동력분산형 고속전철의 추진시스템용 냉각장치 설계 및 시제품 제작 연구

Study on the Design and the Prototype Manufacture of Cooling systems of the Propulsion System for the EMU

유성열* 김성대** 기재형** 임광빈*** 김철주****

Ryoo, Seong-Ryoul Kim, Sung-Dae Ki, Jae-Hyung Yim, Kwang-Bin Kim, Chul-Ju

ABSTRACT

The objective of the present study is to develope a propultion unit cooling system for the next-generation High-speed EMU. The propulsion power control unit consists of some IGBT semiconductors. In general, those power semiconductors are very sensitive to temperatures and need a cooling system to keep them at a proper operational conditions in the range of 50~100℃. In this first year of study, we tried to focuss on the understanding of fundamental technologies for each of the two different cooling systems and collecting basic data for design and manufacturing for both cases. For the water cooling system, a heat sink with multi channels of liquid flow was considered and a model unit was designed and performance test was conducted. For the heat pipe cooling system, a Loop Heat Pipe(LHP) was considered as an element to transport heat from IGBT to environment air flow and a model unit was designed and performance test was conducted. The analysis using SINDA/FLUINT showed that those design parameters are good enough for the LHP to properly operate under a heat load up to around 360W.

1. 서 론

본 연구의 최종목표는 차세대 동력분산형 고속전철용 추진시스템용 냉각장치를 개발하는 것이며, 이 들 추진시스템은 다수의 IGBT 전력변환 반도체로 구성되어 있다.(1) 일반적으로 추진시스템에 적용되는 전력변환반도체는 온도에 매우 민감하여 50~100℃의 작동상태로 유지하기 위한 냉각장치가 필요하다. 이에 1차년도의 연구에서는 동력분산형 추진시스템의 냉각방식으로 고려할 수 있는 수냉각장치 및 히트파이프식 냉각장치에 대한 기초기술 습득에 중점을 두었으며, 이들 냉각방식에 대한 설계 및 제작에 대한 기초 결과를 얻고자 하였다.

현재 일본 고속전철 Fastec 360의 경우 동력분산형 추진시스템 구조를 도입하고 있으

* 유성열, 성균관대학교 대학원, 기계공학부, 정회원
E-mail : luciferz@skku.edu
TEL : (031)290-7489 FAX : (031)290-7489
** 성균관대학교 대학원, 기계공학부
*** 안산공과대학, 기계과
**** 성균관대학교, 기계공학부

며, 냉각용 공기유로를 추진시스템과 분리하고 냉각유로와 전력변환 반도체 사이에 수냉각 장치를 도입하여 추진장치를 냉각하고 있다.[3] 이러한 냉각개념은 표 1-1에 나타낸 바와 같이 추진시스템을 주위 공기와 차단함으로써 먼지 등 오염원으로부터 추진시스템의 요소들을 보호할 수 있으며 또한 추진시스템 형상을 단순화함으로써 유동소음을 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 다만 수냉각장치는 작동유체인 물과 부동액에 의하여 관의 내벽 오염, 이에 따른 열관류율 저감 등과 같은 원천적 문제를 가지고 있으며, 정기적인 점검과 유지관리가 필요하다.

이러한 문제를 해결할 수 있은 기술이 히트파이프식 냉각기술이며 지난 20여년동안 전기철도의 추진시스템 냉각에 사용되고 있다. 다만 이 경우 앞에서 열거한 공간적 문제점을 해결하기 위해서는 기존의 히프파이프식 냉각장치와 다른 개념의 히트파이프 기술이 필요하다. 본 연구에서는 장거리 열수송과 대용량 열수송에 적절한 루프히프파이프(Loop Heat Pipe, 이하 LHP) 기술을 적용한 냉각장치를 개발하여 이러한 문제를 해결하려고 한다.

표 1-1 수냉각방식과 LHP 냉각장식의 주요 성능비교

냉각방식	수냉각 방식	LHP이용 냉각방식	비고
에너지 저감	△	○	
고출력	○	○	
경량	△	△	
소형	○	○	펌프 vs. 증발부 구조
소음	△	△	주행풍 이용 (저속, 저소음 fan 대체)
유지보수 용이	○	△	
열전달율	△	○	LHP(상변화 이용)
설계기술 접근	○	△	LHP(국내 연구설계 수준)
제조기술 접근성	○	-	LHP(국내 제조업체 없음)
작동 신뢰성	△	-	
작동 안정성	△	-	
경제성	○	-	
다중열원 냉각-단일 응축부	△	○	

2. LHP 이용 냉각장치

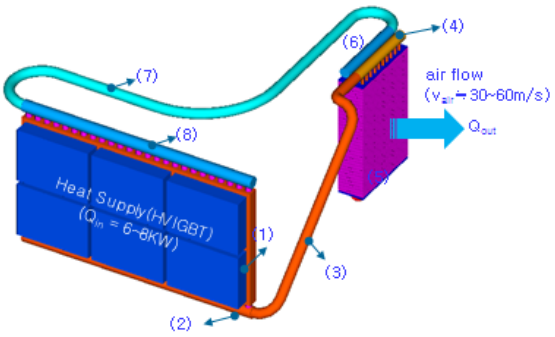
2.1 냉각장치 개념설계

고발열 전자반도체 및 전력변환반도체의 냉각에는 열부하, 설치 공간 등 설계조건에 따라 다양한 구조의 히트파이프들이 적용될 수 있으며, 이러한 기술에 관해서는 그동안 많은 연구들이 수행되었다.[5] 본 연구에서는 표 2-1에 나타낸 바와 같이 동력분산형 고속전철용 추진시스템의 열부하 및 환경적 설계 고려사항들을 검토하고, 루프히트파이프(Loop Heat Pipe, 이하 LHP) 이용 냉각장치의 개념설계를 수행하였다. 동력분산형 고속철도 추진제어장치용 LHP를 이용하는 냉각장치의 개념도를 그림 2-1에 나타내었다.

표 2-1 추진시스템 전력변환반도체용 히트파이프식 냉각장치의 설계 고려사항

최대열부하	Inverter	$Q_{IV,max}$	4~5.5	kW
	Converter	$Q_{CV,max}$	8~9.5	kW
전력변환반도체 최대 표면 온도		$T_{SC,max}$	100 이하	℃
냉각판 온도		T_{cp}	80	℃
외부공기 온도		T_{∞}	-25 ~ +40	℃
외부공기 유속		u_{∞}	25 ~ 110	m/s
최대 운전속도		u_{op}	400	Km/h
상대습도		w	95 이하	%
수명			10년 이상	

전력변환 반도체(IGBT) 스택(stack)이 부착되는 냉각판(1)은 두께 30mm 이하의 평판형 구조로 크기는 스택(stack)의 크기에 의해 결정되며, 내부에 20~30개의 루프히트파이프 증발부가 병렬로 설치된다. 또한 방열기(5)는 핀-튜브 열교환기로 설계되었으며, 열교환기 크기는 대략 L = 310[mm], W = 300[mm], H = 100[mm]로 고속철도의 주행풍(ram-air)을 이용하는 방식으로 설계하였다. 또한 수냉각방식에 비해 열교환기의 크기가 상대적으로 크게 설계되었으며, 이는 LHP 작동시 응축기에서 상변화 응축 열교환과 과냉 열교환이 이루어지기 때문이다.



(1) : cooling plate
(2), (4) : manifolder (vapor)
(6), (8) : manifolder (liquid)
(3) : vapor line (D_o=30[mm])
(7) : liquid line (D_o=20[mm])
(5) : condenser (fin-tube HX)

그림 3-3 LHP를 이용한 추진시스템용 냉각장치

2.2 루프히트파이프 구조와 작동원리

LHP 기술은 1971년 러시아의 Urals Technical University에 Gerasimov와 Maidanik 등에 의해 발전되었다.[5] 직곽형(Ⅰ형상) 구조를 갖는 일반적인 히트파이프와 비교하여 LHP는 그림 3-5에 나타낸 바와 같이 루프형(loop type)의 구조로써 증발부(evaporator), 응축부(condenser), 액체 보상챔버(compensation chamber), 증기이송관(vapor transport line), 액체이송관(liquid transport line)이 중요 구성요소들이다. 증발부 구조는 다소 복잡하며 액체유동통로에 윅이 설치되어 있다. 증발부 내부 윅은 가열벽면 내벽과 접촉하고 이 접촉면에서 액체가 기화하며, 높은 모세압력을 얻기 위해 미세한 기공(fine pore)을 갖으며, 작동유체의 표면장력에 따라 약 20,000~15,000[Pa]의 모세압력을 얻을 수 있다. 또한 윅과 가열벽면 사이에는 증기가 배출될 수 있도록 그루브(groove) 형상의 통로가 설치된다.

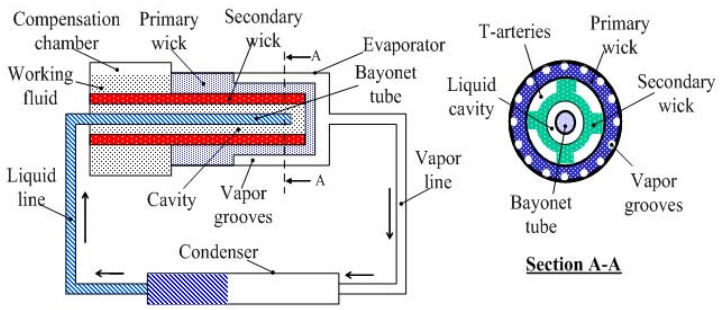


그림 3-5 루프히트파이프 개념도

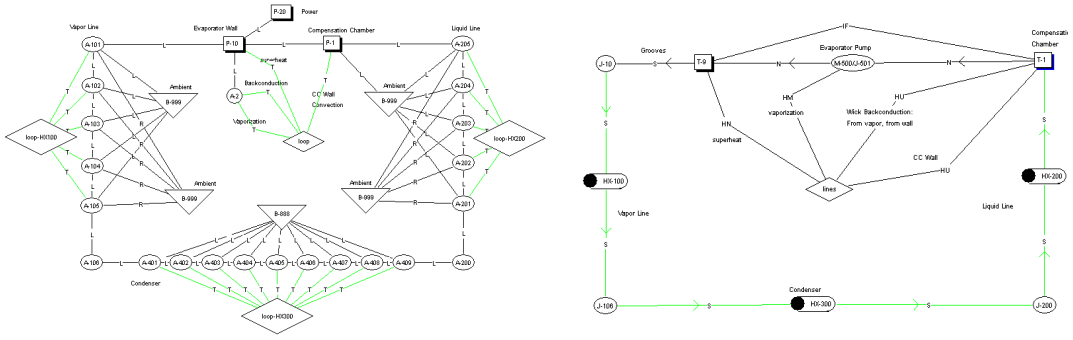
LHP의 작동원리를 살펴보면, 우선 증발부에 열부하가 공급되면 액체는 윅과 가열벽면의 접합부에서 기화된다. 이때 윅의 기-액 계면(liquid-vapor interface)에서 메니스커스(meniscus)가 생성되고 액체의 표면장력에 의해 모세압력이 발생한다. 이 모세압력에 의해 응축부의 액체가 증발부로 귀환하게 된다. 일반적인 히트파이프의 경우 증기가 응축할 때 포화액체 상태로 가정하며, 실제 과냉(sub-cooling)의 크기는 무시할 만큼 작다. 그러나 LHP 응축부에서는 증기가 응축하여 포화액체가 되지만 응축부 후단 액상관로에서 더욱더 냉각되어 과냉상태에 도달된다. 그 이유는 액체이송 관로를 따라 귀환된 응축액이 증발부에서 다시 기화될 때 까지 응축액 챔버 및 증발부 관로에서 긴 시간 동안 열원으로부터 열전도에 의해 열을 받게 되며 이 결과 응축액은 현열흡수에 의해 온도증가가 발생한다. 이때 응축액이 액체 보상챔버 내부 및 증발부 액체관로에서 기화가 생성되면 유동저항이 급격하게 증가하여 액체 수송이 어렵게 되고, 이 결과 작동불능에 도달하게 된다. 이러한 문제점을 피하기 위하여 응축부에서 적절한 크기의 과냉각이 요구된다. 또한 액체 보상챔버의 또 다른 목적은 증발부 가열 벽면에서 과부하 또는 다른 이유로 윅이 건조되어 작동이 중단되는 경우에도 이 시스템을 냉각시키고 액체 보상챔버로부터 모세압력에 의해 윅이 액체에 의해 다시 충전시키는 데 있으며, 따라서 재가동이 가능하게 하는 역할을 하게 된다. 이러한 기능은 LHP에서 매우 중요한 요소이다.

3. LHP 성능해석 및 결과

LHP는 기존의 원통구조 히트파이프와 비교하여 증발부에서는 열전달 경로가 매우 복잡하다. 이 열전달 경로를 정확히 파악하는 것이 열전달한계와 증발부와 응축부 증기온도, 액체온도 등을 예측하는데 매우 중요하다. 이러한 문제를 해결하는 데에는 기존의 열저항 회로해석을 기본으로 하는 해법으로는 오류의 발생여지가 있으며, 특히 액체이송관, 증기이송관 등 관로가 매우 긴 LHP의 경우 관로와 주변의 열전달이 발생할 때에는 더욱 그러하다. 이러한 문제를 극복하는 데에는 수치 해석적 해법이 매우 유용하다.

본 연구에서는 실험용 LHP 모델을 대상으로 C&R Technologies에서 개발한 SINDA/FLUINT를 이용하여 수치해석적 연구를 수행하였다.[6,7] 이 프로그램은 히트파이프

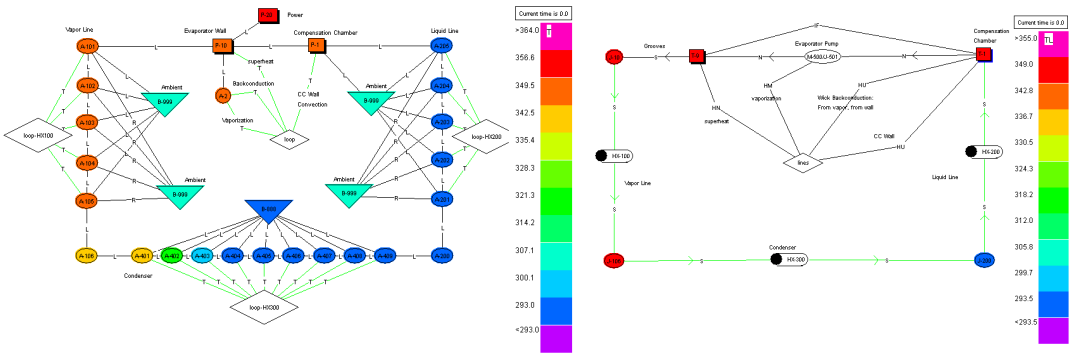
를 이용하여 국소적으로 요소부위를 냉각하거나 또는 가열할 때 전체 시스템의 열전달 경로를 파악하기 위하여 개발된 프로그램이며 주어진 히트파이프의 형상과 열전달 특성 그리고 주위 열전달 계(system)에 대한 물리적 조건을 가지고 온도계와 열전달율에 관한 해를 구한다. SINDA/FLUINT를 이용한 수치해석을 수행하기 위한 LHP의 해석모델은 그림 3-1에 나타낸 바와 같이 전후처리기인 SinapsPlus를 이용하여 기하학적 형상과 제원이 시제품과 최대한 동일한 조건을 갖도록 모델링(modeling)하였다.



(a) LHP의 열적 네크워크 모델 (b) LHP의 유체 네크워크 모델

그림 3-1 SinapsPlus를 이용한 LHP 열유동 해석 모델

정상상태 운전 조건에서 구한 해석결과를 이용하여 벽면온도와 유체온도 분포를 그림 3-2에 나타내었다. 시제품의 설계사양을 이용하여 해석을 수행한 결과 최대 모세압 한계치 약 360[W]를 얻을 수 있었으며 그 이상의 열부하에서 작동불능상태에 도달하는 것으로 보인다. 또한 각 유체 네트워크 모델의 주요 절점에서 관로 내부의 유동압력손실 차이는 열부하 360[W]에서 총 관로 유동압력손실은 대략 1000[Pa]이었다.



(a) LHP 벽면온도 (b) LHP 작동유체 온도분포

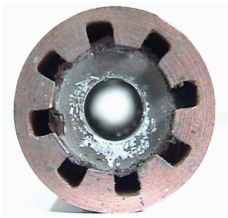
그림 3-2 SinapsPlus를 이용한 LHP 벽면 및 작동유체 온도분포

4. LHP 시제품 제작

LHP 전반적인 제조공정은 히트파이프 제조와 유사하나, 그림 4-1에 나타낸 바와 같이 증발부의 경우 그루브 관을 제작하고 관 내벽에 니켈(Ni) 분말(입도 3[㎛])을 두께 약 3[mm]크기로 소결해야한다.

본 연구에서는 설계된 형상에 따라 내벽에 그루브를 갖는 구리관을 전기 방전가공법을 이용하여 제작하였으며, 이 방법을 적용한 결과 그루브 형상과 치수는 비교적 설계사양을 근사적으로 만족시키고 있으나, 해당 제작 장치는 길이 400[mm]이상의 용기제작이 불가능하며 제작에 소요되는 시간이 길고 제작비용이 고가인 것이 문제점으로 지적되었다. 용기 내벽에는 통전 가압로를 이용하여 니켈 금속분말을 소결하였다. 용기 내벽에 분말소결을 실시하여 용기내벽과 소결체 사이의 열접촉 저항을 최소화하는 것은 히트파이프의 열저항을 최소화하는 데 매우 중요하다. 그러나 이러한 제조공정은 적절한 지그의 제작 및 소결로의 환경설정과 반복 제작에 따른 문제점이 있다. 비록 그림 4-2에서 보는 것과 같이 소결체 시제품을 제작하고, 증발부 구성부품을 브레이징 용접을 통하여 제작하였으나, 현 단계에서도 설계에서 요구하는 물성을 얻기 위해서는 개선해야할 많은 문제점들이 있는 것이 사실이다.

LHP 응축부는 그림 4-1(b)에 보는 바와 같이 증발부에서 이송된 열을 충분히 배출시킬 수 있는 휜-관 열교환기 형태로 설계하였으며, 제작용이성과 성능을 고려하여 상하부에 헤더가 있으며, 이 사이에 직경 4[mm]인 10개의 구리관을 수직으로 배열하였다.



(a) LHP 증발부 용기와 내부 Ni 소결 윅

(b) LHP 응축부(휜-관 열교환기)

그림 4-1 LHP 증발부와 응축부 구성

본 연구를 위하여 설계, 제작할 LHP의 제원과 시제품 사진을 표 4-1과 그림 4-2에 나타내었다. 앞에서 언급한 것과 같이 특히 증발부용기와 소결윅 제작상의 어려움을 고려하여 초기 성능시험 모델은 증발부 길이 약 100[mm] 정도의 축소형으로 제작하였다. 향후 성능시험을 통하여 최대 모세압한계, 시동특성, 열저항 등에 대한 중요한 자료를 얻을 수 있으며, 설계제원들에 대한 유효성 평가에 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 보인다.

표 4-1 요소 루프히트파이프 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[㎖]	

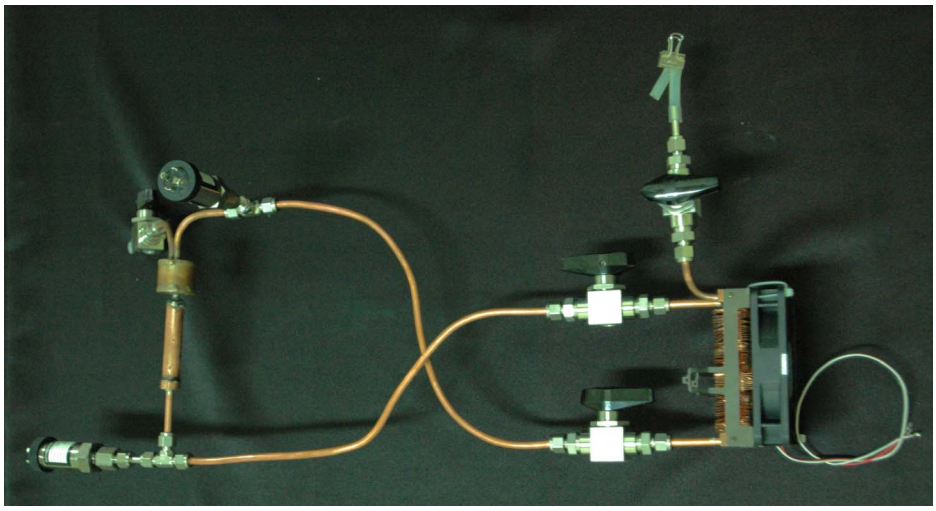


그림 4-2 LHP 시제품

4. 결 론

동력분산형 추진시스템의 냉각방식으로 고려할 수 있는 수냉각장치 및 히트파이프식 냉각장치에 대한 기초기술 습득에 중점을 두었으며, 이들 냉각방식에 대한 설계 및 제작에 대한 기초 결과를 얻고자 하였다. 본 연구에서는 LHP 성능 예측을 위한 1차원 해석모델을 개발하였으며, 이 모델을 확립하면 LHP의 설계인자들에 대한 영향평가 및 유효성 평가에 이용할 수 있다. 또한 이 해석 모델을 확장하여 냉각장치 전체에 성능 예측 모델을 개발할 수 있으며 시스템의 형상최적화 연구에 활용할 수 있다. 또한 독창적인 제조방법을 통해 루프히트파이프 및 소결윅을 제작하였으며, LHP 제조공정을 통해 확립한 전기 방전 가공기술을 이용한 용기 제작, 통전 가압 소결로 이용 원통관 내벽에 금속분말 소결을 위한 지그의 설계 및 소결 공정 등 관련 연구성과는 LHP 냉각장치의 상용화에 핵심 기술이 될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 이 기술이 성공한다면 고속철도 산업에서 세계 최초의 LHP 이용 냉각장치 개발이란 의미를 갖게 될 것으로 생각한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도 A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 유성열, 김성대, 기재형, 임광빈, 김철주, “동력분산형 고속전철의 추진시스템용 냉각장치의 설계 연구”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 232, 2008
2. Matase, T., Endo, T., Koizumi., "Heat pipe Cooling System for Thyristors"", 5th International Heat pipe conference, Tskuba, Japan, May, pp. 14~18, 1984
3. Takashi Endo, “Challenge of Fastech 360”, JR EAST Technical Review-No.8
4. 강환국, 김철주, “전력변환 반도체용 히트파이프식 냉각기의 설계와 작동특성”, 전력전자 논문집 제6권 6호, pp. 572~581, 2001
5. Amir Faghri, Heat Pipe Science and Technology, Taylor & Francis, pp. 493~577, 1995
6. Cullimore, B. and Baumann J., 2000, Steady-state and transient loop heat pipe modelling, ICES 2000
7. Cullimore, B. SINDA/FLUINT. User's manual.