

# 원판형 히트파이프의 응축부 온도 특성에 관한 실험적 연구

부준홍\* · 정원복\*\* · 김태규\*\*\*

## A Study on the Condenser Temperature Characteristics of a Disk Type Heat Pipe

Boo, Joon-Hong, Chung, Won-Bok, and Kim, Tae-Gyu

**Key Words:** disk type heat pipe, hot plate, PFC, FC40, screen mesh, temperature difference, temperature fluctuation, standard deviation

### Abstract

An experimental study was conducted to investigate an isothermal characteristics of the condenser surface of disk type heat pipe using PF 5060 and FC 40 as working fluids. Desired temperature range at the condenser surface was 90°C~130°C, which was cooled by natural convection. The operating temperature, the height of vapor space, the wall thickness of condenser, and the existence of a wick structure were considered as experimental factors. The temperature difference and the temperature fluctuation at the condenser surface were analysed to describe the performance of the heat pipe.

### 1. 서론

가장 일반적인 heat pipe의 단면 형태는 원형이지만, 특수 목적과 용도에 따라 그 단면을 3각, 4각 등 다양한 형태로 제작할 수 있다. 한편, 평판형 히트파이프의 형태는 위 아래의 면 사이에 급속한 열전달을 이루거나, 국부적인 과열 없이 평면 전체에 열부하가 균일하게 분포되도록 하는 용도로 사용된다.

특별한 한 용도로 원판형 가공물 전체가 가능한 적은 온도차를 유지하며 가열되어야 하는 공정도 있다. 통판으로 제작된 disk형 hot plate를 사용하면 고체 구조물을 통한 두께 방향의 열전도 과정에서 열적 소산으로 인해 어느 정도의 등온화 효

과를 이룰 수는 있지만, 이것으로 만족스럽지 못한 정밀 가공 또는 공정에서는 동일한 두께에서 heat pipe의 원리를 적용하는 것이 등온화 조건을 형성 하는데 효과적일 것으로 기대된다.

본 연구는 heat pipe식 원리를 적용하여 제작된 disk형 hot plate의 등온화 성능을 향상시키는 방법을 조사하는데 그 목적이 있다. 온도차 및 온도 요동 발생의 원인으로는 불균일한 재료 특성, 내부 작동 유체의 불균일한 응축 및 유동, noise 또는 열전대 간의 간섭, 냉각면 상부에서의 자연대류 등 중에서 하나 또는 복합적인 것으로 추정할 수 있다. 본 연구에서는 실험계획법을 적용함으로써 주요 인자들에 대한 체계적인 실험을 통해 보다 정확한 원인을 파악하고자 하였다<sup>(1)</sup>.

히트파이프의 원리를 이용한 hot plate에서 등온화를 위주로 한 열적 성능에 영향을 미치는 설계 변수로는 벽 재료 및 작동유체의 종류, 응축부 및 가열부 내면의 형상(워구조), 고체 벽의 두께, 내부 공간의 높이, 작동유체 충전량 등을 고려하여 이들의 변화를 주어 실험을 수행하였다. 축적된 실험

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\* 한국항공대학교 항공공학과 대학원

\*\*\* 삼성중합기술원 CSE Lab

자료는 가열면의 등은 편차(불균일도)를 예측하여 향후 히트파이프식 hot plate의 설계 방향을 제시할 수 있도록 하였다.

## 2. 실험 계획 및 실험 장치 구성

### 2-1 실험계획

원판형 히트파이프 성능에 영향을 미치는 모든 인자들에 대하여 다양한 인자 수준으로 실험하는 것은 한정된 시간과 예산으로 불가능하다. 인자 수준을 변경하기 어려운 것들이 있고, 인자 수준을 3수준 이상으로 하는 경우 요구되는 실험 회수가 커지게 된다. 따라서, 인자 수준을 2수준으로 고정된 상태로 작동온도(90℃, 130℃), 작동유체량(10%, 20%), 작동유체 종류, 증기 공간 높이(5mm, 4mm), 응축부 벽 두께(4mm, 2.5mm), 워 구조물(메쉬)의 유무에 대한 실험을 실시하였다.

작동유체의 종류는 히트파이프의 성능에 큰 영향을 미친다<sup>(2)</sup>. 본 연구에서는 작동유체와 히트파이프 용기간의 공존성(compatibility)을 우선하여 작동온도 범위에 따른 각종 물성치는 물론 작동 압력, Figure of Merit 등을 고려하여 Perfluorocarbon 계열의 작동유체인 PF5060(FC72)와 FC40을 사용하였다. 이 작동유체는 작동온도 범위가 넓고, 독성이 없으며 불연성이고 전기적인 절연성이 우수하여 전기 및 전자제품의 냉각에 일부 사용되고 있다.<sup>(3)</sup>

실험 결과로 얻어지는 특성치는 온도차와 온도요동으로 고정하였다. 온도차는 정상상태에서 응축부 외벽에서 측정된 온도들의 일정 시간 동안 평균값 중에서 최고 온도와 최저 온도와 차이로 정의하고 다음 식으로 표현한다.

$$T_{diff} = \bar{T}_{max} - \bar{T}_{min} \quad (1)$$

온도요동은 정상상태에서 측정된 온도들의 일정 시간 동안 평균온도를 기준으로 시간별 온도차에 대한 표준편차(standard derivation or root mean square)로 정의하고 다음 식으로 표현한다<sup>(4)</sup>.

$$T_{STD} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{T} - T)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

### 2-2 실험 장치 구성

온도측정을 위해서 열전대(T-type thermocouple, AWG36, OMEGA사) 21개를 고온 고전도도 접착제를 이용하여 silicon 피가열체 표면에 부착하였다. 자료획득장치로는 HP75000을 사용하였으며, PC에서는 LABTECH NOTEBOOK 프로그램을 이용하여 1초 간격으로 21채널의 온도를 측정하고 그 자료를 저장하였다. Fig. 1에 피가열체에 부착된 열전대의 위치를 나타내었다. 그림에 표시된 9개의 island는 히트파이프의 상판과 하판의 연결을 위해 필요한 구조물의 일부분이다. 온도 측정에 사용된 열전대는 시편에 부착된 채로 0℃ 얼음물과 100℃ 끓는 물에서 보정하였다. 0℃에서 최대 오차는 0.35℃, 100℃에서 최대 오차는 0.91℃이었다.

원판형 히트파이프를 아래로부터 가열하기 위해서 상용 silicon rubber heater(직경 240 mm, 550W at 220V)를 이용하였다. 온도제어기를 150℃로 설정하고 정상상태에서의 히터의 온도를 측정된 결과 중심에서 최대온도 152.9℃, 좌측 아래 부분에서 최소온도 151.7℃로 동일 평면에서 최대 1.2℃의 차이를 보였다.

실험장치의 구성은 Fig.2에 보여진 바와 같다. 우선 원판형 히트파이프 밑에 silicon rubber 히터를 위치시키고 히트파이프 상판 외벽에 열전대가 부착된 피가열체를 올려놓았다. 히터는 전압조절기에 연결하여 히트파이프에 가하는 입력 열부하를 제어할 수 있게 하였다. 히트파이프의 원주 둘레는 단열재(ceramic wool)로 단열하여, 하부의 히터에서

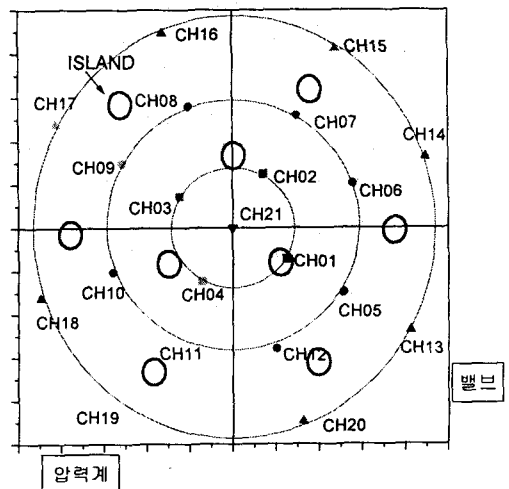


Fig. 1 Locations of thermocouples and islands

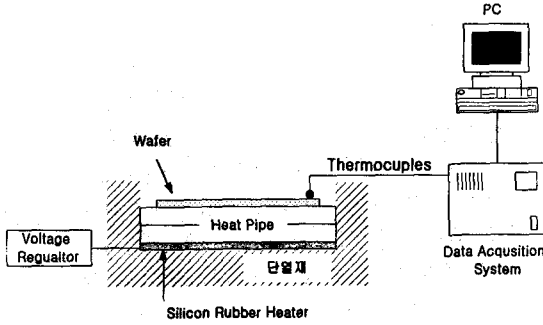


Fig. 2. Experimental set up

에서 히트파이프를 통해 상부의 가열면으로 전달되고, 피가열체 면에서 외부 공기로의 열전달은 자연 대류로 이루어지게 하였다.

실험은 작동유체 충전율을 내부 총체적에 대한 작동 유체량 비율로서 10%에서 20%까지 변화시키고, 피가열체 온도가 90℃ 내외와 130℃ 내외가 되도록 온도제어기를 이용하여 수행하였다. 모든 실험에서 피가열체는 히트파이프 상판에 부착된 상태이었다. 이때 작동온도는 90℃와 130℃로 표시하였지만 실제로 온도 분포에서는 5~10℃ 정도의 변화 폭에서 정상상태를 이룰 때 온도를 측정하였다. 온도차는 21개 채널에 대하여 각각 1분간 평균을 낸 온도의 최대 값과 최소 값의 차이이다. 온도 요동의 척도로 표현하는 표준편차(STD)는 여러 채널중 최대 값을 택하여 표현하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 원판형 히트파이프 상판의 내부 모습이다. 전체 직경 240mm, 전체 두께가 8mm, 깊이가 4 mm이다. 외주 부근에 16개의 나사 구멍이 있고, 내부 공간에 9개의 island들이 존재한다. 빗금친 부분은 O-ring이 들어가는 위치이다. 상판에 밸브를 부착하여 작동유체량을 변화시킬 수 있게 하였고, 압력계를 부착하여 히트파이프의 작동상태를 확인할 수 있게 하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

앞서 실험인자로 언급된 것 중 히트파이프의 내부 증기 공간 높이 및 상판 두께 변화에 따른 영향을 조사하기 위해 3가지 모델을 제작하였다. 선정된 모델의 주요 치수는 Table 3-1과 같다.

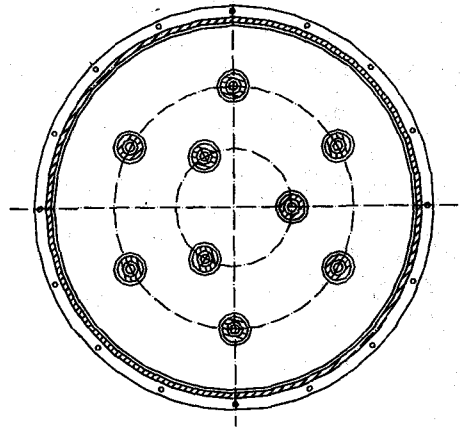


Fig. 3. Upper part of the disk type heat pipe.

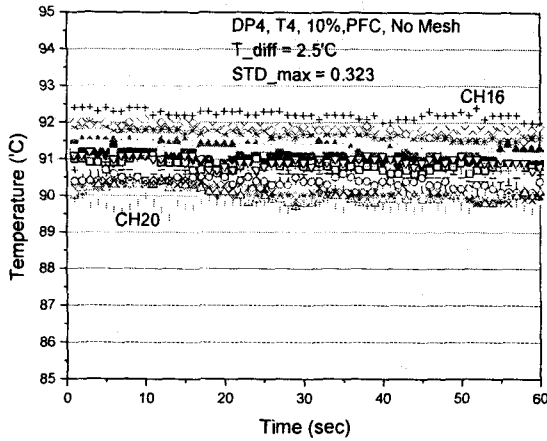
실험 결과 얻어지는 반응치인 온도차와 온도요동에 대한 분석은 결과를 단순하면서도 명확하게 보기 위하여 실험계획법의 분석방법을 이용하여 2인자 2수준으로 분석하였다.

Table 1. Specifications of Experimental Models

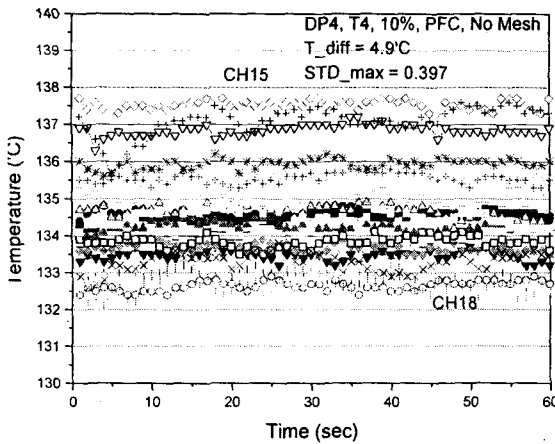
모델	증기공간 높이 (DP)	상판 두께 (T)
1	4 mm	4 mm
2	5 mm	4 mm
3	5 mm	2.5 mm

#### 3-1. 모델 1(DP= 4 mm, T= 4 mm)의 실험 결과

작동유체가 PF5060이고 내부에 메쉬가 없는 경우 온도차에 미치는 영향은 작동 유체량 증가(10% → 20%)로 인해 +1.3℃, 작동온도 상승(90℃ → 130℃)으로 인해 +3.4℃로 나타났다(Fig. 4. 참조). 즉, 작동유체량보다는 작동온도가 온도차 발생에 더 큰 영향을 주었다. 온도요동에 미치는 영향은 작동온도 상승으로 인해 +0.105로 나타났으나, 작동 유체량 증가가 온도요동에 끼치는 영향은 -0.003으로 무시할 정도이다. 작동유체량과 작동온도의 교호작용에 의한 영향은 온도차에 +1.0℃, 온도요동에 +0.031로 그 영향이 각각의 인자에 의한 영향보다 적게 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 4. PF5060 10%(13.5cc), 메쉬가 없는 경우의 온도분포 (a) 90°C부근 작동 (b) 130°C부근 작동

이상의 결과로부터, 모델 1에서는 작동유체로 PF5060을 사용하고 메쉬가 없을 경우 작동유체량은 적게, 그리고 작동온도는 낮게 해야 온도차와 온도요동을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

작동유체가 PF5006이고 내부에 메쉬가 삽입된 경우에 온도차에 미치는 영향은 작동 유체량 증가(110%→150%)로 인해 -0.7°C, 작동온도 상승(90°C→130°C)로 인해 +2.6°C로 나타났다. 메쉬가 삽입된 경우에도 작동 유체량보다는 작동온도가 온도차에 더 큰 영향을 끼치고 있으나 작동유체량 증가의 효과는 메쉬가 없는 경우와는 반대로 성능을 향상시키는 결과를 보였다. 온도요동에 미치는 영

향은 작동유체량 증가로 인해 -0.013, 작동온도 상승으로 인해 +0.083으로 나타났다. 즉, 모델 1에서 작동유체로 PF5060을 사용하고 메쉬가 있는 경우, 작동유체량을 증가시키거나, 작동온도를 낮게 해야만 온도차와 온도요동을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그러나 작동 유체량 증가에 의한 온도요동의 감소 효과는 상대적으로 작았다.

작동유체가 FC40이고 내부에 메쉬가 없는 경우에 온도차에 미치는 영향은 작동유체량 증가(10%→20%)로 인해 -0.7°C, 작동온도 상승(90°C→130°C)로 인해 +2.8°C로 나타났다. 한편, 온도요동에 미치는 영향은 작동유체량 증가로 인해 -0.016, 작동온도 상승으로 인해 +0.176으로 나타났다. 즉, 모델 1에서 작동유체로 FC40을 사용하고 메쉬가 없는 경우 작동유체량을 증가시키거나, 작동온도를 낮게 하여야만 온도차와 온도요동을 줄일 수 있다. 이는 PF5060에 메쉬를 사용하였을 때의 경향과 동일하였다.

작동유체가 FC40이고 내부에 메쉬가 있는 경우에 온도차에 미치는 영향은 작동 유체량 증가(110%→150%)로 인해 +0.8°C, 작동온도 상승(90°C→130°C)로 인해 +1.5°C로 나타났다. 온도요동에 미치는 영향은 작동 유체량 증가로 인해 -0.036, 작동온도 상승으로 인해 -0.031으로 나타났다. FC40을 작동유체로 사용하고 메쉬를 삽입하는 경우 작동유체량 증가와 작동온도 상승에 의한 온도요동 영향이 -효과로 나타나지만 그 효과가 미미하였다. 즉, 모델 1에서 작동유체로 FC40을 사용하고 메쉬가 있는 경우 작동 유체량을 감소시키고, 작동온도를 낮게 하여야만 온도차를 감소시킬 수 있으나, 온도요동에는 별로 영향이 없다고 할 수 있다.

모델 1에 대한 실험 결과를 종합하면, 반응치인 온도차와 온도요동은 작동유체량 보다는 작동온도에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 작동유체 충전율 20%에서 PF5060과 FC40에 의한 영향을 분석해 보면 FC40을 작동유체로 사용함으로써 온도차는 -0.5°C, 온도요동은 -0.058의 성능 향상 효과를 볼 수 있다. 또한 작동온도에 따른 포화 증기 압력관계를 볼 때 130°C부근에서 PF5060은 8기압인데 비해 FC40은 부압 상태이므로 FC40을 사용하면 히트파이프가 구조적으로 안정하다는 장점을 갖는다.

메쉬의 삽입으로 인한 영향을 분석해보면, 작동유체로 PF5060을 사용하는 경우 온도차는 -0.4°C

그리고 온도요동은 -0.157라는 성능 향상 효과를 나타내고 있다. 즉, 메쉬를 사용하면 온도차가 미소하지만 감소하고 온도요동은 상대적으로 큰 효과가 있었다. 한편, FC40을 작동유체로 사용할 때 메쉬를 삽입하면 온도차는 -0.5℃로 미소하게 감소하는 효과가 있었다. 온도요동은 +0.076으로 증가하였으나 그 값이 미미하여 작동유체에 무관하게 메쉬를 사용하는 것이 바람직함을 알 수 있었다

### 3-2 모델 2(DP= 5 mm, T= 4 mm)의 실험 결과

작동유체를 FC40으로 고정하여 작동유체의 충전율과 작동온도의 변화 및 메쉬 삽입의 영향을 파악하고자 수행한 실험이다. 모델 1과의 차이는 내부 증기 채널 높이가 4 mm에서 5 mm로 1 mm 증가하였으며, 이에 따라 내부 체적이 증가하였으므로, 내부 체적 비율로 작동유체량을 산정하는 경우 실제 주입되는 양에 차이가 발생했다.

히트파이프 내부에 메쉬가 없는 경우 온도차에 미치는 영향은 작동 유체량 증가 (10%~ 20%)로 인해 -0.4℃, 작동온도 상승(90℃~ 130℃)로 인해 +2.4℃로 나타났다. 온도 요동에 미치는 영향은 작동 유체량 증가로 인해 +0.135, 작동온도 상승으로 인해 +0.128로 나타났다. 모델 1의 경우와 달리 작동 유체량이 온도 요동에 끼치는 영향이 작동온도에 의한 영향보다 크게 나타났다.

히트파이프 내부에 메쉬가 있는 경우 온도차에 미치는 영향은 작동 유체량 증가 (10%~ 20%)로 인해 +0.5℃, 작동온도 상승(90℃~ 130℃)로 인해 +2.1℃로 나타났다. 온도 요동에 미치는 영향은 작동유체량 증가로 인해 +0.094, 작동온도 상승으로 인해 +0.045로 나타났다. 온도요동에 미치는 영향은 +효과로 모델 1의 경우와 반대되는 결과가 나왔지만 그 영향이 미미하였다.

한편, 작동유체량을 총체적의 20%로 하여 메쉬가 없는 경우와 메쉬를 삽입한 경우에 대한 결과를 분석해보면 메쉬를 삽입함으로써 온도차는 -0.5℃, 온도요동은 -0.116으로 모델 1과 같은 경향으로 메쉬를 삽입한 경우에 성능이 향상되는 결과가 나타났다

### 3-3 모델 3(DP= 5 mm, T= 2.5 mm)의 실험 결과

모델 2의 경우와 같이 작동유체는 FC40으로 고

정한 상태에서 실험을 하였다. 작동 유체량, 작동 온도 및 메쉬 삽입에 의한 영향을 조사하였다. 작동유체 충전량은 모델2와 같다.

히트파이프 내부에 메쉬가 없는 경우 온도차에 미치는 영향은 작동유체량 증가 (10%~ 20%)로 인해 -0.2℃, 작동온도 상승(90℃~ 130℃)으로 인해 +2.6℃로 나타났다. 온도 요동에 미치는 영향은 작동유체량 증가로 인해 +0.024, 작동온도 상승으로 인해 +0.119로 나타났다. 모델 2와 마찬가지로 작동온도가 주된 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다 (Table 2 참조). 이들의 영향을 식으로 표현하면 식(3) 및 (4)와 같은 형태가 된다.

Table 2. 작동유체 FC40, 내부 메쉬가 없는 경우의 결과

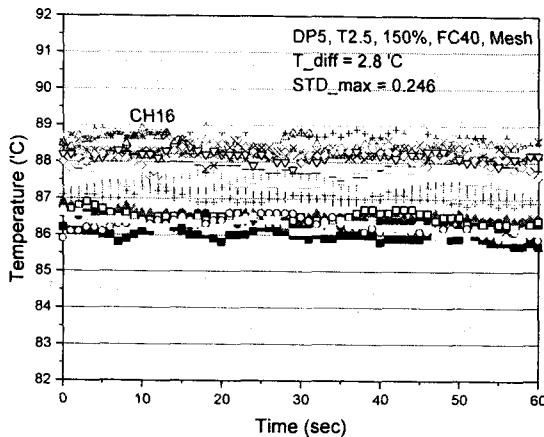
실험인자	특성치				분석 결과		
	충전율, %	작동 온도 ℃	온도 차 ℃	STD_max	인자별 효과	온도 차 ℃	STD_max
1	10 (17cc)	90	3.0	0.144	평균	4.05	0.230
2	10 (17cc)	130	5.3	0.291	작동유체량A	-0.2	0.024
3	20 (34cc)	90	2.5	0.196	작동온도 B	2.6	0.119
4	20 (34cc)	130	5.4	0.287	AB	0.3	-0.028

$$\text{온도차} = 4.05 - 0.2 * \text{작동유체량} + 2.6 * \text{작동온도} + 0.3 * \text{작동유체량} * \text{작동온도} \quad (3)$$

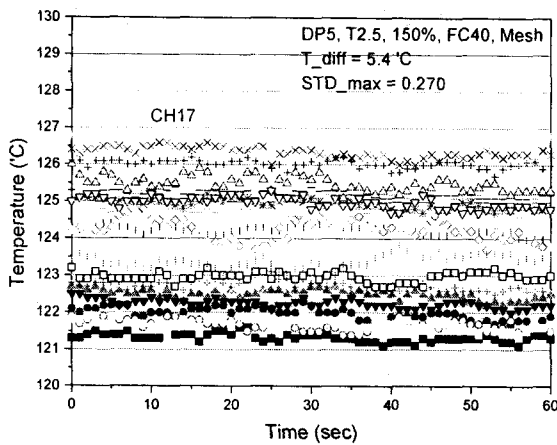
$$\text{STD} = 0.230 + 0.024 * \text{작동유체량} + 0.119 * \text{작동온도} - 0.028 * \text{작동유체량} * \text{작동온도} \quad (4)$$

히트파이프 내부에 메쉬가 있는 경우 온도차에 미치는 영향은 작동유체량 증가 (10%~ 20%)로 인해 -0.5℃, 작동온도 상승(90℃~ 130℃)으로 인해 +2.4℃로 나타났다. 온도 요동에 미치는 영향은 작동유체량 증가로 인해 -0.043, 작동온도 상승으로 인해 +0.093로 나타났다. 온도요동에 미치는 영향은 작동유체량이나 작동온도나 모두 미미하였다.

한편, 작동유체량을 총체적의 20%로 하여 메쉬가 없는 경우와 메쉬를 삽입한 경우에 대한 결과를 분석해보면, 메쉬를 삽입함으로써 온도차는 +0.3℃, 온도요동은 -0.025으로서 모델 2에 비하면 메쉬 삽입에 의한 영향이 적게 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 5. FC40 150% (16.3cc), 메쉬가 있는 경우의 온도 분포 (a) 90°C 부근 작동 (b) 130°C 부근 작동

#### 4. 결론

원판형 히트파이프에서도 일반적인 히트파이프에서와 마찬가지로 최선의 성능을 내기 위해서는 최적의 작동 유체량을 추천하고, 히트파이프 용기의 벽 두께를 얇게 하며, 증발부와 응축부에서의 액체상태의 작동유체가 고르게 액막을 형성되도록 해야 한다.

작동유체는 온도에 따라 열전달 특성이 변화한다는 사실을 고려하여 작동 온도 범위에 적합한 작동유체를 선정해야 한다. 작동유체로 PF 5060와 FC40을 고려할 때 본 연구에서 고려한 적용도에는

FC40의 물성이 PF 5060보다 우수하다는 것을 실험 결과로 확인할 수 있었다. PF 5060의 경우 임계점이 178°C로서 예상 작동온도인 135°C 부근에서 멀지 않으나, FC 40의 경우는 작동온도보다 훨씬 높은 270°C 부근이며, 비등점도 높다. 액체의 비등은 열전달 효과를 증가시키기는 하지만, 액적의 분산이 발생하고 냉각면에 형성된 액적의 국부적 과냉이 발생할 가능성이 있으므로 1°C 미만의 등온 효과를 중시하는 히트파이프의 적용도에서는 비등-응축의 mode 보다는 증발-응축 mode가 바람직하다고 할 수 있다. 가시화 실험에서 확인한 바 FC 40의 경우는 히트파이프의 작동 상한 온도에서도 증발-응축 mode로 작동함으로써 등온 성능의 향상을 가져왔다고 할 수 있다.

히트파이프 내벽에 작동유체가 고르게 분포되도록 하기 위해 스크린 메쉬를 삽입한 경우 히트파이프 성능 향상에 도움이 되었다. 최적의 작동 유체량에 있어서는 PF 5060인 경우 20%와 10%간의 성능차가 컸으나 FC40인 경우 20%와 10%간의 성능차이는 크지 않았다. 히트파이프가 고온으로 상승하면 주위와의 열교환을 이루면서 응축부 영역 내에서 온도차가 커지게 된다. PF 5060인 경우 온도차가 커지면서 온도요동도 크게 증가하였으나, FC40인 경우 온도차는 증가하지만 온도요동에는 영향이 적었다. 가시화 실험에서도 확인하였지만 150°C 이내에서는 안정적으로 작동하기 때문에 온도요동에 영향을 적게 끼친다.

한편, 상판 두께가 얇은 히트파이프에서 등온 성능이 더 좋게 나타났다.

#### 참고 문헌

1. 박성현, 1995, 현대실험계획법, 민영사, pp.347-365
2. Dunn, P.D. and Reay, D.A., *Heat Pipes*, 4th ed., 1994, Pergamon Press, pp.27-96
3. Lock, G.S.H., 1992, *The Tubular Thermosyphon*, Oxford University Press.
4. Holman, J.P., 1994, *Experimental Methods for Engineers*, 6th ed., McGraw-Hill, pp.287-293
5. Montgomery, D.C., 1997, *Design and Analysis of Experiments*, 4th ed., John Wiley and Sons.