2 성분 혼합물을 작동유체로 사용하는 태양열 집열기용 히트파이프의 실험적 연구

정의국† · 부준홍* · 정원복*

An Experimental Study of a Heat pipe with Binary Mixture Working Fluid for Solar Collector

Jung, Eui Guk, Boo, Joon Hong and Chung, Won Bok

Key Words : binary mixture working fluid(2 성분혼합 작동유체), mole fraction(몰분율), thermal resistance(열저항)

Abstract

Heat pipes with binary mixture fabricated and tested for applications where condenser temperature is in a range of 10℃ to 130℃. The pipe materials 8.0 mm O.D. cupper tube and the working fluids are ethanol-water mixtures. The total length of test of the heat pipe was 1710mm in which evaporator section was 1570mm, adiabatic section was 50mm and condenser section was 90mm. Mixing ratios of ethanol and water could be variable in mole fraction. Temperature of condenser section was 10℃, 80℃ and 130℃. Heat pipe performance experimental study was accomplished with change of mixing ratio in these temperatures. The fill charge ratio was 20% of the heat pipe volume. Wick structure was woven-wire and method of experimental work was that thermal load was increased 20W step until the heat pipe wall temperature reached at 150℃. Results were following: At coolant 10℃ and 130℃, mixing ratio that have beat thermal performance was 0.8M+ and at coolant 80℃, was 0.3 ~ 0.5 M+.

1. 서 론

진공관형 태양열 집열기는 평판형 집열기와 달리 기본적으로 중온(80 ~ 150℃) 범위의 집열을 성취하여 산업용 열원으로 사용할 수 있다는 면에서 우수한 장점이 있다.

우리나라의 경우 진공관형 태양열 집열기에 사용하는 히트 파이프는 계절에 따라 다른 일조량의 환경에서 작동함으로 작동 온도범위가 영하의 저온환경에서 고온의 넓은 범위에서 정상적으로 작동되어야 한다. 히트파이프의 열전달 성능은 히트파이프의 형상, 작동유체의 충전량, 윅 구조물의 형태, 히트파이프의 기울기 등에 따라 결정된다. 특별히 진공관형 태양열 집열기에 사용하는 히트파이프는 직경이 작고 증발부가 전체 히트파이프 길이의 90% 이상을 차지하고 있고 응축부는 매우 짧다. 따라서 히트파이프 외벽이 국부적으로 과열되기도 한다. 수열매체 온도가 저온(0℃ 부근)에서 고온 (130℃) 범위에 이르는 넓은 범위 작동 온도에서 사용할 수 있는 고성능의 히트파이프가 필수적이며, 이러한 온도범위에서 작동시킬 수 있는 작동유체 선정이 관심사이다..

일련의 진공관형 태양열 집열기용 히트파이프 성능 개선을 위한 다양한 연구를 수행하여왔다. 고성능 윅 구조물에 관한 연구를 위해 슬랩윅, 편조윅에 관한 성능 비교연구 및 중고온 범위에서 작동유체의 최적 충전량에 관한 실험적 연구도 수행되었다[1]. 응축부 직경이 확대된 형태의 히트파이프에 관한 실험적 연구도 수행되었다.[2].

본 연구는 이러한 연구의 연장선에서 폭넓은 작동온도 범위에서 정상적으로 사용할 수 있는 작동유체를 선정하는데 목적이 있다.

상온에서 사용하는 작동유체로 물이 가장 우수한 작동유체로서 200℃온도 범위까지 사용할 수 있지만 0℃에서는 어는 단점이 있다. 물의 장점을 유지하면서 0℃에서도 얼지 않고 작동하는 작동유체를 만들기 위해 2 성분 혼합 작동유체(binary mixture working fluid)에 대한 여러 연구가 있었다.

† 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원
E-mail : jhboo@hau.ac.kr
TEL : (02)300-0107 FAX : (02)3158-4429
* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

혼합매체로서 물과 에탄올[3], 물과 메탄올[4], 물과 에틸렌글리콜[5], 물과 글리세롤[6]을 사용하여 써모사이펀의 열전달 성능연구가 수행되었다. 물과 섞는 작동유체로는 에탄올이 가장 우수하였고, 이 경우 0.4~0.5M+ (mole fraction) 근처에서 우수한 성능을 나타내었다[7].

본 연구는 확대 응축부를 갖는 편조윅 히트파이프에대하여 응축부 온도를 10℃, 80℃, 130℃로 변화시키면서 실험을 진행하였다. 실험은 히트파이프 외벽의 부분적인 온도가 150℃에 도달할 때까지 열부하를 증가시키면서 실험을 진행하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1 은 본 실험에 사용한 히트파이프의 개략적인 형상을 보여주고 있다. 히트파이프 전체 길이는 1710mm 이고, 내경 6 mm, 외경 8 mm 구리 파이프를 사용하여 제작하였다. 히트파이프의 증발부 길이는 1570mm, 단열부 길이 50mm, 응축부 길이 90mm 로 하였다. 히트파이프 끝에는 니들밸브를 부착하여 다양한 혼합비율에 따른 실험을 진행할 수 있게 하였다.

응축부의 직경은 외경 22mm 로 확대한 상태로서 열전달 표면적을 증가시켜 열전달 효과를 높이도록 하였으며. 냉각유체(실리콘오일 DC200F)의 순환을 위해 냉각재킷을 사용하였다.

냉각재킷 내부는 10 개의 원주형 핀을 부착하여 히트파이프와 냉각유체의 열전달 효과를 증가시키도록 설계하였다(Fig. 2)

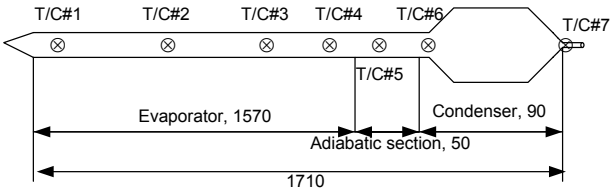

Fig. 1 Schematic of heat pipe with enlarged surface condenser.

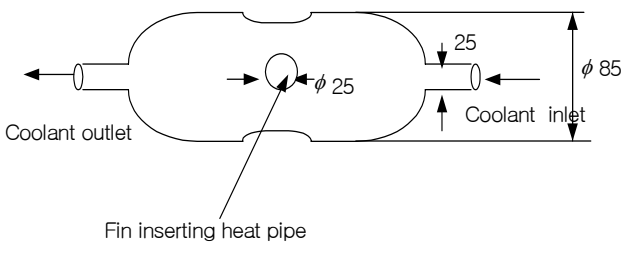

Fig. 2 Cooling jacket with fin inserting heat pipe

히트파이프의 내부에 삽입한 윅 구조물은 편조윅(woven-wire wick)이다.

히트파이프 작동유체는 에탄올(99.9%)과 증류수의 혼합물을 사용하였다. 혼합비율은 에탄올을 기준으로 하여 몰분율(M+)로 구분하였으며, 충전량은 히트파이프의 전체체적의 20%로 하였다. 작동유체의 주입은 파이프 내부를 확산오일형 진공펌프(diffusion-oil type vacuum pump)를 이용하여 진공(2.0×10-5 torr ~ 8.0 × 10-6 torr) 상태로 만든 후 자체 제작한 작동유체 주입장치를 이용하여 주입하였다.

히트파이프의 작동온도를 측정하기 위해 열전대를 부착하여 자료획득장치(Fluke 사, Hydra Series II, 2625A)를 통해 온도를 획득, 기록하였다. K-type(Omega 사, 28AWG) 열전대를 증발부에 4 개 (T/C#1 : 파이프 끝단으로부터 50 mm , T/C#2 : 750 mm , T/C#3 : 1300mm, T/C#4 1535mm), 단열부에 1 개 (T/C#5 : 1595mm 단열부의 중간위치) 그리고 응축부에 2 개 (T/C#6 : 1620mm 응축부의 시작위치, T/C#7 : 1710mm 파이프의 끝단)를 부착하였다.

증발부에 밴드형 전기히트(220V, 600W)를 일정한 간격으로 촘촘하게 감아 열공급을 할 수 있도록 하였으며, 전압조절기를 연결하여 입력 열부하를 조절할 수 있게 하였다. 증발부 및 단열부는 유리섬유로, 응축부는 세라막울로 실험장치를 단열하였다.

응축부에 냉각재킷을 부착하여 항온조(Fisher scientific 사, Model 9100)를 통해 일정한 온도로 제어된 일정량(0.6L/min)의 수열매체(실리콘오일)가 흐르게 하였다.

히트파이프를 태양열 집열기에 적용하는 경우에 45 도 전후로 기울기로 증발부가 응축부 아래에 위치하도록 히트파이프를 설치하기 때문에, 이 기울기에서 실험을 수행하였다.

저온과 고온의 넓은 범위에서의 히트파이프 작동성능을 알기 위해 냉각수 온도를 냉각수 온도를 10℃, 80℃, 130℃로 설정하여, 각각의 온도에서 혼합비율을 변화시키면서 성능 실험을 수행하였다. 순수한 에탄올과 물의 열 물리적인 특성을 고려하여, 히트파이프의 국부적인 최고의 온도가 150℃가 될 때까지 공급열부하를 20W 간격으로 증가시키면서 실험을 수행하였다.

혼합비율과 각각의 응축부 온도에서의 히트파이프의 성능을 비교하기 위해 증발부와 응축부의 평균온도의 차이를 입력 열부하로 나누어 표현되는 열저항 개념(식(1))을 사용하였다.

$$R_{TH} = (T_{e,avg} - T_{c,avg}) / Q \qquad (1)$$

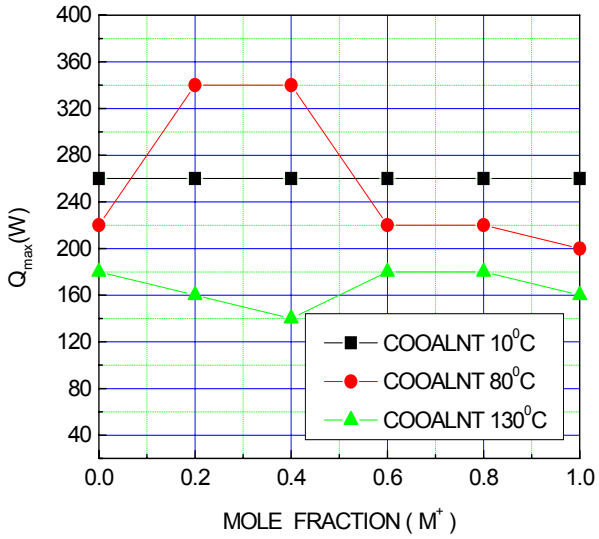

Fig. 3 Maximum thermal load

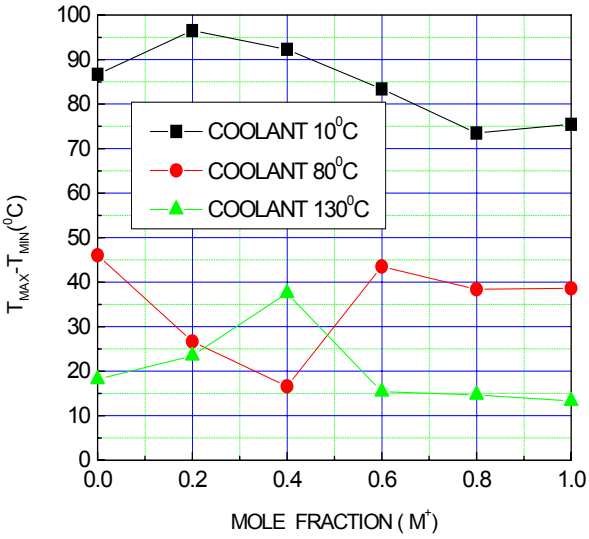

Fig. 4 Maximum and minimum temperature difference.

3. 실험 결과 및 토의

저온, 중온, 고온에서의 2 성분혼합물을 사용하여 히트파이프의 성능실험, 결과를 정리하였다.

Fig.3 은 혼합비율에 따른 각각의 냉각수 온도에서의 최대 공급 열부하를 나타낸다. 그림의 결과는 히트파이프의 국부적인 영역의 한계온도 150℃가 되는 입력 열부하를 나타낸다. 저온과 고온에서는 그의 차이가 20W 내외로 변화가 적었다. 고온의 경우는 0.6~0.8M+ 내외가 상대적으로 높은 최대 입력 열부하를 나타내었다. 중온에서 0.2~0.4M+ 혼합비율에서 상대적으로 높은 입력열부하를 나타내었으며, 저온의 환경보다 더 높은 입력열부하를 갖는 현상이 나타났다.

Fig. 4 는 냉각수 온도별 혼합비율에 따른 히트파이프의 최대 온도와 최저 온도의 차이를 보여준다. 모든 실험조건에서 히트파이프는 드라이아웃 없이 정상상태에 도달 하였다. 실험은 순수한 에탄올과 증류수의 성질을 고려하여 설정한 한계온도인 150℃를 넘지 않는 범위에서 수행되었다.

저온의 경우는 등온성이 매우 떨어지는 경향을 보였다. 혼합비율이 증가함에 따라 0.1M+까지 감소하다가 0.8M+까지 감소하다가 그 이후에 증가하는 경향이 나타났다.

중온에서는 0.4M+까지 증가하다가 감소하는 경향이 나타났다. 고온에서는 높은 등온성을 나타내었지만, 0.4M+일 때 감소하는 경향을 보였다. 저온의 경우는 90℃의 온도차가 발생하여 등온성 면에서 다른 응축부 온도 보다 떨어지는 경향을 보였으며 60W~80W 범위에서 혼합비율(0.4M+, 0.6M+, 0.7M+)의 혼합비율의 증기 온도의 크기가 역전되는 현상이 발생했다. 결과적으로 저온의 온도(10℃)에서 0.8M+에서 우수한 등온성을 나타내었으며, 중온(80℃)에서 0.4M+혼합비율에서 우수한 등온성을 나타내었다. 또한 고온(130℃) 에서 0.6M+에서 우수한 등온성을 나타내었다.

Fig. 5~7 은 각각의 냉각수 온도(T/C #5)에 대해서 공급열부하에 대한 단열부의 증기온도를 나타내었다.

저온(10℃)에서 단열부 증기온도는 순수한 에탄올, 순수한 증류수, 0.8M+, 0.3M+에서 공급열부하에 비례적으로 증가하였으며, 그 이외의 다른 혼합비율에서는 80W 이상에서 일정한 경향을 보였다.

증기의 온도가 가장 낮은 혼합비율은 0.8M+이었으며, 0.4M+에서 가장 높은 경향을 보였으며 각각의 혼합비율과 입력 열부하에서 온도차는 60℃ 내외로까지 차이가 발생하였다. 중온(80℃)에서 단열부 증기온도는 모든 입력열부하에 대해 비례적으로 증가하는 경향을 보였다.

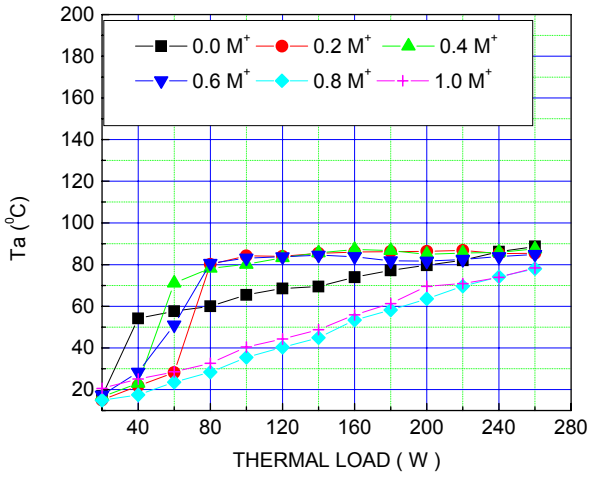

Fig. 5 Adiabatic temperature for coolant 10℃

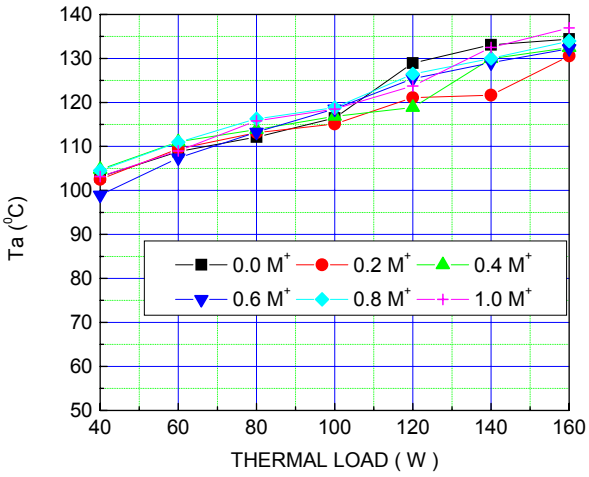

Fig. 7 Adiabatic temperature for coolant 130℃.

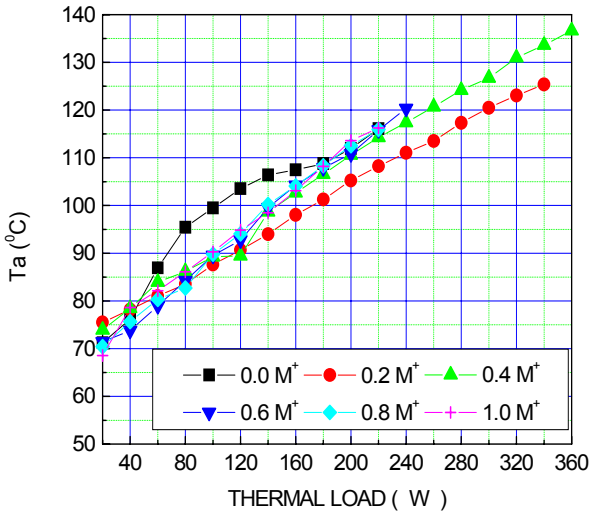

Fig. 6 Adiabatic temperature for coolant 80℃.

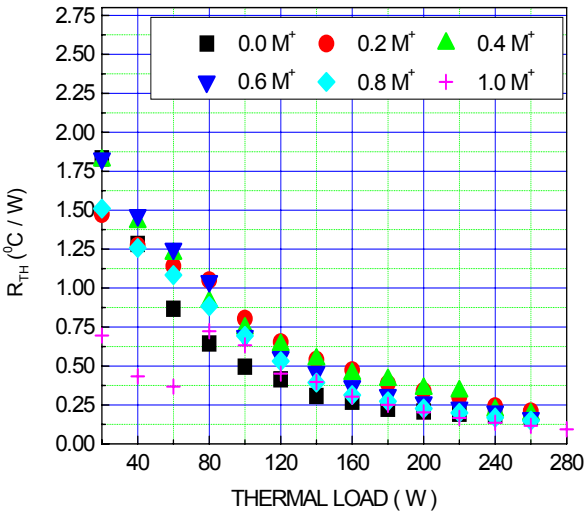

Fig. 8 Thermal resistance for coolant 10℃.

중온(80℃)에서 단열부의 증기온도는 0.2M+에서 가장 낮았으며 순수한 물에서 가장 높은 경향을 보였다. 혼합비율과 입력열부하에서 단열부 온도의 차이들은 15℃내외로 나타났다. 고온(130℃)에서 단열부의 증기온도는 공급열부하에 따라 다소 불규칙적인 현상이 발생했다.

Fig. 8~10 은 저온, 중온, 고온에서 공급열부하에 따른 열저항을 나타내었다. 열저항은 증발부와 응축부의 평균온도차를 입력 열부하로 나눈값으로 나타내었다(식(1)).

저온(10℃)에서 열저항은 혼합비율에 관계없이 입력 열부하에 반비례하는 현상을 보였으며 순수한 에탄올과 혼합비율 0.8M+가 낮은 열저항 분포를 보여 열전달성능 면에서 우수한 것으로 평가되었다.

중온(80℃)에서 열저항은 1.0 M+은 160W 에서 역전하는 현상이 발생했으며 0.6M+내외에서 가장 낮은 열저항의 분포를 나타내었으며 순수한 물의 경우가 높은 열저항의 분포를 나타내었다.

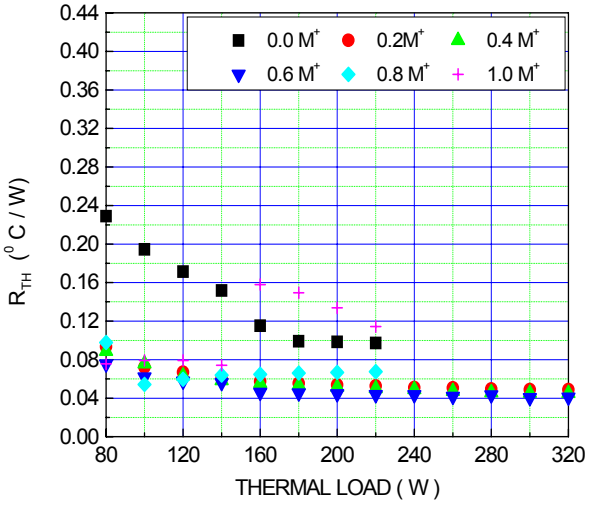

Fig. 9 Thermal resistance coolant 80℃.

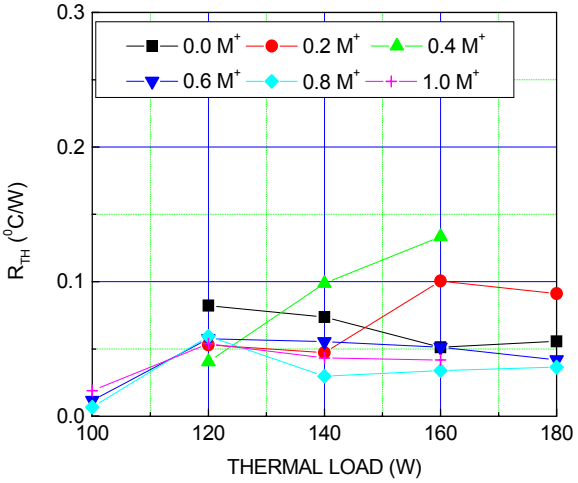

Fig. 10 Thermal resistance for coolant 130℃.

고온(130℃)의 경우에는 입력열부하에 따른 열저항의 분포가 일정하지 않았으며 0.8M+근처에서 낮은 열저항의 분포를 나타내었으며 0.1M+이 가장 높은 열저항의 분포를 높은 열저항 분포를 나타내었다.

Fig. 11~13 은 혼합비율에 따른 일정한 공급열부하에서 열저항의 분포를 보여주고 있다.

저온(10℃)에서 혼합비율 0.8 M+대부분의 모든 입력열부하에거 열저항의 감소를 보여준다. 저온에서 혼합비율 0.8 M+에서 가장 우수한 열전달 성능을 나타내었다.

중온(80℃)에서 혼합비율 0.4M+인 경우 전체 공급 열부하에 걸쳐 항상 최저 열저항을 나타내었다. 이 결과는 참고문헌[3]과도 일치하는 결과이다.

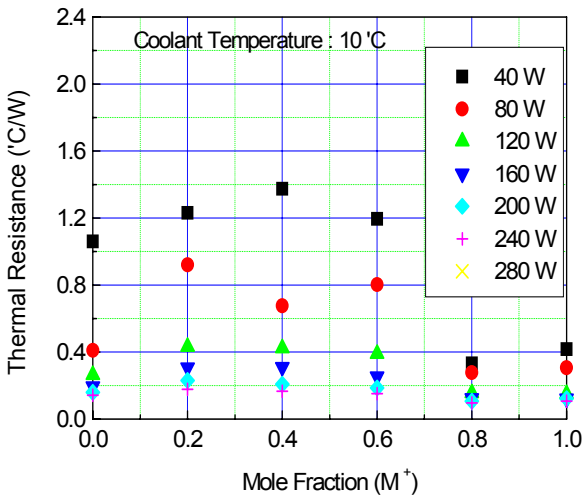

Fig. 11 Thermal resistance for mixing ratio for coolant 10℃

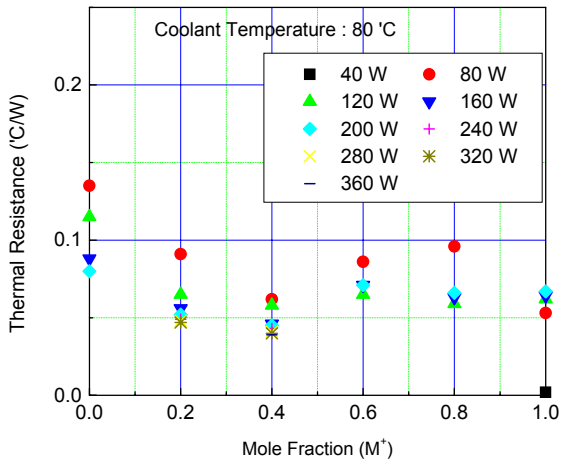

Fig. 12 Thermal resistance for mixing ratio at coolant 80℃

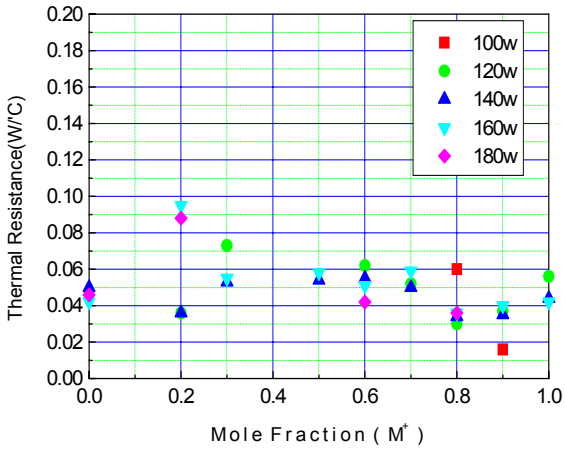

Fig. 13 Thermal resistance for mixing ratio at coolant 130℃

중온(80℃)에서 혼합비율 0.4M+인 경우 전체 공급 열부하에 걸쳐 항상 최저 열저항을 나타내었다. 이 결과는 참고문헌[3]과도 일치하는 결과이다.

고온(130℃)에서 열저항의 분포가 입력 열부하에 따라 매우 불규칙적이였다. 100W 를 제외하면 0.8M+가 가장 낮은 열저항을 나타내었다.

4. 결론

2 성분 혼합 작동유체를 사용한 진공관형 태양열 집열기용 히트파이프의 열전달 성능실험에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 저온(냉각수 온도 10℃)에서 0.8 M+의 내외가 등온성, 열저항의 자료들에 의해 우수한 열전달 성능을 보였다.
(2) 중온(냉각수 온도80℃)에서 0.5 M+의 내외가 등온성,열저항, 자료들에 의해 우수한 열전달 성능을 가진 것으로 나타났다.
(3) 고온(냉각수 온도 130℃)에서 0.8 M+의 혼합비율이 다른경우보다 우수했으며 , 공급열부에 불규칙적인 변화가 발생했다.

후기

본 연구는 2003 년도 산업자원부 에너지 관리공단의 대체에너지 기술개발사업에 의해 지원되었으며, 이에 감사한다.

참고문헌

1. Boo, J.H., and Chung, W.B., 1999, “An Experimental Study of a Slab-Wick Heat Pipe for Medium-high Condenser Temperature,” the 11th International Heat Pipe Conference, Tokyo, No. A111-3.
2. Boo, J.H., Chung, W.B., and Kwak, H.Y., 2002, “Thermal Performance of Heat Pipes having Enlarged Condenser Section in an Elevated Operating Temperature Range,” the 12th International Heat Pipe Conference, Moscow, No. H-1.
3. Peterson, G.P., 1994, *An Introcuction to Heat Pipes*, John Wiley & Sons, pp.232-236.
4. Liu, F., Liu, J., Wang, K., and Guan, L., 1992, “The Visualization Studies on the Boiling Phenomena of Mixture Fluid in Thermosyphons,” the 8th International Heat Pipe Conference, Beijing, No. A-P4.
5. Park, R.J., and Lee, Y., 1992, “Two-phase Closed Thermosyphons with Two-fluid Mixtures,” the 8th International Heat Pipe Conference, Beijing, No. B-18.
6. Tien, C.L., and Rohani, A.R., 1992, “Theory of Two-Component Heat Pipes,” Journal of Heat Transfer, November, pp.479-484
7. Qi, W., and Lang, Y., 1999, “Heat Transfer Characteristics of a Closed Two-Phase Thermosyphon Working with a Binary Mixture at Different Incline Angles,” the 11th International Heat Pipe Conference, Tokyo, No. A5-2.
8. Pioro, L.S., Pioro, I.L., 1997, *Industrial Two-phase Thermosyphons,* Begell Bouse, pp.96-291.