◎ 논 문 ◎ Original Paper

# 대형 공랭 포크형 히트파이프의 열전달 특성에 대한 실험적 연구

임창환<sup>\*</sup> · 김형대<sup>\*\*†</sup>

# Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of a Large-Scale Air-cooled Fork-End Heat Pipe

Changhwan Lim\*, Hyungdae Kim\*\*†

Key Words : Thermosyphon(열싸이편), Fork-end Heat Pipe(포크형 히트파이프), Air-Cooling(공랭)

#### ABSTRACT

Recently, large-scale air-cooled heat pipes have been considered for use in various passive cooling systems to protect against station black-out accidents at nuclear power plants such as the one that occurred at the Fukushima facility in 2011. This study examines the conceptual design of a fork-end heat pipe (FEHP) with a relatively large heat transfer area in the condenser for air cooling in comparison to the evaporator for heating in liquid water. FEHP uses water as a working fluid and consists of one water-heated evaporator tube and several air-cooled condenser tubes. To experimentally evaluate the heat transfer characteristics of the proposed FEHP design, a scaled-down model and a test facility were constructed. The evaporator of the scaled-down model was heated by circulating hot water while the fork-end condensers were cooled by atmospheric air at room temperature. Results of this design study indicated that as the circulating water temperature was increased, four different operational modes were observed in the evaporator in sequence: natural convection, geyser boiling, fully-developed nucleate boiling, and falling film boiling. The geyser boiling displayed mechanically and thermally unstable features due to the large quantity of explosive nucleations in the working fluid when it was superheated beyond the saturation temperature corresponding to the system pressure. The average heat transfer rate in the fully-developed nucleate boiling mode stably increased with increasing water temperature in the heating loop and converged towards a maximum value as the system approached the falling film boiling mode.

## 1. 서 론

히트파이프는 상변화를 이용하여 높은 유효열전도도를 가 지는 열교환 장치이며, 구조적으로 단순하게 제작이 가능한 장점이 있다. 뿐만 아니라 외부의 전력공급 없이도 작동이 가능하기 때문에 여러 산업계에서 이용되고 있다. 이와 같은 장점 때문에 원자력발전 산업계에서는 핵연료의 붕괴열을 제거하기 위한 냉각계통에 히트파이프를 적용하려는 시도를 하고 있다. 특히 후쿠시마 원전사고 이후에 이와 관련된 연 구가 활발히 진행되고 있다.

최근 중국에서는 루프형 써모싸이폰(Thermosyphon) 히 트파이프를 이용한 사용후핵연료 저장수조 피동냉각계통을 개발 중에 있다.<sup>(1,2)</sup> 공랭방식을 이용하며 총 16 MW의 붕괴 열을 제거할 수 있는 루프형 써모싸이폰 설계안을 제안하였 으며, Xiong et al.<sup>(1,2)</sup>은 7.8 m 증발부와 20 m 응축부를 가 지는 실측규모의 실험장치를 제작하여, 실험적으로 단위 히 트파이프의 열전달량을 측정하였다. 실험적으로 10 kW 이상 의 열전달량 성능을 가질 수 있음을 확인하였으며, 약 1,594 개의 히트파이프로 전체 붕괴열을 제거할 수 있음을 확인하 였다. 일본의 Mochizuki et al.<sup>(3)</sup>은 공랭방식을 이용한 열 다이오드(Thermal diode)형 히트파이프의 개념안을 제안하 였으며, 증발부 6 m, 응축부 4 m의 히트파이프를 이용하여 열설계를 수행하였다. 히트파이프의 성능에 따라 소요되는 개수와 전원상실사고 시 시간에 따른 노심냉각수의 온도변

<sup>\*</sup> 경희대학교 원자력공학과 대학원(Kyung Hee University, Department of Nuclear Engineering, Graduate School)

<sup>\*\*</sup> 경희대학교 원자력공학과(Kyung Hee University, Department of Nuclear Engineering)

<sup>†</sup> 교신저자, E-mail : hdkims@khu.ac.kr

The KSFM Journal of Fluid Machinery: Vol. 21, No. 5, October 2018, pp.34~42(Received 09 Mar 2018; revised 07 Jun. 2018; accepted for publication 16 Jul. 2018)

 34
 한국유체기계학회 논문집: 제21권, 제5호, pp.34~42, 2018(논문접수일자: 2018.03.09, 논문수정일자: 2018.06.07, 심사완료일자: 2018.07.16)

화를 이론적으로 해석하였으며, 열설계 결과에서 단위 히트 파이프 성능에 따라 소요되는 개수가 800 개에서 6,600 개로 다양하게 나타났다.

## 1.1 포크형 히트파이프 설계개념

본 연구에서는 포크형 히트파이프(Fork-end heat pipe, FEHP)라는 새로운 개념의 대형 히트파이프 시스템 설계안 을 제안하였다. FEHP의 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 수 직으로 뻗은 증발부(Evaporator) 위에 넒은 공동이 있는 헤 더(Header)구조가 있다. 헤더에는 약 7°의 기울기를 가지며 휜(Fin)이 달린 여러 개의 응축부(Condenser)가 채결되어 있다. FEHP는 작동유체로 물을 사용한다. 증발부가 가열됨 에 따라 작동유체가 기화하며, 생성된 기체는 부력에 의해 헤더로 상승한다. 헤더에 도달한 기체는 여러 개의 응축부로 분지되어 유동한다. 응축부에서는 기체는 공기의 자연대류 에 의해 냉각되며, 액화된 작동유체는 경사면을 따라 헤더에 모이게 되고, 다시 증발부로 회귀하게 된다.

포크형 히트파이프는 여러 다발의 응축부와 증발부가 하 나의 해더 구조로 통합된 형태의 히트파이프이며, 이러한 설 계안의 주된 목적은 열전달 성능이 낮은 공기냉각 방식을 사 용할 때 공랭 열전달면적을 확장하여 단위 히트파이프의 열 전달 성능을 향상시키는 것이다. 이를 통해 소요되는 히트파 이프의 개수를 낮출 수 있다. 하지만 일반적으로 사용하는 히트파이프와 비교하여 규모가 크고, 새로운 형태의 설계개 념을 가지기 때문에 운전특성에 대한 물리적인 이해가 선행 되어야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 포크형 히트파이프의 축소모델을 제작하여 실험연구를 수행하였으며, 특히 증발 부에서 나타나는 운전특성에 대해 집중적으로 분석하였다.

## 2. 문헌조사

FEHP는 중력에 의해 작동하는 윅(Wick)이 없는 히트파이 프의 종류로써 일반적인 써모싸이폰과 동일한 작동방식을 가진다. 실험을 수행하기에 앞서 이전 연구자들에 의해 수행 된 써모싸이폰(특히 증발부)의 열전달 현상에 관한 문헌을 조사하였다.

### 2.1 불안정성

Tian et al.<sup>(4)</sup>은 충진량이 큰 써모싸이폰에서 열유속이 불 안정성에 미치는 영향을 실험적으로 확인하였다. 인가 열량 이 낮을 때에는 활발한 핵비등이 발생하지 못하며, 기포의 크기가 관의 직경과 유사한 테일러(Taylor) 기포가 형성된다 고 언급하였다. 증발부와 단열부의 온도가 큰 폭으로 진동하 는 불안정성이 관측되었으며, 순간적으로 생성된 테일러 기



Fig. 1 Conceptual drawing of fork-end heat pipe

포가 액체를 밀어 올리는 가이즈 비등(Geyser boiling) 현상 에 의해 나타난다고 설명하였다. 하지만 인가 열량이 증가함 에 따라 가이즈 비등현상은 완화되었다. 또한 가이즈 비등이 완화 된 이후, 더 큰 열량이 인가됨에 또 다른 불안정성이 관 측되었다. 인가되는 열량의 증가로 인해 생성되는 증기의 양 과 유속이 증가하게 되고, 이에 따라 증기-액체 계면에서 강 한 전단응력이 작용하면 회귀하는 응축수의 유동이 저해되 어 일시적으로 증발부가 건조(Dry-out)되는 현상이 나타났 다. 이에 따라 증발부 온도가 진동하는 현상이 관측 되었다. Faghri<sup>(5)</sup>는 위와 같은 증발부의 일시적인 건조현상이 상반 류 유동한계(Countercurrent flow limit)로 인해 발생한다 고 설명하였고, 이와 더불어 가이즈 비등현상이 발생할 시 분출하는 액체가 히트파이프와 충돌하여 히트파이프 재료의 건전성이 훼손될 가능성이 있음을 언급하였다.

Jouhara et al.<sup>(6)</sup>은 전산유체역학 해석을 수행하여 써모 싸이폰 내 가이즈 비등현상을 구현하였으며, 물과 R134a 각 각에서 나타나는 풀비등 현상을 비교하였다. 해석 결과, 물 의 경우 낮은 열유속에서 가이즈 비등현상이 나타나며 열유 속이 증가할수록 안정화 되는 것을 확인하였으며, 가시화 실 험을 통해 검증하였다. 반면에 R134a는 작은 기포가 형성되 어 가이즈 비등현상이 나타나지 않았다.

Chang et al.<sup>(7)</sup>은 루프형 써모싸이폰을 제작하여 열유속에 따른 증발부 내부 비등현상을 가시화 하고 불안정성의 영향으 로 나타나는 증발부 벽면온도의 진동현상을 분석하였다. 인가 하는 열유속이 증가할수록 벽면온도의 진동폭은 감소하였으 며 또한, 점차적으로 비등현상이 변화하는 것을 관측하였다.

#### 2.2 증발부 비등현상

Niro 와 Beretta<sup>(8)</sup>는 써모싸이폰 내 비등현상에 따른 비등

#### 임창환・김형대



Fig. 2 The scaled-down model for fork-end heat pipe: (a) pictures, (b) a plan for side view, (c) a plan for front view

영역(Boiling regime)을 구분하였으며 그 영역의 경계가 되는 기준 값을 이론적으로 제시하였다. 충진량이 적고 많음에 따 라 유하액막증발(Falling film evaporation) 모드와 풀비등 모드를 구분하였고, 풀비등 모드에서도 기포가 성장하는 시간 과 기포가 형성되기까지의 대기시간을 기준으로 '간헐적 비등 (Intermittent boiling)'과 '완전발달 비등(Fully developed boiling)'을 구분하였다. 또한 형성된 기포의 크기와 히트파이 프 내경의 크기를 기준으로 하여 완전발달 비등영역을 세분화 하여 테일러 기포가 나타나는 슬러그 비등(Slug boiling)과 기포 비등(Bubble boiling)으로 구분하였다. 뿐만 아니라 실 험적으로 간헐적 비등과 완전발달 비등 현상에서 나타나는 작 동유체의 온도변화 특징을 관찰하였다. 간헐적 비등 영역에서 는 일련의 주기를 가지며 발생하는 불안정성이 나타났으며, 완전발달 비등으로 천이하며 점차 주기가 짧아지다 안정되는 현상을 관측하였다.

Xia et al.<sup>(9)</sup>은 Niro 와 Beretta<sup>(8)</sup>의 내용을 바탕으로 평판 이상류 써모싸이폰(Flat two-phase closed thermosyphon) 에서 나타나는 비등현상을 가시화 하였다. 실험적으로 세 가 지 특징적인 비등현상을 관측하였으며 인가 열유속이 증가함 에 따라 '자연대류', '간헐적 비등', '완전발달 비등' 순으로 천 이하는 것을 확인하였다.

## 3. 실험장치 및 측정방법

### 3.1 포크형 히트파이프 축소모델

포크형 히트파이프의 열전달 현상에 대한 실험연구를 수행 하기 위해 Fig. 2와 같이 축소모델 시편을 제작하였다. 히트 파이프의 재료는 구리이며, 수직으로 뻗은 한 개의 증발부와 7°의 경사를 갖는 12 개의 응축부가 용적이 큰 헤더에 채결되 어 있다. 이때 증발부와 응축부의 직경은 각각 19.05 mm와 12.7 mm이며 두께는 0.8 mm이다. 각각의 길이는 1 m로 동 일하며, 증발부와 헤더 그리고 응축부와 헤더 사이에 각각 0.2 m, 0.15 m의 단열구간을 두었다.

응축부에는 공랭 열전달을 향상시키기 위해 원형 휜이 설 치되어 있으며, 두께가 5 mm, 외경이 32 mm인 원형 휜이 응축부 한개당 300개가 설치되어 있다. 이때 각각의 휜은 확관 방식으로 접합되어 휜과 배관 사이의 열저항이 최소화 되게 하였다.

해더는 응축수가 증발부로 원활히 회귀하도록 하기 위해 7°의 경사를 갖는 브이(V)자 모형으로 제작하였다. 헤더와 증발부 그리고 응축부는 용접에 의해 접합되었고, 이때 12 개의 응축부는 동일한 높이에 위치하도록 하였다.

작동유체로는 물을 사용하였으며, 저온에서의 상변화가 용이하도록 하고 불응축기체를 제거하기 위해 충진 전 고진 공을 조성하였다. 진공조성 및 작동유체 충진은 헤더에 설치 된 다이아프램 밸브를 통해 이루어졌다. 이때, 초기 진공도 는 7.0×10<sup>-4</sup> Pa 이다. 충진률(증발부 체적 대비 충진된 유체 의 체적)은 1.38이며, 이에 대응되는 작동유체의 수위는 약 1.2 m이다.

증발부의 운전특성을 관측하기 위해 작동유체의 온도를 측정하였다. 주요 측정부는 증발부 하단과 헤더의 중앙이며, 각각 T-type 열전대를 설치하였다. 열전대는 Omega사의 표준형 열전대를 사용하였으며 ±1 ℃의 측정오차를 가진다. 히트파이프의 대표압력은 헤더에서 측정하며 Omega사의 PX172-030A 모델을 사용하였다. 이때 압력의 측정오차는 ±0.52 kPa이다.

# 3.2 열전달 실험장치

히트파이프 열전달 실험을 위한 실험장치를 Fig. 3과 같 이 제작하였다. 실험장치는 크게 두 부분으로, 열을 공급하 기 위한 가열루프와 냉각을 위한 공랭덕트로 구성되어 있다. 가열루프는 내에는 증류수가 채워지고. 챔버에 삽입된 히터 에 의해 가열된다. 챔버는 항상 개방되어 루프 내 압력을 대 기압 상태로 유지하도록 하였다. 가열루프에서는 히트파이 프가 설치되어 있는 시험부와 바이패스(By-pass)로 유로가 나뉘어 있다. 시험부에는 오발기어(Oval gear) 방식의 유량 계가 장착되어 있으며, 바이패스로 흐르는 유량은 로타미터 (Rotameter)를 이용해 확인할 수 있다. 각각의 유량은 시험 부 입구단과 바이패스에 위치한 밸브에 의해 조절된다. 히트 파이프는 가열루프 내 재킷을 관통하여 삽입되며 환영유로를 형 성한다. 챔버에서 가열된 유체가 펌프를 통해 환영유로로 흐르며 히트파이프를 가열한다. 4선식 측온저항체를 이용하여 환영유로 를 흐르는 유체의 입·출구 온도를 측정하며, 각각 Omega사의 1/10 Din class의 RTD로 측정한다. 공랭덕트에는 균일한 유동을 형성하기 위해 벌집모양의 그물 구조물을 하단부에 설치하였고, 상부의 송풍기를 이용해 공기 유동을 생성한다. 실험장치를 구성 하는 주요 장비들의 사양을 Table 1에 정리하였다.

# 3.3 측정방법 및 불확실도 해석

# 3.3.1 열전달량 및 열저항 측정방법

열전달량은 가열루프에서 온도와 유량을 측정하여 식 (1)과





같이 계산된다. 이때  $\rho_t$ 은 가열루프를 흐르는 물의 밀도,  $c_{p,l}$ 은 비열을 나타내며,  $T_{in}$ 과  $T_{out}$ 은 재킷의 입·출구온도이다. 그리고 Q는 오발기어 유량계로 측정한 체적유량을 의미한다. 모든 측정값은 정상상태 또는 준정상상태에 도달 했을 때 정 상상태 시간동안의 평균을 취하여 열전달량 계산에 활용하였 다. 문헌조사에서와 같이 운전특성 상 나타나는 불안정성으로 인해 온도와 압력이 진동하게 되는데 이때, 일련의 일정한 주 기를 가지는 변화가 나타날 때를 준정상상태라 정의하였다. 모든 측정은 Agilent 34980A 다기능 측정 장비를 이용하였으 며, 매 4 초 간격으로 측정하였다. 최소 10 분 이상 일정한 주 기를 가질 때를 준정상상태 또는 정상상태라 하였으며, 시간 에 대한 평균을 취하여 평균 열전달량을 측정하였다. 실험적 으로 측정된 전체 열저항은 열원과 열침원의 온도차에 의해 식 (2)와 같이 계산된다. 이때 열침원의 온도는 대기 중 공기 온도이다.

$$q = \rho_l Q c_{p,l} (T_{in} - T_{out}) \tag{1}$$

$$R = \frac{T_{source} - T_{sink}}{q} \tag{2}$$

Heating Loop			Air Duct		
Component	Model/Type	Specification	Component	Model/Type	Specification
Heater	Immersion heater	2 kW / 3 kW	Fan	Innotech TIP-350S	6,900 m <sup>3</sup> /hr ; 3,420 rpm
Pump	NPY-2251-MK/Turbine	50 m ; 1.8 m <sup>3</sup> /hr	Air velocity sensor	E+E Elektronix EE75/ Hot wire anemometer	0-2 m/s±0.03 m/s
Flow meter	DG Flow DGT-010AI/ Oval gear	$0.02-0.7 \text{ m}^3/\text{hr} \pm 0.5\%\text{RS}$			

Table 1 Design specifications of each component of experiment facility

#### 3.3.2 불확실도 해석

본 연구에서 데이터 분석에 이용되는 모든 측정값의 불확 실도는 식 (3)과 같이 계산된다.<sup>(10)</sup>  $u_A$ 는 정상상태 또는 준정 상상태 동안 평균에 대한 Type A 표준불확실도이며, 표본표 준편차(s)를 표본수(N)의 제곱근으로 나눈 것으로 표현된다.  $u_B$ 는 측정장비의 사양서에서 제공되는 추정치(a)에 의한 Type B 표준불확실도이며, 연속균등분포를 가정하여 추정치 를 √3으로 나누어 구해졌다. 이때, 하첨차 n은 온도 또는 유량과 같은 특정한 측정값을 의미한다.

$$u_n = \sqrt{u_{A,n}^2 + u_{B,n}^2}$$
(3)

$$u_{A,n} = \frac{s_n}{\sqrt{N_n}} \tag{4}$$

$$u_{B,n} = \frac{a_n}{\sqrt{3}} \tag{5}$$

본 연구에서 불확실도 해석에 이용되는 측정값은 온도정보 와 유속·유량 등 유동에 따른 정보로 두 가지로 분류된다. 모 든 온도센서는 교정용 측온저항체인 Isotech 935-14-16을 이용해 교정을 수행하여 편향오차(Bias error)를 제거하였고, 유동정보는 유동이 형성되지 않았을 때 측정값의 영점을 점검 하여 편향오차가 없음을 확인하였다. 식 (1)에 의해서 얻어진 열전달량의 불확실도는 식 (6)에 의해서 구해진다.<sup>(10)</sup> 이때 포 함인자(Coverage factor, *k*)의 값은 '2'로 신뢰수준 95%로 계 산되었다. 물의 물성치는 IAPWS R7-97 보고서<sup>(11)</sup>에 의해 구 해졌으며, 이때 불확실도 해석에 사용된 밀도와 비열의 공차 는 각각 0.003%와 0.2%이다.

본 실험에서 가열루프 내 순환유체의 체적유량과 공랭덕트 에서 공기유속은 각각 5.46×10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>/s 와 0.5 m/s로 일정하 게 유지되었다. 이때 열전달량 측정의 불확실도는 신뢰수준 95%로 열전달량이 증가함에 따라 점차 변화하였다. 열전달 량이 26 W일 때 120%에서 열전달량이 2.3 kW 일 때 2.7% 까지 변화하였다.

$$\frac{U_q}{q} = k \left[ \left( \frac{u_{\rho_l}}{q} \frac{\partial q}{\partial \rho_l} \right)^2 + \left( \frac{u_Q}{q} \frac{\partial q}{\partial Q} \right)^2 + \left( \frac{u_{c_{\mu l}}}{q} \frac{\partial q}{\partial c_{\rho,l}} \right)^2 + \left( \frac{u_{T_{in}}}{q} \frac{\partial q}{\partial T_{in}} \right)^2 + \left( \frac{u_{T_{at}}}{q} \frac{\partial q}{\partial T_{out}} \right)^2 \right]^{1/2}$$
(6)

## 4. 결과 및 토의

## 4.1 증발부 운전특성

Fig. 4는 증발부와 헤더에서 정상상태 시간 동안 측정된

작동유체의 온도변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 채 워진 사각형 기호와 삼각형 기호는 각각 증발부 하단과 헤더 에서의 작동유체 온도를 의미한다. 이때 증발부와 헤더에서 의 온도 측정부는 Fig. 2에 나타난 것처럼 각각 증발부의 가 장 하단부와 헤더의 중심에서 측정하였다. 채워지지 않은 사 각형 기호는 증발부 하단의 포화온도를 의미하며, 포화온도 는 헤더에서 측정된 압력과 충진된 작동유체의 높이가 만드 는 정수압수두를 더하여 환산된 포화온도로서 식 (7)과 (8)에 의해 계산되었다.

$$P_e = P_a + \rho_l gh \tag{7}$$

$$T_{sat,e} = T_{sat}(P_e) \tag{8}$$

각 온도 측정은 매 4 초에 한 번씩 연속적으로 이루어 졌 지만, 그래프 상에는 시각적으로 단순화하기 위해 매 96 초 마다 한 번씩 기호를 표시하였다.

Fig. 4(a)는 열원온도가 66.7℃일 때 작동유체의 온도변화 그래프이며, 이때 측정된 열전달량은 약 26 W이다. 본 연구에 서 측정된 최대 열전달량이 2.3 kW 인 것에 비하면 매우 낮은 열전달량을 가지며, 온도변화가 안정적이기 때문에 핵비등과 같은 활발한 상변화가 발생하지 않는 것으로 보인다. 따라서 주된 열전달 현상은 냉각수 내에서 온도차에 의한 자연대류와 수면에서의 증발에 의해 이루어지는 것으로 해석된다. 자연대 류 현상에서는 비등현상이 없기 때문에 안정적인 온도변화 특 징을 가지고 있다. 또한 증발부 온도가 포화온도 이상으로 과 열되어 준안정상태(Meta-stable)에 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 4(b)는 열원온도가 67.6℃일 때 작동유체의 온도변 화 그래프이며, 증발부 하단의 온도가 급격히 감소하며 헤더 부분의 온도가 급격히 증가하는 특징이 나타난다. 이는 선행 연구들<sup>(4-7)</sup>들에서 언급된 가이즈 비등 현상과 유사한 온도변 화 추이를 보이는 결과이다. 포크형 히트파이프에서 나타나 는 가이즈 비등 현상의 일련의 과정을 Fig. 5에 도식화 하였 다. 이는 증발부 하단의 온도가 감소하기 시작할 때 일어나 는 순간적인 과정이다. 증발부 하단의 과열된 액체에서 기포 가 생성되고, 생성된 기포는 급격히 성장하며 배관 크기와 유사한 테일러 기포를 형성하게 된다. 테일러 기포는 증발부 배관에 있던 액체를 헤더로 밀어 올리며, 이에 따라 증발부 와 헤더 사이에서 정수압수두가 감소하여 포화온도가 감소 하게 된다. 이러한 현상은 플래싱(Flashing)현상을 유발하여 더 많은 상변화를 유발하고, 더 큰 기포가 형성되게 된다. 따 라서 정수압의 감소와 플래싱이 연쇄적으로 발생하게 된다. 최종적으로 테일러 기포에 의해 상부의 액체가 헤더로 분출 되며 증발부의 수두가 크게 감소한다. (12) 가이즈 비등이 일어 나는 순간 액체가 헤더의 상부에 충돌하는 충격음이 발생하 였으며, 이후 과열상태였던 증발부의 온도가 감소하고, 가이



Fig. 4 The boiling features of FEHP according to heat source temperature of heating loop: (a)  $T_{source} = 66.7$ °C, (b)  $T_{source} = 67.6$ °C, (c)  $T_{source} = 74.9$ °C, (d)  $T_{source} = 82.8$ °C, (e)  $T_{source} = 98.3$ °C



Fig. 5 The sequence of geyser boiling and pressure (or saturation temperature) transition<sup>(12)</sup>

즈 비등으로 인해 헤더의 온도가 증가하는 것이 관측되었다. 이때 증발부의 액체와 헤더의 기체 온도가 유사해 지게 되었 다. 이는 가이즈 비등에 의해 정수압수두가 거의 사라지게 되어 유사한 포화온도를 나타낸 것으로 해석된다. 이후 분출



Fig. 6 The history of heat transfer rate during geyser boiling: (a)  $T_{source} = 67.6$  °C, (b)  $T_{source} = 74.9$  °C

된 액체가 증발부를 다시 채우면서 수두가 증가하였으며, 액 체가 다시 과열되면서 새로운 가이즈 비등 주기가 시작되는 일련의 과정이 반복되는 것을 관측하였다. 또한 Fig. 4(c)와 같이 열원온도가 74.9℃로 증가함에 따라 가이즈 비등의 주 기가 감소하는 것을 관측하였다. Fig. 6(a)와 (b)는 각각 Fig. 4(b)와 (c)에 대응되는 그래프로서 가이즈 비등 구간 동 안의 열전달량 변화 특징을 나타낸다. 이때 열전달량은 식 (1)에 의해 계산되었으며, 평균 열전달량이 아닌 매 4 초마다 측정된 측정값을 이용하여 과도상황 중 계산된 값이다. Fig. 4(b)와 (c)에서 헤더의 온도가 증가하는 지점, 즉 가이즈 비 등이 발생할 때 큰 폭으로 열전달량이 증가하는 것이 관측 되었으며, 이는 급격한 상변화에 의해 나타나는 것으로 해석 된다. 이때 순간적으로 약 500 W에서 최대 약 1 kW까지 열 전달량이 증가하였다. 특히 Fig. 6(b)에서는 열전달량의 변 화폭이 서로 다른 두 개의 영역이 나타나는 것이 관측 되었 다. 변화폭이 큰 열전달량의 경우, Fig. 4(c)와 비교하였을 때 증발부 하단의 온도변화와 헤더의 온도변화가 동시에 나 타나는 영역이었다. 반면에 변화폭이 작은 열전달량의 경우, 증발부 하단의 온도변화가 없음에도 헤더의 온도와 열전달 량의 변화가 가이즈 비등의 특징을 나타내는 것이 관측되었



Fig. 7 The history of heat transfer rate during fully developed nucleate boiling :  $T_{source}=82.8\,{\rm °C}$ 

다. 이는 증발부의 중간지점에서 가이즈 비등의 시발점이 나 타난 것으로 해석된다. 이 경우 가이즈 비등의 시발점이 증 발부 하단일 때 보다 플래싱의 효과가 상대적으로 작기 때문 에 열전달량의 변화 폭이 작게 나타났다.

Fig. 4(d)는 열원온도가 82.8℃일 때 작동유체의 온도변 화를 보여주며, 가이즈 비등에서 나타나던 헤더에서의 급격 한 온도변화는 관측되지 않았다. 증발부 온도가 포화온도와 유사하게 측정되었으며, 65℃에서 약 ±1℃로 작게 진동하는 것이 관측되었다. 이는 비등현상에서 일반적으로 관측되는 불안정한 특징으로 증발부 하단에서 활발한 핵비등이 일어 나고 있음을 알 수 있다. 전반적으로 Niro 와 Beretta<sup>(8)</sup>가 설 명한 완전발달 비등현상과 유사한 온도변화 추이를 나타냈 다. 하지만 가이즈 비등에서처럼 간헐적으로 증발부 온도가 급격히 감소하였는데, 이러한 현상은 완전발달 비등 중 슬러 그 비등현상이 간헐적으로 발생하여 나타나는 현상으로 테 일러 기포가 증발부의 수두를 감소시켜 발생하는 것으로으 로 해석된다.<sup>(12)</sup> Fig. 7은 완전발달 핵비등 시 나타나는 열전달 량 변화 그래프이며 Fig. 4(d)의 작동유체 온도변화에 대응된 다. 가이즈 비등과 다르게 열전달량의 변화폭이 상당히 일정하 며 더 큰 평균 열전달량을 가진다. 열전달량이 간헐적으로 소 폭 증가하는 구간은 Fig. 4(d)에서 테일러 기포에 의해 증발부 의 수두가 감소하는 것으로 예상되는 구간에 대응된다. 앞서 테일러 기포는 플래싱 현상을 야기할 수 있는 것을 언급하였 다. 이에 따라 일시적인인 열전달량의 증가는 플래싱 현상에 의해 나타나며, 순간적으로 상변화가 가속되어 나타나는 효과 로 예상된다.

Fig. 4(e)는 열원온도가 98.3℃일 때 작동유체 온도변화를 보여준다. Fig. 4(d)와 다르게 테일러 기포에 의한 불안정성이 관측되지 않았다. 또한 증발부와 단열부의 온도가 유사하기 때 문에 정수압수두가 존재하지 않는다. 이러한 운전특성은 열원 온도가 증가하여 인가되는 열량이 증가하고, 기공률이 크게 증 가하여 강제대류비등의 환상류와 유사한 비등특성을 보이는



Fig. 8 The average heat transfer rate of the FEHP with varying heat source temperature (flow rate of heating loop:  $5.46 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s; air velocity: 0.5 m/s; air temperature: 29°C)

것으로 해석된다. 이때, 기포는 배관의 중심을 따라 상승하며, 응축수는 벽면으로 흘러 내려오게 된다. Gross<sup>(13)</sup>에 따르면 적 은 충진량과 작은 열유속에서 유하액막증발(Falling film evaporation)현상이 관측되며 열유속이 증가함에 따라 액막 내에서 비등이 발생하는 유하액막비등(Failling film boiling) 현상이 관측되었다. 즉, 본 실험을 통해 완전발달비등 상황에 서 기공률이 증가하여 많은 충진량과 높은 열유속에서도 유하 액막비등과 유사한 특성이 관측되는 것을 확인하였다.

증발부 열전달 특성에 관한 실험 결과로부터 포크형 히트 파이프에서 네 가지의 증발부의 운전특성이 나타남을 확인 하였다. 열원의 온도를 증가시킴에 따라 증발부의 운전특성 이 자연대류, 가이즈 비등, 완전발달 핵비등, 유하액막비등 순으로 변화하는 것을 확인하였다.

## 4.2 평균 열전달량

Fig. 8은 열원의 온도를 증가시키며 측정한 각 정상상태 구간 동안의 평균 열전달량이며, Fig. 9는 식 (2)를 이용해 계산된 열원온도에 따른 시스템 전체의 열저항이다. 본 연구 에서 사용된 포크형 히트파이프 실험 시편은 최대 약 2.3 kW 의 열전달량을 가졌다. 열원온도가 66.7℃일 때, 열원과 열 침원의 온도차가 약 38℃임에도 불구하고 열전달이 거의 이 루어지지 않았다. 즉 상변화를 발생시킬 최소한의 열원온도 가 필요하며, 그 전까지 히트파이프는 작동하지 않는다. 앞 서 열원온도가 증가하면서 운전특성이 변화하는 것을 설명하 였다. 이에 따라 열원온도 66.7℃에서 자연대류 영역, 83℃ 이하에서는 가이즈 비등영역, 83~97℃ 사이는 완전발달 핵 비등 그리고 97℃ 이상에서는 유하액막비등 영역으로 운전특 성이 구분되었다.

자연대류에서부터 완전발달비등 영역인 83℃ 구간까지는 가이즈 비등의 주기가 감소하면서 평균 열전달량이 선형적



Fig. 9 Thermal resistance of the FEHP with varying heat source temperature (flow rate of heating loop: 5.46×10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>/s; air velocity: 0.5 m/s; air temperature: 29°C)

으로 증가하였고, 열저항은 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 반면에 83℃ 이후 완전발달 핵비등 영역과 유하액막비등 영 역에서는 열원온도가 증가함에 따라 열전달량이 증가하는 경향을 나타냈지만, 열저항은 큰 변화를 보이지 않는다. 가 이즈 비등과 달리 상변화가 지속적으로 발생함에 따라 시스 템의 열전달성능은 점차 수렴하는 것을 의미한다. 따라서 완 전발달 핵비등 이후 열전달량이 증가하는 주된 요인은 열원 과 열침원의 온도차가 증가하여 나타나게 된다.열원온도 92 ℃를 기준으로 완전발달 핵비등 영역에서 유하액막비등 영 역으로 천이하면서 평균 열전달량의 변화 기울기가 감소하 였다. 특히 유하액막비등 영역에서 열전달량이 점차 수렴하 는 경향을 보이는 것을 미루어보아 히트파이프의 작동한계 에 근접하였을 가능성이 있을 것으로 판단되며, 이에 관한 추가 연구가 필요하다.

## 5.결 론

본 연구에서 대형 공랭 포크형 히트파이프의 운전특성을 관측하고 현상에 대한 물리적인 이해를 위한 실험연구를 수 행하였다. 이를 위해 포크형 히트파이프의 축소모델을 제작 하고, 특히 증발부에서 나타나는 운전특성에 대한 실험연구 를 수행하였다.

열원의 온도를 조절하여 인가되는 열량을 조절하였고, 열 량이 증가함에 따라 자연대류, 가이즈 비등, 완전발달 핵비 등, 유하액막비등 순으로 운전특성이 변화하였다. 상변화를 동반한 큰 열전달은 가이즈 비등 시기부터 나타났다. 자연대 류 영역은 상변화가 없으며 열전달이 거의 일어나지 않기 때 문에 히트파이프가 작동하기 전 상태이며, 열에너지를 축적 하고 있는 상황이다. 가이즈 비등이 발생하면 일시적으로 열 전달량 증가하지만, 동시에 기계적·열적 불안정성을 동반하 기 때문에 포크형 히트파이프 설계 시 이를 완화시키는 전략 이 필요할 것으로 판단된다. 유하액막비등 현상은 안정적이 며 높은 열전달량을 갖는 이점이 있지만, 열전달량이 점차 수렴하기 때문에 작동한계와 같은 히트파이프의 최대 성능 과 연관이 있을 수 있다. 따라서 작동한계로 천이하면서 나 타나는 현상에 대한 추가 연구가 필요하다.

본 실험연구에서 관찰된 포크형 히트파이프의 운전특 성은 다음과 같이 요약된다.

- 자연대류: 상변화가 일어나지 않고 준안정상태인 과열 액체 상태를 가지고 있다. 안정적이지만 열전달 효과가 거의 없다.
- 2) 가이즈 비등: 과열된 액체가 순간적으로 상변화 하여 열전달량이 일시적으로 크게 증가하며, 테일러 기포가 형성되어 증발부의 액체가 헤더로 분출된다. 분출된 액 체가 히트파이프 내벽을 가격하며 충격음을 발생하고, 이와 동시에 내부에 큰 온도변화가 발생하며 기계적·열 적으로 불안정한 특징을 가진다. 또한 열원의 온도가 증가함에 따라 가이즈 비등의 발생 주기가 감소하며, 점차 여러 곳에서 가이즈 비등의 시발점이 발생한다.
- 3) 완전발달 핵비등: 증발부 전체적으로 상변화가 발생하 기 때문에 큰 열전달 성능을 가진다. 간헐적으로 발생 하는 테일러 기포에 의한 열적 불안정성이 관측되지만 가이즈 비등에 비해 그 규모가 작다.
- 4) 유하액막비등: 완전발달 핵비등에서 더 큰 열량이 인가 되었을 때 나타나며, 기공률이 증가하여 강제대류의 환 상류와 유사한 형상을 나타내는 것으로 보인다. 이때 기체와 액체는 서로 반대 방향으로 유동한여, 생성된 증기는 중앙으로 움직이고 회귀하는 액체는 벽면에서 액막 형태로 떨어진다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평 가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20 151520101000).

## References

 Xiong, Z., Gu, H., Wang, M. and Ye, C., 2014, "The Thermal Performance of a Loop-type Heat Pipe for Passively Removing Residual Heat from Spent Fuel Pool," Nuclear Engineering and Design, Vol. 280, pp. 262~268.

- (2) Xiong, Z., Ye, C., Wang, M. and Gu, H., 2015, "Experimental Study on The Sub-atmospheric Loop Heat Pipe Passive Cooling System for Spent Fuel Pool," Progress in Nuclear Energy, Vol. 79, pp. 40~47.
- (3) Mochizuki, M., Nguyen, T., Mashiko, K., Saito, Y., Singh, R., Nguyen, T. and Wuttijumnong, V., 2013, "Prevention Possibility of Nuclear Power Reactor Meltdown by Use of Heat Pipes for Passive Cooling of Spent Fuel," Vol. 4, No. 1, pp. 1~6.
- (4) Tian, F. Z., Xin, G. M., Wang, X. Y. and Cheng, L., 2013, "An Investigation of The Unstabel Oscillation Phenomenas of Two-phase Closed Thermosyphon," Advanced Materials Research, Vol. 668, pp. 608~611.
- (5) Faghri, A., 1995, "Heat Pipe Science and Technology," Taylor & Francis, Washington.
- (6) Jouhara, H., Fadhl, B. and Wrobel, L. C., 2016, "Three-dimensional CFD Simulation of Geyser Boiling in a Two-phase Closed Thermosyphon," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 41, Issue 37, pp. 16463~16476
- (7) Chang, S. W., Lo, D. C., Chiang, K. F. and Lin, C. Y., 2012, "Sub-atmospheric Boiling Heat Transfer and Thermal Performance of Two-phase Loop Thermosyphon," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 39, pp. 134~147.
- (8) Niro, A. and Beretta, G. P., 1990, "Boiling Regime of Thermosyphon," Vol. 33, No. 10, pp. 2099~2110.
- (9) Xia, G., Wang, W., Cheng, L. and Ma, D., 2017, "Visualization Study on The Instability of Phasechange Heat Transfer in a Flat Two-Phase Closed Thermosyphon," Applied Thermal Engineering, Vol. 116, pp. 392~405.
- (10) Bell, S., 1999, "A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement," Measurement Good Practice Guide, No. 11, Issue 2.
- (11) Cooper, J. R. and Dooley, R. B., 2012, "Ther International Association for the Properties of Water and Stema," IAPWS R7–97.
- (12) Lu, X., Watson, A., Gorin, A. V. and Deans, J., 2005, "Measurements in a Low Temperature CO2-driven Geysering Well, Viewed in Relation to Natural Geysers," Geothermics, Vol. 34, pp. 389~410.
- (13) Gross, U., 1994, "Falling Film Evaporation inside a Closed Thermosyphon", The 10th International Heat Transfer Conference, Brighton, United Kingdom, 18– FB–7.