

일체형 스택(PEM) 및 냉각장치를 적용한 전동차 추진제어장치 개발 및 상용화

Development and Revenue Service of Propulsion System Using Integrated Stack(PEM) and Heat Pipe

김명한*
Gim, Myung-Han

이광국**
Lee, Gwang-Guk

박수용***
Park, Su-Yong

ABSTRACT

Power semiconductor which is adapted in the rolling stock has a high practicality for capacity of high voltage and high speed switching. but it has a trouble of fever cause of high speed On, Off switching loss and the operating junction temperature is limited to 150°C because is made from the silicon for the foundation material. Therefore, it is important to find a way out of this trouble and must make the countermeasure. In this research, the caloric value of the integrated PEM is calculated to adapt the optimized heat pipe and the reliability of the heat pipe is demonstrated through the cooling performance test and vibration test.

1. 서 론

철도차량의 추진제어장치에 사용되는 전력용 반도체는 그 성능의 비약적인 향상으로 그 대용량, 고속 스위칭이 가능하여 그 활용도가 높아지고 있다. 그러나 전력용 반도체는 On, Off 스위칭에 의한 손실로 인해 발열 문제가 존재하고 그 기반 소재로 실리콘을 사용함으로써 Junction 동작 온도가 150°C의 한계를 가진다. 따라서 추진제어장치의 신뢰성을 확보하기 위해서는 전력용 반도체의 발열문제를 해결하는 것이 필수적이며 냉각을 위한 방안이 마련되어야 한다.^[1]

현재 서울이나 인천 지하철에서 운용되고 있는 PEM(Power Electronics Module)의 냉각장치는 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이며 냉각장치의 용량이 제한적으로 설계되어 있어 추진제어장치의 다양한 기능 구현 및 성능 향상을 위한 응용에 제약이 따르게 되고 경제적인 손실 또한 큰 실정이다. 따라서 추진제어장치의 활용도를 높이고 가격과 성능을 만족하는 냉각장치의 개발이 절실하다. 기존 추진제어장치에서는 각 상별 암(Arm) 단위로 냉각장치를 설계하였으나 본 연구에서는 기 개발된 고성능, 대용량의 전력용 반도체(HVIPM)를 적용한 추진시스템에 발열 문제를 효율적으로 해결할 수 있는 방안으로 일체형 냉각장치로 열전달 특성이 우수한 히트 파이프를 적용하여 스택의 구조를 단순화 및 경량화하고 냉각 효율을 증대 할 수 있는 PEM(Power Electronic Module)의 설계에 대해 기술한다.^[2] 최적의 냉각장치 설계를 위해 발열량을 정확하게 예측하고 히트파이프의 신뢰성을 검증하기 위한 냉각 성능 시험 및 진동 시험을 수행하였다.

* (주)로템 기술연구소 전자연구1팀, 비회원

E-mail : hans@rotem.co.kr

TEL : (031)460-1990 FAX : (031)460-1788

** (주)로템 기술연구소 전자연구1팀

*** (주)대흥기업 기술연구소

2. 일체형 스택(PEM) 설계

2.1 스택 구조

추진제어 장치의 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency) 제어를 위한 주요 구성 요소인 PWM 스위칭을 위한 파워 모듈의 주요 소자는 아래 그림 1과 같이 3개의 암(Arm)으로 이루어진 총 6개의 IPM과 DC Link 전압의 평활 및 필터 역할을 위한 FC(Filter Capacitor)로 구성되며 또한 각 상의 출력 전류 모니터링을 위한 CT(Current Transformer)로 구성된다. 일반적으로 각 암(Arm)에는 스위칭시 발생하는 썬지 전압 흡수를 위한 스너버용 캐패시터를 적용하지만 개발된 PEM에서는 스너버용 캐패시터를 적용하지 않고 부스바를 통해 FC와 IPM 간의 간격을 최소화하여 FC로 하여금 Clamping Capacitor의 역할을 할 수 있도록 구성하여 시스템을 단순화하고 경제성을 갖추도록 하였다.

아래 그림은 HVIPM 스택의 구성 회로도 및 3상 일체형 스택을 베이스 플레이트(Base Plate)에 취부한 모양을 나타낸 것이다.

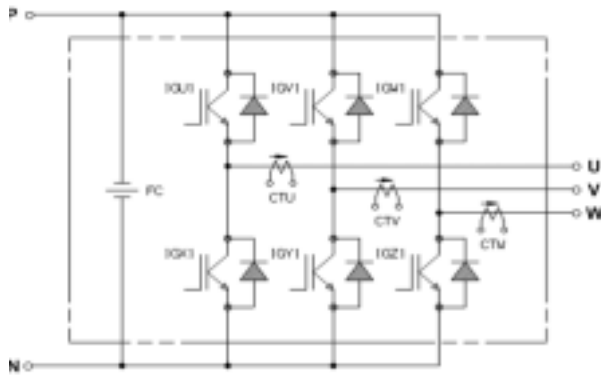


그림 1. HVIPM 구성

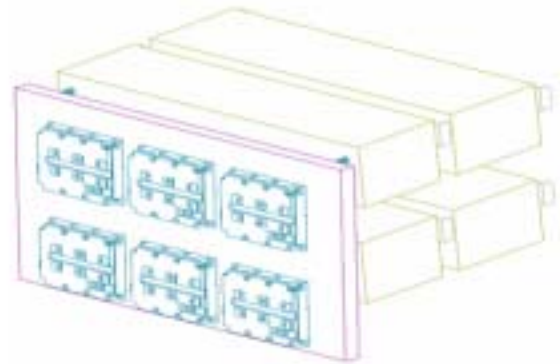


그림 2. 3상 일체형 스택 구조

2.2 전력용 반도체(HVIPM) 적용

고전압용 전력용 반도체는 철도차량, 고신뢰성의 변환기 회로, DC 초퍼등에 사용이 가능하며 본 연구에서는 정격 용량을 바탕으로 3300V, 1200A의 용량을 가진 모듈을 선정하였다. 이 모듈은 그림 4와 같은 내부 블럭으로 구성되어지며 과전류, 과온도, 저전압의 보호 기능을 가지고 있다. 정선 최고 온도는 150℃, 베이스 플레이트를 기준으로 한 과온도 검출 온도는 113℃이다.^[3]



그림 3. HVIPM 취부 형상

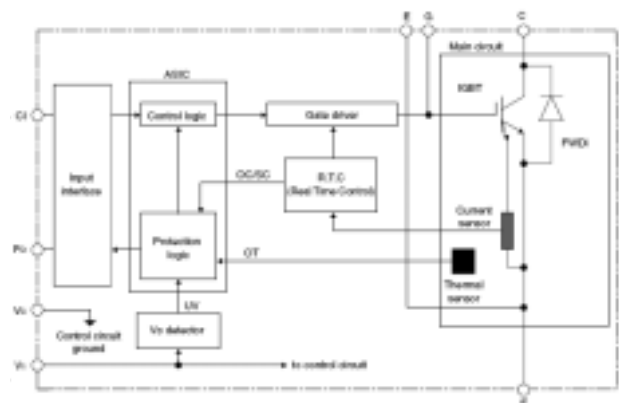


그림 4. 내부 기능 다이어그램

2.3 전력용 반도체(HVIPM)의 발열량 계산

스위칭 소자의 발열량을 결정하는 주요 요인은 전력용 반도체(HVIPM) 내부에 있는 IGBT 및 환류 다이오드의 스위칭 손실과 도통 손실로 각 특성 곡선에 따라 발열량이 결정되며, 추가적으로 제어 변수인 스위칭 주파수와 역률, 변조지수, 주행 패턴 등에 따라 발열량이 다르므로 시스템의 특성에 적합한 설계가 요구되어 진다.^{[4][5]} 본 연구에서는 서울시 2호선 차량의 사양에 따른 최대구배 35%, 가속도 3.0km/h/s 등의 최대 성능을 기준으로 발열량을 계산하였다. 아래의 식은 IGBT 및 환류 다이오드의 스위칭 손실과 도통 손실을 계산하는 식으로 여기서 $P_{IGBT,CON}$ 와 $P_{IGBT,SW}$ 는 각각 IGBT의 도통 손실과 스위칭 손실이며 $P_{DIODE,CON}$ 와 $P_{DIODE,SW}$ 는 각각 환류 다이오드의 도통 손실과 스위칭 손실을 나타낸다.^[6]

$$P_{IGBT,CON} = I_{MP} \cdot V_{CE(sat)} \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{M}{3\pi} \cdot \cos\theta \right)$$

$$P_{IGBT,SW} = (E_{ON} + E_{OFF}) \cdot f_{sw} \cdot \frac{1}{\pi}$$

$$P_{DIODE,CON} = I_{MP} \cdot V_F \cdot \left(\frac{1}{8} \mp \frac{M}{3\pi} \cdot \cos\theta \right)$$

$$P_{DIODE,SW} = \frac{1}{8} \cdot I_{rr} \cdot t_{rr} \cdot V_{CE(peak)} \cdot f_{sw}$$

위의 계산식을 기초로 주행 구간별 스위칭 주파수 및 역률, 변조지수를 고려한 HVIPM 1개당 발열량 계산결과는 표 1과 같고 주행 속도 별 HVIPM 6개의 총 손실 패턴은 그림 5와 같이 나타난다.

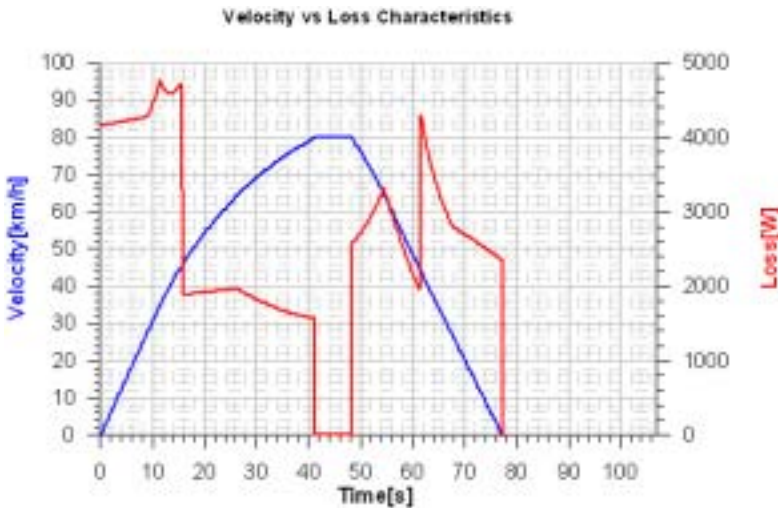


그림 5. 주행 속도 대비 손실 특성

표. 1 손실 계산값

	IGBT	Diode
도통 손실[W]	286.4	117.0
스위칭 손실[W]	158.1	48.4
총 손실[W]	609.8	

여기에 고조파 성분을 고려한 20%의 여유를 포함한 HVIPM 6개의 총 손실은 약 4390W이다.

이와 같은 계산 결과를 바탕으로 냉각 시스템은 연속 정격 4500W의 히트파이프로 설계한다.

3. 냉각 시스템 설계

3.1 히트파이프(Heat Pipe) 구조

히트 파이프는 밀폐 용기 내부의 유체가 열을 받으면 기화 되고, 열을 잃으면 액화 되는 원리를 이용한 것으로 연속적으로 기화 및 액화의 상변화 과정을 통하여 용기 양단 사이에 열을 전달하는 장치이다. 잠열(latent heat)을 이용하여 열을 이동시키는 열 전달 기구로 발열체의 열을 히트파이프를 통하여 응축부로 이송시킨 후 그림 6과 같이 응축부에 설치된 휀(Fin)을 통해 자연대류 또는 강제 대류 방식으로 냉각시키게 된다. 다른 열 전달 기구에 비해 매우 큰 열 전달 성능을 발휘하는 장치이므로 발열체에

서 발생하는 대량의 열을 효과적으로 냉각시키기 위해 사용한다.^[7] 본 연구에서 제안하는 히트파이프는 가변전열 히트파이프(VCHP, Variable Conductance Heat Pipe, Gas-loaded Heat Pipe)로 그림 6과 같은 구조를 가지며 베이스를 통해 들어오는 열을 핀(Fin)으로 전달하게 된다.

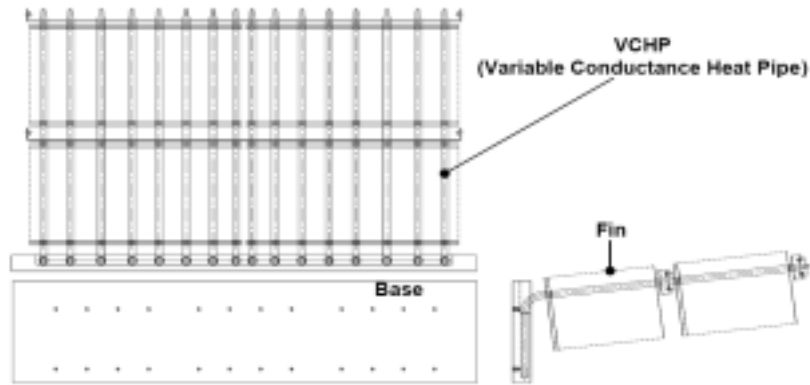


그림 6. 히트파이프 구조

3.2 히트파이프(Heat Pipe) 설계 및 작동 메커니즘

그림 7은 정상 작동중인 VCHP type의 히트파이프 냉각기의 열전달 경로를 개략적으로 표현하고 있다. 발열체인 전력용 반도체(HVIPM)에서 열이 발생하면 베이스(Base)를 통해 열이 전달되고 영역 I의 물은 액체에서 증기로 상변화하면서 열을 흡수하고 영역 II로 이동하여 증기에서 액체로 상변화하면서 열을 방출한 뒤 중력에 의해 다시 영역 I로 이동한다. 이 열은 핀(Fin)으로 전도에 의하여 이동하고 최종적으로 주위 공기로 대류에 의하여 열이 방출되는 구조이다. 하지만 0°C 미만의 환경에서는 유체가 얼기 때문에 정상동작을 할 수 없게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 히트파이프에 불응축 가스(NCG, Non-Condensable Gas)를 주입하여 열을 가하지 않은 상태에서는 그림 8과 같이 불응축 가스가 큰 영역을 차지하고 열이 가해지면 물이 녹고 증발하지만 불응축 가스의 영향으로 증기의 이동경로가 짧게 된다. 이후 계속적으로 열을 흡수하면서 히트파이프 내부의 압력이 증가하여 불응축 가스는 반대편으로 지속적으로 밀리게 되어 작동초반에는 짧은 히트파이프와 유사한 작동을 하고, 정상상태에 도달하게 되면 원래 길이의 대부분을 방열하는데 사용하게 되는 구조를 가지고 있다.

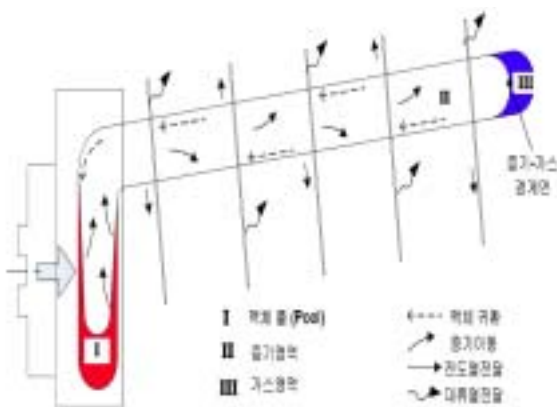


그림 7. 히트파이프 동작 메커니즘

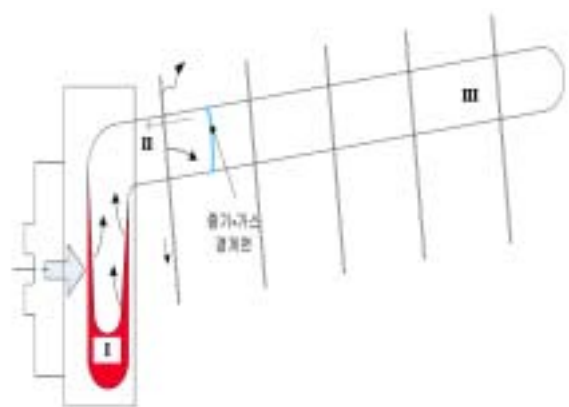


그림 8. 저온 동작 메커니즘

3. 성능 시험

3.1 냉각성능 시험

히트 파이프 냉각기의 성능 검증을 위해 그림 9와 같이 알루미늄 블록과 막대형 전기저항 히터로 구성된 모사발열체를 사용하여 발열량은 4500W를 공급하고 주행풍(3m/s)을 고려한 공기 덕트를 설치하였다. 온도 측정 위치는 그림 10과 같은 각 위치를 선정하였으며 추가적으로 바람의 입구 및 출구의 온도를 데이터 획득 장비와 PC를 통해 실시간으로 모니터링하고, 와트 미터를 이용하여 공급열량을 확인하였다.



그림 9. 냉각성능 시험 구성



그림 10. 온도 측정 위치

성능 만족을 위한 목표 온도차(ΔT)는 PEM의 안정적인 동작을 보증하기 위해 40℃로 설정하였으며 시험 결과 아래와 같은 결과를 획득하였다. PEM 표면 온도가 최대로 차이를 보인 곳은 #9, #10 포인트로 이때 최대 온도차(ΔT)는 33.3℃로 목표 온도보다 약 6.7℃의 마진을 갖는 것을 알 수 있다. 시험 환경은 주위 온도가 21.7℃이었으며 모사 자연풍의 실제 풍속은 2.5m/s였다. 따라서 실제 온도 마진은 좀 더 증가 할 것으로 보인다.

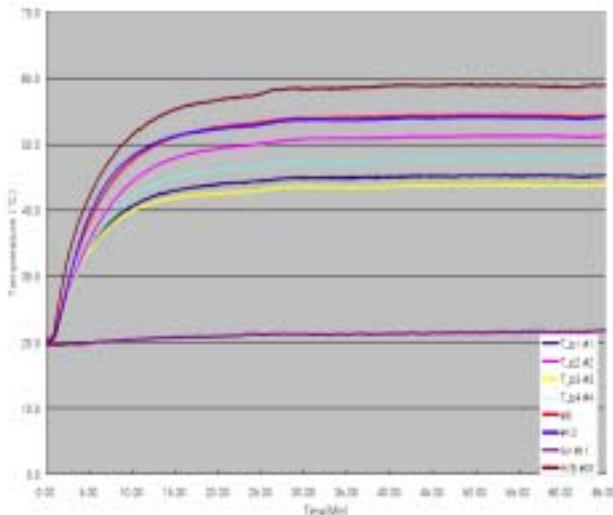


그림 11. 온도 측정 그래프

표 2. 포화 온도 데이터

측정위치	온도	ΔT
#1	41.0	23.6
#2	47.0	29.6
#3	40.6	23.3
#4	44.3	27.0
#5	33.7	16.3
#6	34.5	17.1
#7	45.1	27.7
#8	43.1	25.7
#9	50.2	32.8
#10	50.7	33.3
#11	17.4	0.0
#12	30.9	13.5
#31	55.5	38.1

3.2 진동 시험

진동 영향에 따른 성능 변화 및 히트파이프의 변형 유무를 확인하기 위해 KS R 9144 2 Class B에 따라 진동시험을 수행하였다. 시험 방법은 냉각성능 시험과 동일하며 진동시험 전후의 데이터를 확인하였다. 그림 12는 진동시험 전후의 각 포인트 별로 온도차를 비교한 것으로 가장 온도가 높은 위치는 #9 포인트로 온도차(ΔT)가 진동시험 전후로 각각 32.6K, 32.7K로 미세한 차이를 보이고 있으나 이 값은 측정오차 정도로 볼 수 있으며 냉각 성능을 만족하는 것을 알 수 있다.

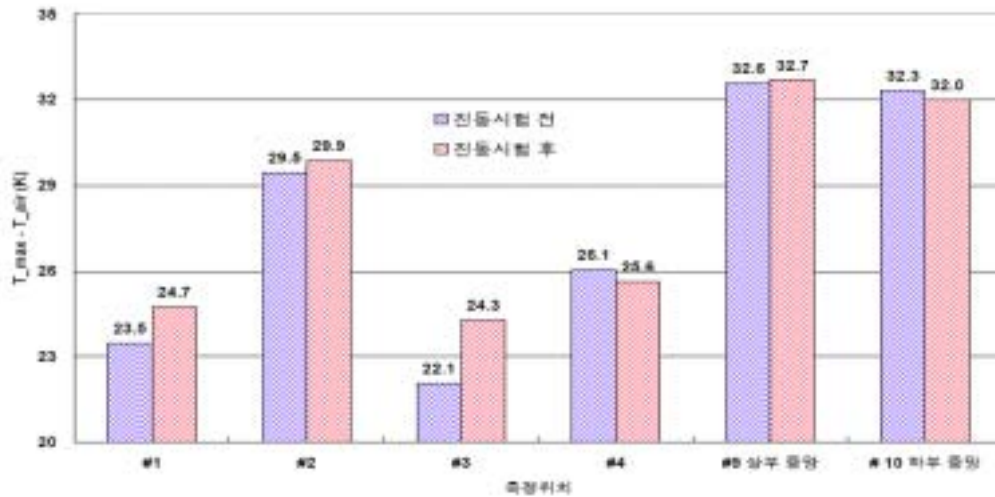


그림 12. 진동시험 전후 온도 변화 비교

4. 결론

전력 반도체 및 냉각장치의 발전으로 철도차량에 적용되는 추진제어장치에도 이러한 기술을 적용하여 경량화 및 경제성과 신뢰성을 높여려는 시도가 계속 되고 있으며 이러한 기술을 바탕으로 철도 차량의 기술 및 가격 경쟁력을 갖추어 가는 시점에서 본 연구가 진행 되었으며 시험결과 만족할 만한 결과를 확보하였다. 본 연구에서 제안한 HVIPM 및 히트파이프를 포함한 일체형 스택은 서울 및 인천 지하철의 추진제어장치에서 적용하고 있는 PEM과 비교해서 사이즈는 같으나 무게는 더욱 경량화 되었고 용량 또한 확대 되었다. 국내 독자 기술에 의해 최적화 개발 시험한 본 연구 성과를 적용함으로써 추진제어시스템을 경량화하고 경제성과 신뢰성을 확보 할 수 있을 뿐만 아니라 수입 대체 효과까지 얻을 수 있을 것으로 보인다. 개발된 PEM은 성능검증 및 환경시험, 시운전을 통해 신뢰성을 충분히 검증한 후 본선운행을 해야 하는 과제가 남아 있으며 이러한 검증을 마친 후 서울시 2호선, 9호선에 적용 예정이고 추후 해외 및 국내 프로젝트에서 이러한 기술이 활용 될 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] J. Holtz (1992.), "Adaptive Optimal Pulse-Width Modulation for the Line-Side Converter of Electric Locomotives", IEEE Trans. power electronics., vol. 7, no. 1, pp. 205-211.
- [2] 이광국, 김동명, 권일동(2005) "IPM 소자를 사용한 추진제어장치 개발 및 상용화"
한국철도학회논문집, pp.671-675
- [3] "PM1200HCE330-1, High Voltage Intelligent Power Module Specification", Data sheet, Mitsubishi Electric.
- [4] Astrid Petterteig, "IGBT Turn-off losses for Hard Switching and with Capacitive Snubbers", IEEE Industrial Application Society Annul Meeting, 1992, pp. 1501-1507
- [5] Yooske Nakazawa, Shin-Ichi Toda, Ikuo Yasuoka and Haruo Naito., "One-Pulse PWM Mode Vector Control for Traction Drives", Power Electronics in transportation. IEEE, pp. 135-141, 1996.
- [6] 김태운, 노애숙 (2005), "IPM 스위칭 소자를 적용한 AC 전동차 추진제어장치" 전력전자학회논문지, 제10권, 제3호, PP.223-240.
- [7] 강환국 (2004), "전력반도체 냉각용 히트파이프의 성능안정성 파악을 위한 성능시험" 전력전자학회논문지 제9권 제3호, pp. 203~212.