

전력반도체 냉각용 히트파이프의 성능안정성 파악을 위한 성능시험

姜 煥 國[†]

Performance Test for the Performance Reliability of the Heat Pipe for Cooling Power Semiconductors

Hwan-kook Kang

요 약

히트파이프를 이용하는 전력반도체 냉각용 히트파이프가 장기간 사용에도 안정된 작동을 이루도록 하기 위해서는 제조 과정에서 발생할 수 있는 산화막 존재 등 문제 요인의 제거와 함께 시험을 통한 확인이 필요하다. 본 연구에서는 전력반도체 냉각용 히트파이프가 요구하는 여러 기하학적, 열적조건에 의해 결정되는 열수송 한계 및 특성과 안정된 작동을 확인하기 위한 시험방법을 제시하고 시험을 통하여 확인된 결과를 정리하였다.

ABSTRACT

The heat pipe for cooling power semiconductor is required no performance changing during the life cycle up to 20 years. For the long reliable performance of the heat pipe, any reasons that has possibility to generate non-condensable gases are not allowed. In this research, the maximum heat transport rate and operation characteristics that are related to various geometric and thermal conditions are carried out. Also the test items, specifications and methods to guarantee the long life cycle of the heat pipe for power semiconductor cooling device are provided and the tests are performed.

Key Words : Heat pipe, Maximum heat transport rate, Thermal resistance, Heat pipe heat sink, Flooding

1. 서 론

전력전자기기의 고속화, 대용량화 추세와 함께 전력용 반도체소자 크기의 소형화에 의한 고집적에 의하여 반도체 소자의 발열량과 발열밀도도 급격히 증가하는 추세이다. 이에 따라 반도체가 적정 작동온도를 유지하도록 냉각하는 냉각기술은 시스템의 안정성과 신뢰성을 확보하도록 하는 중요한 기술로 인식되고 있다. 전력 반도체의 냉각수단으로는 그동안 알루미늄 방열

판이나 수냉각 장치들이 널리 사용되어 왔다. 그러나 발열량과 발열밀도의 증가에 따라 방열판의 경우에는 방열성능을 만족하기 어렵고 수냉각의 경우에는 시스템이 복잡하고 유지보수가 어렵기 때문에 히트파이프를 이용한 냉각장치에 대한 개발이 수행되어 적용되고 있으며 그 적용분야도 점차 증가하고 있다^[1]. 히트파이프 냉각기의 주요 적용 예로써 전기철도 분야의 경우, 그동안 일본에서 전량 수입하여 국내의 지하철 등 전기철도의 인버터/컨버터 등에 적용되어 왔으나 90년대 후반, 한국형 고속전철의 개발과 함께 히트파이프 냉각기에 대한 연구 개발을^[2,3] 통하여 국산화에 성공한 후 국내의 지하철과 전기 철도 차량에 적용 될 뿐 아니라 수입국이던 일본에 수출하고 있다.

[†]교신저자 : 정희원, (주)대흥기업 기술연구소 소장

E-mail : hkk@heatpipe.co.kr

접수일자 : 2003. 10. 1 1차 심사 : 2003. 11. 28

2차 심사 : 2003. 12. 17 심사완료 : 2004. 1. 10

히트파이프는 밀폐된 용기내의 작동유체가 포화 상태에서 비등과 응축을 이루며 열을 전달하는 장치로 양단의 작은 온도차에서도 대량의 열을 전달할 수 있기 때문에 히트파이프가 개발된 60년대 초기 항공, 우주용으로부터 오늘날 컴퓨터, 통신장비, 전력반도체 등의 전자장비 냉각과 폐열회수를 위한 열교환기의 열회수 장치 등에 매우 광범위하게 사용되고 있다. 히트파이프 냉각기는 이러한 히트파이프를 전열 소자로 사용하여 전력반도체에서 발생하는 열을 이송한 후 자연대류나 강제대류에 의하여 소산하는 장치이다. 이러한 히트파이프 냉각기가 전력반도체용 냉각장치로 적용되기 위해서는 냉각성능 뿐 아니라 전기철도 분야의 경우 진동, 전기절연, 저온기동, 열사이클, 소자 부착면의 평면도와 조도 등 엄격한 성능시험 규정을 만족해야 한다. 일반적으로 전기철도용 히트파이프 냉각장치의 성능시험 규정은 해당 업체에서 일본의 시험규정을 적용하여 시험을 수행하고 있다. 이러한 시험 규정은 히트파이프 냉각장치가 약 20년의 수명을 보장하기 위한 것으로 대부분 파손이나 변형과 같은 기계적 결함요소 및 열적 저항요소를 확인하기 위함이다.

한편 히트파이프 냉각장치가 정상적으로 냉각성능을 발휘하기 위해서는 핵심 전열소자인 히트파이프의 최대 열수송한계가 총 냉각부하 이상이어야 하며 수명기간 내에서 성능의 변화가 없어야 한다. 먼저 열수송한계는 개별 히트파이프가 전달할 수 있는 최대의 열부하 값으로써 냉각용량을 결정하는 냉각기 설계의 가장 기초적이며 중요한 요소이다. 한편 히트파이프의 장기간 작동수명과 관련된 주요인자는 히트파이프 용기의 기계적 파손 외에도 용기의 미세한 누설(leaking)과 용기 내부의 불응축성 가스의 존재나 지속적인 발생이다. 이러한 불응축성 가스는 히트파이프 수명에 치명적 결과를 초래하는 원인으로 확인되고 있다^[4]. 일반적으로 용기의 파손이나 누설이 원인인 경우에는 단기간 발생하기 때문에 원인 분석과 불량과약이 매우 용이하다. 그러나 용기 내부의 불응축성 가스의 발생은 그 원인이 다양하고 발생량에 대한 예측이 매우 어렵기 때문에 장기간 사용할 경우 성능변화와 수명을 예측하기가 대단히 어렵다. 불응축성 가스의 발생이 문제가 되는 이유는 불응축성 가스가 응축부에서 일정공간을 점유함으로써 응축부의 유효 작동구간을 감소시키기 때문이다. 가스의 발생이 장기간에 걸쳐 지속적으로 발생하여 냉각성능이 점차적으로 저하되기 때문에 장기간 방치될 경우 반도체 소자 냉각에 치명적 결과를 초래한다. 이러한 히트파이프 내부의 불응축성

가스의 발생 원인에 대해 많은 연구가 수행되었으나 수명의 정량적 예측방법은 현재까지 알려지지 않고 있다. 다만 여러 가지 시험을 통하여 장기간 사용에 따른 수명을 파악하는 정도에 머물고 있다^[4]. 그런데 전문적인 바와 같이 히트파이프 냉각기의 경우에는 성능확인을 위한 엄격한 시험 규정이 알려져 있으나 냉각기의 핵심 구성요소인 히트파이프에 관해서는 그동안 그 시험방법과 규정이 알려져 있지 않아 신뢰성을 확보하는데 어려움이 많은 어려움이 있다.

본 논문에서는 일본의 철도차량에 적용하기 위하여 제시된 전력반도체용 히트파이프의 성능시험 항목을 중심으로 여러 시험방법과 기준을 제시하고 이를 확인하기 위하여 수행된 실험적 결과를 정리하였다.

2. 반도체 냉각용 히트파이프의 구조와 성능조건

2.1 히트파이프 냉각기의 구성과 히트파이프

그림 1은 한국형 고속전철의 속도제어용 전력반도체 IGCT를 냉각하기 위해 국내에서 개발된 강제대류형 히트파이프 히트싱크의 구조(a)와 전력반도체를 냉각하기 위해 조립된 상태(b)를 보여준다. 히트파이프 히트싱크는 열수송체인 히트파이프와 반도체 소자를 설치할 블록, 이송된 열을 공기중으로 소산할 핀으로 구성되며 GTO, IGCT와 같이 전기적으로 절연이 필요한 경우는 그림에서 보는 것과 같이 블록과 핀 사이를 전기적으로 절연한다. 통상 세라믹 관을 증발부와 응축

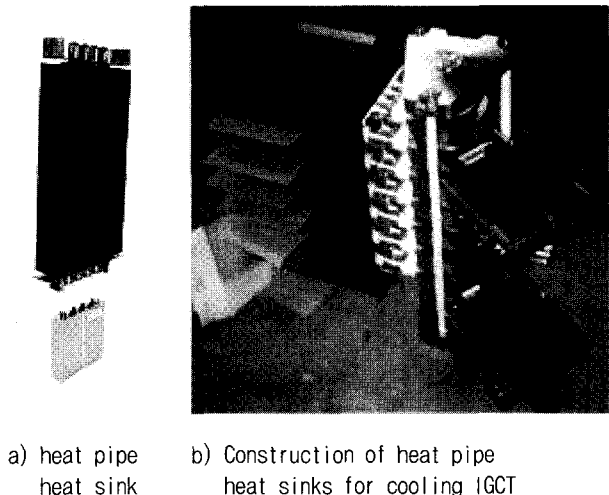


그림 1 고속전철 IGCT냉각용 히트파이프 냉각기
Fig. 1 Heat pipe heat sink device for cooling IGCT in the high speed railway system

부 양단에 용접하여 사용하며 전기적 용량에 따라 세라믹 관의 길이와 표면구조가 결정된다. 히트파이프 히트싱크와 소자를 결합할 때에는 그림 b)에서 보는 것과 같이 다수의 반도체 소자의 양면에 각각 히트파이프 히트싱크를 설치하고 반도체 표면과 냉각기 표면의 열접촉저항을 줄이기 위해 기계적으로 하중을 가하여 조립한다. 따라서 히트파이프 히트싱크 블록의 표면은 적절한 평면도와 조도를 유지해야 하며 하중에 의하여 표면의 변형이 발생하지 않아야 한다. 한편 반도체 소자가 절연되어 있는 경우에는 전기 절연을 위한 세라믹관을 요구하지 않는다. 그리고 반도체 소자의 조립과 히트파이프의 작동상태를 고려하여 히트파이프 단열부를 80°이상의 각으로 굽혀서 사용하거나 U형 또는 V형 구조로 굽혀 사용하기도 하는 등 그 구조는 적용환경에 따라 매우 다양하다. 히트파이프 용기를 굽히는 경우, 곡관부에서의 압력강하 등의 원인에 의해 열전달 계수와 열수송 한계 등 작동특성이 직관형 히트파이프와는 다를 수 있으며 이러한 열전달 특성에 대해서는 그동안 연구가 수행되었다^[5]. 한편 굽힘 구조의 히트파이프는 곡관부에서 내부 단면의 구조가 변형이나 주름이 발생하지 않아야 하며 높은 온도에서 작동하여 높은 압력이 작용하여도 파손되지 않도록 두께의 지나친 감소나 크랙 등 응력 집중의 원인 및 세척불량에 의한 불응축성 가스의 발생원인이 없어야 한다. 그림 2는 앞에서 설명한 여러 가지 형태의 히트파이프를 보여준다. 그림의 위쪽은 세라믹관이 설치된 직관형, 가운데는 U형, 아래는 곡관형 히트파이프를 보여준다.

2.2 전력반도체용 히트파이프의 요구조건

2.2.1 히트파이프의 최대 열수송 한계

히트파이프는 밀폐용기안의 작동유체가 포화상태를 유지하며 상변화에 의하여 열을 전달할 때 액체상태와 증기 상태의 작동유체가 이송하는 과정에서 작동유체가 유동할 수 있는 최대 질량유동율의 제한으로 인하여 하나의 히트파이프가 전달하는 최대의 열부하가 존재한다. 따라서 히트파이프 냉각기를 설계할 때에는 하나의 히트파이프가 전달할 수 있는 최대 열부하를 고려하여 냉각기에 적용될 히트파이프의 수를 결정한다. 예로써 1000W의 열부하를 냉각하는 냉각기에서 히트파이프 하나의 최대 수송열부하가 300W라면 안전율을 고려할 때 최소한 4개의 히트파이프가 요구된다. 이러한 최대 수송열부하는 작동유체, 용기의 형상, 작동온

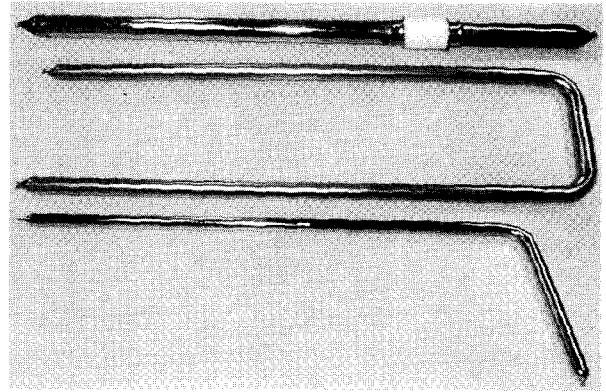


그림 2 여러 가지 형태의 히트파이프

Fig. 2 Various shape of heat pipes for cooling power semiconductor

도, 설치구조 등에 따라 결정되기 때문에 매우 복잡한 상관관계의 해석이 요구된다. 그동안의 많은 연구로부터 열수송 한계의 메커니즘과 예측을 위한 다양한 형태의 상관식이 제시되고 있다^[6]. 일반적으로 히트파이프의 열수송 한계는 발생 메커니즘에 따라 모세관, 비등, 음속, 비산한계로 구분되며^[7] 각 메커니즘에 대한 한계 열유속을 예측하기 위한 해석적 모델이 많은 연구자들에 의하여 정립되었다. 본 연구의 대상과 같이 중력장의 도움을 받는 히트파이프의 지배적 작동 메커니즘은 열사이폰형 히트파이프로 구분할 수 있다. 이러한 열사이폰형 히트파이프는 모세관 구조물(wick)이 설치된 히트파이프와는 다른 액막유동, 증기유동, 증기 발생 메커니즘을 가지며 이에 따라 이송할 수 있는 한계 열전달율의 메커니즘도 상이하다. 여러 연구자들에 의하여 알려진 열사이폰형 히트파이프의 열수송 한계의 발생 메커니즘은 건조, 비등 및 플러딩으로 구분되며^[8] 아래에 간략히 정리 하였다.

건조 한계(dry-out limitation)는 작동유체의 충전율이 증발부 체적의 10~20% 이하로 작고 비교적 큰 열유속일 때 증발부의 열부하 증가에 따라 증기 발생율이 하향 응축액막(condensate film) 유동율보다 커지면 증발부 하단 벽면이 건조(dry out)됨에 따라 발생한다.

비등 한계(boiling limitation)는 높은 충전율에서 벽면에서의 원주방향 열유속이 매우 큰 조건에서 발생한다. 증발부에서 액체는 풀을 형성하고 가열 벽면에서 핵비등이 진행된다. 이 때 열유속 값이 임계 열유속에 접근하면 벽면에서 기포가 이탈하지 못하고 큰 기포를 형성하게 되어 벽면은 액체에 의해 다시 적셔지지 않기 때문에 건조로 발전하게 된다.

증발부에서 상승하는 증기와 하강하는 액막 사이에는 전단력이 발생한다. 열부하 증가에 따른 전단력이 증가하면 기-액 계면을 따라 파동이 이동하는 파동 액막흐름이 발생되며, 액막 파동의 불안정으로 액적이 비산하여 증기의 흐름과 함께 응축부로 이송된다. 열부하를 더욱 증가시키면 전단력도 증가하고 전단력이 가장 큰 증발부 상단이나 단열부 영역에서 하강 응축액막이 증기 흐름과 함께 상승하게 된다. 이러한 현상에 의해 증발부 벽면에 국부적인 부분 건조(dry patch)를 유발하여 결국에는 증발부 벽에서 완전한 건조(dry-out)가 발생되며 이러한 현상을 플러딩 한계(flooding limitation)라 한다. 플러딩 한계는 증발부에 대한 충진율이 20%이상인 경우에 가장 일반적으로 열수송 한계를 지배하는 것으로 알려져 있으며 잘 알려진 몇가지 상관식은 아래와 같다.

Wallis^[9]는 액막이 하강 유동하는 수직파이프에 가스를 주입하여 플러딩 발생조건에 대하여 실험한 후 다음의 상관식을 제시하였다.

$$q_L = \frac{C^2 d h_{fg} [g d \rho_v (\rho_l - \rho_v)]^{1/2}}{4 l_e \left[1 + \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{1/4} \right]^2} \quad (1)$$

여기서 C=0.725

Imura 등^[10]은 밀폐형 2상 열사이폰의 한계 열유속에 대한 실험적 결과와 제한된 채널에서의 한계 열유속에 대한 차원해석 결과를 기초로 한 무차원 해석결과로부터 다음의 상관식을 제시하였다.

$$q_L = 0.16 \frac{d}{l_e} h_{fg} [\sigma g \rho_v^2 (\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.13} \quad (2)$$

2.2.2 히트파이프의 수명안정성

철도차량 등의 전력반도체용 히트파이프는 진동, 온도, 습도 등 열악한 환경에서 20년 이상 성능의 변화가 나타나지 않을 것이 요구된다. 수명의 경우, 장시간의 사용에도 수명안정성 및 일정상능을 보장하기 위한 제조과정에 대한 세심한 고려가 필요함은 물론이고 제조기술을 포함한 개발 단계에서 이에 대한 충분한 시험이 수행되어야 한다. 일반적으로 알려진 히트파이프의 수명과 관련되어 있는 인자는 용기의 기계적 결합, 작동유체와 용기의 부적합, 용기내부의 불응축성 가스의 발생 등이다. 용기의 기계적 결합은 용기 벽두께나

특히 용접부에서의 누설에 의한 것으로 내압시험으로 용이하게 파악될 수 있으며 제조 후 간단한 시험으로도 파악이 가능하다. 용기와 작동유체의 적합성(compatibility)은 용기와 작동유체의 화학적 안정성에 관련된 인자로서 수많은 작동유체와 용기와의 실험 자료가 제시되어 있다^[4]. 한편 불응축성 가스는 용기 내벽의 미세 공동(cavity)내의 불응축 가스의 이탈 및 미세척된 이물질과 산화막 등이 작동유체와의 화학적 반응 등에 의하여 발생하거나 작동 유체 내에 용해되어 있던 불응축성 가스가 이탈되어 발생하기도 한다. 이러한 불응축성 가스의 발생은 상온 정도의 낮은 온도이거나 열전달을 하지 않는 경우에는 문제가 발생되지 않지만 상대적으로 고온이나 비등과 응축이 발생하는 경우에는 활성화되어 벽이나 작동유체에서 이탈하게 된다. 또한 그 발생량도 용기의 세척과 작동유체의 탈기작업 방법과 정도에 의하여 결정되며 비교적 발생량이 미소하기 때문에 단기간의 시험으로는 발생량을 예측하기 어렵다. 일반적으로 히트파이프의 수명을 예측하는 방법으로 불응축성 기체의 생성과 관련하여 히트파이프의 수명을 예측하는 Arrhenius 모델을 적용하고 있다^[4]. 이 방법은 항상 확정된 기간동안에 얻은 가속 성능 데이터를 이용하여 외삽법(extrapolation)으로 그 이후의 결과를 예측하기 때문에 불확실성이 존재한다. Arrhenius 모델에서 먼저 반응인자 F(response parameter)를 다음 식으로 구한다.

$$F = C e^{-A/kt} \quad (3)$$

위 관계식을 이용하여 불응축성 기체의 생성율은 다음 식으로 구한다.

$$\dot{m}(t, T) = f(t)F(T) \quad (4)$$

여기서 $f(t)$ 는 시간의 함수로 실험 데이터로부터 구한다. 이러한 상관식을 얻기 위해서는 장기간의 실험 데이터가 요구된다. 그동안 히트파이프의 작동 특성과 성능에 관한 많은 연구가 수행되었으나 국내에서 장기간 안정적 작동을 확인하기 위한 시험방법과 규정에 대한 연구는 부족하였다. 따라서 철도차량으로 사용될 히트파이프에 대한 자료도 전무한 것으로 파악되며 다만 히트파이프 냉각기를 사용하는 업체에서 히트파이프 냉각기를 대상으로 진동, 충격, 저온기동, 조도 및 평면도 등 적용환경에 대한 시험 정도를 수행하고 있으며 히트파이프의 개별적 성능시험에 대한 방법과

표 2 히트파이프 성능시험 항목과 기준

Table 2 Test items and specifications for the heat pipe performance

시험 항목	기준
최대 열부하 시험	개별 히트파이프 최대 요구 열수송량 이상
장기 수명안정성 확보를 위한 가속 고온 방치 시험.	120℃에서 1000시간 방치 후 단열부와 응축부 끝단 온도차가 2K 미만
온도 사이클 시험.	-20 ~ 120℃에서 100사이클 후 단열부와 응축부 끝단 온도차가 2K 미만
곡면부 단면 조사(곡관부가 있는 경우)	웍이나 벽의 심한 변형이나 크랙 등이 존재하지 않을 것
내전압, 절연저항(전기 절연형 히트파이프)	5400V(AC, 1분간), 2,000MΩ
내압, 기밀시험	784 kPa에서 10분간 가압 후 이상 없을 것 10 ⁻⁹ torr에서 헬륨 누설량 1×10 ¹⁰ Pa·m ³ /s 이하
내부 산화막 및 마감부 산화막 존재 여부 검사	관 내부나 마감부 접합부에 이물질이나 산화막이 존재하지 않을 것

기준은 확립되어 있지 않다. 표 2에는 그동안 일본의 전기절도차량사로부터 요구된 사양을 중심으로 전력반도체 냉각기에 적용되는 히트파이프가 장기간의 안정적 작동성을 확보하기 위한 목적으로 수행해야 할 항목과 기준을 정리하였다. 이러한 전력반도체 냉각기용 히트파이프가 요구하는 사항에 대한 시험을 수행하기 위해 본 연구에서는 직관과 곡관형 히트파이프를 대상으로 각 항목에 적합하도록 시험 장치를 구성하였다. 그리고 한 항목당 시험결과에 신뢰성이 확보되도록 10개의 시편을 제작하고 시험을 수행하고 그 결과를 정리하였다.

3. 히트파이프 시험항목별 시험방법과 결과

본 장에서는 냉각기용으로 적용할 히트파이프를 대상으로 2장에서 서술한 각 항목별로 시험한 결과를 정리하였다. 현재 국내 전력반도체 냉각기용 히트파이프의 작동유체로는 FC-72와 물이 주로 사용되며 용기의 경우에는 동관이 사용된다. 본 연구에서도 두 가지 작동유체를 대상으로 시험을 수행하였다.

3.1 최대 열부하 시험

최대 열부하 시험은 하나의 히트파이프가 작동할 때 여러 가지 원인에 의하여 수송할 수 있는 최대의 열전달을 예측하기 위한 목적으로 수행되며 냉각기 설계에서 총 수송 열부하를 고려하여 히트파이프의 수량을 결정하는 가장 중요한 항목이다. 사용된 작동유체는 FC-72와 물로써 FC-72의 경우는 물의 어는점 이하에

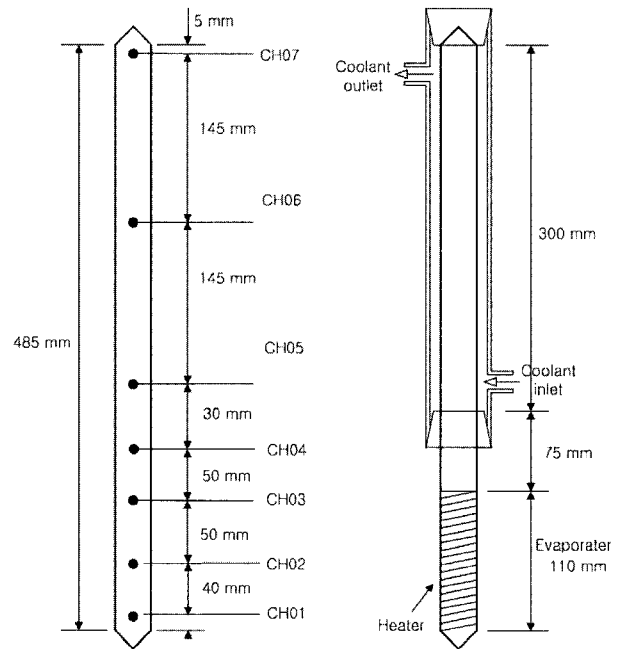


그림 3 열전대 위치 및 실험장치 구성
Fig. 3 Position of thermocouples and test set up

서도 작동이 가능하고 전기적 절연성과 비가연성, 환경친화적인 작동유체로 전력반도체용 히트파이프 냉각기로 많이 사용되며, 물은 높은 잠열과 큰 표면장력 등 우수한 열적성질로 가장 널리 사용되는 작동유체이나 어는점이 적용환경보다 높아 제약이 따르는 물질이다. 시험용 히트파이프는 FC-72의 경우에는 외경 19.05mm, 물의 경우에는 12.7mm인 내부 그루브형 동관을 사용하여 제작한 직관형과 곡관형으로 각 10개, 총 40개가 사용되었다. 작동유체에 따라 직경이 다른

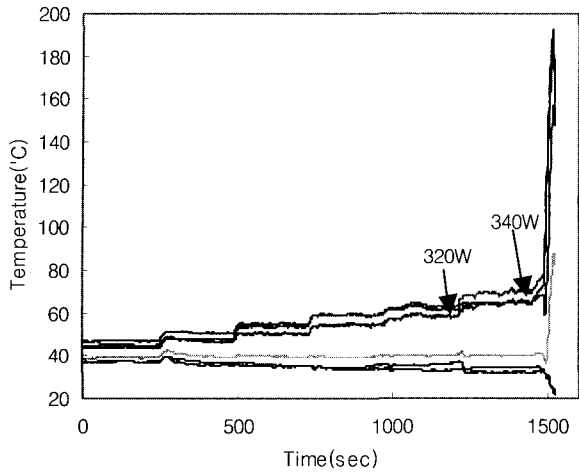
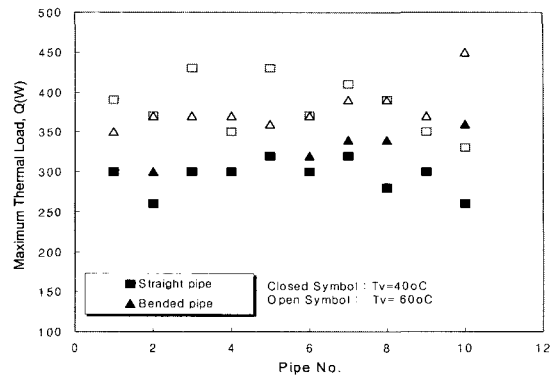


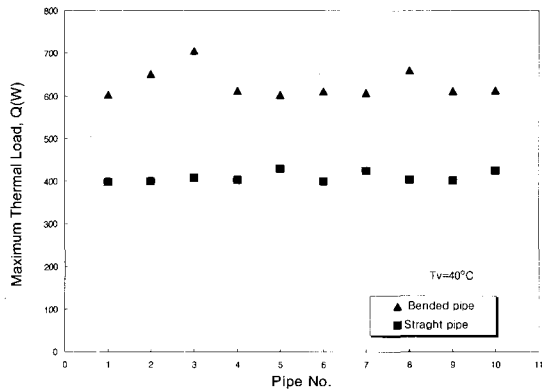
그림 4 열전달을 증가에 따른 벽면온도분포
Fig. 4 Wall temperature variation with time as increase heat flow rate

이유는 동일 직경에서도 FC-72의 최대 수송열부하가 낮기 때문에 유사한 히트파이프당의 최대 수송열부하가 이루어지도록 하기 위함이다. 곡관형은 증발부와 단열부 사이를 약 90~93도 굽혀 만든 구조로 자연대류형 냉각기에 흔히 사용되는 구조이다. 충전율은 증발부 체적에 대해 물의 경우에는 일반적으로 추천되는 25%, 그리고 FC-72의 경우에는 50%가 충전되어 있다. FC-72의 경우 충전율이 높은 이유는 관련 문헌^[12]에 의하면 40%이하의 충전율에서는 비교적 낮은 열부하에서도 건조한계가 나타날 수 있기 때문이다.

그림 3은 실험장치의 개요를 보여준다. 증발부에는 전기 저항선을 설치하여 열부하를 공급하고 응축부에는 물자켓(water jacket)을 설치한 후 냉각수를 유동시켜 이송된 열을 제거하였다. 히트파이프의 벽에는 그림과 같은 위치에 열전대를 부착하여 벽면의 온도를 측정하도록 하였다. 한편 경사각은 실제의 적용환경을 고려하여 직관형 히트파이프의 경우에는 수평면으로부터 7°, 곡관의 경우에는 증발부가 수직하도록 설치하였다. 실험 방법은 아래와 같다. 먼저 열부하를 공급한 상태에서 응축부에 냉각수를 유동시키며 일정시간이 경과하여 각부의 모든 온도가 일정한 정상상태에 도달하면 온도를 기록하고 동일한 방법으로 열부하를 단계적으로 증가시켰다. 이 때 열수송 한계는 증기온도의 함수이므로 단열부의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 냉각수의 온도와 유량을 제어하였다. 증기온도는 20, 40, 60°C에서 실험을 수행하였다. 일정 증기온도에서 열부하를 단계적으로 증가시킴에 따라 증발부와 응축부의



a) FC-72



b) Water

그림 5 최대 열수송 한계
Fig. 5 Maximum heat transport rate

온도차는 서서히 증가하며 임의의 열부하에 도달하면 그림 4와 같이 증발부 일부 온도가 급격히 증가하여 과열도가 급증하는 열부하가 발생하게 되며 이때의 이송 열부하가 최대 수송 열부하이다

그림 5는 증기온도에 대한 각 10개의 열수송 한계를 나타낸 결과이다. 그림에서 각 히트파이프 당 열수송 한계의 편차가 다소 존재하지만 19.05mm 외경의 FC-72 히트파이프의 경우, 증기온도 40°C에서는 약 300W를 최대 열수송 한계로 파악할 수 있으며 안정성을 고려할 때 개당 열부하의 크기를 결정하는 자료로 사용할 수 있다. 관련연구에 의하면 FC-72의 경우에는 낮은 증발잠열과 표면장력에 의하여 플리딩이 열수송 한계를 지배하는 것으로 알려져 있다^[11]. 그림에서 곡관의 경우가 다소 낮은 한계 열부하 값을 보이며 이러한 원인은 곡관부에서의 유동변화에 의한 손실로 파악되며 유사한 결과를 관련 연구^[5]에서 확인할 수 있

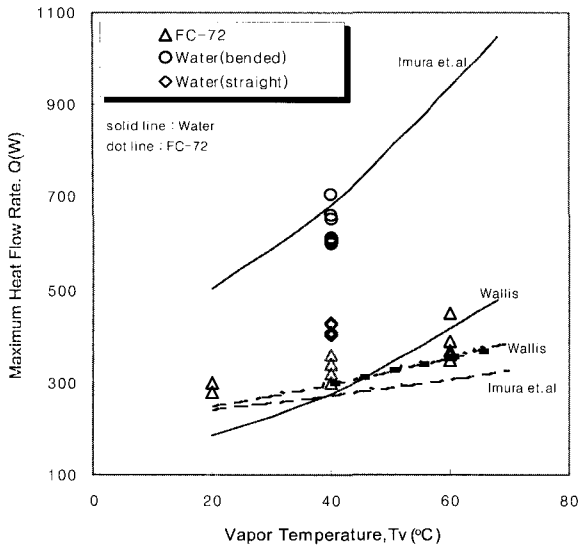


그림 6 실험값과 상관식의 비교
 Fig. 6 Comparison between experimental data and correlations

다. 플러딩 한계의 경우, 증기온도 증가에 의한 작동유체의 물성값 변화에 의하여 증기온도가 높을수록 한계 열부하는 증가하며 실험결과에서도 60°C인 경우가 40°C인 경우에 비하여 약 100W 높은 열부하에서 열수송 한계가 나타나고 있다. 한편 증기온도 40°C인 물 히트파이프의 실험 결과, 직관의 경우 12.7mm 외경에서 약 400W의 최대 한계 열부하를 나타내며 FC-72와는 다르게 곡관의 경우는 열수송 한계가 1.5~1.7배 높은 값을 보이고 있다. 이러한 원인은 곡관의 경우에는 응축부가 수평면으로부터 7도 경사되어 있지만 증발부는 수직으로 설치되어 있어 직관과는 열수송 한계가 발생하는 메커니즘이 서로 다르기 때문으로 파악된다. 이러한 열수송 한계를 예측하는 많은 상관식이 제시되고 있으며 본 연구에서는 상관성이 우수한 것으로 알려진 Imura 등과 Wallis 모델을 증기온도에 대하여 그림 6에 도시하고 실험결과와 비교하였다. 이 두가지 모델은 플러딩에 기초한 상관식으로써 그림 6에서 FC-72의 경우에는 Wallis 모델이, 물을 작동유체로 하는 곡관형의 경우에는 Imura등의 모델이 경향과 값에서 보다 실험값에 접근함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 히트파이프의 지름과 길이 등 형상이 변화하는 경우에 한계 열부하를 예측하는데 이들 상관식을 적용할 수 있다. 관련 연구에 의하면 물과 에탄올등의 작동유체에 대해서는 Imura등의 상관식이 잘 일치하는

것으로 알려져 있으며 FC-72의 경우에는 Wallis 상관식의 적용성이 우수한 것으로 알려져 있다^[11,12]. 한편 직관형 물 히트파이프의 경우에는 이들 상관식 외로 드라이 아웃 등 여러 상관식을 검토하였으나 상관성이 낮았으며 발생 메커니즘을 설명하기 어려웠다. 따라서 이에 대한 보다 깊은 연구가 요구된다.

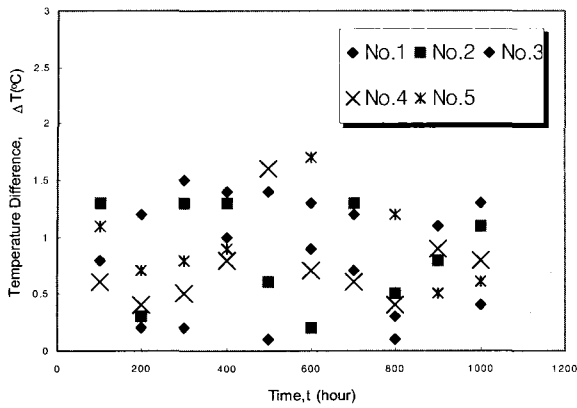
3.2 히트파이프의 안정성 시험

3.2.1 고온 방치시험

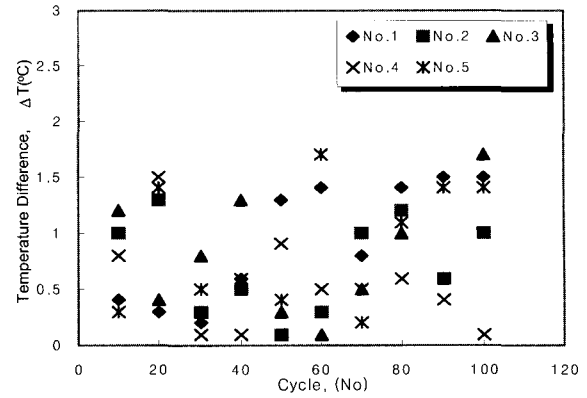
고온 방치 시험은 히트파이프를 장기간 사용할 때 여러 원인에 의한 불응축성 가스의 발생여부를 확인하고자 할 때 고온 환경에서 가속하여 시험하는 방법이다. 본 연구에서는 이를 위해 에틸렌글리콜을 수용하는 항온조를 제작하고 히트파이프를 수평으로 설치하였다. 그리고 항온조 내부에는 전기 히터를 설치하고 120°C의 온도를 일정하게 유지하도록 하였다. 시험은 매 100시간 경과 후 약 90°C의 물이 담겨 있는 수조에 증발부를 수직으로 설치하고 정상상태에 도달하였을 때 응축부 끝단과 중앙부의 온도차를 측정하였으며 10회 총 1000시간에 걸쳐 시험을 수행하였다. 일반적으로 불응축성 가스가 발생하면 응축부에 모여 증기의 이동을 차단하기 때문에 응축부 끝단의 온도는 중앙부와 온도차가 크게 나타나게 된다. FC-72를 대상으로 실험한 결과를 그림 7-a)에, 그리고 물 히트파이프의 실험 결과를 그림 7-b)에 도시하였다. 총 10개의 히트파이프를 대상으로 시험을 수행하였으나 그림에는 5개의 시험 결과만을 도시하였다. 그림에서 응축부 끝단의 온도와 중앙부와의 온도차는 FC-72와 물 모두 2°C 미만으로 매우 미소함을 확인할 수 있다. 한편 구리-물의 조합에 대해서는 많은 연구결과에서 안정성이 확인되었다^[4]. 그리고 구리와 FC-72의 조합에 대해서는 최근의 연구결과에서 안정성이 확인되어 그 결과가 발표되고 있으며^[11,13] 가스 발생량이 미소하여 두가지 조합 모두 현재까지 식 (3)의 상관함수 관계를 얻지 못하고 있다.

3.2.2 온도사이클 시험

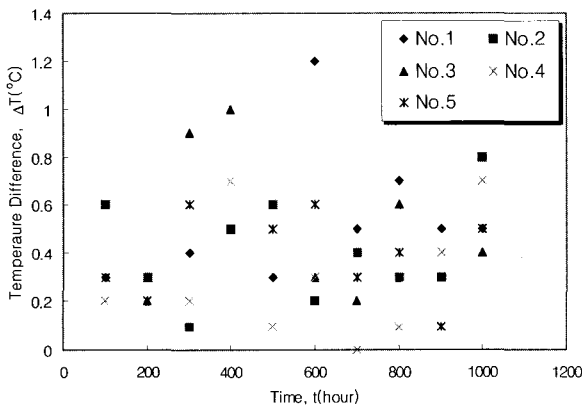
온도사이클 시험은 120°C와 -20°C의 온도 변화를 반복하여 적용함으로써 온도변화에 의한 용기의 변형과 성능의 변화를 파악하는 시험으로 본 연구에서는 FC-72와 물 히트파이프 각 10개를 항온 항습기 내부의 밀폐된 공간에 수평으로 히트파이프를 설치하였다. 먼저 상온으로부터 열을 가하여 히트파이프 벽의 온도가 120°C에 도달하면 20분을 유지한 후 -20°C까지 냉



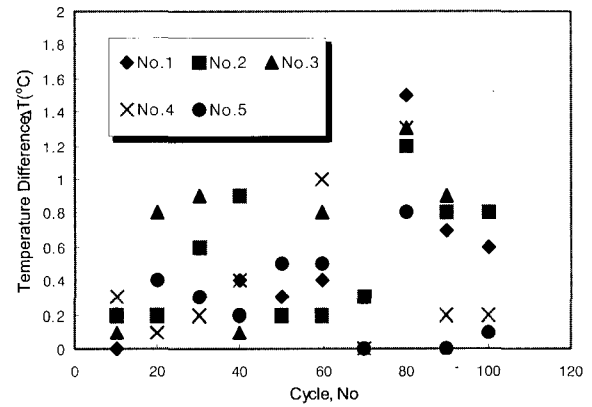
a) FC-72



a) FC-72



b) Water



b) Water

그림 7 고온방치 시험결과

Fig. 7 Results of the long duration test in high temperature

그림 8 온도사이클 시험결과

Fig. 8 Results of the temperature cycle test

각하고 이 상태에서 20분을 유지한 후 다시 가열하는 방법으로 총 100회에 걸쳐 수행하였다. 사이클당 약 3시간이 소요되었으며 매 10회마다 고온 방치시험과 동일하게 90°C의 항온조에 증발부를 담근 후 응축부 끝단과 중앙부의 온도차를 계측함으로써 불응축성 가스의 발생 여부를 파악 하였다. 성능 판단기준은 고온방치 시험과 동일하며 5개의 시험 결과만을 그림 8에 도 시하였다. 그림에서 전 시험기간 동안 2°C미만의 온도차를 유지하고 있으며 온도차의 증가와 같은 불안정한 현상은 나타나지 않은 것을 확인할 수 있다. 한편 3.2.1절과 3.2.2절의 결과에서 시험회수에 따라 온도차는 경향성을 나타내지는 않으며, 다만 값이 산포하는 이유는 계측 오차에 의한 것으로 보인다.

3.2.3 곡면부 단면 및 마감부 산화막 존재 여부 검사

곡면부 단면의 변화는 작동유체의 유동저항을 발생 시켜 열적 성능을 저하시킬 수 있으며 특히 단면과 마감부 산화막의 존재는 장기적으로 불응축성 가스의 발생원인이 될 수 있기 때문에 철저한 세척이 요구되는 부분이다. 따라서 곡관부 및 마감부의 단면을 조사하여 수명저하의 발생원인을 차단하도록 하고 있다. 그림 9는 곡관부의 단면을 확대 촬영한 결과이다. 이 단면부에서 두께의 변화와 크랙, 찌그러짐 등의 여부에 대한 확인이 필요하며 사진의 단면부에서는 두께의 변화가 매우 미소한 결과를 보여준다. 이 외로 히트파이프의 길이방향으로 내부 단면의 세척상태에 대한 확인이 요구되며 그 결과는 나타내지 않았다.

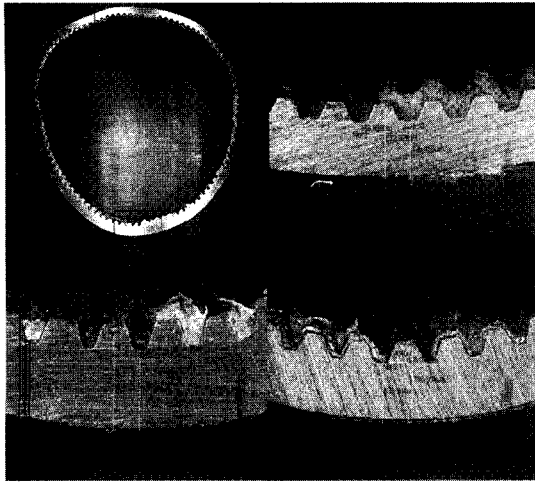
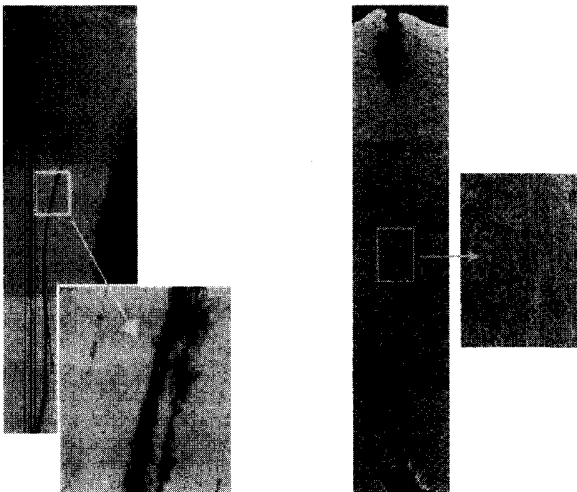


그림 9 곡관부의 단면사진
Fig. 9 cross-sectional view of the bending part



a) remaining oxidization film b) no oxidization film

그림 10 주입관 단면의 확대 사진
Fig. 10 Enlarged cross-section of the fill tube

그림 10은 작동유체를 주입 후 밀폐하는 주입관의 단면을 확대 촬영한 결과이다. 그림 10-a)의 경우에는 주입관이 충분히 세척이 이루어지지 않아 산화막이 존재하는 경우로 장기 작동에서 수명에 치명적인 영향을 미치는 불량 원인이 되는 경우이다. 한편 그림 10-b)의 경우는 산화막이 존재하지 않아 세척이 정상적으로 이루어져 있음을 확인할 수 있다.

이 외로 전기 절연형 히트파이프에서 요구되는 내전압 시험이나 기밀시험 등에 대해서는 시험방법과 결과가 단순하고 정량적인 도시가 어려워 본 논문에는 제시하지 않았다.

6. 결론

히트파이프를 이용하여 철도차량용 전력반도체를 냉각하기 위해서는 히트파이프 및 냉각기 구성요소의 설계와 제조 기술 뿐 아니라 철도 차량이 요구하는 장기간의 사용에도 안정된 작동을 이루도록 히트파이프의 제조과정에서 발생할 수 있는 성능 저하 요인에 대한 충분한 파악과 시험이 필요하다. 이러한 항목들은 열수송 한계와 같은 히트파이프의 작동 메카니즘과 관련된 사항과 내부 불응축성 가스의 발생과 관련 있는 내부 표면의 산화 및 적용환경으로부터 가해질 수 있는 용기의 변형과 파손 여부이다. 본 연구에서는 대용량 전력반도체 냉각기에 주로 적용되는 직경과 길이 및 작동유체로 제작된 히트파이프를 대상으로 열수송 한계를 기하학적, 열적조건을 변화하며 신뢰성을 포함하도록 실험을 수행하고 그 결과를 상관식과 비교하였다. 또한 성능저하의 발생원인에 대한 고찰과 함께 수명안정성을 확보하기 위한 가속 수명시험, 온도 사이클 등의 시험법 및 시험 결과를 제시하고 내부 단면 조사와 같은 정성적 방법을 함께 제시함으로써 장기간의 사용에도 안정적인 성능 및 신뢰성 확보의 기초적인 기준을 마련하고자 하였다.

참 고 문 헌

- [1] Murase, T., Sasaki, C., Matsumoto, K., Kimura, Y., Kotani, M., Sotani, J., "Power Semiconductor Device Cooling System Using Electrically Insulated Heat Pipe [POWERKICKER-E] for Rolling Stock", *Furokawa Review*, No.12, pp. 82~93, 1993.
- [2] 강환국, 김철주, 김제진, "전력제어 반도체용 히트파이프 냉각장치의 열전달 성능 연구" 대한설비공학회 논문집, 제13권 제8호, pp. 701~709, 2001.
- [3] 강환국, 김철주, "전력제어 반도체 냉각용 히트파이프 히트싱크의 설계와 작동특성" 전력전자학회 논문집, 제6권 제6호, pp. 572~581, 2001.
- [4] Dunn, P.D., Reay, D.A., Heat Pipes, 4th Ed. Pergamon Press, New York, 1994.
- [5] 강환국, 김철주, 이용수, "U형 히트파이프의 작동특성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 B권, 제25권 25권 제 12호, pp. 1711~1720, 2001.
- [6] Faghri, A., Heat Pipe Science and Technology, Taylor & Francis, 1995.
- [7] Chi, S. W., Heat Pipe Theory and Practice, McGraw Hill Book, Co., 1976.
- [8] Lock G. S. H., The Tubular Thermosyphon, Oxford

University, 1992.

[9] Wallis, G. B., "Flooding Velocities for Air and Water in Vertical Tubes", 1969. AEEW-R123.

[10] Imura, H., Sasaguchi, K., Kozai, H., "Critical Heat Flux in a Closed Two-Phase Thermosyphon", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, No. 8, pp. 1181~1188, 1983.

[11] 강환국, 김재진, 김철주, "PFC 히트파이프의 열전달 한계에 관한 연구" 공기조화 냉동공학 논문집 제 11권 제 3호, pp. 313~320, 1999.

[12] Park, Y.J, Kang, H.K, Kim, C.J, " Heat Transfer Charadteristics of a Two Phase Closed Thermosyphon to the Fill Charge Ratio", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol 45, pp. 4655~4661.

[13] 강환국, 김철주, 김상식, "전력반도체 냉각용 Fluoro-carbon (FC-72) 히트파이프의 열전달 특성", 제15회 에너지절약기술학술회, 한국에너지기술연구원, pp. 331~342, 2000.

기 호 설 명

- A : 반응활성화에너지(reaction activation energy)
- C : 상수
- d : 열사이폰 내경 [m]
- d_o : 열사이폰 외경 [mm]
- g : 중력가속도 [m/s²]
- h_{fg} : 증발잠열 [J/kg]
- k : Boltzmann 상수(1.38X10⁻²³ J/K)
- l : 길이 [m]
- ṁ : 질량 발생율 [kg/s]
- Q : 열유동율 [W]
- q_L : 열수송 한계 [W/m²]
- T : 절대온도, (K)
- t : 시간

그리스 문자

- ρ : 밀도 [kg/m³]
- σ : 표면장력 [N/m]

하첨자

- e : 증발부
- v : 증기
- l : 액체

저 자 소 개



강환국(姜煥國)

1967년 2월 9일생. 1990년 성균관대 기계공학과 졸업. 1992년 성균관대 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박). 1997년~1999년 성균관대 기계기술연구소 연구원. 1999년~2000년 U.C. Berkeley Post doc. 1998년~현재 (주)대흥기업 기술연구소 소장.