

물-에탄올 혼합물을 작동유체로 하는 진공관형 태양열 집열기용 히트파이프의 작동특성

정의국*, 부준홍**, 곽희열***

*한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과(egjung@kau.ac.kr)
**한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부(jhboo@kau.ac.kr)
***한국에너지기술연구원 태양열연구센터(hykwak@kier.re.kr)

Performance Characteristics of a Heat Pipe Having Water-Ethanol Mixture as Working Fluid for Evacuated Solar Collectors

Jung, Eui-Guk , Boo, Joon-Hong, Kwak, Hee-Youl

*Graduate School, Korea Aerospace University(egjung@kau.ac.kr)
**School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University(jhboo@kau.ac.kr)
***Korea Institute of Energy Research(KIER)(hykwak@kier.re.kr)

Abstract

Heat pipes are considered to be promising candidates to enhance the heat transport capability of evacuated solar collectors in a wide temperature range. The working fluid must be selected properly considering various operating conditions of heat pipes for medium-high temperature range to avoid dry-out, local overheating, and frozen failure. The advantage of using binary mixture as heat pipe working fluid is that it can extend operating temperature range of the system as it can overcome operating temperature limit of a single fluid. Various operating temperature ranges were imposed in the experiments to simulate the actual operation of solar collectors using water-ethanol binary mixture. Tests were conducted for the coolant temperature range of -10°C to 120°C, and mixing ratio range was from 0 to 1 based on mass fraction.

Keywords : 진공관형 태양열 집열기(Evacuated solar collector), 히트파이프(Heat pipe), 2 성분 혼합물(Binary mixture), 물-에탄올 (Water-ethanol)

기 호 설 명

R_{th}	: 열저항 (°C/W)
Q_{input}	: 입력열부하 (W)
\bar{T}_{evap}	: 증발부 평균온도 (°C)
\bar{T}_{cond}	: 응축부 평균온도 (°C)
M_e	: 에탄올 질량 (kg)
M_w	: 물 질량 (kg)

투고일자 : 2008년 9월 17일, 심사일자 : 2008년 9월 24일, 게재확정일자 : 2008년 10월 20일,
교신저자 : 부준홍(jhboo@kau.ac.kr)

M : 에탄올의 질량분율, 식(1)로 정의

1. 서 론

진공관형 태양열 집열기에 응용되는 히트프는 집열관에서 흡수한 태양열을 중·고온의 수열매체에 전달하는 역할을 수행할 수 있어야 한다. 그림 1에서 보인바와 같이 집열기에 적용하는 히트파이프 증발부가 전체길이의 90% 이상을 차지하므로 증발부에서 발행한 증기가 긴 전열면을 유동해야 한다. 따라서 국부적인 과열현상이나 드라이 아웃과 같은 현상이 발생할 우려가 존재함으로, 히트파이프를 설계할 경우 별도의 관심이 요구된다. 진공관형 태양열 집열기에 응용되는 히트파이프의 설계에 관한 선행연구들이 있었다. Boo 와 Chung은 히트파이프의 대체 워 구조물을 연구하기 위하여 다양한 워 구조물(스크린 워, 슬랩 워 및 편조워)과 적절한 충전량에 관한 세부적인 실험적 연구를 수행하였으며¹⁻⁵⁾, 히트파이프의 응축부의 직경을 증발부에 비해 크게 설계 및 제작함으로써 응축부의 열전달 면적을 증대하여 열전달 성능을 향상시켰다³⁾. 본 연구에서 히트파이프의 성능에 영향을 주는 작동유체의 선정에 목적을 두며, 계절간 또는 주·야간 온도차에 무관하게 태양열 집열기가 안정적으로 작동하도록 2 성분(물-에탄올) 혼합물을 작동유체로 선정하여 혼합비율에 따른 히트파이프 성능변화를 보고자 하였다. 그림 2. 에 물과 에탄올의 FOM을 비교하였으며, 여기

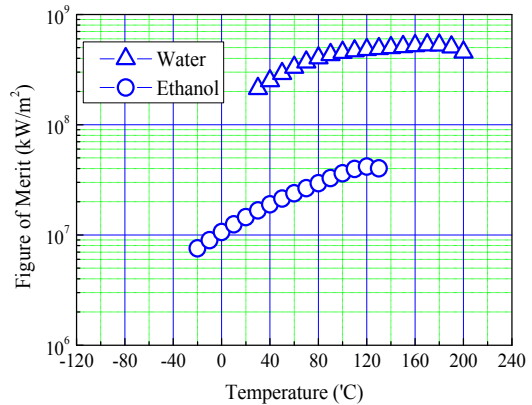


그림 2. 물과 에탄올의 FOM 비교

서 FOM은 히트파이프에 사용되는 작동유체의 성능지수를 나타낸다. 통상적으로 물은 작동유체로서 우수한 FOM(Figure of merit)을 갖지만 낮은 온도범위에서 제한사항을 갖는다(그림 2). 한편, 에탄올은 물에 비하여 FOM은 낮지만 더 낮은 온도에서 적용할 수 있는 장점을 갖는다(그림 2). 물과 에탄올의 혼합은 4계절 대기에 노출되는 진공관형 태양열 집열기의 작동온도 범위를 확장할 수 있는 가능성을 갖는다. 이전의 관련연구들에 의하면 물과 에탄올 혼합물이 빙점을 강하시킨다고 알려져 있으며 태양열 집열기에 사용되는 서모사이펀의 경우 극저극지방이나 겨울철에 결빙을 방지하기 위하여 물에 1-2%의 에탄올 혼합을 추천하고 있다⁶⁾. 본 연구에서 물과 에탄올의 혼합물 작동유체를 편조워 히트파이프에 적용하였다^{7,8)}. 1 기압에서

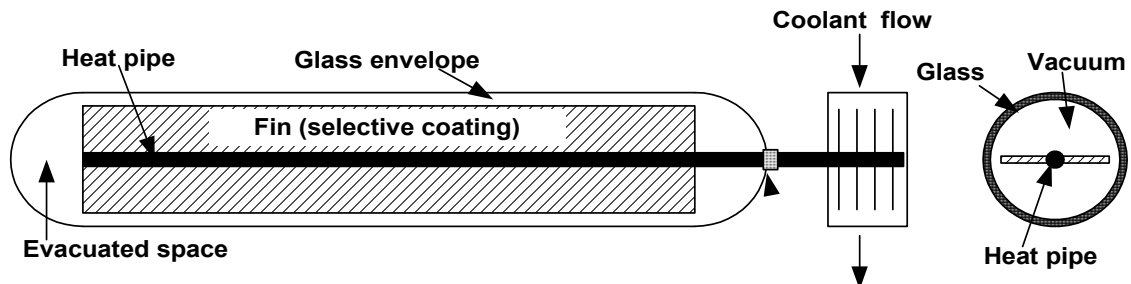


그림 1. 히트파이프를 사용한 진공관형 태양열 집열기

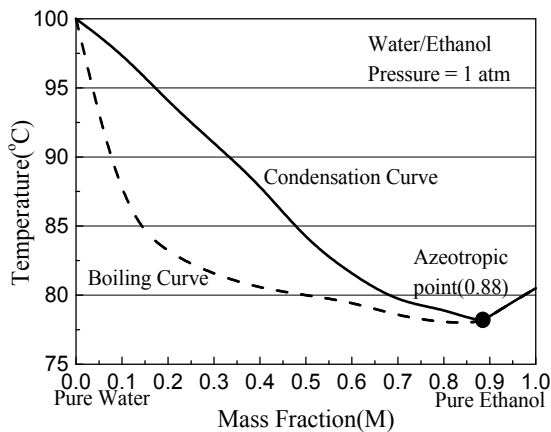


그림 3. 물-에탄올 상평형 선도

물과 에탄올의 상평형 선도를 그림 3에 나타내었다. 일반적으로 응축선도와 증발선도 사이의 온도차가 작을수록 우수한 성능을 나타내며 공비점(질량분율 0.88)에서는 순물질과 같이 거동하게 된다. 2 성분 혼합물의 물리적 거동은 복잡한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 냉각원의 온도를 $-10 \sim 120^{\circ}\text{C}$ 범위에서 제어하였으며, 상온 25°C 에서 물과 에탄올의 일정한 질량비를 획득한 혼합물을 사용하여 실험을 수행하였다. 일정한 질량분율에서 입력열부하에 따른 히트파이프의 열적 특성에 관한 결과를 제시하였다.

2. 실험장치 및 히트파이프 제원

그림 4에 본 연구에서 실험을 수행하기 위한 실험장치를 나타내었다. 실험에 사용한 히트파이프는 길이 1710 mm 이고, 내경 7 mm, 외경 8 mm 의 구리 파이프를 증발부와 단열부에 사용하였고, 응축부는 22 mm 외경의 확대된 형태를 사용하여 제작하였다. 이 때 증발부의 길이 1570 mm, 단열부 길이 50 mm, 그리고 응축부 길이는 90 mm이었다. 히트파이프 증발부 끝단은 마개를 만들어 견고하게 용접하였으며, 응축부 끝단은 혼합비의 변화에 따른 실험을 수행하기 위해서 작동유체

주입관을 부착하고 이 관에 작동유체를 주입하기 위한 니들밸브 부착하였다. 히트파이프의 작동온도를 측정하기 위해 열전대를 부착하여 자료획득장치를 통해 온도를 획득, 기록하였다. K-type(28 AWG 직경 0.5 mm) 열전대를 증발부에 4개 (파이프 끝단으로부터 50 mm, 750 mm, 1300 mm, 1535 mm), 단열부에 1개 (증발부 끝단으로부터 1595 mm 단열부의 중간위치) 그리고 응축부에 2개 (응축부의 시작위치, 응축부의 끝단)를 부착하였다. 증발부에는 밴드형 전기저항식 히터(220V, 600W)를 등 간격으로 촘촘하게 감아 입력열부하를 공급할 수 있게 하였으며, 전압조절기를 연결하여 열원을 조절할 수 있게 하였다. 그림 5에 보인바와 같이, 히트파이프의 응축부의 외경을 22 mm로 확대된 표면을 갖도록 설계하여, 수열매체와의 접촉면적을 증대시켰다. 응축부와 수열매체사이의 효과적인 열전달 성능을 보장하기 위하여 내부에 원주형으로 제작된 10개의 핀이

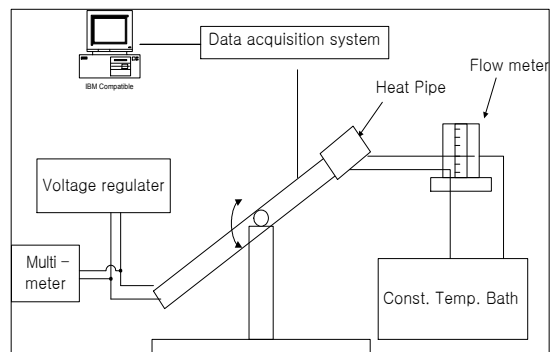


그림 4. 실험장치



그림 5. 확대된 응축부 형상

부착된 냉각재킷을 설계, 제작하여 확보된 응축부를 삽입하게 하였다⁵⁾. 또한, 냉각원과 응축부표면 히트파이프 내부 구조물로서 편조웁(0.08 mm 10가닥 24타)을 전체 히트파이프 길이에 걸쳐 삽입하였다. 증발부와 단열부는 유리섬유로 단열하였으며, 응축부는세라믹울로 단열하여 열의 출입을 방지하였다. 항온조를 사용하여 일정한 온도로 제어된, 일정량(0.6 L/min)의 수열매체(실리콘 오일)가 흐르게 하였다. 수열매체 온도는 -10℃에서 20℃씩 증가하여 120℃까지 설정하였다. 이 때 -10 ~ 20℃범위는 물의 열적성능이 나타나지 않은 영역이며, 그 이상의 범위는 물과 에탄올의 열적성능이 동시에 나타나는 온도범위임을 고려하였다. 통상적으로 히트파이프가 태양열 집열기에 적용하는 경우 45° 전후의 기울기에서 증발부가 응축부 아래에 위치하도록 설치하기 때문에, 이 기울기에서 실험을 수행하였다. 2 성분혼합 작동유체의 혼합비율은 질량분율(M)를 기준으로 하였다. 이 질량분율은 결국 물수비와 동일하다. 식(1)에 질량분율에 대한 정의를 나타내었다. 이는 전체 물수에 대한 에탄올의 질량비이며, M = 0.0인 경우 순수한 물이고, M = 1.0인 경우 순수한 에탄올을 의미한다. 질량분율에 따른 히트파이프의 성능에 대한 실험을 하는 동안 드라이아웃(dry-out)되는 현상은 없었다. 작동유체 중 에탄올의 물리적 특성을 고려하여 히트파이프의 외벽의 온도가 최대 180℃에 도달하는 경우 실험을 중단하였으며, 이때의 열부하를 한계열부하로 정의하였다.

$$M = \frac{M_e}{M_e + M_w} \quad (1)$$

작동유체의 충전율은 통상적으로 서모사이편의 경우 히트파이프의 내부체적의 20% 이내 이고, 워 구조물을 사용하는 히트파이

프는 모세 구조물의 빈 체적만큼만 작동유체를 충전시킨다. 그러므로 워 구조물을 사용하는 히트파이프의 충전율이 서모사이편의 충전율 보다 작다고 할 수 있으며, 편조웁의 경우 내부체적의 20%를 충전하는 것이 일반적이다. 본 실험에 사용된 작동유체의 양은 내부체적의 약 20%를 차지하는 20cc를 충전하였다.

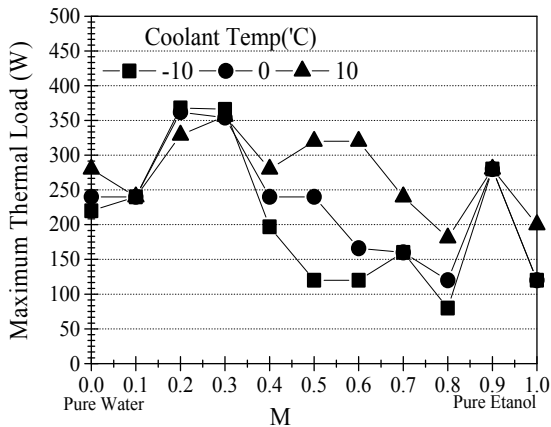
각각의 조건에서 최적의 질량분율을 찾기 위해 성능실험을 수행하고 열저항 개념(식(2))와 최대공급열부하로 열성능을 비교하였다.

$$R_{th} = \frac{\bar{T}_{evap} + \bar{T}_{cond}}{Q_{input}} \quad (2)$$

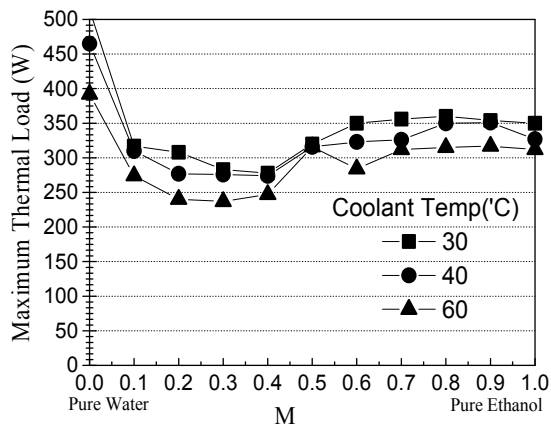
3. 실험결과 및 토론

그림 6.는 여러 가지 수열매체 온도범위에서 질량분율 변화에 따른 최대공급열부하를 나타낸다. -10℃에서 10℃까지(그림 5. (a))의 수열매체 온도범위에서 최대공급열부하는 질량분율 0.2에서 0.3 범위에서 (320 ~ 370)W로 가장 높았으며, M = 0.8 근처에서 (80 ~ 180)W로 가장 낮은 값을 보였다. -10과 0℃ 사이에 대하여 최대공급열부하는 M = 0.3까지는 증가하며 M = 0.8까지 다시감소 후 M = 0.9에서 증가하는 경향을 보였다. 그러나 수열매체온도 10℃의 경우에는 M = 0.5와 0.6에서 약간 증가하는 경향을 보이고 있다.

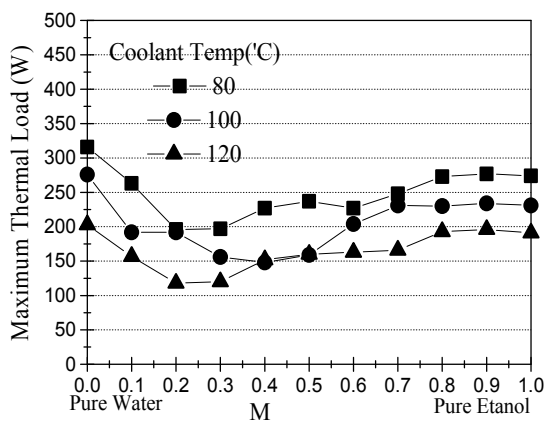
수열매체온도 30에서 60℃까지 범위(그림 6.(b))의 경우에 최대공급열부하는 M = 0.4까지 감소하며, 그 이후에 M = 0.9까지 증가하는 경향을 보인다. 순수한 물을 제외한다면 가장 높은 공급열부하는 질량분율 M = 0.6 ~ 0.9에서 가장 높은 값(320 ~ 360)W를 나타내었으며 질량분율 M = 0.1 ~ 0.3 범위에서 가장 낮은 값(240 ~ 320)W를 나타내었다.



a) 수열매체온도 범위 -10-10°C



b) 수열매체온도 범위 30-40°C



c) 수열매체온도 범위 80-120°C

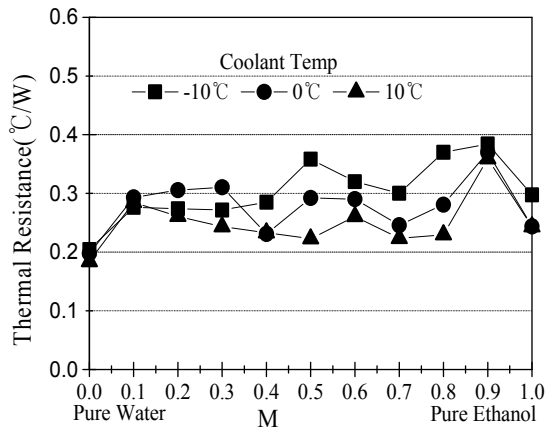
그림 6. 질량분율에 따른 최대공급열부하

수열매체 온도 80에서 120°C범위(그림. 6.(c))의 경우에 최대공급열부하는 질량분율 $M = 0.3$ 이전까지는 감소하지만 $M = 0.4$ 부터는 증가하는 경향을 보인다. 순수한 물을 제외 하면 가장 높은 열부하는 $M = 0.9$ 에서 가장 높은 값(180 ~ 260)W을 보인다.

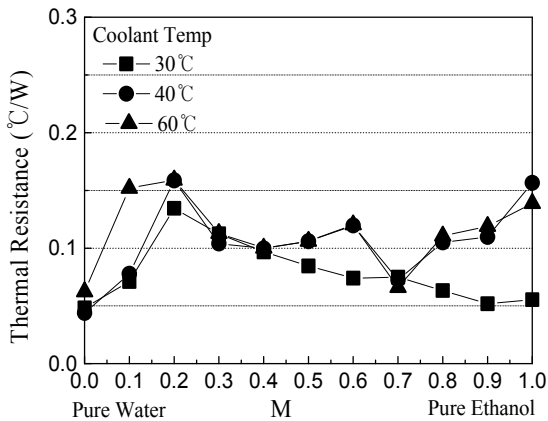
그림 7.에 입력열부하 120 W에서 히트파이프의 열저항을 나타내었다. 입력열부하 120 W는 전체 수열매체 온도범위와 전체질량분율에서 입력할 수 있는 최대공급열부하로 조사되었다.

수열매체온도 -10에서 10°C까지 범위에서(그림 7. (a))의 경우에 대하여, 열저항은 순수한 물의 경우에 가장 낮은 값 (0.24 ~ 0.30)°C/W을 보였다. 수열매체온도 -10°C의 질량분율 $M = 0.3$ 에서 가장 낮은 열저항 값은 0.27°C/W으로서 가장 낮았으며, $M = 0.9$ 에서 0.38°C/W으로서 가장 높은 값을 보인다. 순수한 물과 에탄올을 제외하면 열저항은 질량분율 $M = 0.1$ 와 0.3에서 각각 0.27°C/W 와 0.28°C/W로서 가장 낮은 값을 보였다. 수열매체온도 0°C의 경우에 대해서, 열저항은 질량분율 $M = 0.5$ 에서 0.23°C/W로서 가장 낮은 값을 보였으며, 질량분율 $M = 0.9$ 에서 0.37°C/W로서 가장 높은 값을 보였다. 수열매체온도 10°C의 경우에 대해서, 열저항은 질량분율 $M = 0.5$ 에서 0.23°C/W로서 가장 낮은 값을 나타내며, $M = 0.9$ 에서 0.36°C/W로서 가장 높은 값을 보였다.

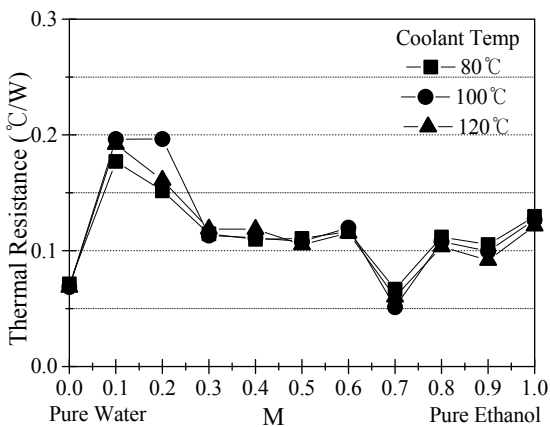
수열매체온도 30°C에서 60°C 범위(그림 7.(b))의 질량분율에 대한 열저항을 나타내었다. 이러한 수열매체의 경우에 순수한 물의 열저항은 (0.05 ~ 0.16)°C/W로 가장 낮은 값을 보였다. 수열매체온도 30°C의 경우에, 열저항은 질량분율 $M = 0.9$ 에서 0.05°C/W로 가장 낮은 값을 보였다. 수열매체온도 40°C 경우에 대해서 열저항은 $M = 0.7$ 에서 0.07°C/W로서 가장 낮은 값을 보였다. 수열매체온도 60°C의 경우에 대해서, 열저항은 질량분율 $M = 0.7$ 에서 0.07°C/W로 가장 낮은 값을



(a) 수열매체온도 범위 -10~10°C



(b) 수열매체온도 범위 30~60°C



(c) 수열매체온도 범위 80~120°C

그림 7. 열부하 120W에서 질량분율에 대한 열저항

나타내었으며 질량분율 $M = 0.2$ 에서 $0.16^\circ\text{C}/\text{W}$ 로 가장 높은 값을 나타내었다. 수열매체 온도 범위 80°C 에서 120°C (그림 7.(c))의 경우에 대한 열저항을 나타내었다. 열저항은 순수한 물과 질량분율 $M = 0.7$ 에서 가장 낮은 값을 보였다.

수열매체온도 80°C 의 경우, 열저항은 질량분율 $M = 0.7$ 에서 $0.07^\circ\text{C}/\text{W}$ 로서 가장 낮은 값을 보였으며 질량분율 $M = 0.2$ 에서 $0.18^\circ\text{C}/\text{W}$ 로서 가장 높은 값을 나타내었다. 수열매체 온도 100°C 에 대해서 열저항은 질량분율 $M = 0.7$ 에서 $0.05^\circ\text{C}/\text{W}$ 로서 가장 낮은 값을 나타내었으며, 질량분율 $M = 0.2$ 에서 $0.20^\circ\text{C}/\text{W}$ 로서 가장 높은 값을 나타내었다. 수열매체 온도 120°C 의 경우에 대해서 열저항은 질량분율 $M = 0.7$ 에서 $0.06^\circ\text{C}/\text{W}$ 로서 가장 낮은 값을 보였으며 질량분율 $M = 0.2$ 에서 $0.19^\circ\text{C}/\text{W}$ 로서 가장 높은 값을 보였다.

4. 결 론

진공관형 태양열 집열기의 히트파이프에 2 성분 혼합물 작동유체의 응용에 관한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 물-에탄올의 혼합물을 작동유체로 적용하였을 때 수열매체 온도 -10°C 에서 10°C 범위에 대해서 질량분율 $M = 0.2 \sim 0.3$ 범위에서 공급열부하는 $(320 \sim 370)\text{W}$ 범위로서 가장 높았다. 수열매체 온도 30°C 에서 60°C 범위에서 질량분율 $M = 0.6 \sim 0.9$ 범위에서 공급열부하는 $320 \sim 360\text{W}$ 범위로서 가장 높았다. 수열매체 온도가 80°C 에서 120°C 범위에 대하여 질량분율 $M = 0.8 \sim 0.9$ 범위에서 공급열부하가 가장 높게 나타났다.
- (2) 입력열부하 120W 에서 열저항의 관점에서 수열매체온도 범위 -10°C 에서 10°C 범위에서 최적 혼합비율은 $M = 0.1 \sim 0.3$ 으로서 열저항은 $0.27^\circ\text{C}/\text{W}$ 에

서 0.28°C/W의 값을 나타내었다. 수열 매체온도 30°C 이상의 범위에 대해서 열 저항은 0.05 ~ 2.0°C/W범위에 있으며 최적혼합비율은 $M = 0.7 \sim 0.9$ 범위에서 나타났다.

8. 정의국, 정원복, 부준홍, “중온범위에서 2성분 혼합물을 작동유체로 사용하는 히트파이프의 열성능 연구”, 대한설비공학회 하계학술발표대회, 제2권, pp. 887-892, 2004

참 고 문 헌

1. 부준홍, 정환수, 광희열, 강용혁, “중온범위 태양열 집열기용 히트파이프의 성능시험”, 한국태양에너지학회 춘계학술대회 논문집, pp. 36-43, 1999
2. Boo, J. H., and Chung, H. S., “An Experimental Study of a Slab-wick Heat Pipe for Medium-high Condenser Temperatures”, 11th International Heat Pipe Conference, A11-3, 1999
3. 부준홍, 정환수, 광희열, 강용혁, “물과 에탄올을 작동유체로 하는 중온범위 슬랩-윅 히트파이프의 성능 시험”, 한국태양에너지학회 추계학술대회 논문집, pp. 121-126, 1999
4. 정원복, 부준홍, 광희열, 천만석, “중온 응축부 온도 범위에서 편조윅 및 슬랩윅 갖는 히트파이프의 성능비교 연구”, 대한기계학회 열공학 부문 추계학술대회 논문집, pp.163-186, 2001
5. 부준홍, 정원복, 광희열, “확관 응축부를 갖는 진공관형 태양열 집열기용 히트파이프 성능 비교 연구”, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 22, No. 4, pp.18-25, 2002
6. Piro, L. S., Piro, I. L., 1997, *Industrial Two-phase Thermosyphons*, Begell House, pp. 96-291, 1997
7. Jung, E. G., Chung, W. B., and Boo, J. H., “Performance of Heat Pipes for Solar Collector Using Binary Mixture Working Fluid”, The 7th International Heat Pipe Symposium, pp. 140-145, 2003