그루브형 태양열 집열용 히트파이프의 열성능 해석

홍정규† ·서정세*·변길성**

Analysis for Thermal Performance of Axially Grooved Heat Pipe for Solar Collector

J.K. Hong, J.S. Suh, G.S. Byon

Key Words : Rectangular Groove(직사각형 그루브), Triangular Groove(삼각형 그루브), Heat Transport rate(열전달율), Capillary limitation(모세관한계), Heat Pipe(히트파이프)

Abstract

In this study, analysis is made for the effects of groove shape on the thermal performance of a axial groove heat pipe. The mathematical models of two-phase flow in grooved heat pipe are presented for the capillary limitation in steady state. Generally, the heat pipe performance depends on the capillary pressure and liquid flow. The friction force of liquid flow through the groove increases with the groove width decreased, and then the capillary pressure is improved in the gas-liquid interface of groove. Therefore, the optimal groove width shaper exists for the maximum thermal performance of heat pipe. In this paper, the optimal groove shape and scale are presented by considering both capillary pressure and liquid flow.

1. 서 론

태양에너지 사용은 기술적인 면에서 이용가능성이 입증되고 있으며, 태양에너지는 최근 전 세계적으로 연구개발이 촉진되고 있고, 이용기술의 진보, 시스템 가격의 감소 및 이용률의 증대 등으로 재생가능하고, 무한한 대체에너지 자원으로 각광을 받고 있다.

태양열 집열기를 이용한 태양열 활용에 있어 가장 적용 가능성이 높은 분야는 온수 급탕 시스템이다. 태양열 온수 급탕에서 요구되는 적정 온도가 40 ~ 60℃ 저온이므로 집열 장치의 가격이 비교적 저가이고 설치가 단순하여, 생산 및 설치에 경제성이 높다. 온수 급탕 부하는 1년 내내 필요하고, 다른 태양열 시설, 즉 냉난방보다 시설의 사용 시간, 이용률이 높고 설치 및 조작의 단순함 등이 경제성을 높은 이유이다. 특히, 에너지 절약이라는 측면에서 온수 급탕이 항상 저온의 온수(40 ~ 60℃)를 공급하므로, 평균 집열 온도가 그다지 높아지지 않더라도 그만큼의 에너지 절약을 할 수 있다는 장점이 있다. 실용화 단계에 와 있는 온수 급탕 분야는 이런 적정 온도의 온수에 대한 연중 내내의 필요성과 사용상의 목적이 적절하게 혼합된 결과로 실용화되고 있다.

태양열 집열 모듈을 이용한 집열 기술은 크게 평판형 집열기를 이용하는 집열기술과 진공관식 집열기(히트파이프 등)를 이용하는 집열 기술로 구별될 수 있다.

† ,**경상대학교 대학원
* 정회원, 경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구센터
E-mail: jssuh@gsnu.ac.kr
TEL: 055)751-5312 FAX 055)757-5622

평판형 집열기를 이용한 집열기술은 그 역사가 상당히 긴 만큼 현재 널리 보급 되어 있으며 적용이 용이하고 또한 위험이 거의 없는 집열기술이다.

히트파이프형 태양열 집열기는 그 작동온도 범위가 저온 활용 범위를 초과하여 중온형 태양열 활용 범위까지 미치므로 그 적용성이 일반 평판형 집열기에 비해 광범위하고, 집열효율이 높다. 최근에는 신소재를 이용한 집열기 제작이 시도되고 있으며 더욱이 현재의 어려운 에너지 수급 현황과 맞물려 그 보급이 확대될 전망이다.

지금까지의 히트파이프에 대한 연구경향을 살펴보면, Cotter[1]는 히트파이프에 대한 기본적인 이론을 정립하였으며, Kemme[2]는 히트파이프의 작동한계를 재조명하고 여러 가지 종류의 윅에 대한 모세관한계를 규명하였다. 홍[3]은스크린 윅의 메쉬 수의 변화와 파이프 내부의 온도분포에 따른 열전달 성능에 대한 연구를 수행하였으며, 오[4]는 히트파이프의 윅 두께가 모세관 한계에 미치는 영향을 실험적으로 설명하였다. 그리고 Tathgir[5]등은 작동유체로서 물을 사용하는 그루브형 스테인리스 스틸 히트파이프가 중력장에서 각도 및 작동유체량에 따른 열전달량을 실험적으로 연구한 바 있다.

본 논문에서 해석하고자 하는 히트파이프를 이용한 태양열 집열기는 기존의 태양열 집열기 제품이 가지고 있는 겨울철의 동파, 내구성 한계, 배치 형식의 제한, 제품 수리의 어려움 등 여러 가지 문제점을 상당히 많이 보완한다는 점에서 집열기 분야에서는 반드시 개발되어야 할 핵심기술인 것으로 사료된다.

따라서 본 논문에서는 태양열 집열기내에서 히트파이프를 연구함으로서 집열기의 성능을 향상 시킬 수 있는 기초 설계 자료를 제시하고자 한다.

2. 연구내용

히트파이프 제조 시 작동 성능에 영향을 미치는 변수를 정확히 파악하여 이들 변수의 상관관계를 통해 히트파이프를 설계하는 것은 매우 중요한 일이다. 그루브형 히트파이프의 경우 그루브 형상 변화에 따른 히트파이프 성능예측을 통해 기본적인 자료를 획득한다면 보다 더 적은 시행착오를 통해 우수한 히트파이프를 제작할 수 있을 것이다.

그루브형 윅을 가진 히트파이프는 액체의 통로로서 홈을 이용하기 때문에 액체 유동저항이 매우 작고, 홈과 홈 사이의 핀이 파이프 재질과 같은 금속을 사용하기 때문에 열저항이 매우적다[6]. 또한 높은 압력이 작용하거나, 장기간 사용하는 장치에서는 윅의 파손에 대한 안정성이 요구된다. 이러한 이유에서 최근에는 내부 환상이나 축방향 그루브로 만들어진 윅을 갖는 히트파이프를 많이 사용하고 있다.

일반적으로 히트파이프의 성능은 윅의 형상과 크기, 작동유체량에 의해 결정된다. 히트파이프가 최대의 성능을 내기 위해서는 모세관압력과 유량이 커야한다. 그러나 모세관압력을 크게 하기 위해 그루브 폭을 줄일 경우 액체유동에 대한 저항의 증가로 인해 압력손실이 커지게 된다. 즉 액류가 장애를 받아 유량을 크게할 수 없으며, 반대로 액류를 크게 하기 위해 그루브 폭을 크게 하고자 하면 모세관 압력이 작아진다.

본 연구에서는 축방향 그루브형 히트파이프에서 복합 윅의 형상은 고려하지 않고 그루브 형상의 변화를 통한 히트파이프의 성능평가를 하고자 한다. 이를 통해 형상에 따른 최적 작동유체량을 결정하여 그루브형 히트파이프 설계 시 기본적으로 고려할 사항을 제시하고자 한다.

3. 해석 및 결과

본 연구에서는 CCHP 축방향 그루브형 히트파이프의 열전달량과 모세관 한계에 관계하는 요소를 중심으로 해석하였다. 그루브의 개수, 폭과 깊이, 파이프 기울기, 그루브의 형상에 대해서 히트파이의 열적 특성을 해석하였다. 히트파이프의 형상은 Fig 1.과 같다. 해석에 적용된 히프파이프의 파이프 재질은 구리이며 작동유체는 물을 사용하였다. 기타 히트파이프의 사양은 Table 1.과 같다.

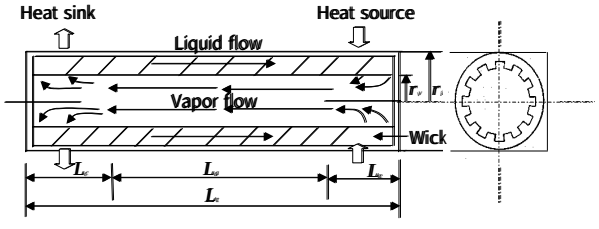

Fig. 1. Schematic diagram of a axial grooved heat pipe.

Table. 1 Specification of heat pipe.

Properties	Values
Pipe Material	Copper
Working Fluid	Water
Radius of Pipe(r_p)	4.085 ㎜
Thickness of Pine	3.785 ㎜
Total Length	1500 ㎜
Condenser length(L_c)	300 ㎜
Adiabatic Length(L_a)	200 ㎜
Evaporator Length(L_e)	1000 ㎜

3. 1 수평상태의 히트파이프

해석에 적용된 히트파이프는 태양열 집열기에 쓰기에 적합하도록 파이프 길이가 1.5m로 반경방향에 비해서 축방향 길이가 긴 Rectangular Groove 형 히트파이프를 선택하였다. 또한 파이프의 재질은 구리로 하였고, 작동유체로 물을 사용하였다. 작동온도 300K, 열전달 계수를 150Km/m^{2}로 설정하였다. 그리고 작동온도를 380K까지 해석하였다. 또한 그루브 개수를 36개, 48개, 72개로 세 단계에 걸쳐 변화시키고, 세부적으로 각각의 단계에서 그루브의 최적 형상단면적을 찾았다.

히트파이프의 그루브 개수, 형상등을 결정함에 있어, 히트파이프와 지표와의 기울기는 중요한 요소이다. 지표와의 기울기가 0 ℃일 때 유효모세관압력 $P_{cm,e}$는 최대 모세관압력보다 작아질 것이다. 이러한 감소는 중력이 히트파이프의 축과 수직으로 작용하기 때문이다. 즉,

$$P_{cm,e} = \frac{2\sigma}{r_c} - \Delta P_g \qquad (1)$$

여기서 ΔP_g 은 중력에 의한 압력강하 항이다.

수평일 경우 ΔP_g 항은 최대값을 가지므로 유효모세관 압력은 작아지고 모세관한계 또한 작아져서 히트파이프가 제대로 작동하지 못 할 수도 있으므로 신중히 그루브의 개수 및 폭, 깊이를 선정하여야 한다. Fig 2는 그루브의 개수가 36개일 때 그루브의 폭(wg)과 깊이(hg)을 변화시키면서 한계 열전달량과 모세관한계를 나타낸 것이다. 폭이 0.4㎜ 이고 깊이가 0.4㎜일 때 한계 열전달량과 모세관한계가 최대이고 나머지 경우 모세관한계에 걸려 정상작동하지 못했다.

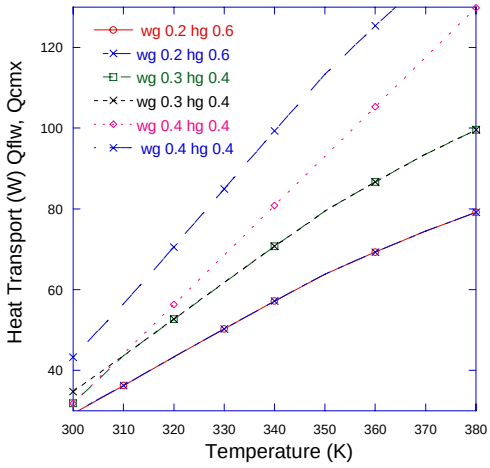

Fig. 2 Heat Transport rate within Capillary limit.

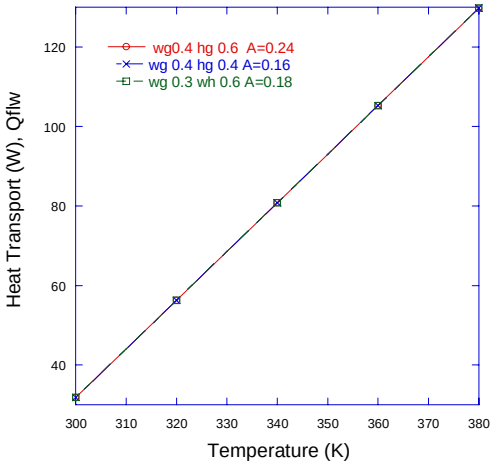

Fig. 3 Heat transport rate versus operating temperature according to dimension variation of groove wick.

그루브의 단면적이 클수록 모세관한계는 증가한다. 하지만 모세관한계가 증가한다고 하여 한계 열전달율이 비례적으로 증가하는 것은 아니다. Fig. 3에서 미소하지만 단면적 A=0.16㎟일 경우 최대값이다. 이는 면적이 증가하여 모세관

압력이 증가함과 동시에 유동저항 또한 증가하기 때문이다.

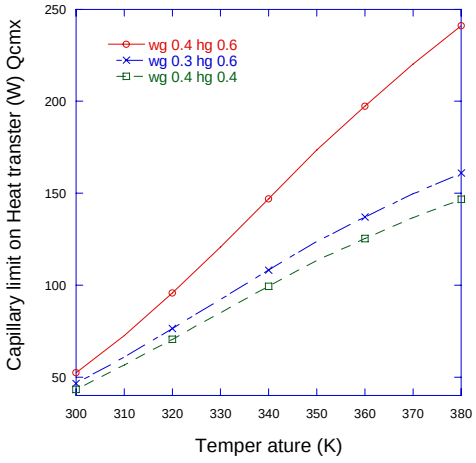

Fig. 4 Capillary limit according to dimension variation.

위와 같은 방법으로 각 단계별로 최적 단면적을 구하였다. 결과 그루브 개수 36개일 때 폭 0.4㎜ 깊이 0.4㎜, 48개일 때 폭 0.3㎜ 깊이 0.4㎜ 그리고 72개일 때 폭 0.2 깊이 0.6㎜일 때 최대 열전달율을 가졌다.

Table. 2 Limit groove width, depth according to groove number

개수 / 깊이(hg)	최대 폭 wg		
	n=36	n=48	n=72
0.6	0.521	0.391	0.260
0.5	0.538	0.404	0.269
0.4	0.556	0.417	0.278
0.3	0.573	0.430	0.287
0.2	0.591	0.443	0.295
0.1	0.608	0.456	0.304

3. 2 Groove 개수 비교

위에서 얻은 결과 값으로 각 단계별 Groove 개수에 대한 열전달율을 비교 하였다. Table. 2 는 각 단계별 최대 폭(wg) 과 깊이(hg)를 나타낸다.

Fig 5 에서 보는 것과 같이 그루부의 개수를 증가 시킬 때 N=36개 일 때 근소하게 가장 크고, N=48 과 N=72일 때는 동일한 열전달율을 가지고 있었다

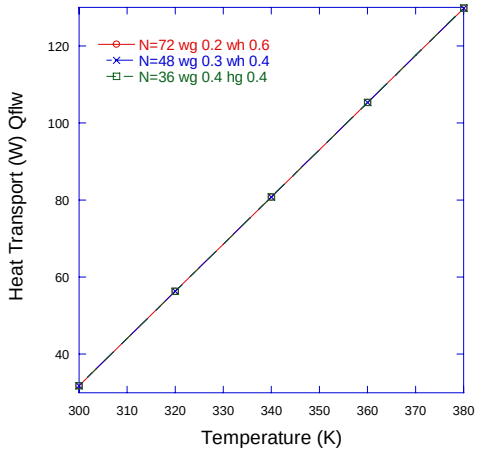

Fig. 5 Heat Transport rate versus operation temperature according to groove number.

3. 3 파이프의 기울기 비교

윅을 가진 히트파이프의 가장 큰 장점 중의 하나는 파이프의 위치가 자유롭다는 것이다. 어떤 각도에서도 정상적으로 작동하는데 본 연구에서는 히트파이프와 지표의 각도를 0°, 45° 그리고 90°에서 해석을 하였다. 응축부의 위치는 증발부의 상부에 위치하게 하였다. 히트파이프가 지표와 기울기을 가지게 되면 식(1)에 의해서 기울기가 증가할 수 록 유효모세관압력도 증가한다. 즉 기울기가 45°, 90°일 때는 Groover의 폭과 깊이에 영향을 받지 않는다는 것이다.

Fig. 6 에서 기울기별 한계열량의 차이는 없다. 그러나 Fig. 7 에서 기울기별 모세관 한계는 현저하게 차이가 보여진다. 중력의 영향을 받아 모세관 압력이 최대로 감소했을 때의 히트파이프의 작동 여부를 확인하면 기울기에는 영향을 받지 않음을 알 수 있다. Fig 6. 은 이런 상황을 잘 보여 준다. Fig. 6, 7은 파이프의 기울기가 수평일 때 최대 열전달율을 보인 N=36 일 때 폭이 0.4㎜, 깊이 0.4㎜ 에서의 기울기 변화 시 열전

달율과 모세관한계이다.

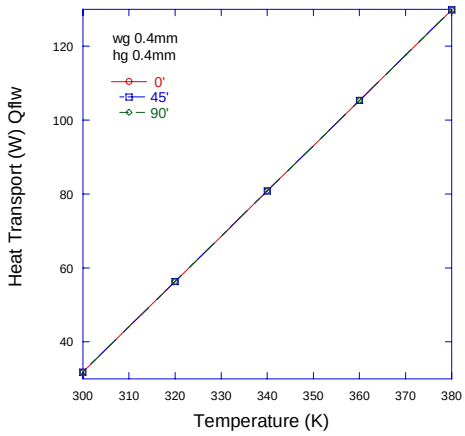

Fig. 6 Heat Transport rate versus operating temperature according to horizontal position.

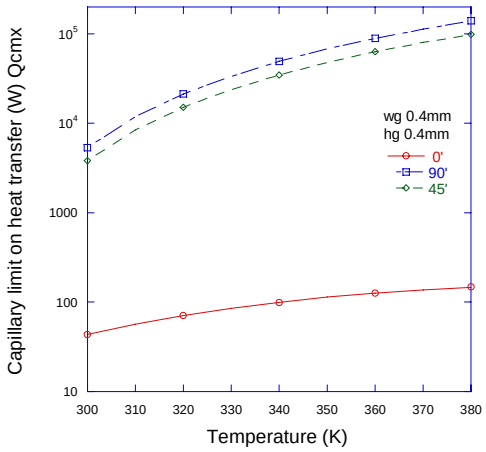

Fig 7 Capillary limit versus operating temperature according to horizontal position.

3. 4 Groove의 형상 변화 비교

직사각형 그루브, 삼각형 그루브을 비교해 보았다. 모세관한계 및 한계열량은 wick의 유동단면적에 관련이 있으므로 직사각형 그루브의 형상단면적과 같게 삼각형 그루브의 폭과 깊이를 선택하였다. Fig. 8은 사각형 그루브와 삼각형 그루브의 형상단면적이다.

해석 결과 직사각형 형상단면적과 삼각형의 형상단면적은 동일하지만 실제로 액체가 채워지는 유동단면적은 삼각형 유동단면적이 작으므로 모세관한계는 사각형 그루브보다 적게 나왔다. 또한 파이프에 기울기를 줄 경우 직사각형 그루브의 경우처럼 높게 나와 파이프가 정상작동함을 알 수 있었다. Fig. 9에서 보는 봐와 같이 동일한 형상단면적으로 비교하였을때 모세관한계는 직사각형 그루브의 2배 이상 큼을 알 수 있었다. 이는 Fig. 8에서보는 봐와 같이 직사각형 그루브가 삼각형 그루브보다 실질적으로 유체가 채워진 유동면적이 2배 이상 크기 때문이다.

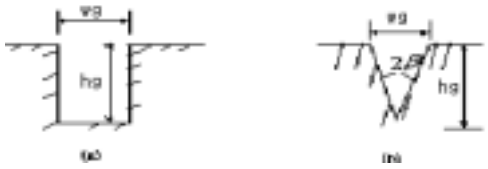

Fig. 8 Various groove shapes:(a)rectangular (b)triangular groove

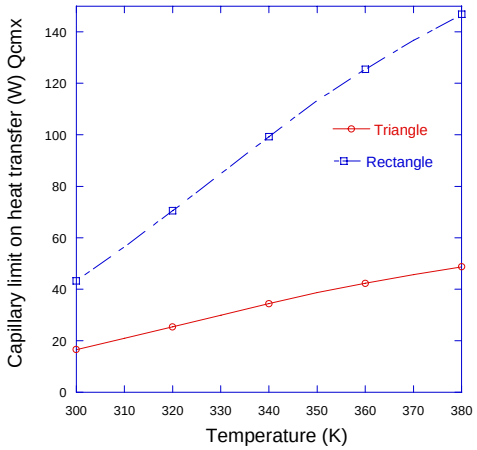

Fig. 9 Capillary limit versus operating temperature according to Various groove shapes.

위의 사항들을 종합하여 본 해석에서 가장 적절한 히트파이프의 그루브 개수는 N=36 개 이며 폭(wg) 0.4㎜ 깊이 0.4㎜ 직사각형 그루브일 때이다. Fig. 10은 히트파이프의 축방향 길이에 대한 Pv 와 Pl의 그래프이다. 긴 축방향으로 인하여 증기압력이 약 100 pa 압력강하가 발생하였다.

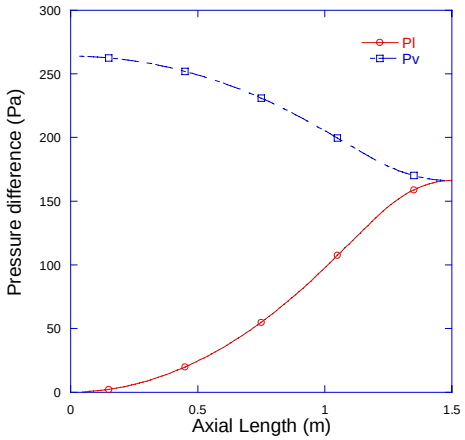

Fig. 10 Pressure difference according to groove number N=36

4. 결 론

본 해석에서는 축방향 그루브형 히트파이프에서 그루브 형상의 변화를 통한 히트파이프의 성능평가와 그루브 형상 변수들 사이의 관계를 통해 열전달률 한계와 모세관한계를 알아보았다.

1. 최적 열전달율은 모세관한계를 높이기 위해 윅의 폭과 깊이를 증가시킨다고 커지는 것은 아니였으며, 이와 함께 유체저항도 고려하여 선정하여야 한다.
2 Groove의 개수 증가 시 모세관한계를 증가시키기 위해 윅의 깊의 증가에 제한이 있다.
3. 히트파이프의 기울기 변화는 중력의 영향으로 모세관한계가 수직으로 갈 수 록 급격히 증가함을 알 수 있다.
4. Groove 형상은 Rectangular Groove 가 Triangular Groove 보다 열전달율, 모세관한계에서 유리함을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. Cotter, T. P., 1965, "Theory of Heat Pipes", Report LA-3246-MS, Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, Los Alamos, N Mex., March 26, pp.1-37
2. Kemme, Josep E., 1969, "Heat Pipe Design Considerations", Report LA-4221-MS, Aug. 1, 1969, of the Los Alamos Scientific Laboratory the University of California, Los Alamos, N. Mex. (for presentation at the 11th Heat Transfer Conference, Aug. 3-6, Minneapolis, Minn.), pp.1-8.
3. 홍용규, 1980, “윅의 변화가 히트파이프 열전달량에 미치는 영향, 홍익대학교 대학원.
4. 오흥규, 1987, “수직형과 수평형 히트파이프에서 윅의 두께가 성능에 미치는 영향”, 한양대학교 대학원
5. Tathgir, R. G. and Singth, G., 1984, "Performance Characteristics of a Stainless Steel Gravity Assisted Grooved Water Heat Pipe at Low Temperature", the Proceeding of 5IHPC Part I, pp.18-23
6. K. T. Feldman Jr. and S. Munje, 1979, Experimentswith Gravity-Assisted Heat Pipes with and without Circumferential Grooves J. ENERGY, Vol.3,No.4, pp.211-216
7. Chi, S. W., 1976, Heat Pipe Theory and Practice,A Sourcebook .Hemisphere Publishing Co.
8. Dunn, P.D. and Reay, D.A., 1994, Heat Pipes, Fourth Ed., Pergamon Press.
9. Peterson, G.P., 1995, Introduction to Heat Pipes, Wiley.
10. 신동열, 1987, “히트파이프의 최적충진량에 관한 실험적연구”, 서울대학교 대학원
11. 大島阱一, 1976, “ヒートパイプ 應用設計ヘンドブツク”, 日本 技術經 濟 センター編.