

기-액 상변화 열전달을 이용한 대형 조리용기 개발을 위한 2 성분 작동유체의 열전달 특성실험[§]

정 태 성^{*†}, 강 환 국^{**}

* 인하공업전문대학 기계설계과, ** 동은에이티에스

Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Binary Working Fluid for Clean Large Cauldron Using Liquid-Vapor Phase Change Heat

Tae Sung Jung^{*†} and Hwan Kook Kang^{**}

* Dept. of Mechanical Design, Inha Technical College,
** Dongeun ATS

(Received April 21, 2014 ; Revised July 11, 2014 ; Accepted July 15, 2014)

Key Words: Thermosyphon(열사이폰), Binary Working Fluid(2 성분 작동유체), Naphthalene(나프탈렌), FC-40, Large Cauldron(대형 조리용기)

초록: 본 연구는 고효율 청정 조리용기 개발을 위한 기초 연구로서 기-액 상변화를 이용하여 조리용기의 등온성을 향상시키고자 100-200°C의 작동온도 범위에 적합한 작동유체를 선정하고 이들 작동유체의 열전달 특성실험을 수행하였다. 이를 위하여 2 상 밀폐 열사이폰을 제작하고 두 가지 작동유체에 대한 비등 및 응축 열전달 특성과 시동특성에 대한 실험하였으며, 실험 결과로부터 2 가지 유체를 혼합한 2 성분 유체 열사이폰의 시동 및 열전달 성능의 상호 보완 가능성을 분석하였다.

Abstract: This paper describes preliminary research conducted for developing a high-efficiency clean large cauldron using the liquid-vapor phase change heat transfer. To improve the isothermal environment of the cauldron, naphthalene and FC-40 were selected as the working fluids to operate well in the temperature range of 100-200°C and used in experimental investigations of the heat transfer characteristics. A two-phase closed thermosyphon was designed and built to demonstrate the functionality of the working fluids. Startup, boiling, and condensation tests were performed, and the test results were used to examine the possibility of complementary effects of the startup and heat transfer characteristics of the two-phase closed thermosyphon using a mixture of naphthalene and FC-40.

1. 서 론

중식, 한식 등 일반적인 국내 음식점에서 보급 중인 가스 버너를 이용한 대형 조리용기는 주로 주철, 알루미늄, 스테인리스 강(Stainless steel)을 재료로 하고 있는데 주철은 산화에 의한 녹 발생이 쉽고, 알루미늄은 체내에 일정량 이상 유입될 경우 파킨슨씨의 치매 등 유해한 장애를 일으킬 수 있다고 알려져 있어⁽¹⁾ 조리용기의 재료로 부적합

하다. 스테인리스 강은 다른 재질에 비하여 청결하고 위생적인 재료로 평가 받고 있으나 주철에 비하여 약 1/3, 알루미늄에 비하여 1/100 이하의 낮은 열전도율을 가지고 있어 열부하를 증가시키면 가열면에 온도 불균일이 증대하여 조리용 식재료가 타게 되는 원인이 된다.⁽²⁾

본 연구는 Fig. 1 과 같이 포화상태 작동유체가 이중용기 내부 공간에서 기-액 상변화에 의하여 열전달을 수행함으로써 조리용기의 등온성을 향상시키는 고효율 청정 조리용기 개발을 위한 기초 연구로서 100-200°C의 작동온도 범위에 적합한 작동유체를 선정하고, 이들 작동유체의 열전달 특성 실험을 수행하였다. 이를 위하여 동일한 원리의 2

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2014. 4. 24.-25., 라마다프라자호텔) 발표논문임

† Corresponding Author. tsjung@inhac.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

상 밀폐 열사이폰을 제작하고 두 가지 작동유체에 대한 비등 및 응축 열전달 특성과 시동특성에 대한 실험을 수행하였으며, 실험 결과로부터 2 가지 유체를 혼합한 2 성분 유체 열사이폰의 시동 및 열전달 성능의 상호 보완 가능성을 분석하였다.

2. 작동유체 성능 실험장치

2.1 작동유체의 선정

기액 상변화에 의한 열전달 장치인 열사이폰은 작동온도의 범위에 따라 다양한 작동유체를 선택하여 사용할 수 있다. 식재료의 끓임과 볶음 등의 열적 가공 온도를 고려하면 본 연구에서 적용하려 하는 작동유체의 작동 온도범위는 100°C에서 200°C사이로 예상된다. 이러한 작동 범위의 저온 또는 중온용 작동유체는 다우섬(Dowtherm), 나프탈렌, FC-40 등이 해당되는데,⁽³⁾ 본 연구에서는 가연성과 취급성 및 세척방법, 용기와의 화학적 반응에 의한 부식 및 수명관련 요인 등을 고려하여 나프탈렌과 FC-40 을 대상으로 적합한 작동유체를 선정하고자 하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

작동유체의 종류에 따른 열사이폰의 작동 특성과 성능실험을 위하여 STS304 재질의 튜브를 이용하여 Fig. 2 와 같은 2 상 밀폐 열사이폰을 제작하였다.

수직으로 고정된 열사이폰에 156 ml의 작동유체 충전하였으며, 증발부에 열부하를 공급하고자 길이 220mm 의 스테인리스 피복 전기저항 발열체 5 개를 증발부 외벽의 원주를 따라 설치하고 그 외부를 세라믹 파이버(Cerakwool, KCC, Korea)로 단열처리 하였다. 온도 측정을 위하여 열사이폰의 증발부, 단열부 및 응축부의 외벽에 총 10 개의 열전대(K type, $\phi 0.3\text{mm}$)를 설치하였다. 응축부로 이송된 열은 냉동기에서 공급된 냉각수에 의하여 제거되며 열부하에 따라 냉각수 온도와 유량을 조절하여 열사이폰의 작동 온도범위를 제어하였다.

슬라이더스로 전압을 조절하며, 전력량계(WT210, Yokogawa, Japan)를 이용하여 증발부의 공급 열부하

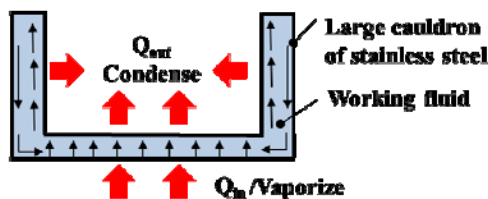


Fig. 1 Clean large cauldron using liquid-vapor phase change heat transfer

를 계측하였으며, 증발부 온도를 기준으로 100-230°C의 범위의 시동과정과 정상상태에서 측정점의 온도를 데이터 로거(MV100, Yokogawa, Japan)로 기록하였다.

3. FC-40 과 나프탈렌의 특성 실험

3.1 열부하에 따른 정상상태 온도분포

Fig. 3 은 열부하에 따라 FC-40 과 나프탈렌을 작동유체로 하는 열사이폰의 벽면온도를 나타낸 것이다. FC-40 열사이폰의 증발부 벽 온도를 보면 열사이폰 길이 방향으로 증발부 하단으로부터 단열부 측으로 온도가 상승하여 중앙부에서 가장 높은 온도를 나타내며 열부하가 증가하면 그 차도 증가하는데 913W 에서는 약 30°C이상의 값을 보이고 있다. 이는 열사이폰에서 증발부 하단에 작동유체가 풀(Pool) 상태를 유지할 때 나타나는 현상으로 설명되며, 이러한 관점에서 작동유체 충전량 변화에 따른 실험의 필요성이 판단되나 본 연구는 작동유체 선정에 위한 작동유체간 특성 실험이 목적이므로 충전량을 변화시키는 추가적인 실험은 수행하지 않았다. 최고 온도 지점으로 부터 단열부 방향으로 2 개 지점은 비교적 균일한 온도를 나타

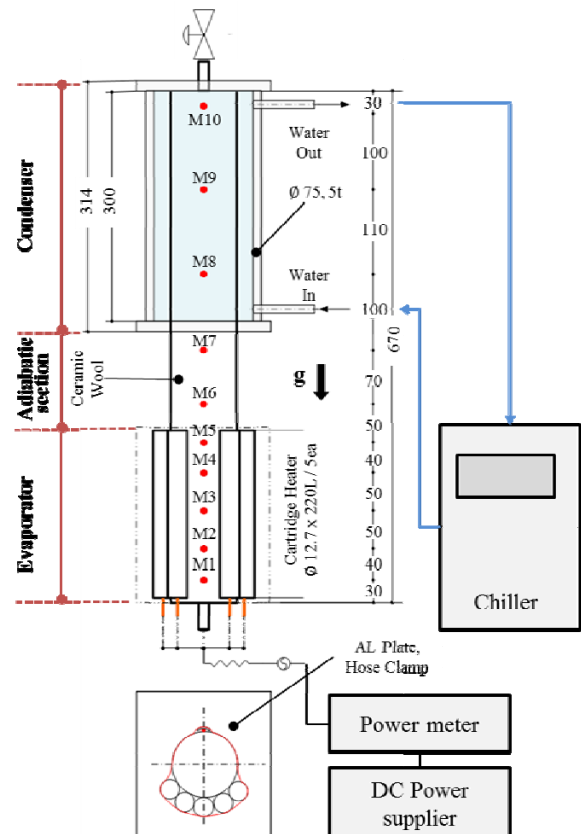


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set up

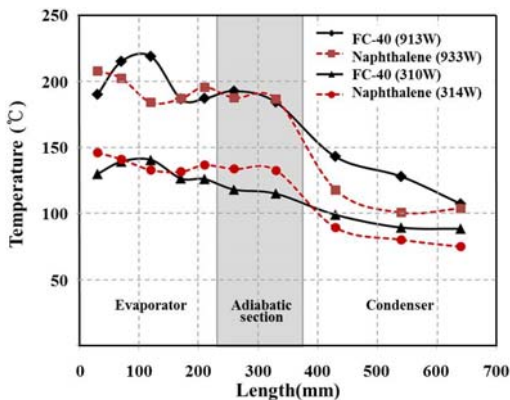


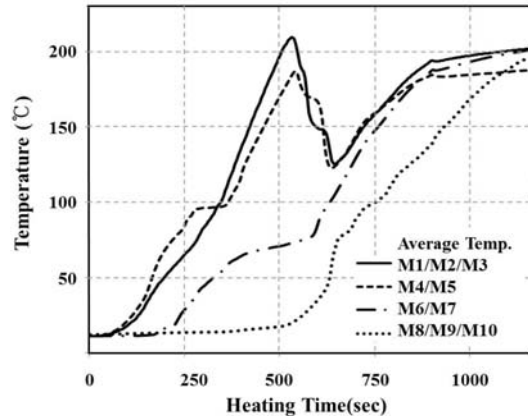
Fig. 3 Wall temperature distributions of the two phase closed thermosyphon (Naphthalene and FC-40)

내었으며, 전반적으로 동일한 작동유체를 사용한 관련 연구⁽⁴⁾의 결과와 유사한 온도분포 특성을 보였다. 응축부의 온도분포는 단열부로부터 선형적으로 온도가 감소하는 형태를 보이며 열부하 증가를 증가시키면 응축부 측정점간 온도차도 증가하였다. 이러한 증발부의 국부적 과열과 응축부의 온도구배는 비등 및 응축 열전달 계수의 감소로 인한 열저항 증가의 원인이 된다.

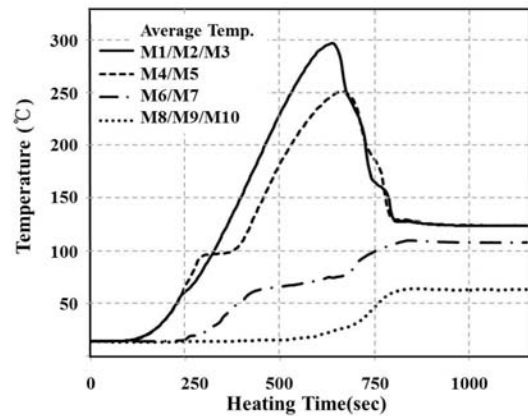
한편 나프탈렌 열사이폰의 응축부 벽면온도 분포는 FC-40 과는 다르게 비교적 동일한 온도를 보이고 있으나 단열부와 온도차는 상대적으로 증가되어 있고, 열부하가 높아짐에 따라 온도차 또한 커지는 경향을 확인할 수 있다.

3.2 나프탈렌의 시동특성

나프탈렌은 녹는점이 약 80°C 정도으로써 상온에서 고체물질이다. 관련 연구⁽⁴⁾에 의하면 응축부 온도가 녹는점보다 낮은 경우 증기의 재응결에 의해 시동 불안정성이 나타날 수 있으며 본 연구에서는 이러한 관점에서 나프탈렌 열사이폰의 시동특성을 파악하고자 하였다. Fig. 4(a)는 나프탈렌 열사이폰의 증발부에 750W의 열을 가하고, 응축부에 별도의 냉각수를 공급하지 않아 이송된 열이 자연대류에 의하여 주변으로 소산되도록 하였을 때 시간에 따른 각 측정점의 온도 변화를 보여준다. 그림에서 증발부 하단 측정점 3 개소(M1, M2, M3)와 상단 2 개소(M4, M5)의 온도는 서로 다른 경향을 보이고 있다. 즉 증발부 상단 측정점 온도는 그 하단에 비하여 상대적으로 빠르게 상승하며 벽면의 온도가 약 100°C에 도달한 후 비교적 일정한 온도를 보이다가 다시 상승하는 경향을 보이고 있다. 한편 증발부 하단 3 개 측정점은 가열초기 온도 상승률이 상단에 비하여 상대적으로 낮다가 증발



(a) Without cooling



(b) With cooling

Fig. 4 Start-up characteristics of naphthalene thermosyphon (heat load 750W)

부 상단 온도가 일정하게 유지되는 온도에 이른 후에는 상단의 측정점보다 증가됨을 알 수 있다. 이후 선형적으로 증가하여 최대 230°C까지 과열된 후 약 550 초에서 급격히 온도가 감소하고 있다. 한편 단열부(M6, M7)와 응축부(M8, M9, M10)는 가열초기 온도가 증가하지 않으며, 응축부의 경우 가열 후 약 520 초 후부터 온도가 상승하는 현상을 보이고 있다. 단열부는 200-300 초 구간에서 온도 상승율이 증발부와 유사한 값이나 이후 둔화되는 형태를 나타낸다. 응축부 온도는 증발부 온도가 급격히 낮아지는 약 550 초 이후 급격히 상승하여 증발부 온도에 근접하면 증가율이 감소하는 경향을 보이며 이후 전 측정점의 온도 증가율은 유사한 값을 나타낸다.

Fig. 4(b)는 응축부에 냉각수가 연속적으로 유동하는 상태에서 증발부에 750W의 열부하를 공급하였을 때의 실험결과이다. Fig. 4(a)와 유사하게 가열 시작 100 초 후 약 100°C 정도에서 증발부 상단의 온도가 일정하게 유지하는 경향을 보이며, 응

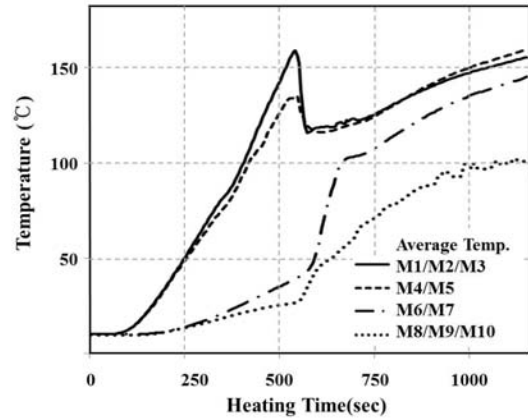
축부와 단열부의 벽면온도 변화 경향 또한 동일한 형태를 보이고 있다. 다만 가열부 최고 온도는 320℃ 정도로 앞서 보다 과열도가 증가하고 있으며 온도 낙하도 최대 200℃ 정도로 커짐을 알 수 있다.

이러한 작동특성은 아래와 같이 설명된다. 상온에서 증발부 하단에 고체 상태로 존재하는 나프탈렌에 열부하가 공급되면 온도가 증가하다가 융해점에 이르면 융해 잠열로 인하여 온도증가율이 둔화된다. 지속적으로 열공급이 이루어지면 포화상태에서 기화한 증기가 단열부 및 응축부로 이동하여 응축된 후 증발부로 귀환되고, 이에 따라 단열부와 응축부는 순차적으로 온도가 점차 증가한다. 이 때 낮은 증기압에 의하여 증기유동이 단열부 상단 또는 응축부 하단의 일부 구간에 이르러 응축부 온도가 어는점보다 낮아지면 증발부로부터 공급된 나프탈렌 증기가 응축 후 응고되어 증발부로 귀환하지 못하게 되고, 증발부는 건조현상(Dryout)이 발생하여 온도가 지속적으로 상승한다. 단열부 및 응축부 온도가 용기의 전도 및 내부증기의 유입에 의해 가열되어 융해온도에 이르면 융해된 작동유체가 중력에 의하여 증발부 상단에 공급되어 증발부 온도는 급격하게 낮아지고, 증기의 유입에 따라 응축부 온도는 급격히 상승한다.

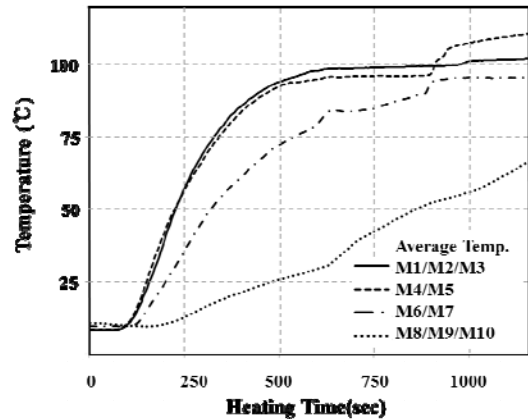
응축부에 냉각수를 공급하면 냉각을 증가로 인하여 응고된 작동유체가 융해온도까지 이르는 시간이 길어지고, 증발부 온도의 과열도가 증가하며 시동 시간 또한 지연된다. 이러한 응고점 이하에서의 작동에 의한 작동유체의 시동 특성은 관련 연구에서도 확인할 수 있다.⁽⁵⁾

4.2 성분 유체의 작동특성

작동유체로 검토한 FC-40은 PFC 계열의 작동유체로서 비가연성 고가이며 200℃의 고온표면에서 열분해에 의한 가스 발생이 가능성이 있다. 또한 앞의 실험 결과와 같이 응축부에서 온도차가 발생하여 등온성이 다소 낮은 것으로 판단된다. 본 연구에서는 나프탈렌의 시동성 제한을 극복하고 용기의 등온성을 확보하고자 상온에서 액체 상태인 FC-40을 혼합하는 2성분 작동유체(Binary working fluid)를 사용하여 시동성 및 응축부 온도 강하에 의한 등온성 저하 요인을 개선할 수 있을지에 대한 실험을 수행하였다. 2성분 유체 열사이폰의 작동유체 충전량은 단일 작동유체와 같게 156 ml로 하였으며, 두 작동유체의 체적비를 동일하게 하였다. 작동유체의 충전량은 히트파이프의 작동특성과 성능에 영향을 미치는 주요한 설계인자로서



(a) Without cooling



(b) With cooling

Fig. 5 Start-up characteristics of binary working fluid(heat load 750W)

관련하여 많은 연구가 수행되었으며, 본 연구의 2성분 작동유체의 체적비와 충전율 또한 주요한 관련 인자로 판단된다. 다만, 본 연구에서는 2성분 작동유체를 적용함에 따른 시동 및 열전달 특성을 확인하고자 하며 각 작동유체의 충전율과 체적비의 변화에 대한 실험은 수행하지 않았다.

Fig. 5는 나프탈렌과 FC-40을 혼합한 2성분 유체 열사이폰의 시동특성을 실험한 결과이다. 이 경우에도 앞의 실험과 동일하게 응축부에 냉각수 공급을 달리하여 냉각 부하 변동에 따른 시동특성 변화를 함께 파악하였다. Fig. 5(a)는 2성분 유체 열사이폰의 응축부에 냉각수를 공급하지 않은 상태에서의 실험결과를 보여준다. 그림에서 나프탈렌의 시동특성 실험결과와 유사하게 증발부의 과열 및 급격한 온도 강하현상을 볼 수 있다. 그러나 증발부의 최고 온도는 약 170℃로 상대적으로 과열도가 낮으며 온도 강하 또한 약 50℃ 정도로 완화되어 있다. 또한 단열부와 응축부 온도가 초기 시동시점부터 상승하고 있어 나프탈렌 열사이

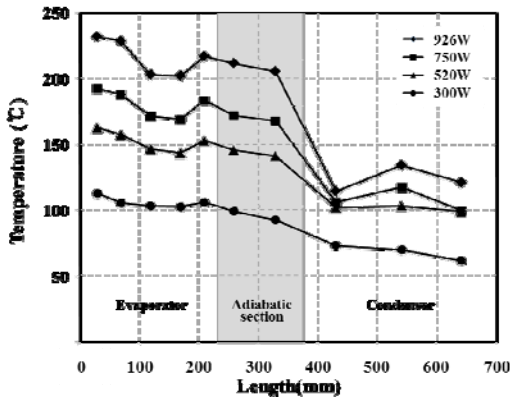


Fig. 6 Wall temperature distributions of naphthalene thermosyphon

촌에 비하여 안정된 시동이 이루어지며, 초기 시동시간도 감소하고 있다.

냉각수가 공급되는 경우 Fig. 5(b)에서와 같이 증발부 전 영역은 비교적 일정한 증가율로 온도가 상승하며 앞의 결과와 유사한 최대 140°C에서 정상상태의 온도 값을 나타내고 있으나 급격한 온도 하강과 상승 등 불안정을 보이지 않으며, 응축부의 온도도 시동초기부터 상승하여 전반적으로 안정된 시동 상태를 보이고 있다. 이러한 결과는 상온에서 액체 상태인 FC-40 이 낮은 온도에서 정상적으로 작동함에 따라 나프탈렌의 용해 및 응고에 의한 시동 불안정성을 개선할 수 있음을 보여준다.

Fig. 6 은 2 성분 유체 열사이폰에서 열부하에 따른 벽면온도를 측정된 실험 결과이다. 그림에서 증발부 온도분포는 Fig. 3 의 두 경우와 다르게 증발부 하단으로부터 온도가 낮아진 후 단열부 입구에서 상승하며 증발부의 상대적 온도차도 앞서의 경우보다 증가하고 있음을 볼 수 있다.

응축부의 경우 FC-40 에 비하면 등온성이 향상되어 구간 내 온도차가 감소한 결과를 보여주는데 낮은 열부하에서는 응축부 끝단 온도가 다소 낮아지나 응축부 온도가 100°C 이상인 경우 구간내 온도차가 감소하였다. 다만, 열부하가 증가에 따라 응축부 중단의 온도가 높게 나타나고 있다. 응축부 온도가 100°C 미만의 작동온도에서는 나프탈렌이 용융점 이하로 냉각되어 주로 FC-40 에 의하여 열전달이 발생하므로 등온성이 낮아지는 현상이 나타나는 것으로 추정되나 그 이상의 온도에서는 FC-40 열사이폰에서 나타나는 온도 구배 특성과는 구분되고 있으며, 혼합유체를 사용하는 관련 연구⁶⁾ 결과와도 상이한 특성을 보이고 있다.

이러한 특성은 두 작동유체의 물성에 의한 것으로 예측된다. 두 작동유체는 비공비(Non-azeotrope)

물질로서 25°C에서 액체의 밀도가 나프탈렌은 약 975 kg/m³, FC-40 은 1870kg/m³ 로 나프탈렌에 대한 FC-40 의 비중이 약 2 에 이르러 비혼합 상태이다. 포화온도 또한 서로 다르기 때문에 비등과 응축과 관련된 그 동안의 작동조건과는 매우 상이하며 향후 이에 대한 엄밀한 실험과 고찰이 필요한 것으로 판단된다.

5. 작동 유체의 열전달 성능

Fig. 7 은 세 가지 작동유체로 실험한 자료를 이용하여 증발부 열유속에 대한 증발부 열전달 계수를 나타낸 것이다. 열유속 증가에 따라 열전달 계수도 증가하며 고열유속 범위에서 FC-40 의 증가율이 상대적으로 큰 것으로 파악되나 3 가지 모두 증가율이 비교적 일정한 것으로 판단된다. 그림에서 열유속 10000-50000W/m² 실험범위에서 나프탈렌은 2000-4000W/m²K, FC-40 의 경우는 700-3000W/m²K 의 값을 보이므로 동일 열유속에서 나프탈렌이 FC-40 에 비하여 약 1.5-2 배 큰 값을 나타내고 있다. 2 성분 유체 열사이폰의 경우는 두 가지 작동유체의 평균 열전달 계수인 1,000-4,000W/m²K 의 값을 나타내고 있다.

Fig. 8 은 응축부에서의 열유속에 대한 열전달 계수를 나타낸 그림이다. 나프탈렌과 FC-40 의 경우 열유속 증가에 따라 열전달 계수도 증가하는 경향을 보이나 나프탈렌의 경우가 열유속 증가에 대한 열전달 계수 증가율이 크게 나타나고 있다. 실험범위에서 나프탈렌은 200-300W/m²K, FC-40 의 경우는 300-400W/m²K 의 값을 보임으로써 증발부에 비하여 상대적으로 열전달 계수 값이 매우 낮으며 증발부와 다르게 나프탈렌이 FC-40 에 비하여 낮은 값을 보이고 있다. 2 성분 유체 열사이폰의 경우는 250-600W/m²K 의 값을 보이고 있으며 열유속 증가에 따른 열전달 계수 값이 증가 또는 감소하는 두 가지 경향을 동시에 보이며 산포되어 있다. 이러한 결과는 앞의 응축부 온도 분포에서 보는 것과 같이 응축부 벽의 온도가 나프탈렌 용융온도에 도달하는가 여부에 따라 달라지는 것으로 판단된다.

Fig. 9 는 열부하에 따른 열사이폰의 총 열저항을 나타낸 것으로 3 가지 작동유체에 따른 열사이폰의 종합적인 열전달 성능을 보여준다. 열저항은 증발부 평균 온도와 응축부 평균 온도와 차를 공급 열부하로 나눈 값이다. 3 가지 작동유체의 열저항은 실험 범위에서 약 0.17-0.07K/W 의 값을 나타내었으며, 열부하 증가에 따라 감소하는 경향을

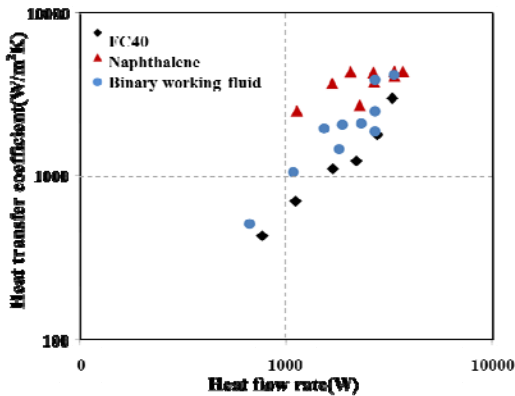


Fig. 7 Heat transfer coefficient at evaporator according to heat load

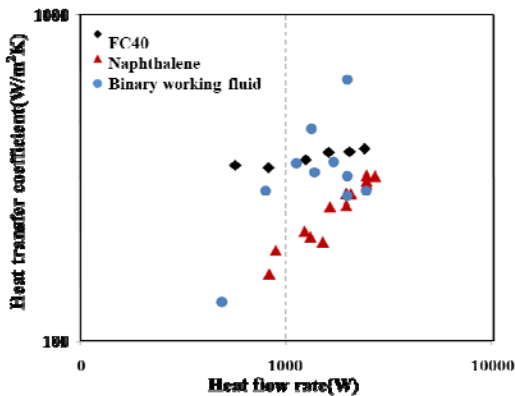


Fig. 8 Heat transfer coefficient at condenser according to heat load

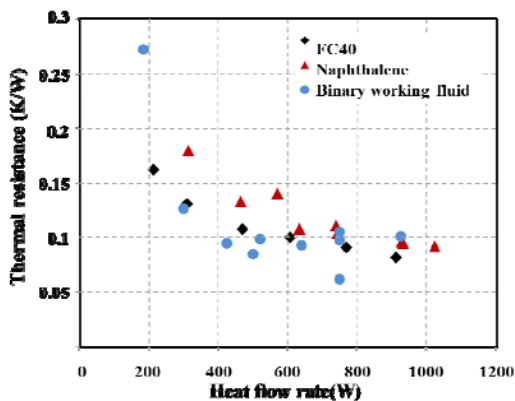


Fig. 9 Thermal resistance versus heat load

보이고 있다. 3 가지 작동유체 중 나프탈렌이 전열 부하 범위에서 가장 높은 열저항을 나타내며, 이는 응축부의 응축 열저항이 상대적으로 크기 때문이다. 다음으로 FC-40, 2 성분 유체의 순으로 낮은 값을 보이고 있는데 2 성분 유체의 경우는 열전달 율에 따라 산포가 크게 나타나고 있다. 시동특성과 함께 이러한 결과를 보다 엄밀하게 이해하기 위해서는 2 성분 유체 열사이폰의 비등 및 응축, 2

상 유동에 관한 많은 연구가 필요한 것으로 판단 된다.

6. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 나프탈렌은 용융점이 약 80°C로 상온에서 고체 상태이므로 열사이폰에 열부하가 가해지는 시동 초기 증발부에서의 용해과정 및 응축부에서의 재응결에 따라 시동 불안정성이 나타났으나, 나프탈렌과 FC-40 을 혼합한 2 성분 유체 열사이 폰은 시동초기 FC-40 의 열전달에 의하여 시동 불 안정성이 나타나지 않았다.

(2) FC-40 열사이폰은 나프탈렌에 비하여 상대적으로 낮은 비등 열전달 계수를 보이며 응축부 끝 단으로 온도강하가 나타나나 응축 열전달 계수는 나프탈렌에 비하여 높은 값을 나타냈다.

(3) 2 성분 유체 열사이폰은 실험의 열부하 범위 에서 비등 및 응축 열전달 계수 값이 대체적으로 두 유체의 중간 값을 나타내었다. 이러한 결과에 따라 총 열저항은 나프탈렌, FC-40, 2 성분 유체 순 으로 감소하는 결과를 나타냈다.

(4) 본 연구에서는 2 성분 작동유체의 충전율과 체 적비의 영향에 대한 실험을 수행하지 않았으나 향후 관련 변수에 대한 실험이 추가적으로 필요하다.

후 기

본 연구는 중소기업청 기술혁신개발 사업 ‘과급 연소기 및 상변화 열전달식 고전도율 스텐레스 용 기를 적용한 조리기구 개발’과제 연구비 지원으로 수행되었음. (과제 번호: S2043052)

참고문헌 (References)

- (1) Kim, J. M., Han, S. H. and Baek, S. H., 1997, "Comparison of Aluminum Leaching from Cooking Utensils During Cooking," *Journal of Food Sci. Tech.*, pp. 613~617.
- (2) Jung, T. S. and Kang, H. K., 2013, "Experimental Study on Heat Transfer Characteristics for Materials of Large Cauldron," *Proceedings of KSPE Conference, Spring*, pp. 933~934.
- (3) Park, K. H., Lee, Y. S., Ra, H. S. and Chung, W. B., 2006, "An Experimental Study on the Operating Characteristics of the Naphthalene and Dowtherm Heat Pipe" *Proceedings of KSME Conference, spring*, pp.1966~1971.

- (4) Lee, Y. S., Park, K. H., Ra, H. S., Chang, K.C. and Kang, H. K., 2005, "Study on the Working Fluid Characteristics of Medium Temperature Heat Pipe," *Proceedings of SAREK Conference, winter*, pp.687~692.
- (5) Hong, S. E. and Kang, H. K., 2006, "A Study on the Chilling Start-up Characteristics and Performance of a Gas Loaded Heat Pipe," *Journal of SAREK*, Vol. 18 No.11, pp. 915~922.
- (6) Jung, E. K., Boo, J. H. and Chung, W. B., 2003," An Experimental Study of a Heat pipe Binary Mixture Working Fluid for Solar Collector" *Proceedings of KSME Conference, fall*, pp.13~18.