전력반도체 냉각을 위한 원통형 루프히트파이프 제작 및 성능 평가에 관한 연구

A Study on Manufacture and Performance Evaluation of a Loop Heat Pipe System with a Cylindrical Evaporator for IGBT Cooling

기재형† 유성열* 성병호* 김성대* 최지훈* 김철주**

Ki, Jae-Hyung Ryoo, Seong-Ryoul Sung, Byung-Ho Kim, Sung-Dae Choi, Jee-hoon Kim, Chul-Ju

ABSTRACT

The Loop Heat Pipe (LHP) operates to pump the working fluid by means of the capillary force in a wick structure. Particularly, it is difficult to design and manufacture the evaporator consisted of a grooved container and a compensation chamber as well as the wick structure. This study is related to design and manufacture the grooved container coupled with wick structure, the properties of the wick structure such as the permeability, the porosity, and the maximum capillary pressure were measured to apply the cooling technology for Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT). The container of the LHP was manufactured by the electrical discharge process and the wick structure was sintered with the nickel particle by an axial-press apparatus with the pulse electronic discharge. As results, the properties of the wick were experimentally obtained about 60% of the porosity, 35kPa of the maximum capillary force and 1.53 x 10-13m2 of the permeability.

1. 서 론

전자기기의 고속화, 대용량화 추세와 함께 전력용 반도체소자 크기의 소형화에 의한 고집적에 의하여 반도체 소자의 발열량과 발열밀도도 급격히 증가하는 추세이다. 이에 따라 반도체가 작동온도를 유지하도록 냉각하는 냉각기술은 시스템의 안정성과 신뢰성을 확보하는 중요한 기술로 인식되고 있다. 특히 고속전철의 전력변환반도체는 추진시스템의 핵심부품이며, 내부 전력변환반도체 발생열을 제거하기 위한 냉각방식으로 상변화 열전달을 이용한 히트파이프식 냉각기술이 적용되고 있다. 현재 고발열 전자반도체 및 전력변환반도체의 냉각에는 열부하, 설치 공간 등 설계조건에 따라 다양한 구조의 히트파이프들이 적용될 수 있으며, 이러한 기술에 관해서는 그동안 많은 연구들이 수행되었다. 그러나 지난 20여년동안 전기철도의 추진시스템 냉각에 사용되고 있는 기존의 히프파이프식 냉각장치는 직관형 구조의 히트파이프-히트싱크 구조로 동력분산형 고속철도

† 기재형, 성균관대, 기계공학부, 정회원
E-mail : mythkjh@skku.edu
TEL : (031)290-7474 FAX : (031)290-7489
* 성균관대학교 대학원, 기계공학부
** 성균관대학교, 기계공학부

추진시스템에 적용하기 위해서는 다른 개념의 히트파이프의 기술적 검토가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 고속철도 추진시스템에 적용되는 전력변환반도체 냉각장치 구성을 위한 루프히프파이프(Loop Heat Pipe, 이하 LHP) 시험모델을 제작하고 성능시험을 수행하고자 한다.

2. LHP 구조 및 작동원리

LHP는 그림 2.1에 보는 바와 같이 증발부, 응축부, 액체 보상챔버, 증기이송관, 액체이송관 등으로 구성되어 있으며, 증발부에는 작동유체의 순환을 위한 금속소결윅을 내장하는 것으로 되어있다. LHP의 기본적인 작동 원리는 원통관형 LHP의 것과 동일하다. 즉 내부에 충전된 작동유체의 기-액 상변화 과정을 통하여 시스템의 양단사이에 열을 전달한다. 이때 작동유체의 유동에 필요한 동력은 다공성 윅으로부터 얻게 된다. 즉 히트파이프 양단에서 각 작동유체의 비등과 응축이 발생하면 기-액 계면에서 서로 다른 크기의 모세압이 발달하고 이 모세압 차이에 의해 윅 내부 액체 통로에서의 응축부로부터 증발부로 압력 구배가 형성되어 이 압력 구배에 의해 액상의 작동유체가 응축부로부터 증발부로 수송하게 된다. 여기서 윅은 가열벽과 접촉을 이루며 이 접촉면을 통하여 열을 공급받아 윅에 포화된 액체과 기화하게 된다, 이때 기-액 계면의 메니스커스(meniscus) 와 모세압이 발생하게 된다. 이 모세압이 유체를 순환 시키는데 필요한 펌프 동력을 제공한다.

LHP에서 작동유체가 이러한 상태 변화를 지속하기 위해서는 몇 가지 조건을 만족해야 한다. 작동유체는 수송에 필요한 동력인 모세압을 생성해야 한다. 또한 응축액은 액체 관로, 액체 보상 챔버 및 윅내부 통과 시에 기화해서는 않된다. 이것이 일반적인 히트파이프와 LHP가 작동하는 원리적인 차이이다.

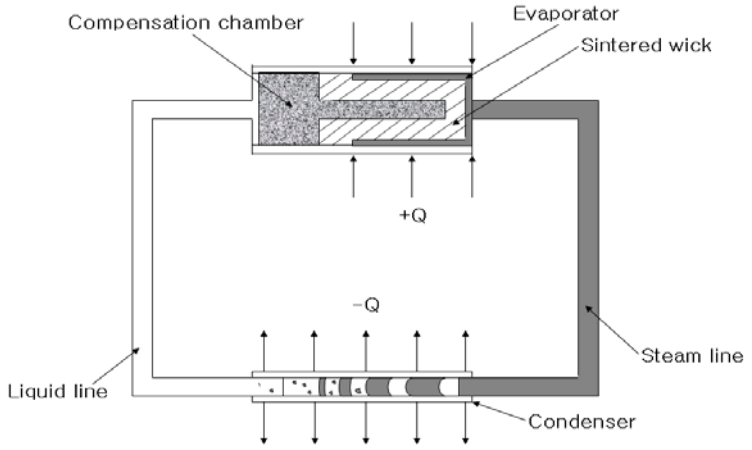


그림 2.1 LHP의 구성

LHP가 정상상태에서 작동하기 위한 조건은 주어진 열부하에서 모세 펌프 압력과 관로 내부 유동저항의 합 이 언제나 평형을 이루어야 한다는 운동량 보존의 법칙을 만족해야 하고,

또한 각 요소에서 열적 평형을 만족해야 한다는 것이다. 만약 이러한 평형조건들을 만족하지 못하게 될 경우 히트파이프는 작동 불능상태에 도달하게 되며, 이러한 문제를 예측하는 일은 히트파이프 설계와 적용분야에서 매우 중요한 일이다. 특히 LHP의 경우 일반적인 히트파이프와 달리 한번 작동불능에 도달하게 되면 재시동에 어려움이 발생할 수도 있기 때문에 더욱 세심한 검토가 필요하다. 이러한 작동불능에 도달하는 요인은 히트파이프 구동원리에 따라 다양하며, 보통 작동불능에 도달할 경우 열부하를 열전달한계라고 부르며, 그 요인에 따라 모세한계, 윅한계, 액체이송관 비등한계 등이 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

본 연구를 위하여 설계, 제작할 LHP의 제원을 표 3-1에 나타내었으며, 특히 증발부용기와 소결윅 제작상의 어려움을 고려하여 초기 성능시험 모델은 증발부 길이 약 100[㎜] 정도의 축소형으로 제작하였다. 또한 작동유체는 물을 사용하였으며, 충전량(charge ratio)은 LHP 작동특성을 고려하여 50[㎖]를 충전하였다.

표 3-1 요소 LHP 제원

Part		Geometry (Material)	Dimension
Evaporator		Cylinder tube (Cu)	d_o = 16[mm], d_i = 14[mm] t_w = 1[mm], h = 100[mm]
	Sintered Wick	Cylinder (Ni)	d_o = 10[mm], d_i = 6[mm] t_w = 2[mm], h = 100[mm]
	Compensation Chamber	Cylinder tube (Cu)	d_o = 40[mm], d_i = 36[mm] t_w = 2[mm], h = 50[mm]
	Vapor Channel	annulated groove (n=8ea) width=1.99[mm], height=2[mm], n=8	
Condenser & Subcooler	Fin-Tube Heat exchanger	Pipe(Cu)	d_o = 1/4" = 6.35[mm] d_i = 5[mm], L = 150[mm] n = 8ea
		Fin (Cu)	100×100×25[mm] n = 50
Vapor line		Pipe (Cu)	d_o = 1/4" = 6.35[mm] d_i = 5[mm], L = 600[mm]
Liquid line		Pipe (Cu)	d_o = 1/4" = 6.35[mm] d_i = 5[mm], L = 600[mm]
Charging Reservior		Glass tube (Pyrex)	d_o = 40[mm], d_i = 36[mm] L = 300[mm]
Woking fluid		Water	
Chargr ratio		50[㎖]	

LHP 성능평가를 위한 성능시험 장치의 개략도 및 사진을 그림 3.1에 나타내었으며, 온도측정을 위하여 관로 표면의 열전대(T-type, 0.12㎜) 부착하였고, 내부 작동유체의 압력측정을 위하여 증기이송관 및 액체이송관의 절대압력센서(0~2 bar)를 설치하였다. LHP 벽면온도

측정점의 수는 각각 증발부 4개, 증기채널 1개, 보상챔버 1개, 응축부 4개, 증기이송관 7개, 액체이송관 7개와 휜에 5개를 설치하였다.

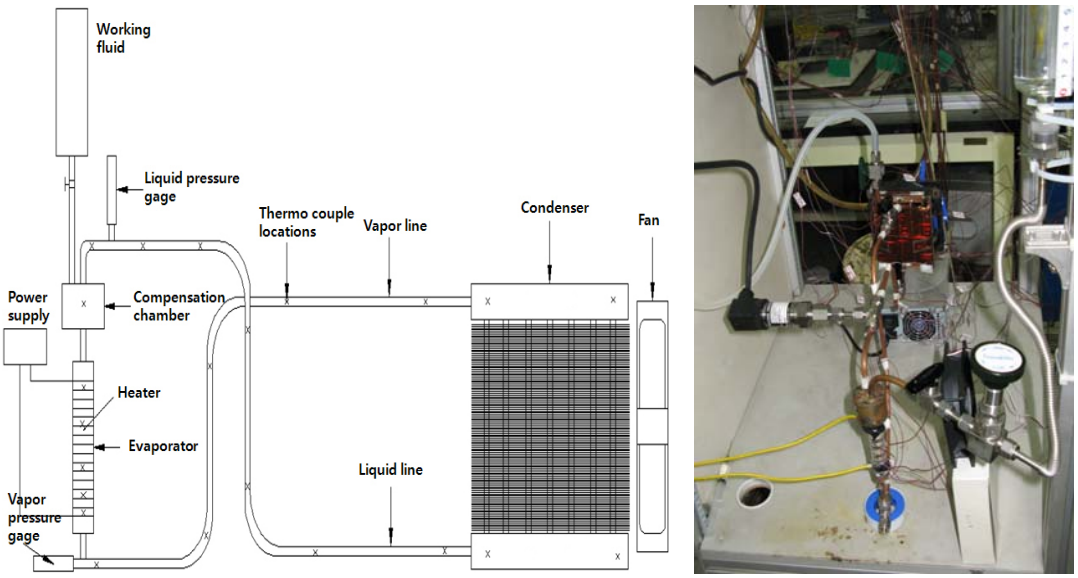


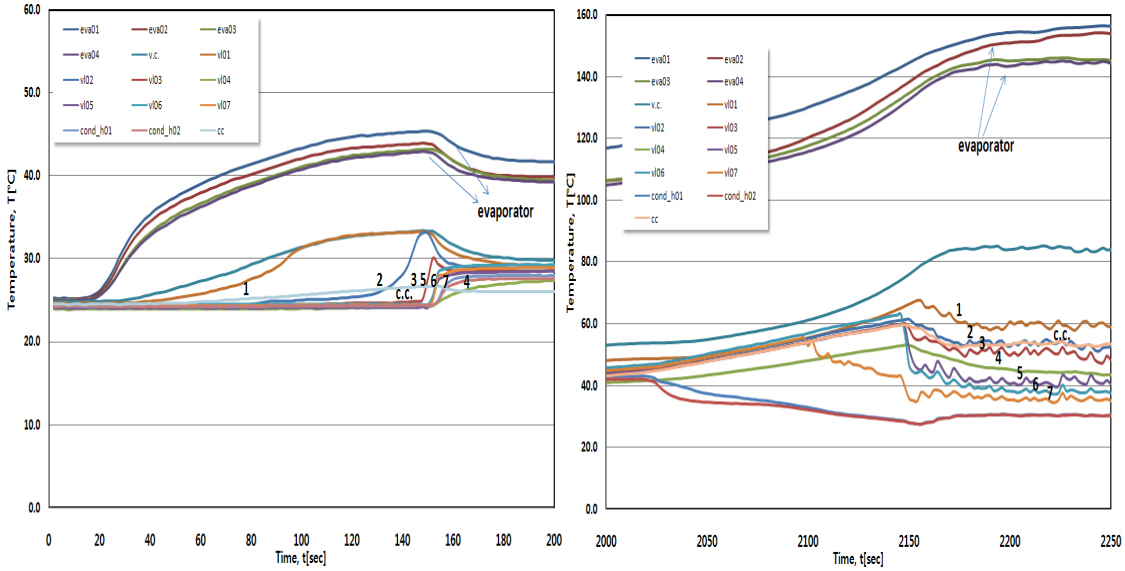
그림3.1 LHP의 제작 및 구성

4. 실험결과

본 실험은 LHP를 이용하는 전력반도체 냉각용 LHP가 안정된 작동특성을 유지하는지 확인하기 위해 교류전원 공급 장치로 일정한 크기의 열부하를 공급하였으며, 열부하는 10[W]씩 증가시키면서 시험을 수행하였다. 또한 각 측정점의 온도 및 압력을 데이터 획득 장치(DR230, Yokogawa Co.)로 기록하였다.

4.1 시동성 및 한계

LHP의 작동특성을 실험한 결과를 그림 4.1에 나타내었으며, 초기 열부하가 10[W]인 경우 LHP 내부를 순환하고 있는 유동은 모든 열역학적으로 정상상태(steady state)에 도달하고 있으나, 60[W]에서의 2.2절에서 언급한 열전달 한계로 인해 유동이 불안정해지며 작동을 하지 못하였다. 이는 작동유체 순환을 저해 하여 LHP의 작동 안정성에 영향을 미치는 것으로 사료된다.



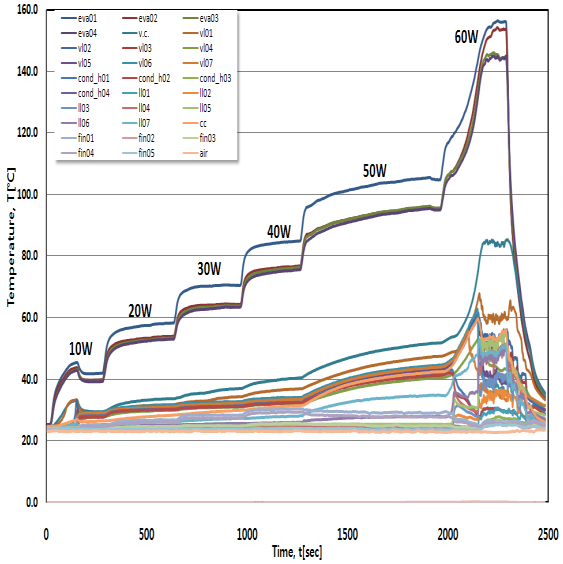
(a) LHP의 시동성 (b) LHP의 한계

그림 4.1 LHP의 시동성 및 한계

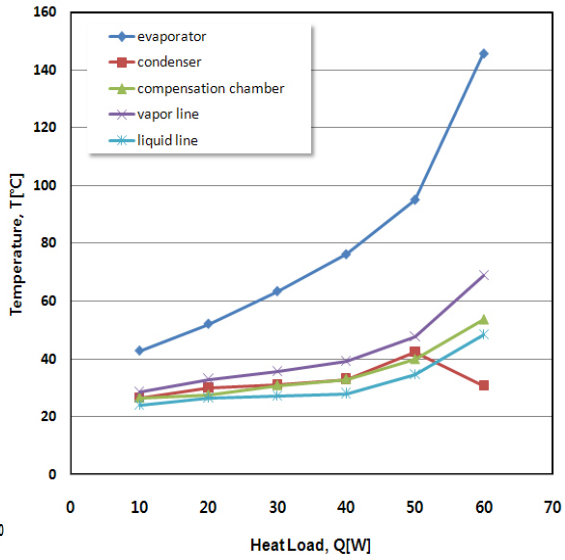
4.2 작동 특성

단계별로 열부하를 증가시킨 경우 LHP 벽면온도의 변화를 나타낸 것이 그림 4.1(a)이다. 이 결과를 증발부, 응축부, 보상챔버, 증기라인, 액체라인의 부분별 특성을 그림 4.2(b)에 나타내었다. 50W 초과시 증발부, 보상챔버, 증기라인, 액체라인에 온도가 급격히 상승하면서 응축부에 온도가 감소하는 현상을 확인할 수 있다. 이는 보상챔버 내부의 온도증가 또는 증기발생으로 작동유체의 순환이 중지되어 작동유체의 유입 더 이상 되지않음을 보여준다. 이는 앞 서 언급한 LHP의 과냉한계로 보인다.

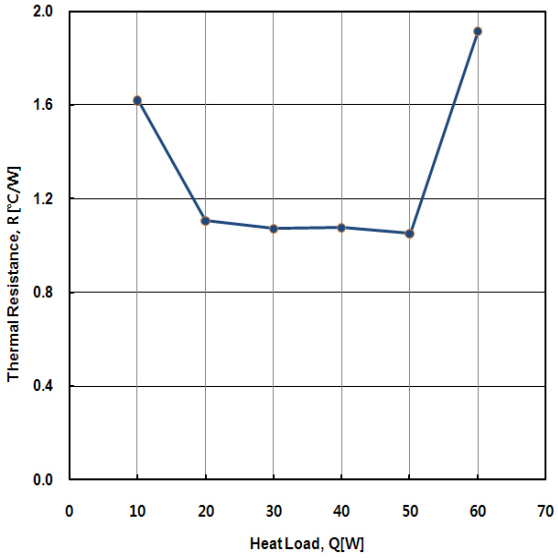
또한 LHP 증발부 벽면온도와 응축부 벽면온도 사이의 온도차로 열저항을 나타낸 것이 그림 4.2 (c)이다. 실험결과에서 얻은 한계 열부하 50W에서 열저항은 1.052~1.62℃/W이며, 예상 열저항보다 높게 계산되었으며, 이는 증발부 벽면온도와 가열 히터의 온도측정이 다소 부정확하게 취득되어진 결과로 보인다.



(a) LHP의 작동 특성



(b) LHP의 부분별 작동 특성



(c) LHP의 작동 열저항

그림 4.2 LHP의 작동 특성 및 열저항

5. 결론

본 연구는 전력변환반도체 냉각장치 구성을 위한 LHP 시험모델을 제작하고 성능시험을 수행하였으며 결론은 다음과 같다.

(1) 비교적 낮은 열부하에서 LHP 시동성은 안정성을 유지하며 작동 하였다.

(2) 열전달 한계는 대략 50 W 였으며, 전체 열저항은 1.052~1.62℃/W였다. 이는 유동저항의 증대에 따라 열저항이 증가한 것으로 사료된다.

향후 열전달 한계 및 낮은 열저항을 확보하기 위한 열전달 한계의 증대에 연구가 필요하다. 이는 증발부 열전달 경로에 대한 해석을 통하여 수행해야 할 내용으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Maidanik, Y. F., Pastukhov, V. G. and Fershtater, Y. G., 1990, Development, analytical and experimental investigation of loop heat pipe, Proceedings of 7th IHPC, pp.539-546

2. Maidanik, Y. F., Vershinin, S. V. and Fershtater, Y. G., 1997, Heat transfer enhancement in a loop heat pipe evaporator, Proceedings of 10th IHPC, pp. A1-3

3. Takashi Murase et. al, "Power Semiconductor Device cooling system Using Eletrical Insulated Heat Pipe for Rolling Stock", Furokawa Review, No 12, pp. 82~93, 1993.

4. Matase, T., Endo, T., Koizumi., "Heat pipe Cooling System for Thyristors"", 5th International Heat pipe conference, Tskuba, Japan, May, pp. 14~18, 1984

5. Takashi Endo, “Challenge of Fastech 360”, JR EAST Technical Review-No.8

6. 강환국, 김철주, “전력변환 반도체용 히트파이프식 냉각기의 설계와 작동특성”, 전력전자 논문집 제6권 6호, pp. 572~581, 2001

7. Amir Faghri, Heat Pipe Science and Technology, Taylor & Francis, pp. 493~577, 1995