

태양열 집열기용 히트파이프의 열전달 특성에 대한 해석

김 병 기[†], 정 경 택, 배 찬 효, 서 정 세*

경상대학교 대학원, *경상대학교 기계항공공학부

Analysis of the Heat Transport Capacity of a Axial Grooved Heat Pipe for Solar Collector

Byoung-Gi Kim[†], Kyung-Taek Chung, Chan-Hyo Bae, Jeong-Se Suh*

Graduate School of mechanical and aerospace engineering and ReCAPT, GyeongSang Nat' l Univ., Jinju 660-701, Korea

*School of mechanical and aerospace engineering and ReCAPT, GyeongSang Nat' l Univ., Jinju 660-701, Korea

ABSTRACT : This study is aimed to analyze the effects of heat pipe shape on the heat transfer in solar collector with a axial grooved heat pipe. In the design of a heat pipe, two of the most important criteria to be met are the operating temperature range and the maximum heat transport capacity. When the operating temperature range is known and the working fluid has been selected, the maximum heat transport capacity depends strongly on capillary pressure and liquid flow. The heat transport capacity of the heat pipe will depend on the geometry of the heat pipe, the wick structure, the vapor channel shape, groove number, cooling temperature, condenser length and pipe diameter. So various shapes are used for mathematical models of two-phase flow in grooved heat pipe. From the results, the adequate groove shape and scale are presented by considering the heat transport and capillary limitation.

Key words : Rectangular groove(직사각형 그루브), Triangular groove(삼각형 그루브), Heat transport rate(열전달률), Capillary limitation(모세관한계)

기 호 설 명

d_o : 히트파이프 외경
 h : 그루브 높이
 L_c : 응축부 길이
 N : 그루브 개수

$P_{cm,e}$: 최대 모세관압력
 ΔP_{\perp} : 축과 수직으로 작용하는 압력강하 항
 r_c : 유효 모세관 반경
 R : 곡률 반경
 $T_{c,w}$: 응축부 주변 온도
 w : 그루브 폭

† Corresponding author

Tel.:+82-55-751-5312;fax:+82-55-757-5622

E-mail address: jssuh@gsnu.ac.kr

그리스 문자

α : 삼각형 그루브 꼭지각

β : 그루브 옆벽과 밑면이 이루는 각
 σ : 표면장력

1. 서론

국민 경제의 향상에 따라 국민들의 에너지 수요는 점점 증가되는 경향으로 나아가고 있으나, 국내 주요 에너지원인 석유는 전량 외국에 의존하고 있어 불안정한 국제 정세에 따라 가격의 급등과 함께 수급조차 불안정해지고 있다. 이에 따라 에너지 대체방안인 태양열, 풍력, 지열 등의 개발 및 기존 에너지의 효율적인 사용이 큰 관심을 모으고 있다. 태양열 온수난방 설비는 여러 형태로 개발보급 되어 왔으나 아직은 몇 가지 이유로 해서 그 사용 가치에 대한 인식이 부족한 실정이다. 이의 해소를 위한 일환으로 히트파이프를 채용한 태양열 집열기를 연구 개발 중에 있다.

히트파이프는 밀폐된 내부에 충전된 작동유체가 연속적으로 액체-증기의 상변화를 수행하면서 발생하는 잠열을 이용하여 열을 이동시킴으로써, 단일 상(phase)의 작동유체를 이용하는 통상적인 열전달 기구에 비하여 높은 열전달 성능을 나타낸다. 히트파이프의 기본적인 구조는 밀폐용기, 작동유체와 용기내부의 워(wick)으로 이루어져 있으며 여러 요소들이 히트파이프의 성능에 영향을 미치므로 각 변수들의 상관관계를 통해 히트파이프를 설계하는 것은 매우 중요한 일이다.

히트파이프의 설계과정은 다음과 같이 문제의 설정, 작동유체의 선정, 워 및 벽 재료의 선택, 워 구조의 선택, 설계이론의 적용 그리고 최적해의 선택 및 평가 등의 과정으로 요약될 수 있다.

특히, 워의 구조를 선택할 때 단순 워의 경우는 공식화된 법칙이 없으므로 각 요구 조건에 맞게 적절히 설정하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 저온용 태양열 집열기용 히트파이프의 해석을 위해 히트파이프의 성능에 영향을 미치는 여러 가지 변수, 그루브 형상, 그루브 개수, 히트파이프 기울기, 냉각수 온도, 응축부 길이 및 외경 등을 변화 시키면서 열전달률 및 작동한계에 대해 해석하여 보고 이런 변수들이 히트파이프의 열전달 성능에 어떠한 영향을 미치는지 알아보고자 한다.

2. 이론 및 계산 방법

2.1 기본 이론

히트파이프는 연속적인 동작을 위해서 응축부의 액체상태의 작동 유체가 증발부로 귀환해야 한다. 히트파이프는 이를 위해 다른 외부 동력원을 필요로 하지 않으며 워에서의 모세관압력이 작동 유체를 증발부로 이동시키는 동력원이 된다. 히트파이프는 여러 개의 작동 한계를 가지고 있지만 그 중에서 이 모세관한계가 가장 큰 비중을 차지한다.

워에서의 유효 최대 모세관 압력, $P_{cm,e}$ 은 다음과 같이 결정된다.

$$P_{cm,e} = \frac{2\sigma}{r_c} - \Delta P_{\perp} = \int_{x_{min}}^{x_{max}} \left(\frac{dP_v}{dx} - \frac{dP_l}{dx} \right) dx \quad (1)$$

$$\Delta P_{\perp} = \rho g d_v \cos \psi$$

간단한 그루브의 형태로는 삼각, 직사각 2개의 그루브 형태를 고려한다. 직사각 그루브의 경우는 최대 모세관 압력의 계산에 그루브 폭의 간격을 모세관 반경으로 고려하며, 직각 이외의 단면을 갖는 그루브의 경우는 그루브 경사면의 각도를 추가적으로 고려하여 계산에 이용한다.

직사각 그루브의 경우에는 그루브의 축방향으로는 액체-증기 표면에 곡률이 없다고 가정하므로 모세관 반경의 크기가 그루브의 폭과 동일하다. 즉, $r_c = w$ 이다.

삼각 그루브의 경우는 꼭지각을 2β 라고 하면 곡률 반경 R 은 $R = w / 2\cos\beta$ 이므로 유효 모세관 반경의 관계식은

$$\frac{2}{r_c} = \frac{1}{R} = \frac{2\cos\beta}{w} \quad (2)$$

이므로, 이로부터 r_c 는 다음 식과 같다.

$$r_c = \frac{w}{\cos\beta} \quad (3)$$

2.2 계산 방법

본 연구에서 사용된 히트파이프는 내부 형상이 그루브 형상을 가지고 있는 히트파이프이며, 크기 및 규격은 Table 1과 같다. 파이프 재질은 구리, 작동유체는 물로 하였다.

히트파이프는 수평으로 작동하는 것으로 설정하여 중력의 영향을 고려하지 않았으며, 열침(heat sink)의 조건은 열전달이 원활하게 이루어지는 것으로 설정하였다. 또한 제작 상에 생길 수 있는 물리적인 조건들은 고려하지 않고 해석하였다. 기본적인 경계조건으로 증발부에서의 열전달계수는 무시하였고, 응축부에서의 경계조건으로 응축부 주변온도는 293 K, 열전달계수는 150 W/m²·K로 가정하였다.

3. 해석 결과

3.1 일정한 그루브 면적에서 형상 변화

Fig. 1은 일정한 그루브 면적, 즉 동일한 유량에 대한 삼각형, 사각형 그루브 형상일 때의 작동온도에 따른 모세관한계를 나타낸 그래프이다.

동일한 유량에서는 모세관압력이 성능을 지배한다. 해석 결과 사각형 그루브 형상이 삼각형보다 2배 이상 더 큰 모세관한계를 가진다. 그 이유는 액체가 채워지는 유동단면적이 사각형 그루브가 크기 때문이다. 히트파이프의 워 설계과정에서 중요한 것은 작동한계에 대한 검증이다. 실제 최대 모세관압력은 유체정역학적 압력보다 두배보다 커야 된다는 사실을 감안해서 설계해야 할 것이다.

Table 1 Specification of heat pipe

Properties	Specification
Material	Copper
Working fluid	Distilled water
Pipe O.D	9.52mm
Total length	1500mm
Evaporator length	1250mm
Adiabatic length	50mm
Condenser length	200mm
Groove width	0.23mm
Groove depth	0.28mm
Number of groove	40EA
Shape of groove	Rectangular

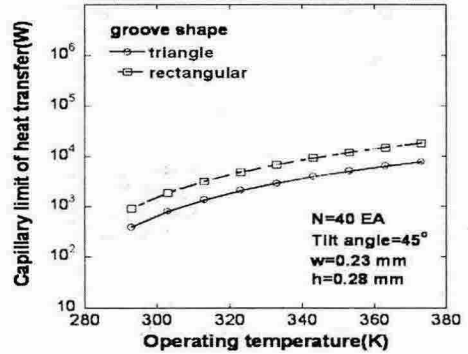


Fig. 1 Capillary limit versus operation temperature according to the groove shape

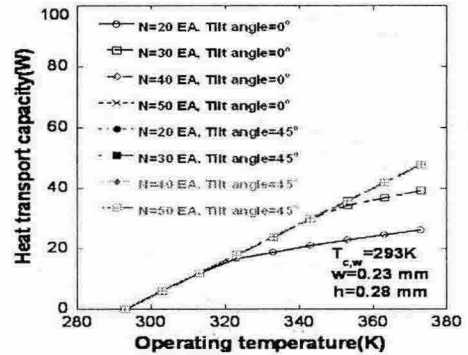


Fig. 2 Heat transport capacity versus operation temperature according to the number of groove

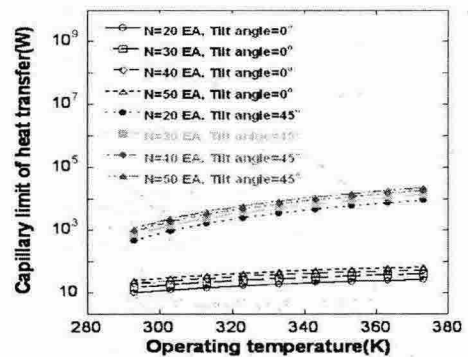


Fig. 3 Capillary limit versus operation temperature according to the number of groove

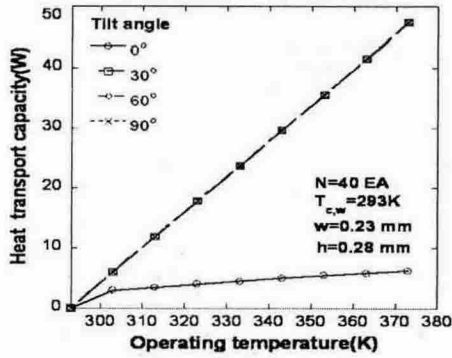


Fig. 4 Heat transport capacity versus operation temperature according to tilt angle

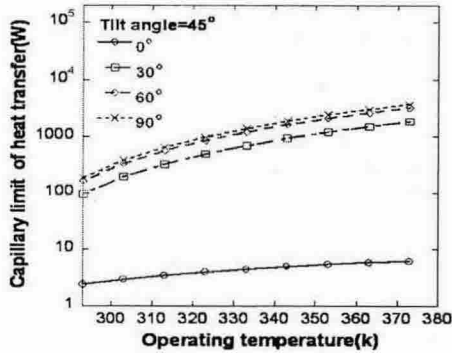


Fig. 5 Capillary limit versus operation temperature according to tilt angle

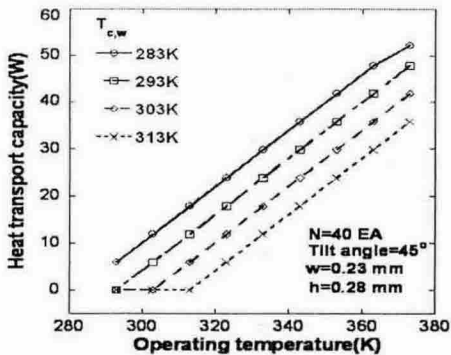


Fig. 6 Heat transport capacity versus operation temperature according to cooling temperature

3.2 사각 그루브 개수 변화

Fig. 2와 Fig. 3은 기울기가 0° , 45° 일 때 그루브 개수를 20, 30, 40, 50개 일 때 작동온도에 따른 열수송률과 모세관 한계를 나타낸 그래프이다. 한계열량은 기울기가 45° 일 때는 그루브 개수에 상관없이 일정하지만 기울기가 0° 이고 그루브 개수가 20, 30개 일 때는 한계열량이 감소하였다. 또한 모세관한계에서는 그루브 개수가 증가함에 따라 모세관한계도 증가함을 알 수 있었다. 특히 중력의 영향을 최대로 받는 0° 에서는 모세관한계가 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 해석 결과에서도 알 수 있듯이 그루브의 폭이 좁아질수록 모세관한계는 증가한다. 하지만 열전달률도 비례해서 증가하지는 않았고 그루브 폭이 증가해도 열전달률의 변화가 없는 그루브 개수가 존재 하였다. 즉 열전달률과 모세관한계의 측면에서 볼 때 그루브 개수의 영향이 있는 범위가 존재 하였고 해석상에서는 고려하지 않았지만 히트파이프 설계 시 그루브 폭과 깊이의 결정에 있어서는 제작 중에 생길 수 있는 물리적인 형상 변화도 고려해야 할 것이다.

3.2 히트파이프 기울기 변화

Fig. 4과 Fig. 5는 기울기 변화에 따른 작동온도별 열전달률과 모세관한계를 나타낸 그래프이다. 그루브형 히트파이프의 장점 중에 하나로 파이프의 위치가 자유롭다는 것인데 해석 결과 수평인 상태에서는 특별히 주의가 필요로 한다. 수평 상태에서는 중력의 의한 압력강하 값이 최대이기 때문에 모세관한계가 급격히 떨어지고 작동한계 또한 매우 작다. 해석 결과에서 볼 수 있듯이 0° 이외의 각도에서는 히트파이프가 정상 작동하였지만 0° 일 때 열전달률이 급격하게 떨어져 정상적인 작동을 하지 못하였다. 그루브형 히트파이프가 기울기에는 제한이 거의 없지만 히트파이프 설계 시 특히 0° 일 때는 반드시 이런 점을 고려하여야 할 것이다.

3.4 냉각수 온도 변화

Fig. 6과 Fig. 7은 히트파이프의 응축부 주변 온도에 따른 작동온도별 열전달률과 모세관한계

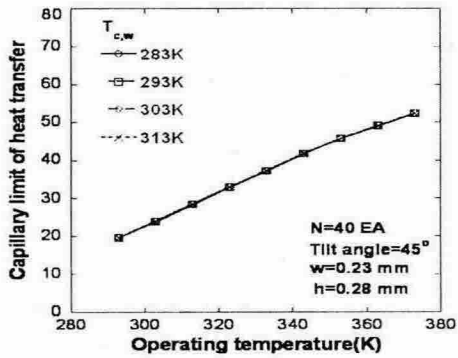


Fig. 7 Capillary limit versus operation temperature according to cooling temperature

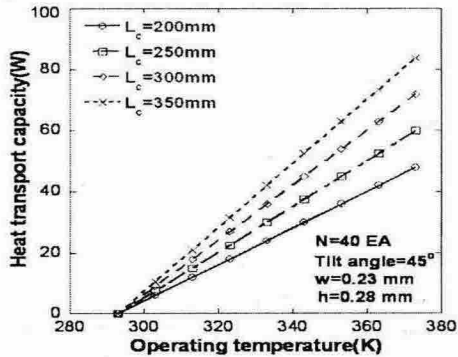


Fig. 8 Heat transport capacity versus operation temperature according to condenser length

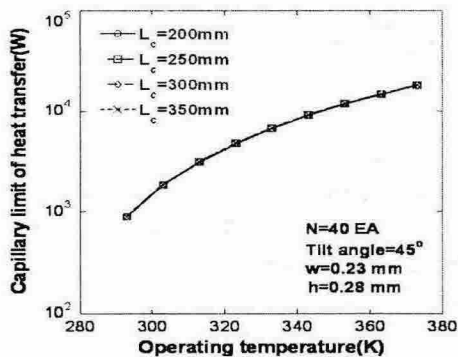


Fig. 9 Capillary limit versus operation temperature according to condenser length

를 나타낸 그래프이다. 해석결과에서와 같이 응축부 주변의 온도를 낮출수록 열전달률이 향상됨을 볼 수 있고 응축부 주변에서 열의 출입이 원활하다는 뜻이다.

3.5 응축부 길이 변화

Fig. 8와 Fig. 9은 증발부와 단열부 길이를 고정시킨 상태에서 응축부 길이를 변화시켰을 때 작동온도별 열전달률과 모세관관계를 나타낸 그래프이다. 해석 결과에서 응축부 길이가 길어짐에 따라 열전달률이 커짐을 볼 수 있다. 그러나 모세관관계는 일정하다. 응축부의 길이 증가는 응축열전달 면적을 증가시키게 되고 따라서 응축

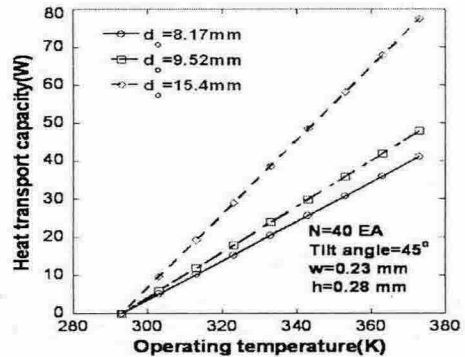


Fig. 10 Capillary limit versus operation temperature according to the heat pipe diameter

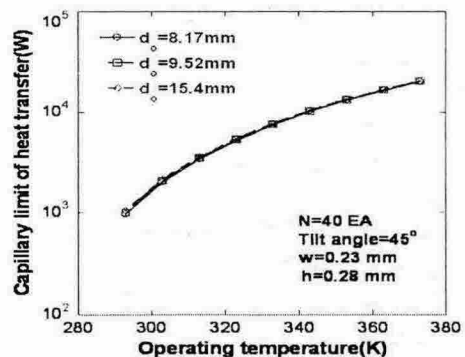


Fig. 11 Capillary limit versus operation temperature according to the heat pipe diameter

부족으로 이송 되어지는 증기의 응축량이 증가 될 수 있어 결과적으로 열전달률을 상승시키는 결과를 가져왔다.

실제 열전달률을 상승시키기 위해서 응축부 열 전달 면적을 증가시키기 위해 핀을 부착 시키거나 응축부의 길이를 늘릴 수도 있을 것이다.

3.6 파이프 외경 변화

Fig. 10와 Fig. 11은 히트파이프 외경의 변화에 따른 작동온도별 열전달량과 모세관한계를 나타낸 그래프이다. 히트파이프의 외경이 커지면 열전달량도 늘어남을 확인할 수 있다. 그리고 모세관한계는 외경의 변화에 관계없이 동일했다. 실제 히트파이프의 직경은 높은 마하수에서 증기의 유동압축이 축방향으로 높은 온도구배를 보이기 때문에 증기속도가 과도하지 않게 설계하는 것이 중요하고 또한 그루브의 개수에도 제한이 있음을 고려해야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 태양열 집열기용 히트파이프의 다양한 형상의 변화가 히트파이프의 열전달에 어떠한 영향을 미치는지 여러 가지 변수들을 변화해 가면서 해석을 하였다. 그리고 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 일정한 그루브 단면적에서 그루브 폭을 변화 시켰을 때 사각형의 단면적이 삼각형보다 더 좋은 성능을 가졌다.
2. 그루브 개수가 증가할 때 모세관압력은 증가하였지만, 한계열량은 0°를 제외하고는 변화가 거의 없었다.
3. 히트파이프 기울기 변화는 중력의 영향으로 모세관한계가 수직으로 갈수록 급격히 증가함을 알 수 있다.
4. 히트파이프 응축부 주변의 온도를 낮출수록 열전달률이 향상 되었다.
5. 히트파이프 외경이 커질수록 열전달률은 증가하였고 모세관한계의 변화는 없었다.

후 기

본 연구의 일부는 산업자원부의 지역혁신인력

양성사업, BK21 지역대학육성사업, 2004년도 지방대학혁신역량강화사업의 지원으로 이루어졌으며, (주)세운전재 관계자에게 감사드린다.

참고문헌

1. K.T. Chung, C.H. Bae, 2005, "An Experimental Study on the Thermal Characteristics with Charging Quantity of Working Fluid of Grooved Heat Pipe in Solar Collector", KSME 2005 spring Conference Proceedings
2. Y.J. Park, W.S. Kyun, J.S. Suh, 1998, "Characteristic of Thermal Performance for a Axial Groove Heat Pipe With the Shape of Groove", J. of Engineering Research Inst
3. J.H. Boo, S.H. Jin, 1993, "Development of a Computer Code for the Performance Analysis and design of Low Temperature Heat Pipes", KSME, Vol 17, No.3, pp 698-709
4. D.E. Kim, Y.S. Park, J.S. Suh, 2001, "Analysis of Thermal Performance in Variable Conductance Heat Pipe with Meshed Wick", J. of Engineering Research Inst
5. Y.S. Park, D.E. Kim, G.S. Byon, J.S. Suh, K.W. Lee, K.H. Park, 2003, "Analysis of Thermal Control Performance of Variable Conductance Heat Pipe with Axial Grooves", KSME 2003 spring Conference Proceedings
6. J.K. Hong, J.S. Suh, G.S. Byon, "Analysis for Thermal Performance of Axially Grooved Heat Pipe for Solar Collector", KSME 2004 spring Conference Proceedings
7. Chi, S. W., 1976, "Heat Pipe Theory and Practice", A Sourcebook .Hemisphere Publishing Co.