2015, Study on heat transfer characteristics of foldable bubble jet loop heat pipe, MS thesis, The graduate school Pukyong national university, Busan, Korea.