

HEV용 인버터의 방열을 위한 수냉식 배관구조

金京滿[†], 禹炳國*, 李容和**, 姜燦鎬***, 全泰園§, 趙官烈§§

Water Cooling Pipe Structure for Heat-Dissipation of HEV Inverter System

Gyoung-Man Kim, Byung-Guk Woo, Yong-Hwa Lee, Chan-Ho Kang,
Tae-Won Chun and Kwan-Yuhl Cho

요 약

하이브리드 전기자동차(HEV)용 인버터의 스위칭 소자에서 발생하는 열을 효율적으로 냉각시키기 위한 수냉식 구조를 제안한다. 기존의 볼트형 냉각구조는 강한 수압에서 누수현상이 발생할 수 있으므로 본 논문에서는 이를 방지하기 위해 방열판 내에 파이프 형태의 구조를 적용하였다. 방열원을 기준으로 수로의 이격거리 변화와 여러 형태의 수로에 대해 방열현상을 시뮬레이션으로 해석하고, 방열효과가 우수한 2가지 배관구조 모델을 기준으로 방열효과를 비교 분석하였다. 시뮬레이션 결과를 토대로 2가지 배관구조를 적용한 HEV용 30kW급 인버터를 제작하여 방열효과를 검증하였다.

ABSTRACT

To dissipate the heat generated from the switching devices in the inverter system of HEV, the water cooling structure is proposed. The bolt type cooling structure has a problem such as water leakage for high pressure of water, therefore the proposed cooling structure applied pipe structure in the heat sink. The heat dissipation characteristics for various structures of water channel and distance between heat source and water channel was analyzed through the simulation. heat dissipation effect for two types of water cooling structures was investigated. Based on the simulation results, two types of water cooling system for 30kW inverter system of HEV were manufactured and the heat dissipation effect was verified.

Key Words : Heat dissipation, Water cooling, Pipe structure, Inverter, HEV, ICE-PAK program

1. 서 론

전력용 반도체 소자를 이용한 전력전자분야 기술이 발전하면서 다양한 형태의 전력변환장치가 실용화되고 있다^[1]. 산업용 인버터에 비해 하이브리드 전기자동차

(HEV, Hybrid Electric Vehicle)용 인버터는 HEV의 구동력에서 전기모터가 담당하는 비중이 높아지면서 인버터의 용량도 커지는 추세인 반면 차량 내부에 장착되므로 인버터의 크기는 소형으로 개발되어야 한다. 국내 HEV용 인버터의 최대효율은 약 96%로 4% 이상의 손실을 가지지만 이는 부하와 환경에 따라 달라진다. 30kW급 HEV용 인버터에서 발생하는 발열손실은 최대 1.8kW에 달하고 이는 열로써 발산된다. 이 열은 전장부품의 동작과 수명에 영향을 끼치므로 효과적인 방열을 위해 방열구조의 해석과 개선에 대한 요구가 증대되며, 특히 소형화된 대용량 HEV용 인버터의 방열을 위해 수냉(water cooling)구조가 필수이다^[2,3,4].

본 논문에서는 30kW급 HEV용 모터구동을 위한 인

[†]교신저자 : 정회원, (주)이지트로닉스 수석연구원

E-mail : kmkim@egtronics.co.kr

*정회원, (주)이지트로닉스 수석연구원

**정회원, (주)동아일렉콤 연구원

***정회원, (주)이지트로닉스 대표이사

§정회원, 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수

§§정회원, 충주대 정보제어공학과 조교수

접수일자 : 2009. 4. 30 1차 심사 : 2009. 6. 6

2차 심사 : 2009. 8. 12 3차 심사 : 2009. 12. 4

심사완료 : 2009. 12. 9

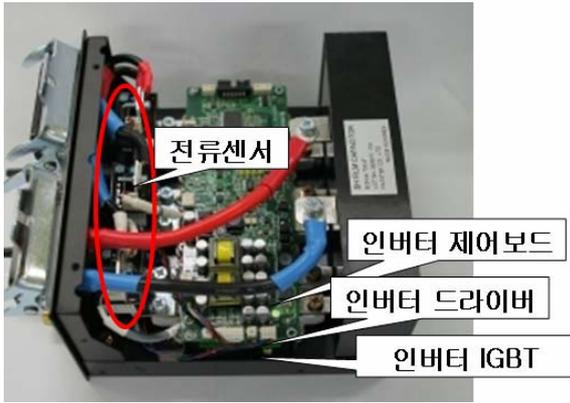


그림 1 인버터의 내부구성
Fig. 1 Configuration of the inverter

버터의 수냉식 방열구조를 제안하였다. 인버터에서 발생하는 최대 손실을 1.8kW로 선정하고, 다양한 방열구조 및 방열점과 배관간격에 따른 방열특성을 고찰하였다. 방열에 효과적인 배관위치와 배관구조를 결정하기 위해 ICE-PAK 시뮬레이션 프로그램을 통하여 방열특성을 검토하였다. 또한 방열특성이 우수한 2가지 냉각구조모델을 실제 인버터에 적용시켜 제작하고, 인버터 스위칭 소자의 방열에 대한 방열판의 냉각특성을 열화상카메라로 측정하여 시뮬레이션 결과와 함께 비교하여 방열효과를 검증하였다.

2. HEV용 모터 구동 인버터

2.1 인버터의 구조와 사양

HEV 차량의 전기동력을 발생하기 위한 모터는 차량용으로 설계 제작된 30kW 용량의 3상 영구자석 매입형 동기모터를 사용하였다. 그림 1과 같이 모터구동용 인버터는 모터제어 알고리즘이 탑재된 제어보드, 스위칭 소자들과 이를 구동하기 위한 드라이버 회로, 전류센서, 슈퍼커패시터 및 스위칭 소자에서 발생하는 열을 냉각시키기 위한 방열부 등으로 구성하였다.

인버터 외형은 가로 213mm, 세로 216mm, 높이 130mm로 약 6ℓ 부피의 직육면체 구조 내부에 구성품이 배치되고, 이 중 방열판의 높이는 내부 부품의 높이와 실장상태를 고려하여 40mm로 설정하였다.

인버터의 주된 방열원은 스위칭 소자이다. 본 연구에 적용된 인버터 스위칭 소자들은 3상 브리지 구조를 위해 각 상의 상, 하단에 있는 2개의 스위칭 소자가 하나의 모듈로 된 세미크론의 'SEMIX 302HD066'을 3개 사용하였다.

표 1 인버터와 구동모터사양

Table 1 Specification of the inverter and motor

인버터 정격	입력전압	200 ~ 344 V, 270 V(Normal)
	최대전류	200 A
	스위칭 주파수	10 kHz
	동작온도	-40 ~ 105 ℃
	토크리플	5 % 이하
구동 모터	모터 종류	3상 매입형 영구자석동기모터
	최대속도	6000 rpm
	정격출력	30 kW
	회전자 위치검출	레졸버
	극수	16극

표 1은 실험에 사용한 인버터와 구동모터 정격 및 특징을 나타낸다.

2.2 방열판의 구조

인버터 방열은 크게 공냉식과 수냉식이 있으나, HEV 차량용 인버터는 용량에 비해 소형으로 제작해야 하므로 수냉방식을 적용해야 한다. 내연기관 엔진 냉각용 수냉시스템을 인버터 냉각과 동시에 적용하면 별도의 인버터용 냉각시스템이 필요없다.

수냉식 수로 제작에 많이 사용하는 냉각구조는 방열판을 상부와 하부로 구분하고, 수로에 해당되는 부분을 각각 깎아낸 후 두 구조물을 맞붙여 볼트로 체결하는 방식이다. 이 구조는 제작이 쉽고 수로의 형태를 자유롭게 제작할 수 있는 장점이 있지만, 수압이 높을 경우 접합면에서 누수발생의 빈도가 높은 단점을 가진다.

본 논문에서는 금속성 방열판 내부를 드릴로 가공하여 파이프 형태가 되도록 설계하였다. 파이프형 수로는 냉각수 고압 순환이 가능하여 방열특성이 우수하고 누수가 없으며, 제작비가 절감되는 장점이 있다. 반면 볼트형 배관구조에 비해 자유로운 배관형태로 제작하기엔 다소 힘들다.

3. 시뮬레이션을 통한 냉각구조 온도특성비교

3.1 시뮬레이션 모델링

그림 2는 본 논문에 적용한 30kW급 HEV 구동용 인버터에 대하여 ICE-PAK 시뮬레이션 프로그램으로 모델링한 3차원 도면이다.

시뮬레이션에 적용된 방열판은 순수 알루미늄보다 전도성이 좋고 무게가 가벼운 혼합물 알루미늄으로 밀도가 2700kg/m³, 전도도가 500W/m·°K이며, IGBT 모

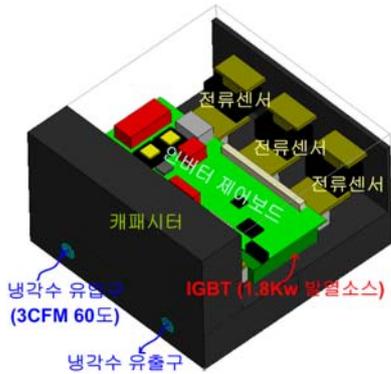


그림 2 인버터 시뮬레이션용 3D 도면
Fig. 2 3D picture for the inverter simulation

들의 접합 경계면에서 열전달 상수값이 1W/m²인 재질의 알루미늄을 사용하였다.

인버터 크기를 고려하여 방열판은 가로 213mm, 세로 216mm, 높이 40mm로 한정하고, 차량의 엔진냉각 시스템과 동일하게 적용하기 위해 파이프의 이음매를 고려하여 직경 16mm, 단면적 2cm²로 적용하였다.

배관구조에 대한 방열특성을 해석, 측정하기 위해 주 발열원인 IGBT 모듈의 위치를 고정시키고, 발열전력 1.8kW는 3개의 IGBT 모듈에서 균등하게 발열된다고 가정하여 시뮬레이션 모델을 설정하였다. 실제 인버터 구조물 시험에서도 IGBT 모듈에 1.8kW에 해당하는 열원을 가해서 방열특성을 확인하여 시뮬레이션 결과와 함께 비교 분석하였다.

방열특성을 알아보기 위해 온도 측정점은 온도가 가장 높은 위치를 기준으로 그림 3과 같이 발열원 중심점 3개 지점(IGBT1~IGBT3)과 스위칭 소자들 부근 8개 지점(P1~P8)으로 설정하였다.

3.2 단일케환배관을 가진 U자형 배관구조

냉각배관은 그림 4와 같이 냉각수가 3개의 발열점

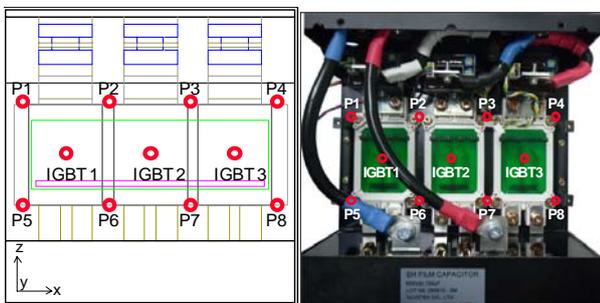


그림 3 온도측정점의 위치
Fig. 3 Temperature measuring points

부근을 흐를 수 있도록 배치하였다. 냉각수가 유입되는 배관은 유입구에서 발열점 IGBT1 방향으로 배치하고, 냉각수가 유출되는 배관은 발열점 IGBT3에서 유출구 방향으로 배치하였으며, 이 두 배관을 케환배관으로 연결하여 냉각수가 흐를 수 있는 경로를 확보하였다. 이러한 배치구조에서 발열점과 배관들 사이 수평간격과 수직간격에 따른 방열특성을 알아보기 위해 3개의 시험군으로 구분하였다.

발열원들을 기준으로 시험군 I은 케환배관의 수평위치, 시험군 II는 유입배관과 유출배관 사이 수평간격, 시험군 III은 각 배관들의 수직방향 간격을 변화시켜 방열온도를 측정하여 비교, 분석하였다.

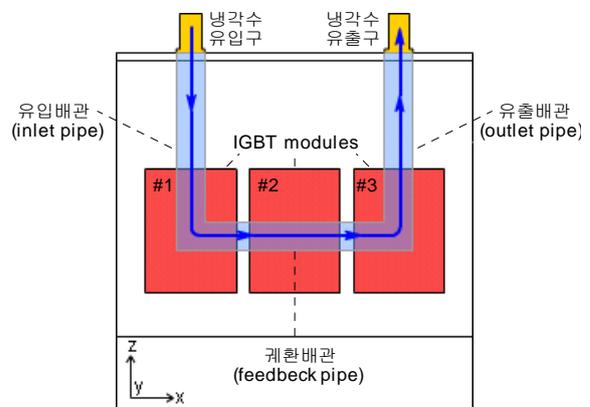


그림 4 배관 구조와 발열원
Fig. 4 Pipe structure of water channel and heat sources

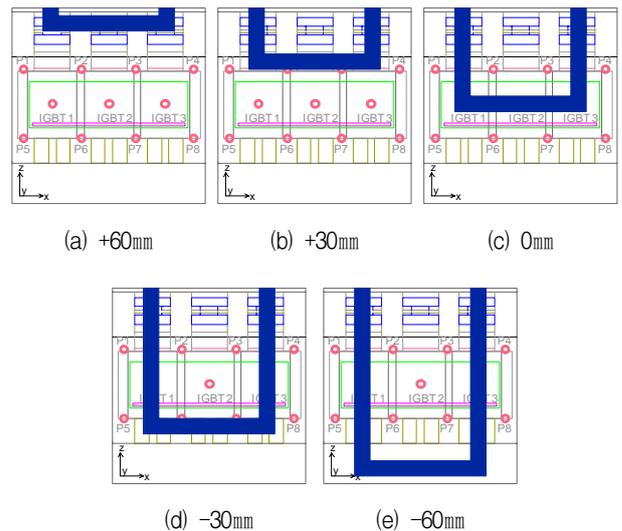


그림 5 케환배관의 배치변화(Z축 방향)
Fig. 5 Variation of feedback pipe placed(Z-axis)

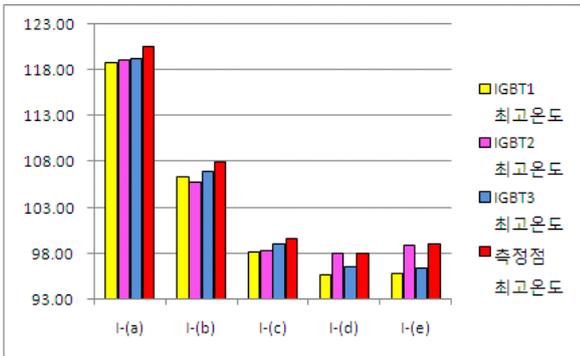


그림 6 시험군 I 방열 결과
Fig. 6 Results of heat-dissipating for group I

3.2.1 시험군 I -케 환배관의 위치변화

시험군 I 은 유입 및 유출배관을 발열점인 IGBT1과 IGBT3의 방향으로 고정배치하고 케 환배관을 그림 5와 같이 발열점 중심선에서 Z축 방향으로 (a)는 60mm, (b)는 30mm, (c)는 0mm, (d)는 -30mm, (e)는 -60mm씩 차이를 둔 5가지 경우로 선정하였다.

그림 6은 그림 5의 시험군 I 의 케 환배관 배치변화에 대하여 발열원 중심점인 IGBT1, IGBT2, IGBT3의 개별 최고온도와 그림 3에서 표시된 스위칭 소자 주변의 8개 측정점과 스위칭 소자 중심의 3개 측정점 중에서 최고값을 가지는 온도를 그래프와 수치로 나타내고 있다. 그래프에서 온도가 높을수록 방열특성이 좋지 못함을 의미한다.

시험군 I 에서 발열원과 접촉되는 유효배관이 가장 작고 케 환배관이 중심선에서 가장 멀리 배치된 (a)시험 방열특성이 가장 나쁘고, 발열원과 접촉되는 유효배관이 증가하고 케 환배관이 중심선에서 가까울수록 방열특성이 개선된다. (c)시험은 케 환배관이 발열점 중심을 지나가지만, (d)시험에 비해 접촉유효면적이 작기 때문에 방열특성이 (d)시험보다 약간 나쁘다. 따라서 케 환배관의 위치와 함께 유입배관과 유출배관의 접촉 유효면적에 커져야 방열특성이 좋아진다는 사실을 확인하였다.

3.2.2 시험군 II-유입/유출배관의 위치변화

시험군 II에서는 그림 7과 같이 케 환배관을 +Z축 30

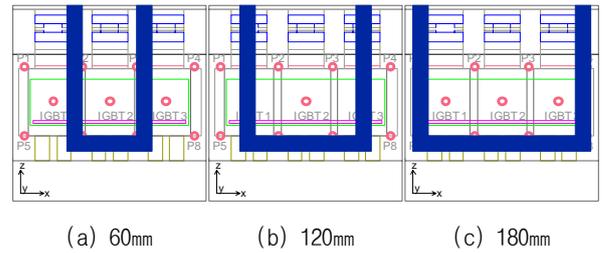


그림 7 유입/유출배관의 간격변화
Fig. 7 Variation of the gap between inlet and outlet pipes

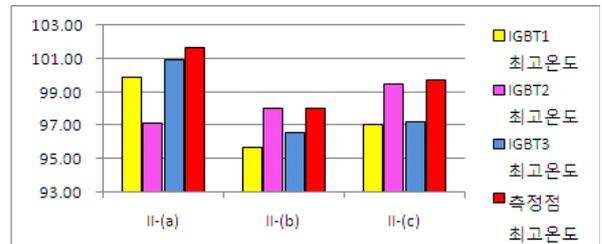


그림 8 시험군 II의 방열 결과
Fig. 8 Heat-dissipation results for group II

mm에 고정시키고 유입배관과 유출배관의 중심간 간격을 (a)는 60mm, (b)는 120mm, (c)는 180mm가 되도록 배치하고 방열특성을 확인하였다.

그림 8은 시험군 II의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로 유입배관과 유출배관이 발열원 중심을 지나는 (b)의 배치가 가장 우수한 방열특성을 가진다.

3.2.3 시험군 III - 발열원과 배관의 간격변화

시험군 III에서는 그림 9와 같이 인버터 단면에서 발열원인 IGBT 모듈이 직접 닿는 면에서 방열판내 수직 방향으로 배관을 13mm, 18mm 및 28mm 이격시켰을 때 방열특성을 확인하였다.

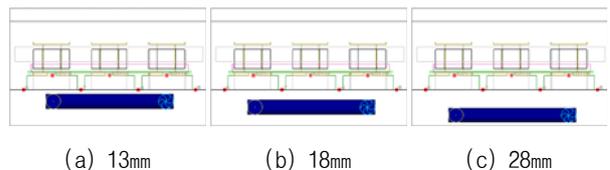


그림 9 배관의 수직위치 변화
Fig. 9 Y-axis position of pipe

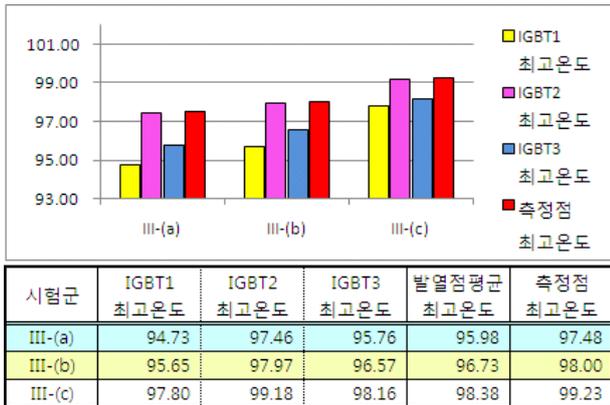


그림 10 시험군III 방열 결과
Fig. 10 Results of the heat-dissipating for groupIII

그림 10에서 나타난 바와 같이 발열원과 배관의 수직 간격이 가까울수록 발열특성이 우수함을 알 수 있다. 그러나 발열점과 배관이 가까우면 고압을 견디지 못해 배관이 터져버리는 문제가 있으므로 실제 제작은 (b)의 모델을 적용하였다.

3.3 2중 궤환배관을 가진 ‘ㄴ’자형 배관구조

다양한 시험군들 중에서 가장 우수한 방열구조를 가지는 시험군 I의 (d)구조를 기준으로 하여 그림 11과 같이 2중 궤환배관을 추가로 배치하고 방열특성을 확인하였다.

시험군IV는 기존 주 궤환배관을 기준으로 그림 12와 같이 Z축 방향으로 30mm, 60mm, 90mm 간격으로 2차 궤환배관을 배치하여 방열특성을 고찰하였다.

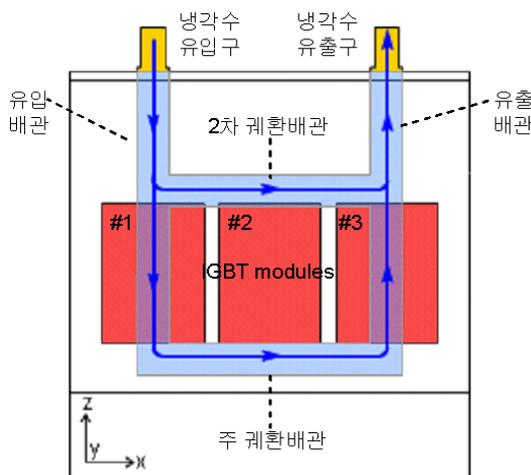


그림 11 2중 궤환배관을 가진 배관구조
Fig. 11 Pipe structure with double feedback pipe

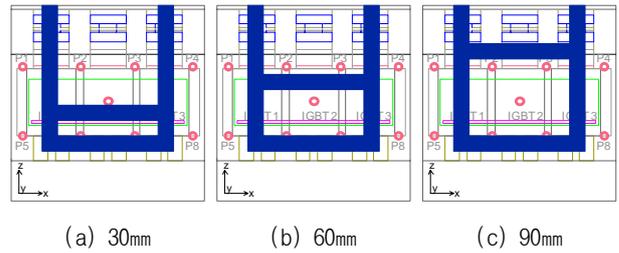


그림 12 2차 궤환배관의 위치 변화
Fig. 12 Position of secondary feedback pipe

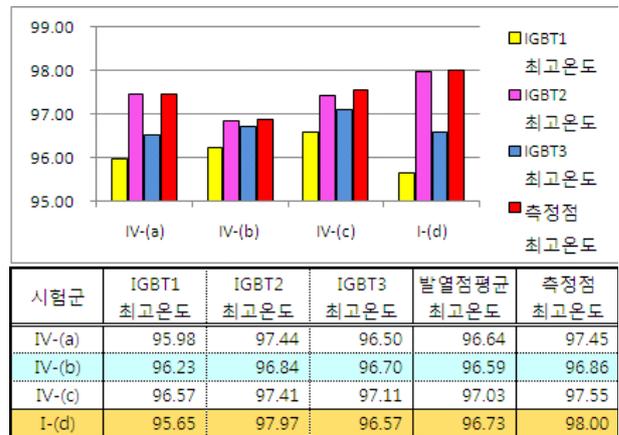
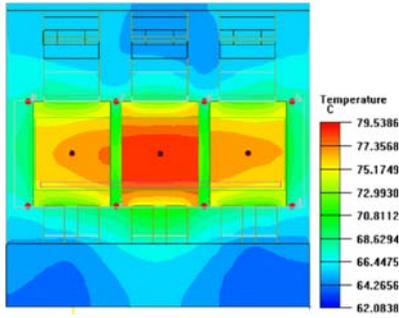


그림 13 시험군IV 방열 결과
Fig. 13 Results of the heat-dissipating for groupIV

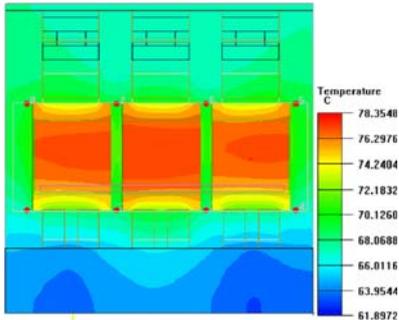
시뮬레이션 결과 시험군IV의 모든 구조가 시험군 I-(d)보다 온도가 낮아짐을 알 수 있고, 그 중에서 시험군IV-(b)의 방열특성이 가장 우수하다. 시험군 I-(d)의 발열점들 중에서 최고온도와 평균온도가 각각 98.0℃, 96.7℃로 온도편차가 크지만, 시험군IV-(b)는 96.8℃, 96.6℃로 온도편차가 작다. 즉 비교한 두 시험의 평균 온도는 거의 비슷하지만 측정점 중 최고 온도는 시험군 I-(d)가 높게 나타난다.

그림 14는 시험군 I-(d)와 시험군IV-(b)의 열분포에 대한 시뮬레이션 결과 화면을 나타내었다.

그림 14에서 나타난 바와 같이 단일 궤환배관을 가지는 (a)의 열분포에 비해 2중 궤환배관을 가지는 (b)의 열분포가 고르게 이루어지고, 가운데 발열점에서 (a)가 (b)에 비해 온도가 집중되어 높게 나타난다. 만약 가운데 발열점에서의 방열이 제대로 이루어지지 않으면 중앙에 배치된 스위칭 소자들에 온도가 집중될 수 있고, 이로 인해 소자가 손상될 우려가 있다. 스위칭 소자 중 하나 이상이 오동작을 일으킬 경우 인버터 시스템을 비롯하여 HEV 차량의 운행에 심각한 문제



(a) 단일 궤환배관



(b) 2중 궤환배관

그림 14 단일 궤환배관과 2중 궤환배관의 열분포
Fig. 14 Heat distribution for single and double feedback pipe

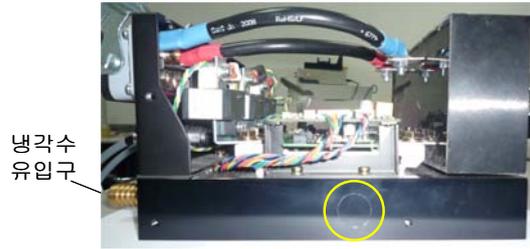
를 일으키게 된다.

따라서 2중 궤환배관을 가지는 경우가 단일 궤환배관을 가지는 경우 보다 균등한 방열특성을 가짐을 확인하였다.

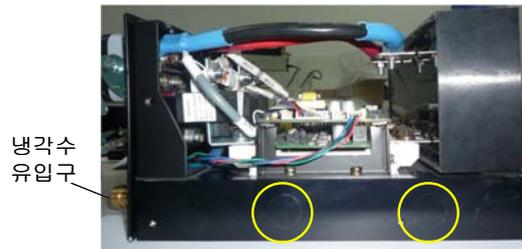
4. 냉각시스템 구현과 시험

시뮬레이션 해석에서 우수한 방열특성을 보인 시험군 I-(d)의 단일 궤환배관을 가진 U자형 배관구조와 시험군 IV-(b)의 2중 궤환배관을 가진 비자형 배관구조를 HEV용 인버터 냉각시스템에 적용하여 시작품을 제작하였다. 파이프형 수로 제작을 위한 공정은 다음과 같다.

- 1) 유입구와 유출구 지점에서 배관의 길이만큼 드릴 가공을 한다.
- 2) 유입배관과 유출배관이 연결되도록 측면에서 궤환배관 위치에 드릴 가공을 한다.
- 3) 측면 가공 시작점을 용접으로 막는다.
- 4) 유입구와 유출구에 파이프 이음매를 부착한다.



(a) 단일 궤환배관의 마감



2차 궤환배관 주 궤환배관

(b) 2중 궤환배관의 마감용접

그림 15 궤환배관의 마감

Fig. 15 Welding at feedback pipes

발열원으로 IGBT 스위칭 소자에 병렬로 부착된 환류 다이오드를 6개 모두가 직렬이 되도록 결선하고 그림 16과 같이 직류전류원으로 발열전력을 조절하였다. 전체 직류다이오드의 전압강하가 7.32V일 때 공급전류가 246A가 되도록 하여 1.8kW의 발열전력을 설정하였다. 냉각기(chiller)의 설정온도는 60°C, NTC의 포화 시 설정온도는 59.9°C로 설정하였고 'Labtech LLC-0702'를 통해 냉각수 순환, 유량제어, 온도제어를 하였다.

시뮬레이션과 동일한 지점에서 온도를 측정하도록 설정하였다. IGBT 모듈의 내부 온도를 측정하기 위해 그림 17과 같이 5V 전원으로 NTC의 전압값을 측정하고, NTC 특성에 의한 누적전압온도 환산표를 참고하여 온도값으로 환산하였다.

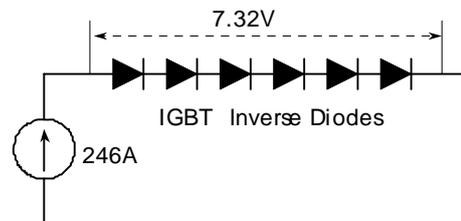


그림 16 발열회로구성

Fig. 16 Circuit for heat source driving

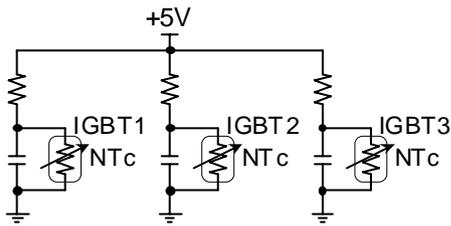
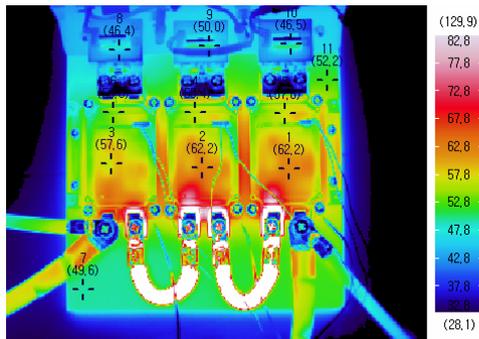
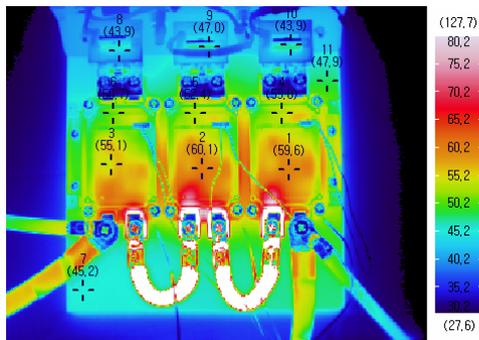


그림 17 IGBT 온도측정회로
Fig. 17 Temperature measuring circuit for IGBT



(a) 단일케환배관



(b) 2중 케환배관

그림 18 인버터의 열분포
Fig. 18 Temperature distribution of inverter

그림 18은 30kW HEV용 인버터 시작품의 케환배관의 배치와 구조에 따른 방열분포를 알아보기 위해 열화상 카메라로 측정하였다. 그림 18에 표시된 숫자는 측정점 온도를 나타낸다. 3개 발열점에서 온도가 (a)는 57.6℃, 62.2℃, 62.2℃ 이고, (b)는 55.1℃, 60.1℃, 59.6℃ 이다. 측정 중 순간적으로 상승하는 최고온도는 (a)는 82.8℃, (b)는 80.2℃ 가 된다. 앞서 시뮬레이션에서 살펴본 값과 다소 차이를 보이는 것은 냉각기(chiller)의 설정온도로 인한 강제냉각 때문이다. 그러

나 측정값의 패턴과 편차의 크기만 고려하면 비슷한 특성을 보인다. 따라서 실제 제작시험을 통해 제안된 2중 케환배관을 가진 수냉식 방열구조가 가장 우수한 효과를 가짐을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 HEV용 인버터의 방열을 위한 수냉식 방열 배관 구조를 제안하였다. 시뮬레이션을 통하여 단일 케환배관을 가진 'U'자형 구조에서 주 케환배관의 적절한 위치를 선정하고, 2차 케환배관의 배치를 조절하면서 방열의 특성을 고찰한 결과 시험군IV-(b)의 2중 케환배관을 가진 'b'자형 배관구조가 가장 낮은 온도와 균형적인 방열 기능을 가짐을 확인하였다.

30kW급 HEV용 인버터에 'U'자형 배관과 'b'자형 배관을 적용시킨 냉각시스템을 제작하고, 발열회로를 통해 가한 열에 대한 방열특성을 열화상 카메라로 측정한 결과, 시뮬레이션에서 살펴본 특성과 유사한 결과를 얻었다.

따라서 균형적인 방열과 특정부위 중 발생하는 최고온도가 가장 낮은 구조는 2중 케환배관을 가지는 'b'자형 배관구조임을 확인하였다.

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2009-(RAVERS-2 세부과제))

참 고 문 헌

[1] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics : Converters, Applications, and Design, John Wiley & Sons, pp. 3-6, 1989.
 [2] 김유한, 이현동, 유기호, "연료전지차용 100 kW 전기구동 시스템 냉각설계기술 개발", 전력전자학회 2008년도 하계학술대회 논문집, pp. 428-430, 2008. 6.
 [3] 이지명, 이재용, 박래관, 장서건, 최경수, "하이브리드 전기자동차 구동용 전력변환장치", 전력전자학회 논문지, 제13권, 제6호, pp. 420-429, 2008. 12.
 [4] U. Drofenik, G. L. Johan, and W. Kolarb, "Pump Characteristic Based Optimization of Direct Water Cooling System for 110-kW/500-kHz Vienna Rectifier", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 20, No. 3, pp. 704-714, 2005, May.

저 자 소 개

2004년~현재 총주대 정보제어공학과 조교수, 당 학회 JPE Publication Editor.



김경만(金京滿)

1971년 1월 11일생. 1996년 울산대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기전자정보시스템공학과 박사과정. 현재 울산과학대학 전기전자학부 겸임 조교수. 현재 (주)이지트로닉스 수석연구원.



우병국(禹炳國)

1970년 9월 17일생. 1996년 울산대 공대 전기공학과 졸업. 2008년~현재 총주대 정보제어공학과 석사과정. 1996년~2009년 (주)동아일렉콤 책임연구원. 현재 (주)이지트로닉스 수석연구원.



이용화(李容和)

1980년 8월 15일생. 2005년 한양대 전자전기컴퓨터공학과 졸업. 2005년~2009년 (주)동아일렉콤 연구원.



강찬호(姜燦鎬)

1959년 4월 13일생. 1986년 중앙대 전자공학과 졸업. 1996년 한양대 전기공학 졸업(석사). 2003년 SQUO대(일) 전력전자공학 졸업(공학). 1988년~1989년 LG정보통신(주) 연구원. 1989년~2008년 (주)동아일렉콤 연구소장. 2008년~현재 (주)이지트로닉스 대표이사.



전태원(全泰園)

1959년 1월 30일생. 1981년 부산대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1997년~1997년 Tennessee 대학 방문연구교수. 2005년 ~ 2006년 미국 Virginia Tech 방문연구교수. 현재 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수. 당 학회 부회장, 전력변환연구회 위원장.



조관열(趙官烈)

1964년 2월 20일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 한국과학기술원 전기전자공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학). 1993년~2004년 LG전자(주) DA연구소 책임연구원.