

N₂와 CF₄ 혼합물을 작동유체로 하는 극저온 열사이편에 대한 실험적 연구

김 영 권[†], 이 지 성, 정 상 권, 한 영 희^{*}, 정 세 용^{*}, 박 병 준^{*}

한국과학기술원 기계공학과, ^{*}한전전력연구원 초전도그룹

Experimental Investigation on the Cryogenic Thermosiphon Using N₂ and CF₄ Mixture as the Working Fluid

Youngkwon Kim, Jisung Lee, Sangkwon Jeong, Younghee Han, ^{*}Seyong Jung, ^{*}Byungjun Park

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

^{}Superconductivity and Applications Group, Korea Electric Power Research Institute, Daejeon, 305-760, Korea*

(Received January 21, 2009; revision received August 21, 2009)

ABSTRACT: A thermosiphon is utilized as a thermal shunt to reduce the cool-down time of a cryogenic system cooled by a two stage cryocooler. The cool-down time reduction by the thermosiphon is determined by the type of working fluid which is directly related to the operating temperature range of the thermosiphon. A mixed working fluid has a potential to widen the operation temperature range of the thermosiphon. In this study, the thermosiphon using N₂ and CF₄ mixture as the working fluid is fabricated and tested to verify its transient heat transfer performance. The thermosiphon with the mixed working fluid has no noticeable reduction of cool-down time compared with that of the thermosiphon with pure working fluid in this experiment. However, it seems that the thermosiphon with mixed working fluid may have an advantage according to the cooling capacity of a cryocooler, the cooling target temperature and the size of a cooling object.

Key words: Cryogenic thermosiphon(극저온 열사이편), Mixed working fluid(혼합 작동유체), Transient operation(과도작동)

1. 서 론

열사이편은 히트 파이프의 일종으로, 유체의 상 변화 현상을 이용하는 열전달 기구이다. 순수한 유체의 경우 상변화는 주어진 압력의 포화 온도

에서 발생하며 큰 열량의 흡수 및 방출을 수반하기 때문에 양 끝 단의 작은 온도차로 큰 열량을 전달할 수 있다는 장점이 있다.

극저온 영역에서의 열사이편은 작동유체가 상 온에 비해 다양하지 못해 작동범위가 제한됨에도 불구하고, 원자로의 냉중성자원, 초전도 모터, 크라이오 펌프 등에 종종 사용되고 있다. 특히, 종래에는 초전도체를 냉각하기 위해 극저온 액체를 사용하였으나, 최근 액체의 증발에 따른 손실을 줄

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-350-3079; fax: +82-42-350-8207

E-mail address: ykkim78@kaist.ac.kr

이고 사용자의 편의를 향상시키기 위해 전도냉각형 극저온 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

이런 전도 냉각형 시스템에서 열사이편은 효율적인 열전달을 위해 사용될 수 있으며, 이때의 장점은 크게 두 가지 측면으로 볼 수 있다. 첫째는 정상상태에서 열사이편의 큰 열전달 성능으로 인해 구리나 알루미늄과 같은 고체 전도체에 비해 같은 면적에 대해서 더 큰 열량을 양 끝단의 작은 온도 차이로 전달할 수 있다는 것이다.⁽¹⁾ 둘째로, 2단 극저온 냉동기를 사용하여 냉각하는 시스템의 경우, 냉동기의 1단부와 냉동대상을 열사이편으로 연결함으로써 시스템의 초기 냉각에 냉동기 1단부의 큰 냉동용량을 사용하여 냉각시간을 단축시킬 수 있다.⁽²⁾ 후자와 같은 경우 적절한 작동유체의 선정으로 시스템의 최종 도달 온도 이전에 작동유체가 동결되도록 하면 시스템의 정상상태 작동 중에는 열사이편을 통한 열전달이 거의 없어지게 된다. 이러한 열사이편의 “열 스위치(thermal switch)” 특성은 다른 열전달 기구에 비해 열사이편만이 가지는 장점이다.

이러한 열사이편에 대해 Prenger et al.은 N₂를 작동유체로 하는 단일 열사이편⁽²⁾ 또는 작동 온도범위가 다른 유체를 사용하는 다수의 열사이편^(3,4)을 사용함으로써 초기 냉각시간을 줄일 수 있음을 보였다. 이처럼 각각 다른 작동유체를 사용하는 다수의 열사이편을 사용하는 경우, 열사이편 자체의 열용량과 열사이편과 냉동기 또는 냉동대상을 연결하기 위해 추가적으로 사용되는 구조물의 열용량이 증가하고 이와 관련된 유체의 공급 장치 등으로 시스템이 복잡해지게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 작동 온도범위가 다른 N₂와 CF₄의 혼합물을 작동유체로 하는 열사이편을 설계, 제작하여 혼합물의 조성비에 따른 냉각시간의 변화를 실험을 통하여 관찰하였다.

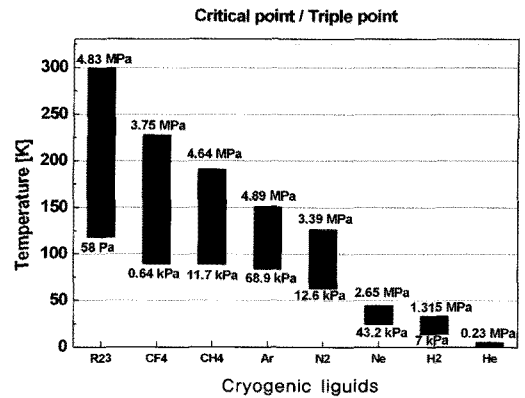
2. 실험장치 및 방법

2.1 작동유체 선정 및 실험장치

열사이편은 작동유체의 증발 및 응축을 통한 열전달 기구이므로 원하는 작동 온도범위에서 이상(two phase) 상태가 되어야 한다. 즉 열사이편의 가능한 작동온도 범위는 작동유체의 임계점(critical

Table 1 Properties of candidate fluids for cryogenic thermosiphon

Fluid	Critical temperature (K)	Normal boiling point (K)	Triple point temperature (K)
R23	299.3	191.1	118.0
CF ₄	227.5	145.1	89.5
CH ₄	190.6	111.7	90.7
Ar	150.7	87.3	88.8
N ₂	126.2	77.3	63.2
Ne	44.5	27.1	24.6
H ₂	33.2	20.4	14.0
He	5.2	4.2	2.2



point)에서부터 삼중점(triple point)까지이다. 극저온 영역에서 사용가능한 대표적인 작동유체들은 Table 1과 같으며 본 실험에서는 작동 온도범위가 넓고 안정성이 좋은 N₂와 CF₄를 작동유체로 선정하였다.

실험장치는 Fig. 1에서 보듯이 냉각을 위한 GM 극저온 냉동기(Model 350 CS, Austin Scientific), 열사이편(thermosiphon), 1.5 kg의 구리로 된 냉동대상(thermal load), 버퍼탱크(buffer tank), 진공용기(vacuum chamber)로 이루어져 있다. 실험에 사용된 열사이편의 응축부(condenser)와 증발부(evaporator)는 열전도도가 좋은 구리(copper)를 사용하였으며 단열부(adiabatic region)는 스테인리스 스틸(stainless steel)을 사용하였다. 단열부에 스테인리스 스틸을 사용한 이유는, 앞서 언급한 열사이편의 열 스위치 특성을 이용하기 위해서는 내

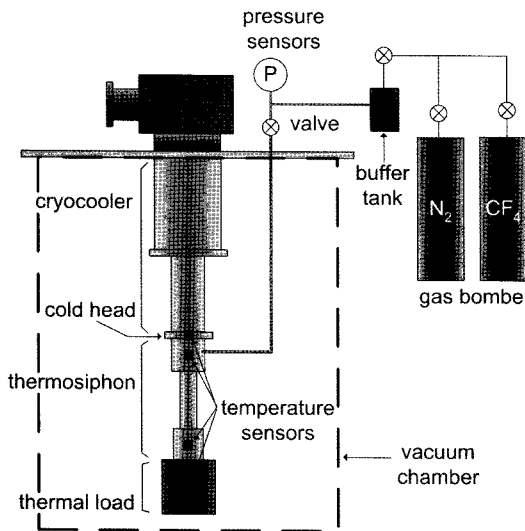


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

부의 작동유체가 동결되었을 때 열사이펀의 벽면을 통한 전도 열전달을 최소로 할 필요가 있기 때문이다. 응축부와 증발부는 직경 30 mm, 높이 30 mm이며 단열부는 길이 100 mm, 외경 1/2"(12.7 mm)이다. 그리고 작동유체의 저장소인 약 200 cc의 버퍼탱크를 진공용기 외부에 설치하였다. 실제 냉각시간 단축을 위해 사용되는 열사이펀을 사용할 경우 열사이펀은 냉동기의 1단부와 2단부 사이에 설치되지만, 이 경우 냉동대상이 냉동기 1단부와 2단부에 의해 동시에 냉각되어 열사이펀을 통한 열전달 효과만을 분리하여 확인할 수 없으므로, 본 실험에서는 냉동기의 2단부에 열사이펀을 설치하고 그 증발부에 냉동대상을 설치하였다.

냉각과정 동안, 냉동기 저온부(cold head)와 열사이펀의 응축부 및 증발부의 외벽 그리고 냉동대상의 온도는 실리콘 다이오드 센서를 사용해서 관측하였다. 버퍼탱크와 열사이펀으로 연결되는 배관에는 압력계를 설치하여 열사이펀과 버퍼탱크의 내부 압력을 측정하였다. 냉각실험 동안 진공용기 내부는 10⁻³ torr 이하의 압력으로 유지하여 단열 성능을 확보하였다.

2.2 실험방법

작동유체의 충전 방법은 Fig. 1에 표시된 압력계와 열사이펀 사이의 밸브를 잠근 상태에서 먼저

Table 2 Experimental conditions

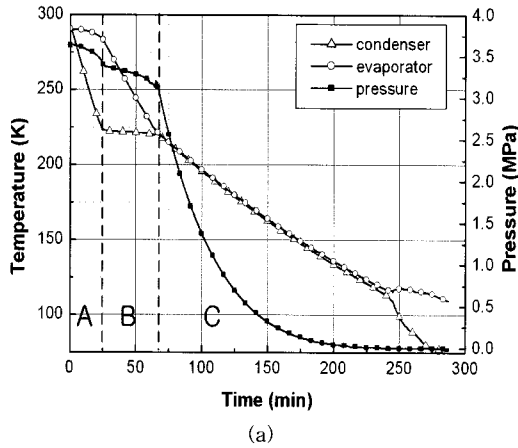
Experiment	Working fluid
Case 1	4 MPa pure CF ₄
Case 2	0.5 MPa N ₂ + 3.5 MPa CF ₄
Case 3	1 MPa N ₂ + 3 MPa CF ₄
Case 4	2 MPa N ₂ + 2 MPa CF ₄
Case 5	3.5 MPa N ₂ + 0.5 MPa CF ₄
Case 6	4 MPa pure N ₂

N₂를 버퍼탱크와 압력계가 설치된 부분까지 충전한다. 이때 N₂의 최초 충전 압력은 Table 2와 같이 0.5 MPa에서 3.5 MPa 까지 변화시켰으며 이를 통해 혼합물의 조성에 변화를 주었다. 이후 CF₄를 충전하여 전체 압력이 4 MPa이 되도록 하였다. 실험순서는 다음과 같다. 버퍼탱크에 혼합가스의 충전이 완료된 후 열사이펀으로 연결되는 밸브를 개방하며, 이때 전체 압력이 약 3.4 MPa까지 하강하게 된다. 작동유체 충전 후 냉동기를 작동시켜 작동유체가 동결되는 시점까지 냉각하는 동안의 온도 및 압력변화를 측정하였다.

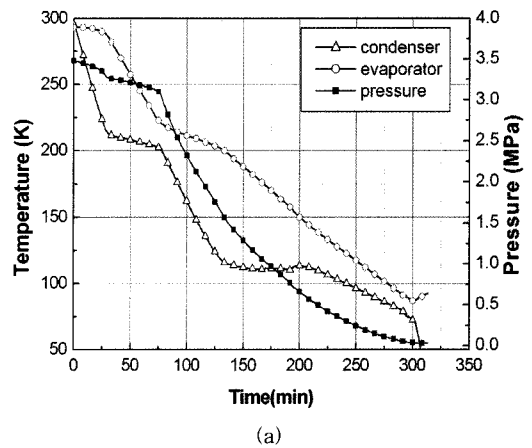
3. 실험결과

3.1 단일 작동유체 실험

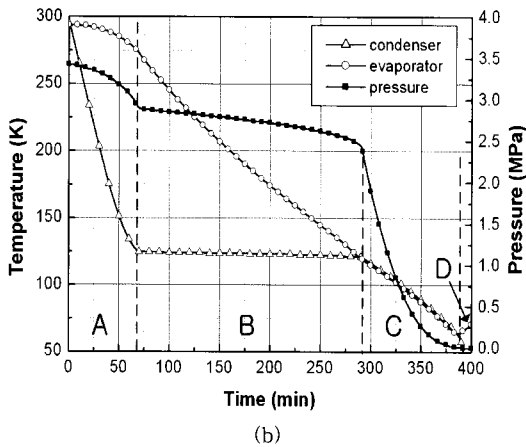
혼합 작동유체의 냉각특성과 비교해보기 위해 순수 N₂와 순수 CF₄를 작동유체로 하는 열사이펀에 대한 실험을 수행하였으며 결과는 Fig. 2에 도시되어 있다. Kim et al.⁽⁵⁾은 과도상태에서 작동하는 열사이펀에 대해서 내부 열전달 메커니즘의 변화에 따라 작동구간을 4개의 구간으로 나누었다. 그 구간은 각각 대류 열전달 구간 (A), 막비동 열전달 구간 (B), 핵비동 열전달 구간 (C), 작동유체의 동결 구간 (D)이다. 본 실험에서도 열사이펀이 이와 같은 과정으로 작동하여, Fig. 2에서 보듯이 위에서 언급한 4개의 구간이 확연하게 구분이 된다. 단, 실험 1의 경우에는 작동유체가 동결될 때까지 실험을 수행하지 않아서 작동유체의 동결을 관찰할 수 없었으나, 실험 6의 경우에는 약 390분 부근에서 증발부의 온도가 증가하는 현상으로부터 작동유체의 동결을 확인할 수 있다. N₂의 경우에 대한 실험 결과를 보면 작동유체가



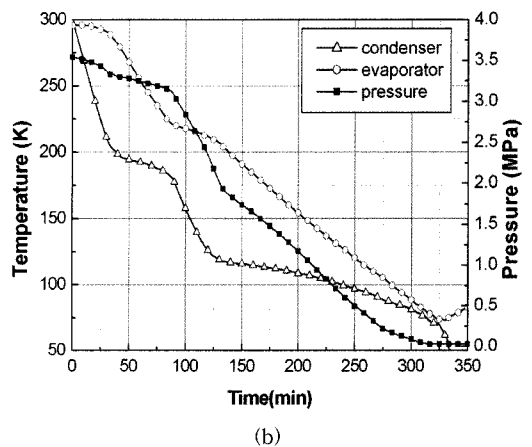
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 2 Cool-down history of pure working fluid experiment; (a) case 1 and (b) case 6.

Fig. 3 Cool-down history of mixed working fluid experiment; (a) case 2 and (b) case 3.

동결되기 직전까지 증발부와 응축부의 온도차이가 매우 작은 상태로 열사이펀이 효과적으로 작동하고 있으나, CF₄의 경우에는 약 230분 부근에서 응축부의 온도가 삼중점 온도인 89.5 K 이상으로 유지됨에도 불구하고 열사이펀 양끝단의 온도차가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 현상은 열사이펀 내부에서 CF₄의 증기압이 매우 낮기 때문에 열전달이 원활히 발생하지 못하기 때문이다. 실제 열사이펀 양 끝의 온도차이가 증가하는 약 110 K에서 CF₄의 포화압력은 3.4 kPa이다. 반면 N₂의 경우에는 삼중점 부근까지 높은 포화압력을 가지므로 열사이펀이 효과적으로 작동한다. 또한 내부 작동유체가 동결되면 열사이펀을 통한 열전달이 사라지게 되어 응축부와 증발부의 온도 차이가 급격하게 증가한다.

3.2 N₂/CF₄ 혼합 작동유체

순수 작동유체에서 막비동 열전달 구간에서는 응축부의 온도가 거의 일정하게 유지되는 것과는 달리, 혼합 작동유체의 경우에는 막비동이 발생할 것으로 예상되는 구간에서도 응축부의 온도가 계속적으로 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 혼합물의 경우 같은 압력하에서도 포화 온도가 변화하는 특성 때문으로 생각된다.

N₂가 비교적 적은 양이 사용된 실험 2와 3의 경우에는(Fig. 3) 냉각과정 동안의 온도변화가 다른 실험 결과들과는 달리 매우 특이한 형태를 보인다. 전체 냉각과정 동안 응축부와 증발부의 온도 차이가 매우 크게 유지되고 있으며, 실험이 시작된 후 약 25분에서 75분 사이의 증발부 및 냉동대상

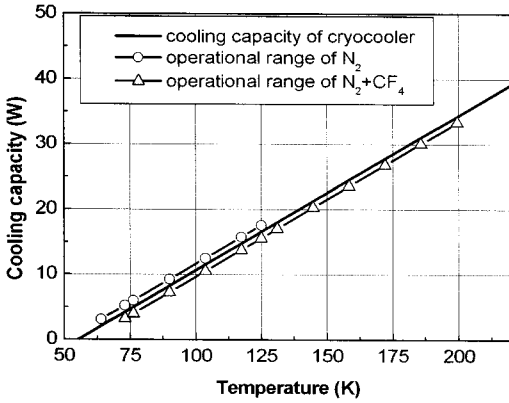
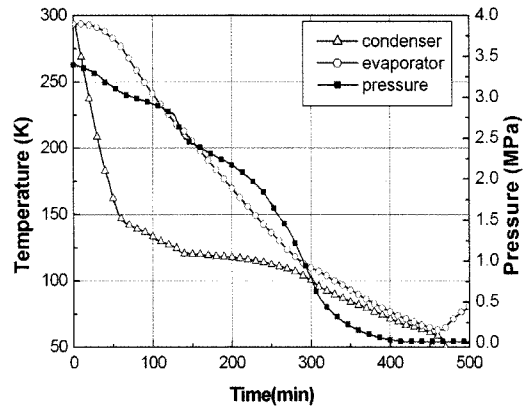


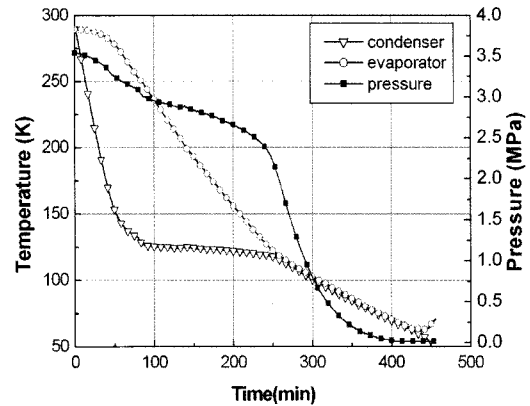
Fig. 4 Cooling capacity of cryocooler(cryoTel, LG Electronics) and operational range of thermosiphon.

의 급격한 온도감소를 통해 열사이펀 내부에서 응축 및 비등에 의한 열전달이 발생하기 시작했음을 알 수 있다. 그러나 75분부터 125분까지는 냉동대상의 온도 감소율이 줄어들고 응축부의 온도가 다시 급격하게 하강하는 현상으로부터 열사이펀을 통한 열전달이 현저히 감소한 것을 알 수 있다. 이후 응축부의 온도가 120 K 부근에 도달하자 다시 열사이펀을 통한 열전달이 증가하게 된다. 이는 첫 번째 작동구간에서는 CF₄가 응축 및 비등 열전달에 지배적인 요소로 작용하고, 두 번째 구간에서는 N₂와 CF₄에 의해 열전달이 발생하는 것처럼 보인다. 또한 위의 두 경우에서는 순수 유체의 결과에서 볼 수 있는 핵비등과 막비등 열전달의 전이가 확연히 나타나지 않는다. 또한 냉동대상이 각각 87 K과 73 K까지 냉각되므로 CF₄만을 사용한 경우에 비해 낮은 온도까지 냉각이 가능하다. N₂를 사용한 경우 열사이펀의 작동 시작 온도가 125 K인데 비해, 실험 2와 실험 3의 경우에는 200 K 부근이므로 Fig. 4에서와 같이 냉동기의 큰 냉동용량을 사용할 수 있기 때문에 73 K까지는 더 빨리 냉각되는 효과가 있다.

실험 2, 3에 비해 N₂의 양이 많아진 실험 4와 5의 결과는 Fig. 5에 도시되어 있다. 실험 2와 실험 3에 비해서 전체적인 온도변화가 순수 유체를 사용한 열사이펀의 결과와 비슷한 양상을 보인다. Fig. 5의 (a)의 경우 응축부와 증발부의 온도가 비슷한 기울기로 감소하는 약 300분 이후의 구간은 핵비등 열전달 구간으로 생각할 수 있으며, (b)의 경우에는 약 250분 이후의 구간으로 생각



(a)



(b)

Fig. 5 Cool-down history of mixed working fluid experiment; (a) case 4 and (b) case 5.

할 수 있다. 그러나 이 구간동안 응축부와 증발부의 온도차이는 (a)와 (b) 각각이 평균 약 6.5 K과 1.5 K 정도를 유지하고 있으며 순수 유체의 경우에는 2 K 이하이다. 이는 열전달 계수의 차이에서 비롯되며, 익히 알려진 대로 혼합 유체의 경우 순수 유체에 비해 열전달계수가 작아진다는 사실과 부합하고 있다.⁽⁶⁾ 또한 작동유체가 동결되기 시작할 때 증발부와 냉동대상의 온도는 약 62.3 K이며, N₂만을 사용한 실험 6의 경우에는 64.1 K이다. 순수한 N₂의 경우 삼중점이 63.2 K이지만 실험 4와 5의 경우 증발부 벽면이 이보다 낮은 온도를 유지하고 있다. 증발 열전달에 의한 벽면과 액체와의 온도 차이를 고려하면 사용된 온도센서의 오차(±0.25 K)를 감안하더라도 열사이펀 내부 유체의 온도는 N₂의 삼중점 온도에 비해

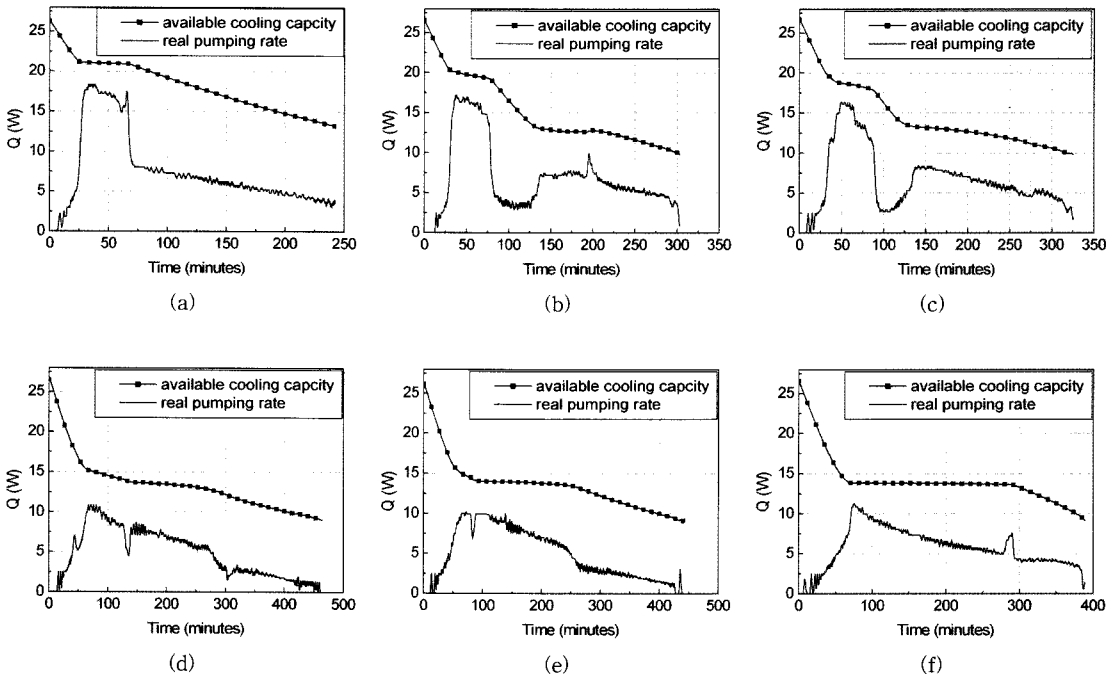


Fig. 6 Available cooling work and real pumping rate; (a) case 1, (b) case 2, (c) case 3, (d) case 4, (e) case 5, (f) case 6.

더 낮을 것으로 예측할 수 있다. 이를 통해 혼합 유체의 동결 온도가 순수유체 보다 다소 낮아졌다고도 볼 수 있다. 이러한 공융점(eutectic point)의 존재는 매우 흥미로운 연구 분야로서, 본 논문에서 수행한 실험결과만으로 확실하게 주장할 수는 없지만, 어떤 대상을 열사이편으로 냉각할 때, 순수유체를 사용하는 것 보다 냉각온도를 더 감소시킬 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 실험 4와 5의 경우는 작동온도가 N_2 에 비해 다소 낮아진다는 장점은 있으나 전체 냉각속도는 N_2 만을 사용하는 경우에 비해 다소 느려지는 단점이 있다.

실험 4의 경우 열사이편의 작동이 약 140 K 정도에서 시작되어 약 80분 동안은 125 K 이상의 온도를 유지하고 있다. 이 과정동안은 큰 냉동 용량을 사용할 수 있지만 응축부의 온도가 유지되지 못하고 계속해서 감소하고 있고, 이는 냉동용량 중 일부만이 냉동대상을 냉각하는데 사용되지 못하고 응축부를 냉각하는데도 사용되고 있다는 것을 의미하기 때문에 큰 냉동용량을 사용하는 장점이 제대로 반영되지 못하고 있다. 본 실험의 경우 냉동대상의 질량은 1.5 kg인 반면 열사이편의 질량이 0.5 kg 정도로 열사이편의 질량이 냉동대

상에 비해 매우 큰 편이다. 하지만 실제 시스템을 생각해 보면 열사이편의 열용량(heat capacity)을 무시할 수 있을 정도로 냉동대상의 질량이 열사이편의 질량에 비해 매우 클 것이다. 이때에도 열사이편을 통한 시스템의 냉각 곡선은 시간이 더욱 길어지고 전체 경향은 Fig. 4의 (a)와 비슷할 것으로 예측된다. 그러한 경우 전체 냉동용량 중 응축부를 냉각시키는 데 소비되는 냉동용량의 비가 본 실험의 경우에 비해 작아질 것이므로, 냉동기가 높은 온도에서 작동함으로써 큰 냉동용량을 사용하여 전체 냉각시간이 감소되는 효과가 본 실험의 결과에 비해 더욱 커질 것으로 예상된다.

3.3 열사이편을 통한 열전달량 비교

실험에 사용된 냉동기의 냉동용량(\dot{Q})은 측정 결과 식(1)과 같이 저온부(cold head) 온도 (T_c)에 대한 1차함수로 표현된다.

$$\dot{Q} = 0.073 T_c + 5.1 \quad (1)$$

위 식은 냉동기에서 발생하는 사용 가능한 전체

냉각용량을 나타내며, 이 중 일부가 열사이편을 통하여 열부하를 냉각시키는데 사용된다. Fig. 6을 통해서 각 실험과정 동안 저온부 온도에 따른 냉동기의 냉동용량 변화와 그 중 열사이편을 통해 열부하를 냉각시키는데 사용된 양을 비교함으로써 혼합유체를 사용하는 열사이편의 장, 단점을 확인 할 수 있다. Fig. 6을 보면, CF₄의 조성이 높을수록 열사이편의 작동 초기에 열전달량이 증가함을 알 수 있다. 이는 CF₄에 의해 고온에서 열사이편이 작동하여 냉동기의 큰 냉동용량을 사용할 수 있는 장점을 잘 반영하고 있다. 다음으로 열부하의 냉각에만 사용되는 양이 블록하게 증가하는 부분은 열사이편이 제대로 작동된 구간으로 볼 수 있으며 Fig. 6 (a), (b), (c)를 비교해보면 혼합유체가 사용된 경우 열사이편의 작동 온도 범위가 확장되었다는 것을 확인할 수 있다.

반면에 혼합유체를 사용하였을 때 열사이편의 작동 온도 범위가 넓어지지만 열사이편을 통한 열전달량이 급격하게 감소하는 부분이 발생함을 확인할 수 있다. 이와 같은 구간은 Fig. 6 (b), (c)와 같은 경우 약 100분을 전후로 확인하게 나타나며, (d)에서는 130분, (e)에서는 100분 부근에서 작게 나타난다. 특히 (b)와 (c) 같은 경우 이와 같은 구간이 상대적으로 길게 유지가 되고 있으므로, 전체 냉각시간 감소에 부정적인 영향을 미치게 된다. 또한, Fig. 6 (d), (e)와 같이 CF₄의 조성이 작을 경우 300분 이후 질소만을 사용한 경우에 비해 열사이편을 통한 열전달량이 적으며, 이는 혼합유체를 사용함으로써 인해 열전달 계수의 감소로 냉동기와 열부하 사이의 온도차이가 커져서 발생하며, 결과적으로 전체 냉각시간을 증가시키는 원인이 된다. 열사이편의 작동 온도 범위가 넓어 졌다는 사실은 초기냉각시간 단축에 긍정적인 요소로 작용하지만 중간에 열전달이 급격히 감소하는 구간 및 후반부에 양 끝단의 온도차의 증가는 냉각시간 단축에 부정적인 요소로 작용한다.

4. 결 론

본 논문은 혼합물을 작동유체로 사용하는 극저온 열사이편의 과도상태 작동특성을 알아보기 위해서 CF₄와 N₂를 작동유체로 선정하여 조성을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 냉각시간 단축

이라는 측면에서 혼합유체를 사용할 경우 단일유체에 비해 큰 이점을 찾을 수 없었으나, 과도상태 구간 동안 열사이편의 작동 온도 범위가 넓어지는 것을 확인하였다. 하지만 혼합조성에 따라 열사이편의 최저 작동온도가 다르고, 중간에 열전달량이 줄어드는 구간이 존재하게 된다. 또한 온도에 따른 냉동기의 냉동용량 특성이 과도상태 냉각시간에 영향을 미칠 수 있으므로 이러한 요소를 함께 고려한 논의가 필요하다.

N₂가 비교적 적은 양이 사용된 실험 2, 실험 3의 경우 냉각과정에서 단일 유체와는 달리 매우 특이한 거동을 보였으며, 이러한 현상에 대한 설명을 위해서는 N₂와 CF₄의 응축 및 비등 열전달에 대한 보다 심층적인 연구가 필요하다. 또한 열사이편 내부에 온도센서를 추가적으로 설치하여 내부 온도변화를 측정하면 물리적 현상의 설명에 필요한 근거를 얻을 수 있을 것이다. 또한 지금과는 다른 혼합물 조성을 가지는 열사이편에 대한 연구도 매우 흥미로운 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 산업자원부에 의한 전력조성기반사업센터의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Abdel-Bary, M., Abdel-Bary, S., Kilian, K. and Ritman, J., 2007, Performance measurement of a 7 mm-diameter hydrogen heat pipe, *Cryogenics*, Vol. 47, pp. 158-165.
2. Prenger, F. C., Hill, D. D., Daney, D. E., Daugherty, M. A., Green, G. F. and Roth, E. W., Nitrogen heat pipe for cryocooler thermal shunt, 1996, *Adv. Cryo. Eng.*, Vol. 41, pp. 147-154.
3. Prenger, F. C., Hill, D. D., Daney, D. E., Daugherty, M. A., Green, G. F., Chafe, J., Heiberger, M. and Langhorn, A., Heat pipes for enhanced cooldown of cryogenic system, 1997, *Cryocoolers*, Vol. 9, pp. 831-839.
4. Prenger, F. C., Hill, D. D., Daney, D. E., Daugherty, M. A., Green, G. F., Chafe, J., Heiberger, M. and Langhorn, Performance of cryocooler shunt heat pipes, 1998, *Adv. Cryo. Eng.*, Vol.

- 43, pp. 1521-1528.
5. Kim, Y. K. and Jeong, S., 2006, Investigation of transient heat transfer characteristics of cryocooler-cooled thermosiphon, Proceedings of the KSME 2006 fall annual meeting.
 6. Radermacher, R., and Hwang, Y., 2005, Vapor compression heat pumps with refrigerant mixtures, Taylor and Francis, pp. 237-239.