

동력분산형 고속전철의 추진시스템용 냉각장치의 설계 연구
**Study on Design of the Cooling System Used for the Propulsion System
of the High-Speed EMU**

유성열* 김성대** 기재형** 임광빈*** 김철주****
Ryoo, Seong-Ryoul Kim, Sung-Dae Ki, Jae-Hyung Yim, Kwang-Bin Kim, Chul-Ju

ABSTRACT

Present, the cooling method of using a phase-change heat transfer such as immersed type, heat pipe etc is applied in cooling of high-capacity power semiconductors of the main power system for the high speed train with the concentrated traction. In order to apply these phase-change cooling system to the high speed EMU to be developed, needed are technological researches of consideration of installing space, air passage, light weight material and miniaturization.

Although this research establishes design specifications through theoretical analysis and computational analysis from the basic design process of the cooling system of the propulsion system for the high-speed EMU, when details design is completed, present improvement subject and optimum design before manufacturing the prototype of the cooling system on the basis of analysis results. And then, carried out will be the performance tests through prototype manufacture and reliability estimation by components of cooling system.

1. 서 론

현재 동력집중식 고속전철용 추진력변환장치의 대용량 전력변환반도체의 냉각에는 침전방식(Immersed Type), 히트파이프식(Heat Pipe Type) 등과 같은 상변화 냉각방법이 적용되고 있으나⁽⁶⁾, 차세대 동력분산형 고속전철용 추진시스템에 이들 상변화 냉각방식을 적용하기 위해서는 설치공간 확보 및 송풍방법 개발 등이 필요하며, 또한 경량화, 소형화를 실현하기 위한 기술적 연구가 필요하다.

이에 본 연구에는 동력분산형 고속전철 추진시스템용 냉각장치의 기본설계과정부터 이론해석 및 전산해석을 통하여 설계사양을 확정하고, 이후 상세설계가 완성되면 해석결과를 토대로 시제품 제작 전에 개선사항 및 최적설계안을 도출할 것이다. 또한 시제품 제작을 통한 성능시험 및 냉각장치 요소별 신뢰성 평가 등을 수행하고자 한다.

* 유성열, 성균관대, 기계공학부, 정회원

E-mail : luciferz@skku.edu

TEL : (031)290-7489 FAX : (031)290-7489

** 성균관대학교 대학원, 기계공학부

*** 안산공과대학, 기계과

**** 성균관대학교, 기계공학부

1.1 연구개발 목표 및 내용

동력분산형 고속전철의 추진시스템(propulsion system)은 차량 하부에 분산 배치되어 동력집중식 주 전력변환장치에 비해 설치공간이 협소하여 전력변환반도체에서 발생하는 열을 효과적으로 외부로 방열하기 위한 열적 기구설계가 필요하다. 즉 반도체 소자 발생열을 자연대류 방식이나 강제 대류방식을 사용하여 방열을 하기 위해서는 차량 하부에 적절한 송풍유로가 확보되어야 한다.

본 연구과제의 개발목표는 동력분산형 고속전철용 추진시스템을 구성하는 고발열 전력변환 반도체들을 적정 허용온도 범위(100℃ 이하)로 유지할 수 있는 냉각장치의 개발이며, 차세대 고속철도 기술개발사업의 개발 기간 6년 중 3년으로 연구개발이 추진되며, 기반기술 연구를 통한 설계지원 및 최적설계 도출과 시제 차량제작 후 성능평가 및 신뢰성평가 등을 목표로 추진되고 있다. 표 1.1은 각 년차별 연구개발 추진내용을 정리한 것이다.

표 1.1 년차별 연구개발 추진내용

차년도	추진 내용
1차년도	<ul style="list-style-type: none"> - 추진시스템용 냉각장치 기술동향분석 - 히트파이프 냉각장치 설계 - 요소 히트파이프 기초설계 및 성능해석 - 히트파이프 시제품 제작 및 성능시험
2차년도	<ul style="list-style-type: none"> - 히트파이프 냉각장치 설계 - 히트파이프 냉각장치 시제품 제작 - 히트파이프 냉각장치 성능시험 - 히트파이프 냉각장치 전산 열유동 해석
3차년도	<ul style="list-style-type: none"> - 히트파이프 냉각장치 시제품 성능개선 - 히트파이프 냉각장치 시제품 성능평가 - 히트파이프 냉각장치 신뢰성 시험

1.2 연구개발 중요성

고속전철의 전력변환장치는 추진시스템의 핵심부품이며, 내부 전력변환반도체 발생열을 제거하기 위한 냉각방식은 상변화 열전달을 이용한 히트파이프 기술이다. 히트파이프 기술을 이용한 냉각장치 설계 및 제조기술은 우주항공분야에 적용된 첨단기술이며, 본 연구를 통하여 축적된 냉각기술은 국내의 정보통신, 멀티미디어, 항공, 군수분야에 기술이전이 가능하다. 이러한 히트파이프 기술을 적용한 냉각장치 설계는 다수의 선택적 설계가 가능하며, 최적설계를 위해서는 운전조건, 작동성능, 안정성, 신뢰성, 경제성 등에 대한 다각적 접근과 실증실험을 통하여 결정해야 한다. 또한 이 기술을 이용한 냉각방식은 히트싱크(heat sink)와 히트소스(heat source)를 포함한 열유동 해석, 히트파이프 설계, 작동유체의 정제(99.99%), 탈기 및 유량제어 공정, 정밀가공 및 접합 등 첨단 기계기술이며, 냉각장치의 신뢰성 확립을 위해 10년 이상의 장기수명 확보를 위한 요소제조 및 공정기술에 대한 연구와 시험속도 400km/h를 달성하기 위한 냉각장치의 경량화 및 소형화에 대한 기술적 연구가 필요하다.

2. 전력변환장치용 냉각기술

고속전철용 추진시스템의 전력변환장치는 반도체 소자의 개발로 급격히 발전하여 왔으며, 견인전동기도 직류전동기에서 유도전동기가 사용됨에 따라 컨버터-인버터(Converter-Inverter)로 구성된 전력변환장치가 필요하게 되었다. 또한 전력변환반도체의 발달에 의하여 스위칭 소자도 대용량 GTO, IGBT 등을 사용하게 되었다. 일반적으로 전력변환반도체 소자들은 온도특성이 강하기 때문에 적정 허용 작동온도 범위가 결정되며, 이 작동온도를 유지하지 위해서는 반도체 내부의 동력스위칭 또는 전기저항손실에 의한 내부 발생열을 제거하기 위한 냉각장치가 필요하다.

보통 도시형 전철의 GTO Thyristor의 최대 열부하는 약 800W, 고속전철에 사용되는 IGBT의 경우는 1.5~2kW이다.⁽⁴⁾ 이들 전력변환반도체의 냉각장치는 약 250W의 낮은 열부하에서는 자연대류형 히트싱크가 1000W 미만의 열부하에서는 강제대류 냉각방법을 사용하는 알루미늄 히트싱크가 적용되며, 이 이상의 열부하에서는 수냉각 또는 상변화 열전달을 이용하는 냉각방법이 적용되고 있다.

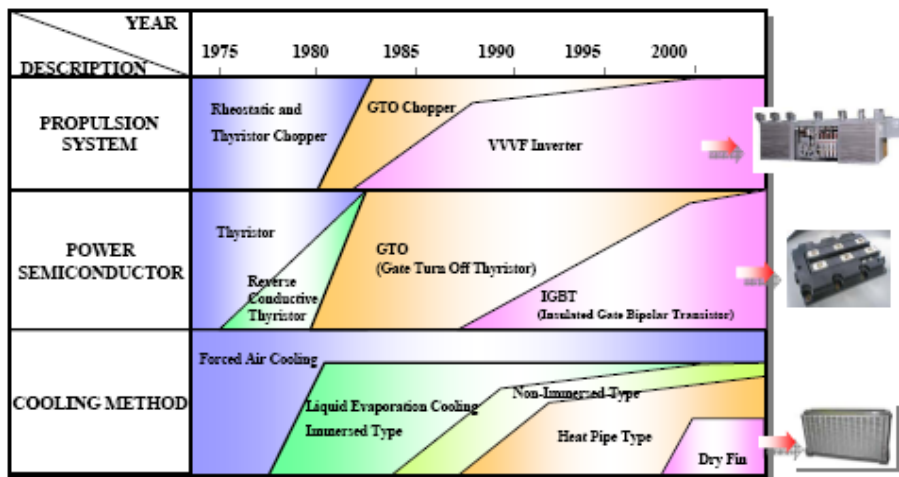


그림 2.1 추진시스템, 전력변환반도체 및 냉각방법의 변화.

3. 냉각장치 설계

고발열 전자반도체 및 전력변환 반도체로 구성된 전장품의 냉각에 적용되는 히트파이프 이용기술에 관해서는 그동안 많은 연구들이 수행되었다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 히트파이프 기술을 이용한 냉각장치 설계를 위한 동력분산형 고속전철용 추진시스템의 열적, 환경적 설계사양을 검토하고, 적용 가능한 히트파이프 냉각장치의 기본적인 설계와 제작 및 성능시험을 수행하고자 한다.

3.1 예상 열부하 및 냉각장치 설계 사양

동력분산형 고속전철용 전력변환장치의 기본 회로도와 컨버터-인버터 스택(stack)은 그림 2.2에 보는 바와 같으며, 4개의 컨버터와 3개의 인버터가 있으며, 컨버터-인버터 스택은 각각 4개의 전력변환반도체로 구성된다.

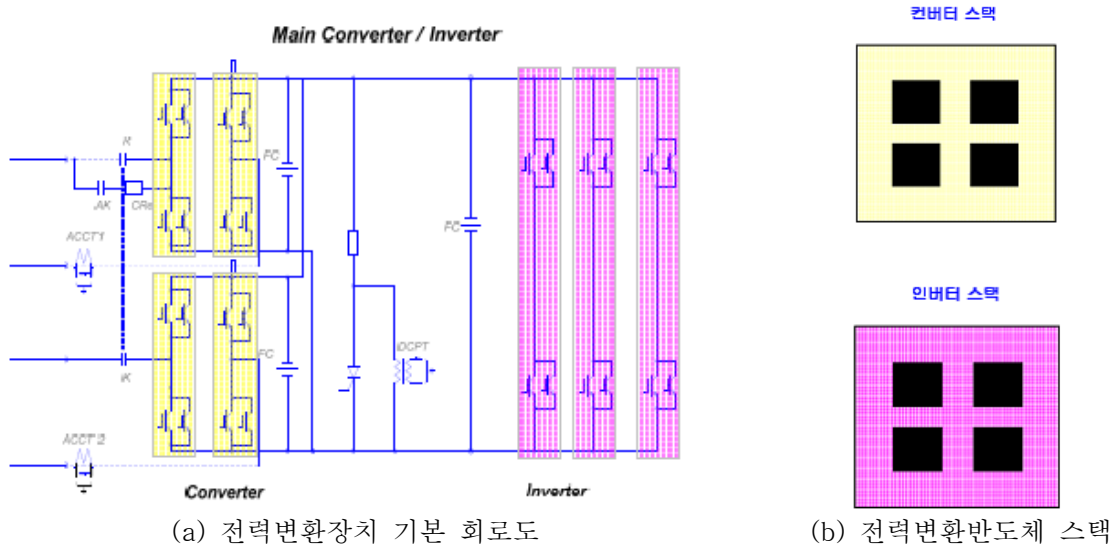


그림 3.1 전력변환장치 회로도 및 전력변환반도체 스택 구성.

표 3.1은 본 연구를 통하여 개발할 전력변환장치용 히트파이프 냉각장치 설계시 고려해야 할 조건이다. 즉, 컨버터-인버터 스택의 예상 열부하는 컨버터의 경우 소자당 발열량이 2.1kW, 인버터의 경우 1.2kW로 예상되며, 이 들 스택의 최대발열량은 각각 4.4kW, 8.4kW이다. 또한 전력변환반도체의 정상 작동온도를 100℃이하로 유지해야 하므로 외기공기 온도를 고려할 때 반도체 소자의 공기에 대한 허용온도 상승차는 약 40~55℃로 예상된다. 따라서 안전율을 고려한 Q=9.5kW의 최대발열량과 외기에 대한 전력변환반도체의 최소 허용온도 상승치 $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 를 설계치로 설정하면 냉각장치 허용 최대열저항은 $R_{\text{tot}}=\Delta T/Q=0.0042$ 이 될 것으로 예상된다.

표 3.1 동력분산형 고속전철 전력변환장치용 히트파이프 냉각장치의 설계사양

최대열부하	Inverter	$Q_{IV,\text{max}}$	8~9.5	kW
	Converter	$Q_{CV,\text{max}}$	4~5.5	kW
전력변환반도체 최대 표면 온도		$T_{SC,\text{max}}$	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	

3.2 냉각장치의 구조와 작동원리

차세대 동력분산형 고속전철 추진시스템용 냉각장치는 일본의 Fastec360의 경우 수냉각장치(water cooling system)를 적용하고 있으며,⁽³⁾ 히트파이프 기술을 이용할 경우 적용 및 개발 가능한 히트파이프 종류는 루프 히트파이프(loop heat pipe)와 루프 열사이폰(loop thermosyphon)이다. 이 들 냉각장치의 기본적인 구조와 열전달 및 유체역학적 특성 비교를 표 3.2에 나타내었다. 그림 3.3 (b)에 보는

바와 같이 히트파이프 기술이용 냉각장치는 컨버터-인버터 스택이 증발부에 부착되며, 환-관 (fin-tube) 열교환기로 응축부가 구성된다. 그림 3.3(a) 나타낸 수냉각장치와 유사하나, 내부 작동유체를 순환시키기 위한 펌프가 필요하지 않다. 이들 히트파이프의 작동원리는 일반적인 히트파이프와 유사하며 다음과 같다. 즉 전력변환반도체에서 발생된 열이 증발부 내부 작동유체로 전달되어 기-액 상 변화가 일어나고, 이 때 발생된 증기는 이송관을 통하여 환-관 열교환기로 구성된 응축부로 유입되며, 응축된 작동유체는 증발부로 이송된다. 작동유체를 순환시키는 펌프동력은 루프 열사이폰의 경우 증발부와 응축부의 정수압차(hydraulic pressure)를 이용하며, 루프 히트파이프의 경우 워크(wick)의 모세압력(capillary pressure)을 이용한다. 또한 응축부로 전달된 열의 효과적인 냉각은 팬(fan)을 이용하거나 주행풍(ram-air)을 이용할 수 있으며, 이 경우 동력분산형 고속철도 객차 설계단계부터 하부에 송풍유로에 대한 연구가 필요하다.

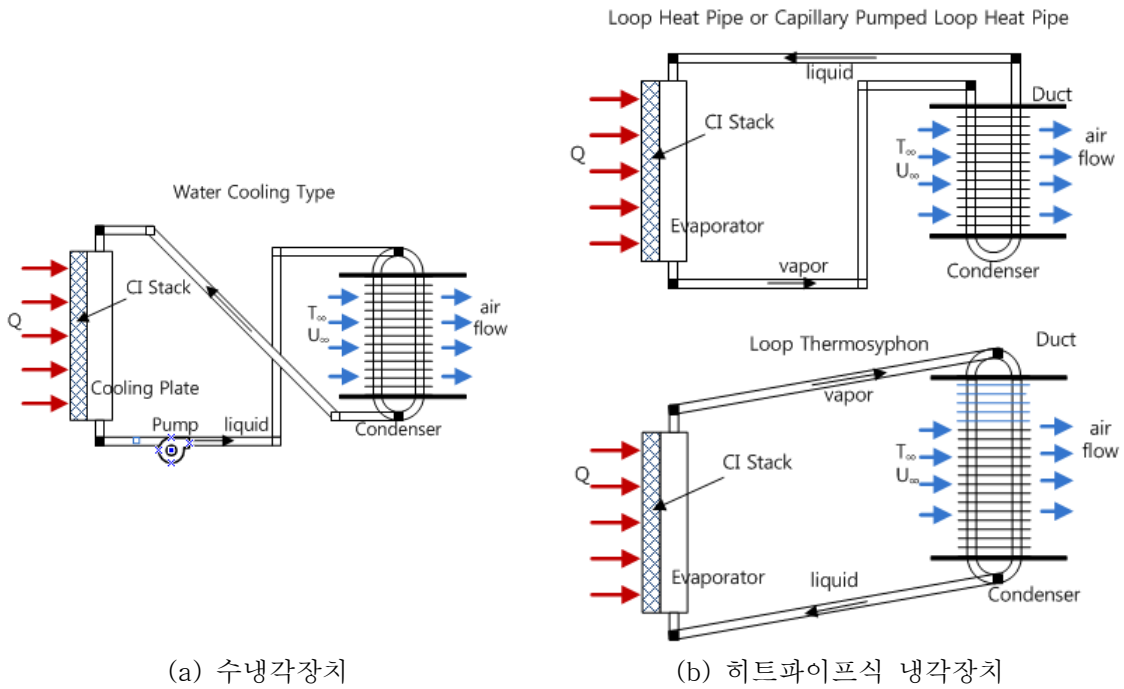


그림 3.2 동력분산형 고속철도 전력변환장치용 냉각장치의 개념도

표 3.2 수냉각장치 및 히트파이프 냉각장치의 열전달 및 유체역학적 특성비교

	수냉각장치	히트파이프 냉각장치
열전달 메카니즘	작동유체 현열이용 $Q = \dot{m}c_p\Delta T$	작동유체 잠열이용 $Q = \dot{m}h_{fg}$
작동유체 질량유동율	$\dot{m} = Q/(c_p\Delta T)$ $h_{fg} = 600\sim 4000$ [J/kg] $\Delta T = 15^\circ\text{C}$	$\dot{m} = Q/h_{fg}$ $h_{fg} = 1000\sim 2000$ [kJ/kg]
질량유동율 비교	$\phi = \dot{m}_{HPC}/\dot{m}_{WC} = \frac{1/(h_{fg})}{1/(c_p\Delta T)} \approx 0.01 \sim 0.03$	
작동유체 순환동력	$w_{pump} = \sum_i (\rho_i V_i \Delta p)_l$	$w_{pump} = \sum_i (\rho_i V_i \Delta p)_l + \sum_i (\rho_i V_i \Delta p)_v$

4. 결론

동력분산형 고속전철의 개발에 있어 추진시스템용 냉각장치의 설계, 성능해석 및 평가는 차량의 주행 안정성 및 신뢰성에 영향을 미치며, 독자적인 기술개발이 필요한 부품 소재기술이다. 현재 루프형 히트파이프 냉각기술을 이용한 고속전철 추진시스템용 냉각장치 개발관련 연구사례는 없는 것으로 추정되며, 본 연구를 통한 추진시스템용 히트파이프 냉각장치의 독자적 기술선점이 가능할 것으로 보인다. 또한 본 연구개발을 통하여 확립된 추진시스템의 냉각장치 설계 및 제조기술은 향후 국내의 정보통신, 멀티미디어, 항공, 군수분야에 기술이전이 가능할 것으로 예상된다.

따라서 본 연구는 분산형 고속전철 추진시스템용 냉각장치에 대한 기반기술을 정립하고, 이를 설계 단계에서 반영함으로써 개발기간 및 개발비용의 단축에 효과를 얻을 수 있는 연구를 진행해 나갈 것이다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Takashi Murase et. al, "Power Semiconductor Device cooling system Using Electrical Insulated Heat Pipe for Rolling Stock", Furokawa Review, No 12, pp. 82~93, 1993.
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 제 6권 6호, pp. 572~581, 2001
5. Amir Faghri, Heat Pipe Science and Technology, Taylor & Francis, pp. 493~577, 1995
6. 현대중공업, "주전력 변환장치 개발 연차보고서" 1997~2000