

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 22, No. 4, 2002

확대 응축부를 갖는 진공관형 태양열 집열기용 히트파이프 성능 비교 연구

A Comparative Study of Heat Pipes with Enlarged Condenser Section for Evacuated Solar Collectors

부준홍*, 정원복*, 곽희열**

Boo, Joon Hong*, Chung, Won-Bok, Kwak, Hee-You**

Key words : 히트파이프(heat pipe), 확대 응축부(enlarged condenser), 슬랩윅(slab wick),
중온작동온도(medium operating temperature)

Abstract

For application to medium temperature solar collectors (80~120°C), a heat pipe should be designed properly to efficiently transfer heat to a hotter condenser than common applications. Among many wick structure candidates for heat pipes of this type, a slab wick was selected based on promising performance data reported previously. The thermal performance of slab wick heat pipes, screen wick heat pipes and thermosyphons with enlarged condenser section were experimentally investigated for comparison purpose. The heat pipes were 8.0 mm O.D.(evaporator section) and 25.4 mm O.D. (condenser section) made of copper. The experimental data of the heat pipes were analysed in terms of thermal resistance against thermal load and coolant temperature.

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

* *Aerospace and Mechanical Engineering, Hankuk Aviation University*

** 한국에너지기술연구원 대체에너지부 자연형태양열연구팀

** *Renewable Energy Research Department, Korea Institute of Energy Research*

1. 서론

진공관형 태양열 집열기는 기본적으로 중온(80-120°C) 범위의 집열을 성취하여 산업용 열원으로 사용할 수 있다는 면에서 판형 집열기와 구분된다. 진공관형 태양열 집열기는 집열판으로부터의 열손실을 줄이기 위해 유리 진공관을 사용하고, 집열 표면에 선택적 도장을 하며, 고효율 열이송 수단으로 중앙에 축방향으로 히트파이프(heat pipe)를 배치하여 평판형 집열기보다 우수한 성능을 발휘하도록 한다.¹⁾ (그림 1). 따라서, 평판형 집열기에 적용하는 히트파이프²⁾⁻³⁾와는 달리 중온범위의 집열을 위해서는 이 작동환경에 맞는 고효율 히트파이프가 필요하다.

이를 위해 슬랩윅(slab wick) 구조의 히트파이프를 채택한 관련 연구를 수행해왔다. 슬랩윅 구조는 일반적으로 히트파이프의 열전달성능을 향상시키기 위하여 사용되어진다. 스크린메쉬(screen mesh)를 사용하여 제작되는 슬랩은 복합윅(composite wick) 구조로 구성된다. 일반적인 히트파이프처럼 파이프내벽에 액체 귀환에 필요한 모세관력을 발생하는 워구조물과 함께 슬랩이 히트파이프 내부 증기영역 내에 길이 방향으로 삽입된다. 슬랩은 모세관력을 높이기 위해 촘촘한 눈금의 스크린메쉬가 슬랩 바깥쪽에 위치하고 성긴 눈금의 스크린메쉬가 안쪽에 위치하여 추가적인 액체귀환 통로를 확보함으로써 액체상태의 작동유체의 축방향 이동저항을 줄여준다.⁴⁾⁻⁵⁾ 이 결과 히트파이프의 성능을 향상시킬 수 있게 된다.

외경 9.52mm의 구리관에 슬랩윅을 삽입한 후 응축부 조건이 중온범위일 때 작동유체 에탄올에 대한 최적 충전량에 대한 연구가 이루어졌다.⁶⁾ 연구결과 슬랩윅 히트파이프내의 워구조물이 액체로 포화되는 양 100%를 기준으로 110%가 최적의 충전량임을 알았다. 동일한 사양의 히트파이프 및 동일 작동조건에서 물 및 에탄올을 작동유체로 사용하여 최대 처리 가능한 열부하 및 경사각에 따른 성능변화에 대한 연구 결과도 발표된 바가 있다.⁷⁾⁻⁸⁾ 또한 동일한 증발부 및 단열부 직경(9.52mm)에 대하여 응축부를 확대(25.4mm)한 경우 연구에서는 9.52mm 직경의 응축부일 때보다 처리열부하에서는 2배, 열저항은 1/2감소한다는 결과를 얻었다.⁹⁾ 한편 대체 워구조물로서 편조윅에 대한 연구도 진행된 바 있다.¹⁰⁾

이전 연구들은 제작여건을 고려하여 증발부 및 단열부의 직경이 9.52mm일 때의 연구 수행 결과이다. 본 연구에서는 응축부 확대 효과 및 최적의 작동유체량에 대한 결과를 바탕으로 태양열 집열에 적용을 위한 최종 사양인 증발부 및 단열부 8.0mm이며 25.4mm로 확대된 응축부를 가지는 히트파이프에 대한 성능 실험을 수행하였다. 성능 비교를 위해서 슬랩윅 히트파이프, 스크린윅(screen wick) 히트파이프 및 워구조물이 없는 써모사이펀(thermosyphon)을 제작하고 실험을 수행하였다.

2. 히트파이프 제작 및 실험방법

히트파이프는 앞서 언급한 바와 같이 3가지 중

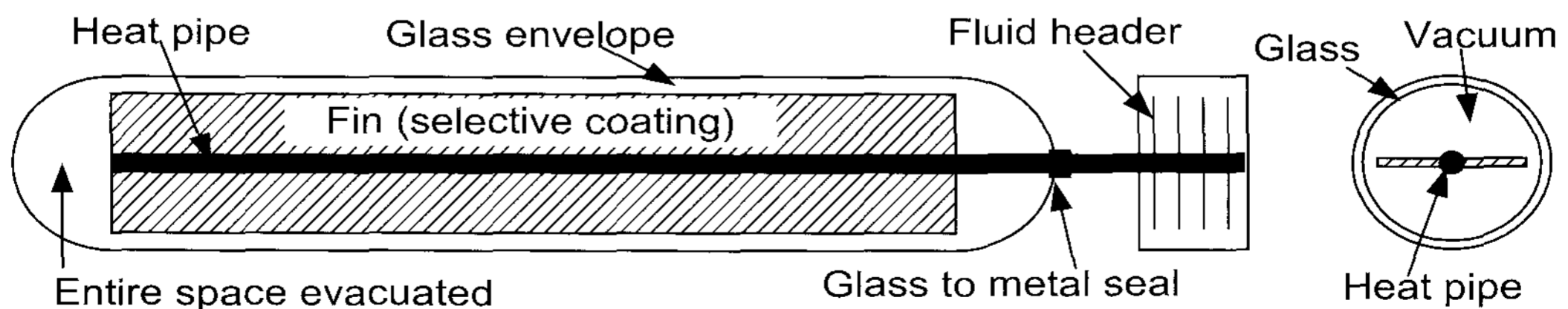


그림 1. Typical evacuated (vacuum-tube) solar collector

류의 응축부가 확대된, 구리-에탄올 히트파이프를 제작하였다.

복합wick 형태인 슬랩wick은 그림 2와 같이 구성하였다. STS316 재질의 #200 스크린메쉬(screen mesh) 두 겹을 파이프 내벽에 밀착되도록 삽입하였다. 이 Wick에 의해 작동유체는 파이프 내벽면에 고루게 분포할 수 있게 된다. 슬랩은 STS316 재질의 #20 스크린메쉬를 파이프 길이방향으로 네 겹의 직사각형 형태로 만든 후 다시 STS316 재질의 #200 스크린메쉬 두 겹을 #20 스크린메쉬 외부에 감았다. 이렇게 제작한 슬랩의 사양은 높이 6.3mm 및 폭 2.4mm이고, 길이는 1550mm로서 파이프 길이방향으로는 증발부와 단열부에 위치하도록 제작하였다.

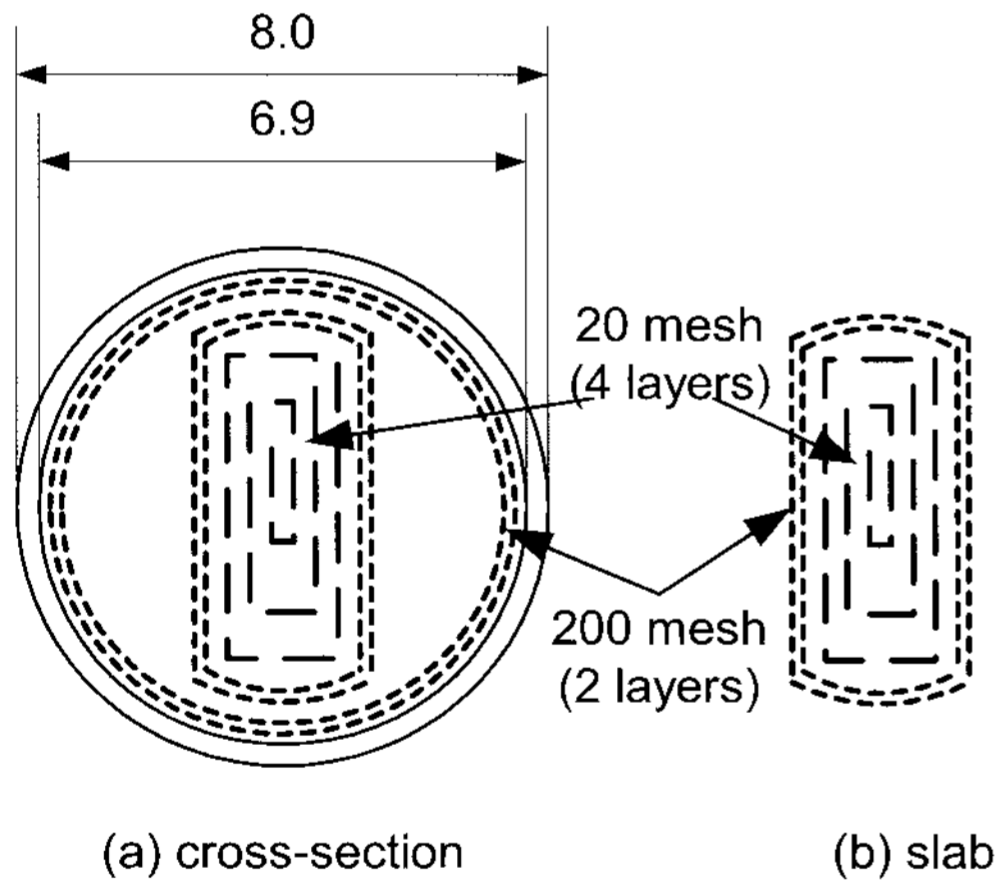


그림 2. Schematic of the cross-section of slab wick heat pipe (unit: mm).

스크린wick 히트파이프의 경우 8.0mm 관 내벽에 2겹의 STS316 #200 스크린 메쉬를 삽입하였다. 그림 2의 슬랩wick 형상에서 가운데 슬랩이 없는 형태이다. 써모사이편은 Wick구조물이 없다.

응축부의 형상은 세 종류의 히트파이프 모두 외경 25.4mm(1 inch)의 직관형태이다. 히트파이프 전체 길이 1600mm 중 증발부 길이는 1500mm, 단열부 길이는 50 mm 그리고 응축부

길이는 50mm로 설정하였다(그림 3). 증발부에 밴드히터(220V, 720W)를 감아 균일한 열부하를 가할 수 있게 하였고, 전압조절기에 연결하여 입력 열부하를 조절할 수 있게 하였다. 응축부는 냉각재킷을 부착하여 항온조(Fisher Scientific 사, Model 9100)를 통해 일정한 온도로 제어된 냉각수가 흐르게 하였다(0.7lpm, Ethylene glycol). 히트파이프의 작동 온도를 측정 위해서 파이프 외벽에 열전대를 부착하여 자료획득장치(Fluke사, Hydra Series II, 2625A)를 통해 온도를 기록하였다. 온도 센서로는 K-type (OMEGA사, 28 AWG) 열전대를 증발부 끝단에서 10cm를 띄우고 20cm 간격으로 증발부 영역에 6개를 배치, 부착하였다. 그리고 응축부 전후에 2개의 열전대를 부착하였다.

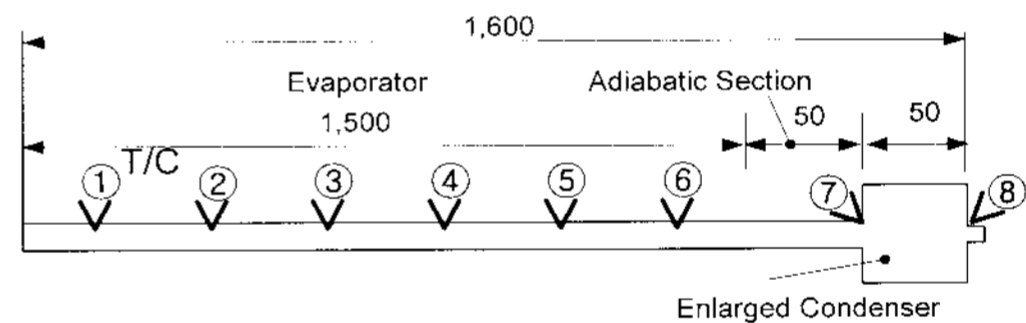


그림 3. Schematic of heat pipe having enlarged condenser (unit : mm)

본 연구에서 작동액체는 에탄올(순도 99.9%)만을 사용하였고, 슬랩wick 히트파이프의 경우 그 주입량은 Wick 액체로 포화될 때의 양을 100%로 기준하여 최적의 충전량(6)인 110%이었다. 충전율 110%의 경우 절대 주입량은 28.1cc로 히트파이프 내부 총체적의 약 50%에 해당하는 양이다.

스크린wick 히트파이프 및 써모사이편에 대한 작동유체량은 내부체적의 10% (5.6cc) 에서 50% (28.0cc)까지 변화시켜가면서 실험을 진행하였다. 태양열 집열을 위한 히트파이프이므로 경사각은 45°로 설정하였다. 실험에 이용한 항온조의 성능 때문에 응축부의 온도조건을 중온 범위 중 80°C에서만 실험하였다. 이와 비교를 목적으로 40°C, 60°C에서의 성능실험을 추가 수행하였다.

표 1. Test Conditions

	Slab wick HP	Screen wick HP	Thermosyphon
Wick	slab + 2 layer screen	2 layer screen	none
Charge ratio(volume)	110% by pore space	10, 20, 30, 40, 50%	10, 20, 30, 40, 50%
Working fluid	Ethanol (99.9%)		
Tilt angle	45°		
Coolant temperature	40, 60, 80		
Operating limit	130°C		

실험은 작동유체인 에탄올의 물성을 고려하여 히트파이프 외벽의 최고 온도가 130°C를 초과하지 않는 범위에서 수행하였다(표 1).

3. 실험결과 및 고찰

그림 4에 80°C의 수열매체가 공급될 때 슬랩윅 히트파이프의 정상상태 온도 분포이다. 증발부 전체 길이방향으로 온도차가 1°C 내에서 안정적으로 작동하고 있음을 할 수 있다. 열부하가 증가함에 따라 슬랩윅 히트파이프의 작동온도가 증가하여 100W를 초과하는 열부하에서 히트파이프의 온도가 130°C를 넘어 실험을 중단하였다. 수열매체 유입 온도가 60°C 및 40°C인 경우 응축부 외부 온도가 낮아지면서 히트파이프 전체 작동온도도 낮아졌고, 이로 인해 작동한계는 증가하여 한계 열부하가 각각 140W, 160W이었다. 이때의 정상상태 온도 분포는 수열매체 온도 80°C인 경우와 유사하였다. 수열매체 유입 온도가 80°C인 경우의 최대 열부하는 직경 9.52mm인 히트파이프⁹⁾의 작동한계보다 보다 40W 감소하였다.

그림 5는 슬랩윅 히트파이프의 열부하에 따른 히트파이프의 열저항을 수열매체 온도별로 나타내고 있다. 열저항은 증발부 온도 평균과 응축부 온도 평균을 입력열부하로 나눈 값으로 나타내었다. 수열매체의 온도가 높을수록, 즉 히트파이프의 작동온도가 높아질수록 히트파이프의 열저항은 줄어들고 있다. 수열매체의 온도가 40°C, 60°C

및 80°C에서 각각 평균 열저항이 0.041°C/W, 0.035°C/W 그리고 0.029°C였다. 이 열저항은 이전 연구결과⁹⁾보다 높다. 이는 응축부는 25.4mm로 확대된 상태로 증발부와 단열부의 직경이 9.52mm에서 8.0mm로 줄어들면서 증기유동 단면적이 감소하여 열전달 경로에 저항 증가가 생겨 최대 열부하가 감소하였고 열저항이 증가하게 된 것이다.

2겹의 스크린 메쉬(#200, STS316)를 워구조물로 사용한 히트파이프인 경우 작동유체량이 내부체적의 10%, 20%, 30% 및 50%에 대하여 실험을 수행하였다. 10%는 2겹의 스크린윅이 액체상태의 작동유체로 포화되는 양을 내부체적비로 계산한 최적양이다. 또한 20% 및 30%는 써모사이펀 모드일 경우의 최적양¹¹⁾이고 50%는 슬랩윅 히트파이프의 주입량과 동일한 양이다.

한계 열부하값은 수열매체 온도 80°C에서 작동유체량과 무관하게 모두 100W 이었다. 또한 수열매체의 유입온도가 60°C, 40°C 인 경우 한계 열부하는 각각 140W, 160W로서 슬랩윅 히트파이프의 한계 열부하와 동일하게 나타났다.

그림 6은 2겹의 스크린윅 히트파이프의 정상상태 온도 분포로서 작동유체량이 10%, 수열매체 온도가 80°C일 때의 결과이다. 10%일 때 가장 좋은 성능을 나타내었고, 작동유체가 증가할수록 성능이 저하되었다. 그림에서 100W 미만인 경우 증발부 끝단에서 일부 과열된 것을 볼 수 있다. 이 때 증발부 전체 길이방향으로 온도차가 최대 4°C까지 편차를 보였다. 이는 작동유체 일부가 중

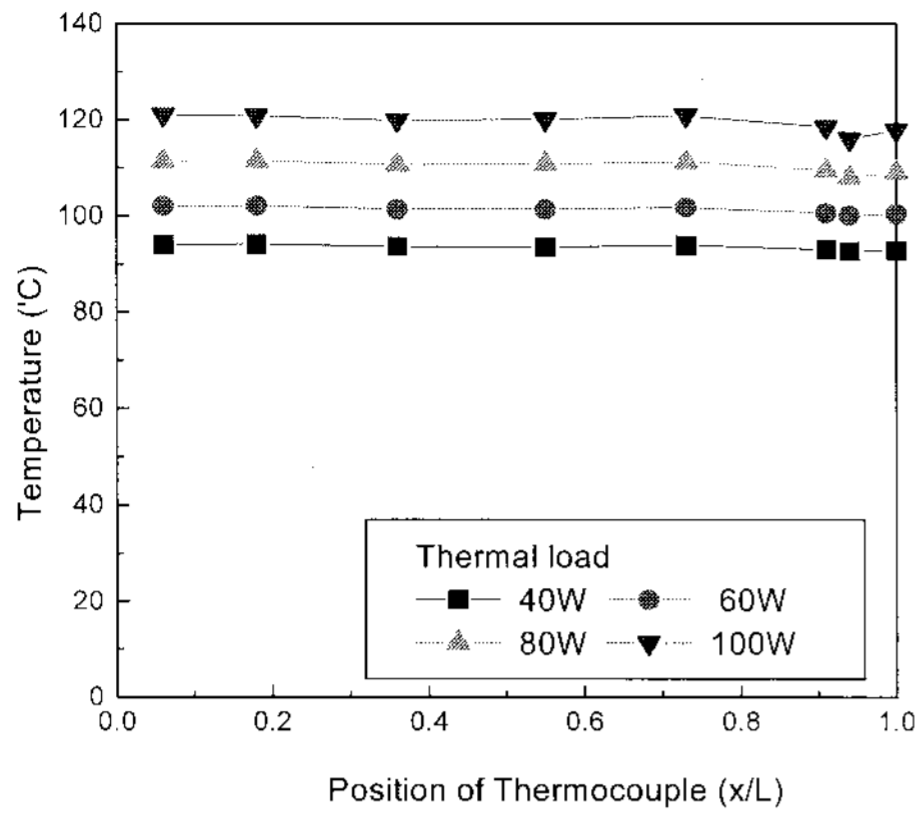


그림 4. Steady-state temperature distribution of the slab wick heat pipe.(coolant temperature : 80°C)

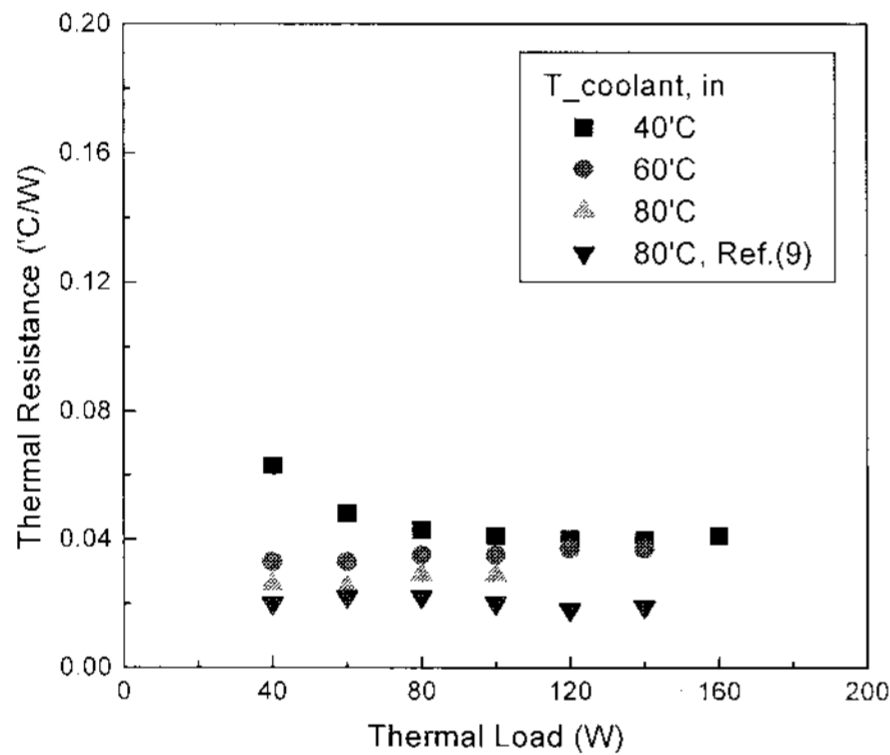


그림 5. Thermal resistance of 8mm, slab wick heat pipe as function of thermal load.(charge ratio : 110%)

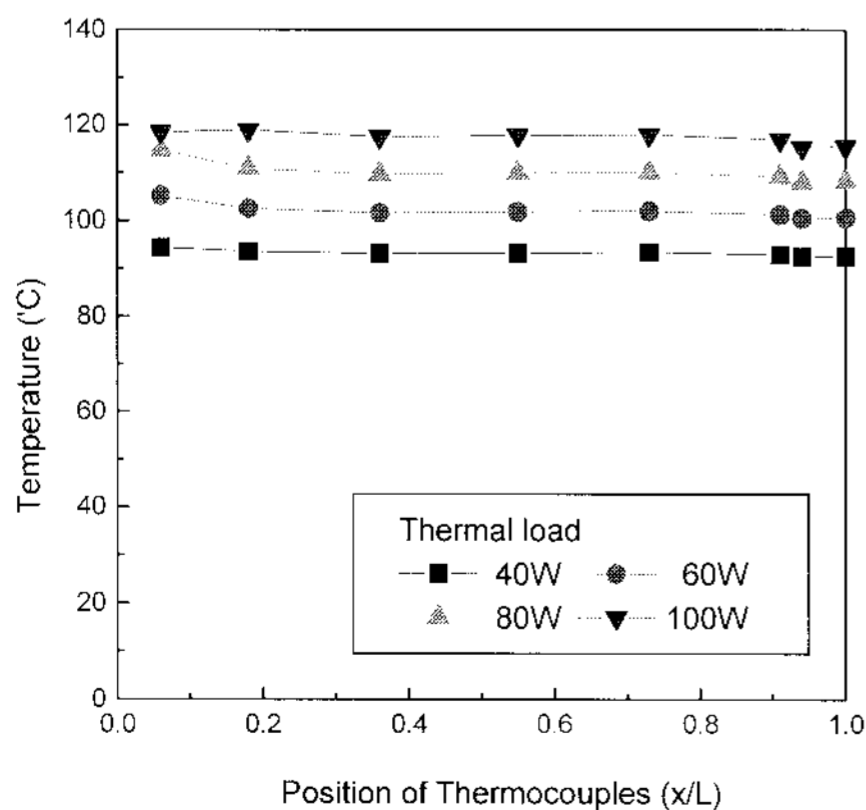
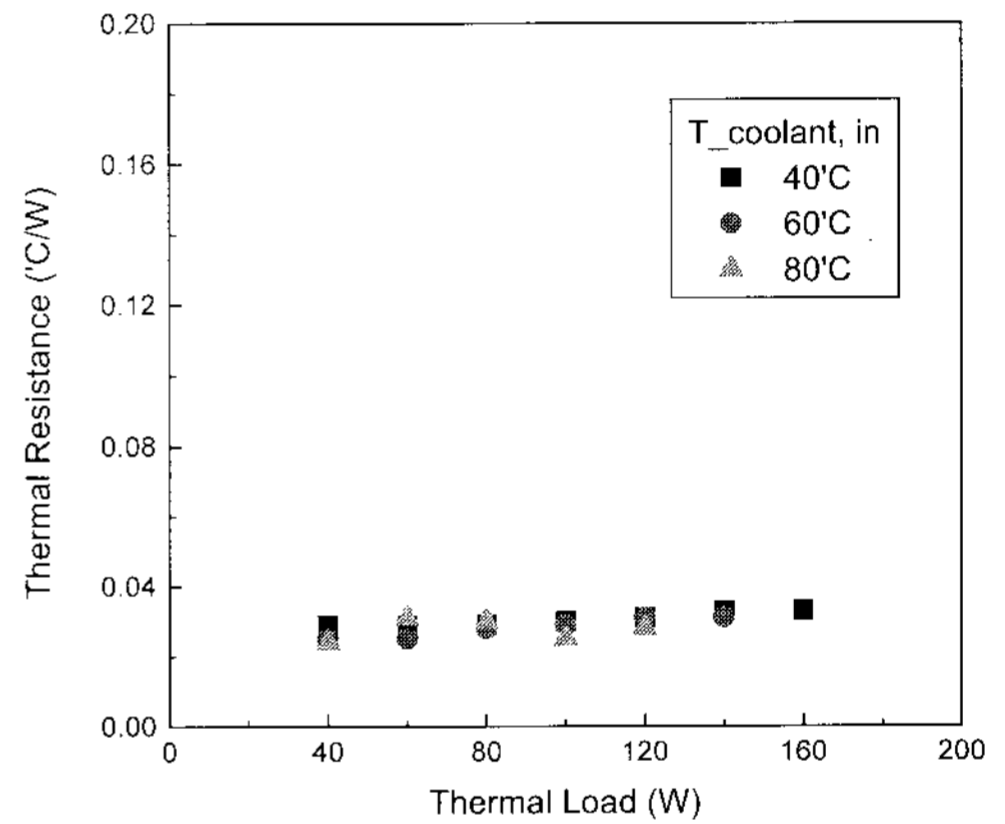


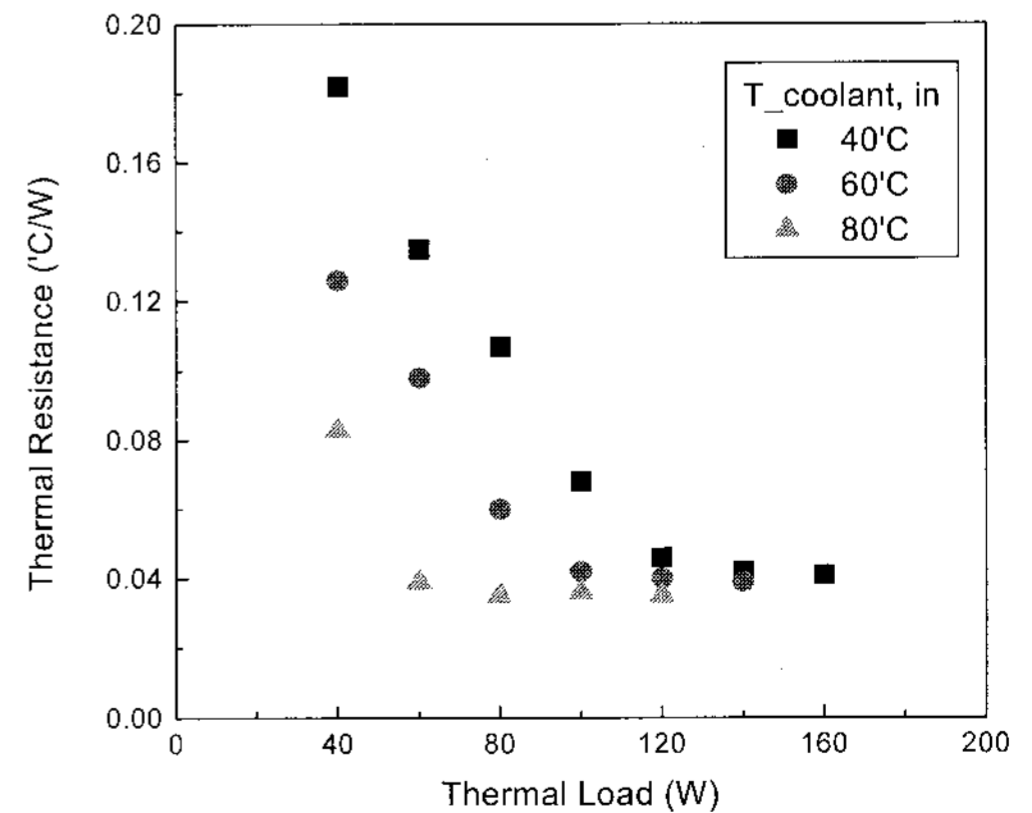
그림 6. Steady-state temperature distribution of the 2 layer screen wick heat pipe(coolant temperature : 80°C, charge ratio : 10% by volume)

력에 영향으로 증발부 밑단에서 풀(pool)을 형성하여 열전달 성능에 영향을 끼쳤기 때문이다. 주입한 작동유체량이 많아질 수록 풀에 의해 열전달 성능이 저하되었다. 이를 그림 7의 열저항 분포로 나타냈다.

그림 7은 열부하에 따른 히트파이프 열저항을 수열매체에 대하여 나타내고 있다. 그림 7(a)는 작동유체량이 내부체적의 10%인 경우로 50%까지의 작동유체량 중 최상의 결과이다. 슬랩윅 히



(a) charge ratio : 10% by volume



(b) charge ratio : 50% by volume

그림 7. Thermal resistance of 2 layer screen wick heat pipe as function of thermal load.

트파이프와 달리 수열매체의 온도와 무관하게 안정적인 성능(0.03°C/W 내외)을 보이고 있다. 동일 조건의 슬랩웍 히트파이프의 성능과 유사하였다. 낮은 수열매체 온도에서는 스크린웍 히트파이프가 우수한 성능을 나타내었는데, 이것은 슬랩웍 히트파이프가 고온에서 열전달 성능을 향상시킬 목적으로 설계되어 많은 양의 작동유체와 함께 추가적인 모세관 구조물이 삽입되었기 때문으로 낮은 작동범위에는 적합하지 않음을 의미하고 있다. 작동유체 주입량이 20% 와 30% 경우에는 열저항이 10%인 경우에 비하여 2배 이상 커졌다. 작동유체 일부가 앞서 언급한대로 증발부 밑단에서 풀을 형성하여 성능을 감소시켰기 때문이다. 작동유체 50%를 주입한 경우 수열매체 온도에 따라 성능이 많이 변하고 있다(그림 7(b)). 수열 매체의 온도가 80°C인 경우 40W에서 열저항이 0.8°C/W였다가 열부하가 증가하면서 0.04°C/W가 되었다.

써모사이펀인 경우 스크린웍 히트파이프와 동일한 주입량 10%, 최적의 써모사이펀 작동유체 주입량 20%, 30% 그리고 슬랩웍 히트파이프와 동일한 작동유체 주입량인 50%에 대한 실험을 수행하였다. 기본적으로 써모사이펀은 내부에 작동유체를 균일하게 분포시키는 워구조물이 없는 관계로 일정량의 작동유체가 증발부 끝단에서 항상 풀을 형성한다. 이로 인해 증발부 끝단에서 국부적인 과열현상이 발생하는데 10%를 주입하는 경우 작동유체량이 부족하여 과열현상이 발생하였다. 20%~30%에서 최상의 성능을 나타내었지만 국부적인 과열현상은 항상 발생하였다. 작동유체량이 50%인 경우 과열이 심해져서 응축부 수열매체의 유입 온도가 60°C인 경우에 열부하 60W에서 증발부 끝단과 응축부 영역의 온도차가 40°C정도의 차이를 보였다. 수열매체의 온도가 80°C인 경우 40W를 입력하는 동안 작동온도가 130°C를 초과하여, 이 조건에서의 실험을 더 이상 수행할 수 없었다.

그림 8은 써모사이펀에 대하여 수열매체 온도 80°C, 작동유체 주입량 20%인 경우의 정상상태 온도 분포이다. 이때가 최적의 작동상태를 보였고, 30%에서도 유사한 결과를 얻었다. 써모사이펀 끝단 위치의 온도가 주변의 다른 부위보다 명확하게 높게 분포하고 있다. 이때 온도차는 최대 10°C정도였다. 작동한계 열부하는 100W로서 슬랩웍 및 스크린웍 히트파이프와 동일하였다. 수열매체온도가 40°C, 60°C에서도 과열 현상이 발생하였지만, 각각의 한계 열부하는 160W, 140W로 히트파이프인 경우와 동일하였다. 작동유체량이 10%인 경우 60W였고, 50%인 경우 앞선 언급한 바와 같이 40W에서 이미 한계 온도를 초과하였다.

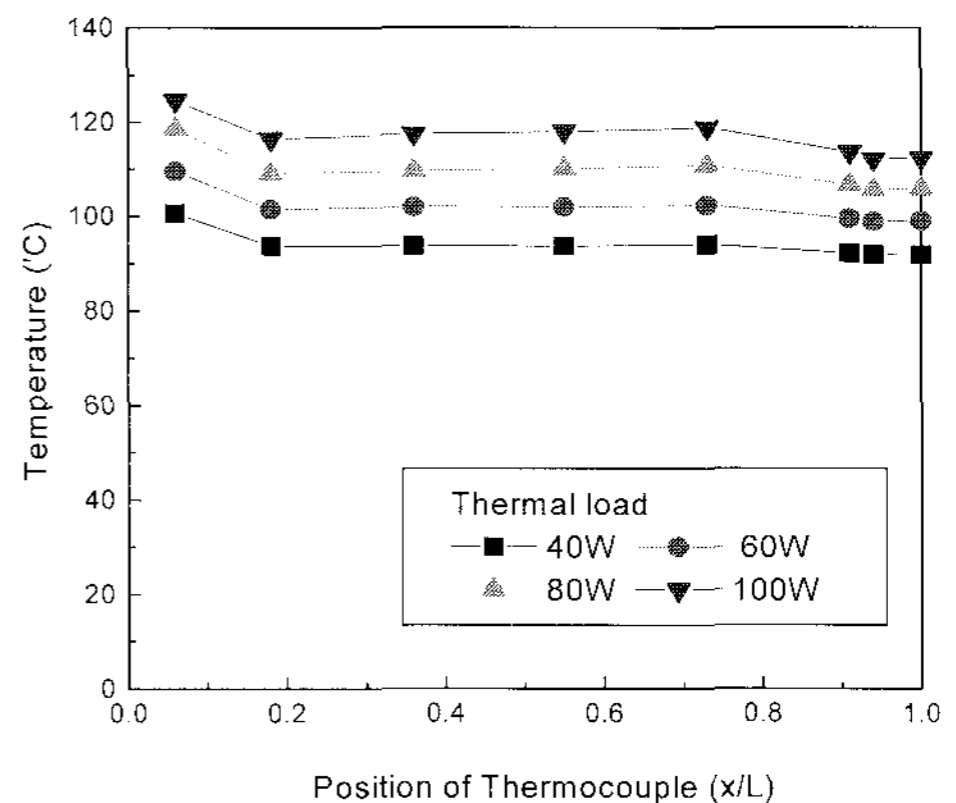
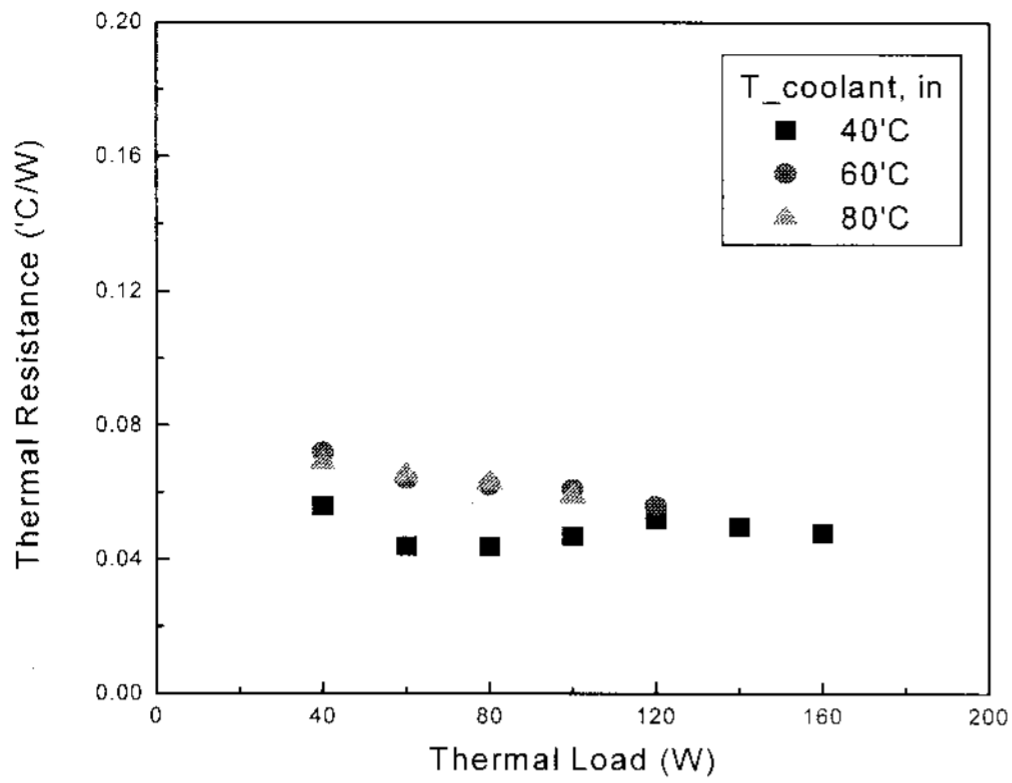
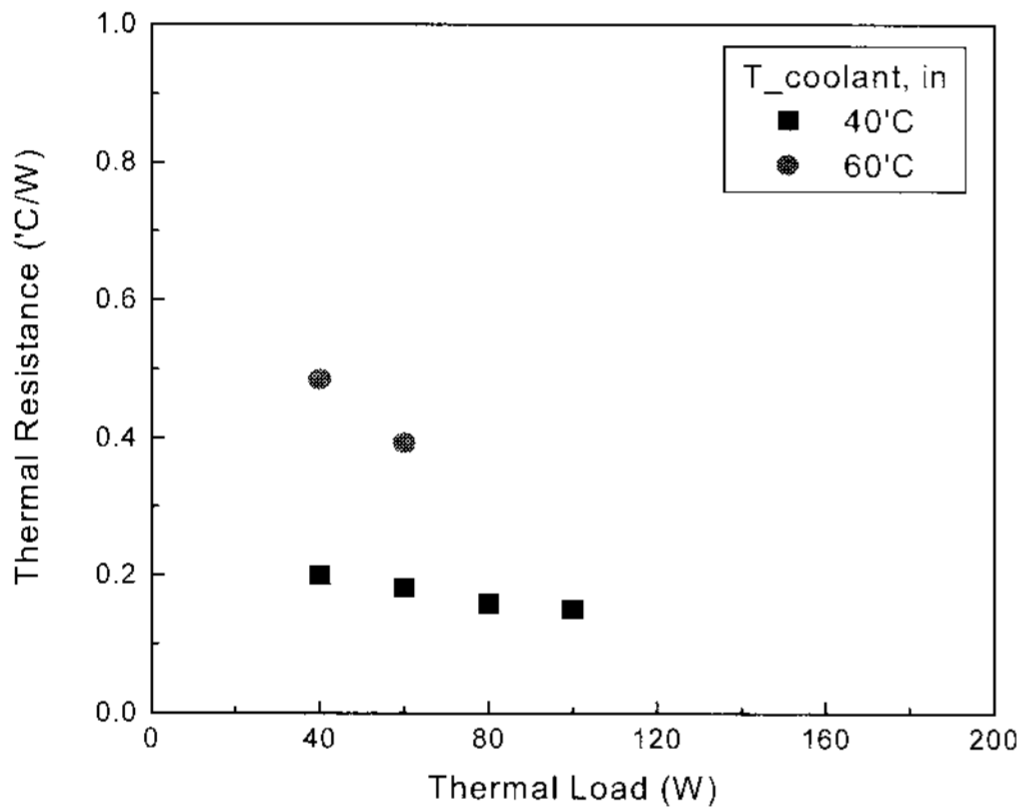


그림 8. Steady-state temperature distribution of the thermosyphon(coolant temperature : 80°C, charge ratio : 20% by volume)

그림 9는 써모사이펀의 열저항 분포를 나타내고 있다. 그림 9(a)의 경우 작동유체량 20%로 최적의 성능을 나타내며 0.06°C/W 내외에 분포하고 있다. 이 값은 슬랩웍 히트파이프 및 스크린웍 히트파이프보다 2배 증가한 값이다. 슬랩웍히트파이프와 달리 수열매체의 온도가 낮을수록 성능이 좋았다. 작동유체량이 50%인 경우(그림 9(b))의 수열매체 온도 40°C에서의 열저항은 0.2°C/W 내외로 분포하였다.



(a) charge ratio : 20% by volume



(b) charge ratio : 50% by volume

그림 9. Thermal resistance of thermosyphon as function of thermal load.

4. 결론

확대된 응축부(25.4 mm)를 갖는 진공관형 태양열 집열기용 히트파이프에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 슬랩워 히트파이프는 수열매체의 온도가 높을수록 성능이 좋았다. 그러나, 동일한 사양의 확대 응축부를 가질 때 증발부 직경이 8.0 mm인 경우가 9.52 mm에 비하여 최대 열부하가 감소하였고, 열저항은 증가하

였다.

2. 스크린워 히트파이프에서 경우 작동한계 및 열저항 관점에서의 성능은 작동유체 주입량이 적을수록 우수하여 10%일 때 가장 우수한 성능을 나타냈다. 수열매체의 온도와 무관하게 일정한 성능을 발휘하였지만, 국부적인 과열현상이 증발부에서 발생하였다.
3. 써모사이펀은 슬랩워 히트파이프 및 스크린워 히트파이프에 비하여 낮은 열부하에서 작동한계에 도달하였다. 최상의 작동조건(작동유체량 20% 또는 30%)에서의 열저항 또한 슬랩워 히트파이프 및 스크린워 히트파이프보다 컸다.
4. 증발부 직경 8mm의 히트파이프를 응축부 수열매체 유입 온도가 80°C인 경우를 중심으로 비교하면, 열저항 관점에서 슬랩워 히트파이프와 스크린워 히트파이프의 성능이 써모사이펀보다 우수하였다.

후 기

본 연구는 2001년도 산업자원부 에너지 관리공단의 대체에너지 기술개발사업에 의해 지원되었으며, 이에 감사한다

참고문헌

1. 부준홍, 곽희열, 중온용 진공관식 태양열 집열기의 성능 예측, 한국태양에너지학회 1998년도 창립20주년기념 학술대회 논문집, (1998), pp.201-207
2. 임광빈, 김철주, 태양열 집열기용 열파이프의 구조와 작동 특성에 관한 연구, 한국에너지공학 학회지, 2권 2호, (1993), pp.179-186
3. 김철주, 임광빈, 열파이프가 부착된 평판형 태양열 집열기의 열전달 특성에 대한 실험적 고찰, 대한기계학회 논문집, 17권 5호, (1993), pp. 1237-

- 1245.
4. A. Faghri, *Heat Pipe Science and Technology*, Talor & Francis, USA, (1995), pp. 24-32.
 5. G. P. Peterson, *Introduction to Heat Pipes - Modeling, Testing and Applications*, Wiley-Interscience, USA, (1994), pp. 241-246.
 6. 부준홍, 정환수, 곽희열, 강용혁, 중온 범위 태양열 집열기용 히트파이프의 성능 시험, 한국태양에너지 1999년도 춘계학술대회 논문집, (1999), pp. 36-43.
 7. 부준홍, 정환수, 곽희열, 강용혁, 물과 에탄올을 작동유체로 하는 중온범위 슬랩-윅 히트파이프의 성능 시험, 한국태양에너지 1999년도 추계학술대회 논문집, (1999), pp.121-126
 8. J. H. Boo and H. S. Chung, An Experimental Study of a Slab-wick Heat Pipe for Medium-high Condenser Temperatures, 11th International Heat Pipe Conference, Japan, (1999), Paper No. A11-3.
 9. 부준홍, 정원복, 곽희열, 태양열 집열기용 히트파이프의 열전달 성능, 대한기계학회 2000년도 열공학부문 추계학술대회 논문집, (2000), pp. 117-122.
 10. 정원복, 부준홍, 곽희열, 천만석, 중온 응축부 온도 범위에서 편조윅 및 슬랩윅을 갖는 히트파이프의 성능비교 연구, 대한기계학회 2001년도 열공학부문 추계학술대회 논문집, (2001), pp. 163-168
 11. G. S. H. Lock, *The Tubular Thermosyphon*, Oxford University Press, USA, (1992), pp. 132-153