

작동유체가 양방향성 태양열 열다이오드의 열성능 변화에 미치는 영향 분석

고영주*, 이헌주**, 천원기***, Chen Kuan****, 임상훈*****

*제주대학교 에너지공학과(yungjoo3067@cheju.ac.kr), **제주대학교 에너지공학과(hjlee@cheju.ac.kr),
제주대학교 에너지공학과(wgchun@cheju.ac.kr), *Department of Mechanical Engineering, University
of Utah(chen@eng.utah.edu), *****한국에너지기술연구원 재생에너지연구부(shlim@kier.re.kr)

Effect of Working Fluids on the Thermal Behavior of a Bi-directional Solar Thermal Diode

Ko, Yung-Joo*, Lee Heon-Ju**, Chun, Wongee***, Chen, Kuan****, Lim, Sang-Hoon*****

*Dept. of Nuclear and Energy engineering, Cheju National University(yungjoo3067@cheju.ac.kr)

**Dept. of Nuclear and Energy engineering, Cheju National University(hjlee@cheju.ac.kr)

***Dept. of Nuclear and Energy engineering, Cheju National University(wgchun@cheju.ac.kr)

****Department of Mechanical Engineering, University of Utah(chen@eng.utah.edu)

*****Renewable Energy Research Department, Korea Institute of Energy Research(shlim@kier.re.kr)

Abstract

An experimental investigation has been carried out to study the effects of different working fluids on the behavior and thermal performance of a bi-directional thermodiode. The thermodiode was made up of two rectangular loops mounted between a collector plate and a radiator plate. Rotatable joints between the horizontal and inclined segments of the loops enable easy alteration of the direction of heat transfer. The loops and the tank were filled with a working fluid for effective heat transfer when the thermodiode was forwarded biased. Six different working fluids were tested with thermal conductivity values ranging from 0.1 to 0.56 W/m-°C, thermal expansion coefficient values ranging from 1.8×10^{-4} to $1.3 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, and kinematic viscosity values ranging from 0.65×10^{-6} to $100 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Especially, mixtures of Al_2O_3 (30nm particle) in deionized water have been tested for the volumetric ratios of 0.01, 0.02, 0.03, 0.1, 0.2%. Each experiment was carried out after the loop was filled with a working fluid for effective heat transfer and the thermodiode was forwarded biased. The solar thermodiode was heated by a radiant heater consisting of 20 halogen lamps that generated a heat flux of about 1000 W/m² on the collector surface. Results are given in terms of temperature development in different parts of the loop as heat is delivered from its hot end to the surrounding atmosphere by the radiator made of copper plates.

Keywords : 열다이오드(Thermal Diode), 루프형 Smart Module(Loop-type Smart Module), 작동유체
(Working Fluids), 동작점(Circulation Point)

접수일자 : 2007년 12월 6일, 심사완료일자 : 2008년 1월 12일

교신저자 : 고영주(yungjoo3067@cheju.ac.kr)

기호설명

α : 확산계수(m²/s) k : 열전도도(W/mK)
 β : 열팽창계수(1/K) c_p : 비열(kJ/kgK)
 ν : 동점성계수(mm²/s) T_s : 표면온도(°C)
 ρ : 밀도(g/cm³) T_∞ : 유체온도(°C)

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu\alpha} \quad : \text{Rayleigh수}$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu} \quad : \text{Grashof수}$$

1. 서 론

이산화탄소 배출의 저감을 위해 기존의 화석연료의 사용을 줄이고 기후변화협약의 발효에 대응 할 수 있는 신재생에너지는 친환경적이면서 비고갈성이라는 특징을 갖고 있다. 국제적으로 화석연료의 과다사용과 이산화탄소의 배출로 인한 지구온난화가 가속화되면서 온실가스 배출억제를 위한 환경규제가 강화되고 있다. 뿐만 아니라 기후변화협약과 교토협약의 발효로 화석연료의 사용절감과 이산화탄소감소를 위한 신재생에너지를 사용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 무한한 에너지로 알려진 태양에너지를 이용한 연구가 최근 몇 십년 동안 다양한 방법으로 이루어지고 있다. 우리나라도 이산화탄소 배출의 주범인 화석에너지 소비저감을 위해 정부에서는 신재생에너지 보급촉진을 위해 많은 비용을 투자하고 있으며 또한 다각적인 측면에서 정책을 펴고 있다. 태양열의 건물 난방 및 냉방에의 적용은 첨단 소재의 개발과 함께 그 경제성 및 가능성이 상당히 향상되었으며, 그 결과 최근에 건설된 주거용 및 첨단 기술의 상업용 건물들에의 태양에너지의 도입은 그 전보다 더 활발히 추진되는 양상을 보이고 있다. 연간 에너지소비량의 약 40%가 건물 및 상업 부문에 소요되고, 생활수준이 향상

됨에 따라 그 소비율도 증가하는 추세이다. 건물 에너지 부문에 태양열을 적용하고자 하는 연구 노력은 에너지 자원이 부족한 우리나라에서는 상당히 의의 있는 일이라 할 수 있다.

태양열이용기술은 가장 유망한 신재생에너지 이용 기술의 하나이며 이를 이용한 난방 및 냉방 기술은 사회적으로도 기존의 여러 형태의 에너지를 대신할 수 있는 무한한 잠재력을 지니고 있다고 할 수 있다. 아울러 태양에너지 이용의 활성화는 교토협약의 준수 뿐 아니라 날로 파괴되는 지구 생태계를 지키기 위한 가장 현실적인 수단이라고 할 수 있다. 새로운 소재와 요소 기술의 개발은 기존의 태양열 온수 급탕과 냉·난방 시스템의 경제성과 효율성 향상에 크게 기여하고 향후 이 분야의 보급 활성화는 당면한 에너지와 환경 문제의 해결에 적지 않은 보탬을 줄 것으로 기대되고 있다.

본 논문은 태양열에너지를 건물에 보다 효율적으로 적용하기 위해 천원기 등¹⁾²⁾에 의해 개발된 열다이오드(Thermal Diode)식 태양열 이용시스템인 Smart Module을 사용하여 작동유체의 종류에 따른 시스템 열전달에 미치는 영향과 열성능 향상을 파악하는데 목적을 두고 있다.

2. 실험장치 및 방법

열다이오드식 태양열 이용시스템인 Smart Module은 혼합형 시스템으로 태양열에너지를 이용한 실내의 기온조절이 가능하며 적절한 열용량을 저장할 수 있다.

Smart Module시스템은 열 유동의 방향을 바꿀 수 있는 양방향성 열

1) 특허출원 제 98-5663호, "열다이오드식 태양열난방 시스템"

2) 천원기 외, Thermo-Diode식 태양열 이용 모듈 개발 (Ⅲ), 연구보고서, 통상산업부, pp.89~93, 1998.

다이오드를 근간으로 하여 다양한 기상 조건에 따라 유효 열전달량과 태양열의 집열 여부 등을 조절함으로써 시스템의 이용 효율을 높여 쾌적한 실내 환경을 지속적으로 유지할 수 있도록 설계되었으며, 건물의 외측 비내력벽(Curtain Wall)을 이용하여 설치할 수 있으므로 별도의 설치 공간을 필요로 하지 않으며, 다양한 치수의 표준화된 모듈을 생산할 수 있다면 이를 근간으로 난방 부하에 따라 시스템의 전체 규모를 조절할 수 있는 장점이 있다.

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 루프형 열다이오드식 태양열 Smart Module 시스템의 개념도를 그림 1에 나타내었다.

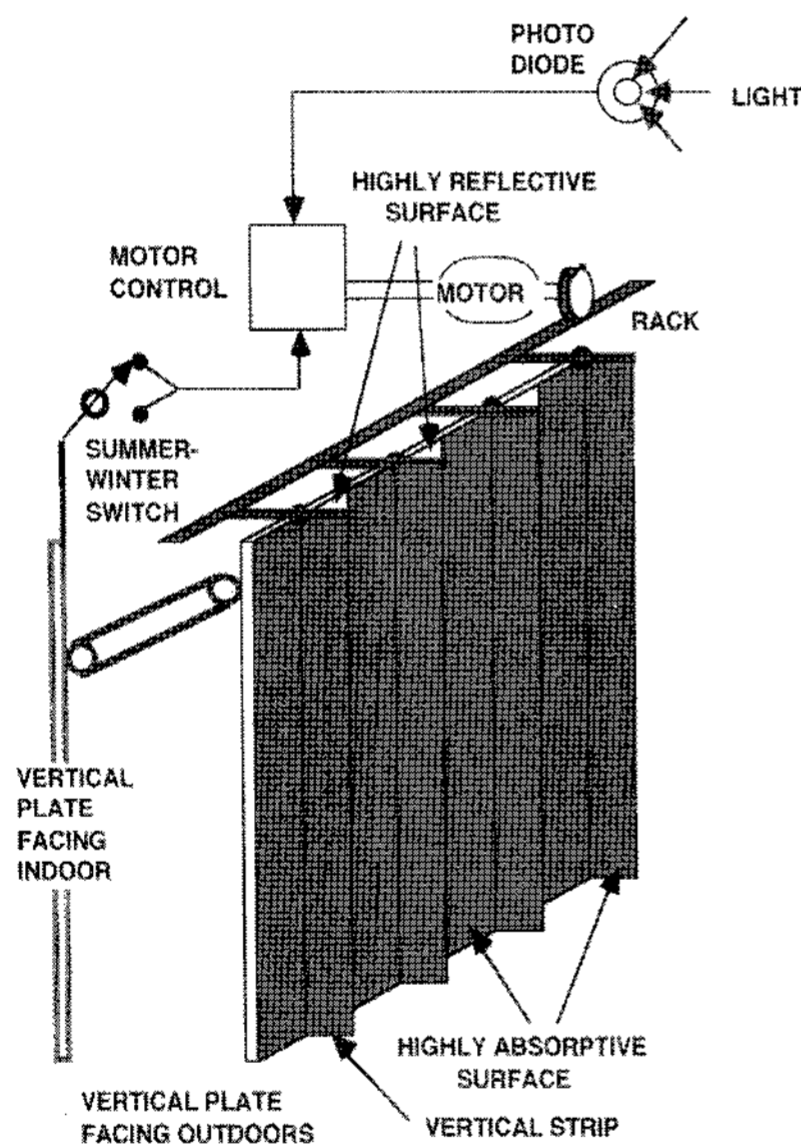


그림 8. 루프형 열다이오드를 이용한 Smart Module의 개념도

루프형 Smart Module 시스템은 집열부, 방열부, 이 두 부분을 잇는 연결튜브인 연결부 그리고 데이터를 수록하는 DAS와 장치 지지어셈블리 등 5부분 구성되어 있다. 집열부는 집열판은 두께3mm, 너비100mm×552mm의 동관 중심에 홈을 내어 같은 길이의

내경 10mm의 동관으로 이루어진 집열패널로 되어 인공태양과의 각도를 변화할 수 있도록 회전이 가능한 형태로 되어 있다(회전식 집열패널). 방열부 역시 방열판과 내경 10mm의 동관으로 구성된 방열패널로 되어 있다. 집열부와 방열부는 방열부의 상하이동이 가능하도록 유연성이 있는 폴리우레탄튜브로 연결되어 있다. 튜브를 이용 방열부의 상하이동이 가능하게 하여 실외의 기온에 따라 실내의 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 되어 있다(냉·난방 기능). 그림 2는 루프형 양방향성 열다이오드의 장착한 예를 보여주고 있다.

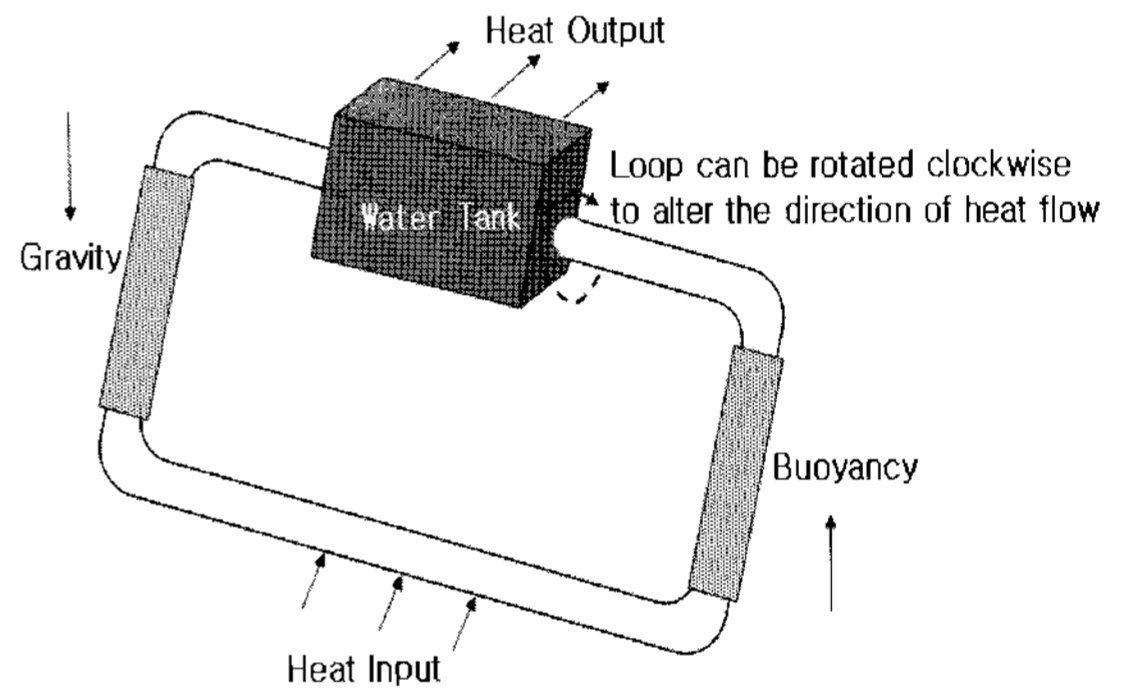


그림 2. 양방향성 열다이오드 장착 예

2.2 실험방법

본 실험에서는 1.5kW급 인공태양(Solar Simulator)을 사용하여 열속을 1000W/m²로 일정하게 집열부에 입사되도록 인공태양과 시스템과의 거리를 고정하고 있다. 옥내 실험이므로 실험하는 동안 시스템 주위 온도가 일정하도록 충분한 공간을 확보하여 실험하였다.

실험장치의 각 부분에 삽입된 K형 열전대를 이용하여 온도를 측정할 수 있도록 하였으며, DAS(Data Acquisition System)을 이용하여 매 3분마다 자료를 측정·기록하였다.

표 1 실험에 이용된 작동유체의 물성치

Fluid (25°C)	Density [g/cm ³]	Kinematic Viscosity [mm ² /s]	Thermal Conductivity [W/m.K]	Specific Heat [kJ/kg.K]	Thermal Expansion Coefficient[1/K]	Thermal Diffusivity [m ² /s]
물	0.997	0.893	0.607	4.18	0.254×10^{-3}	1.46×10^{-7}
아세톤	0.7898	0.387	0.161	2.18	1.488×10^{-3}	0.93×10^{-7}
에틸알코올	0.7893	1.36	0.169	2.44	1.427×10^{-3}	0.88×10^{-7}
실리콘오일	0.755	0.65	0.1	1.465	1.34×10^{-3}	0.90×10^{-7}
	0.935	10	0.13	1.465	1.08×10^{-3}	0.95×10^{-7}
	0.965	100	0.15	1.55	9.6×10^{-4}	1.0×10^{-7}

표 1에 본 실험에서 작동유체로 사용된 유체의 물성치를 나타내었다. 표 1에 제시되어 있는 작동유체이외에 물과 에틸알코올을 부피비(80:20, 50:50, 20:80)로 혼합한 혼합유체와 최근 열교환기 등의 열전도도를 향상시키기 위해 많은 관심을 모으고 있는 나노유체를 작동유체로 사용하여 실험을 하였다.

3. 실험 결과

1.5kW급 인공태양(Solar Simulator)의 열속을 1000W/m²로 균일하게 Smart Module시스템의 각 부분 집열관과 방열관의 출·입구, 집열관과 방열관 그리고 실내온도 등을 측정하였다. 그림 3에는 작동유체가 물인 경우의 측정데이터를 나타내고 있다.

그림 3을 보면 실험을 시작하여 약 10분 경과 후에 작동유체의 온도가 20°C 이상 갑자기 상승하는 것을 볼 수 있다. 이것은 시스템내에 작동유체의 유동이 시작되었음을 보여주는 것이다. 유동이 시작되면서 가열되었던 집열관 출구 근처의 유체가 방열관으로 유입되면서 눈에 보이는 현격한 온도 차이를 보인다. 유체의 온도가 정점(유동 시작온도)에서 조금 떨어진 후 다시 서서히 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 집열관내의 활발한 유체 유동에 의해 방열관에 들어있던 차가운 유체가 집열관으로 들어와 미처 데워지기 전에 다시 방열관으로 유입되기 때문이다. 이 유체의 유동이 시작되는

점을 동작점(CP, Circulation Point)이라 하며, 이 동작점에 이르는 시간과 온도차는 작동유체의 특성과 시스템의 성능에 밀접한 관계를 갖는다.

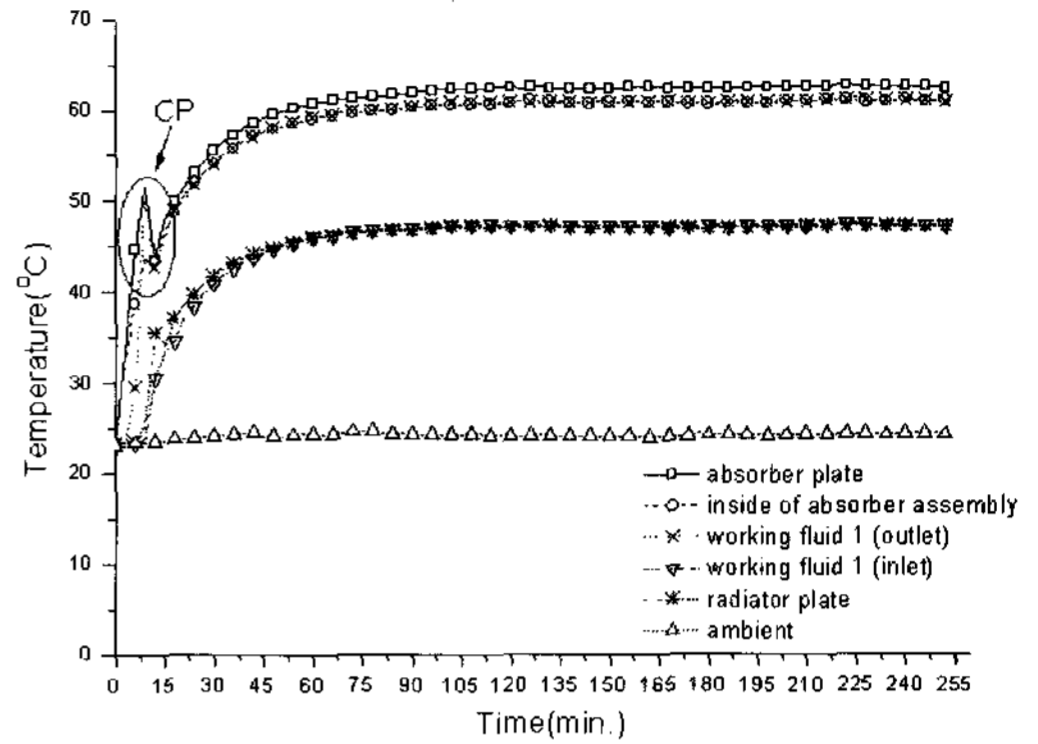


그림 3. 작동유체가 물인 경우의 실험데이터 (열속 1000W/m²)

그러나 작동유체 모두가 유동이 시작점인 동작점을 나타내지는 않는다. 예를 들어 아세톤, 0.65mm²/s 점도의 실리콘오일과 같이 점성이 낮고 밀도가 적을 경우 또는 실리콘오일³⁾의 점도가 100mm²/s인 경우

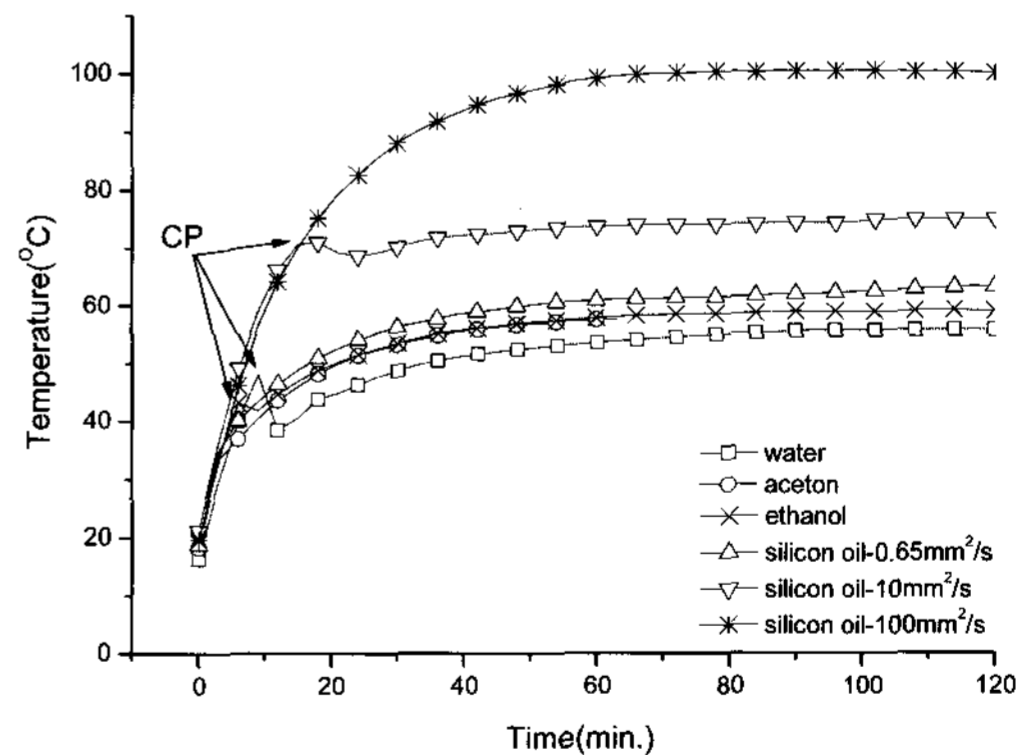


그림 4. 작동유체별 동작점 존재 비교

에는 유체의 물리적인 특성 때문에 동작점

3) 실험에 사용된 실리콘오일 : 신탭 TSF451

없이 작동유체의 온도가 상승한다. 그림 4에는 표 1에 제시된 작동유체에 따른 동작점의 존재를 비교해 보았다. 그림 4를 보면 작동유체의 물리적 특성에 따라 동작점의 유무와 위치가 달라지고 있는 것을 볼 수 있다. 작동유체의 밀도와 점도의 상대적인 관계에 따라 밀도와 점도가 작을 경우에는 열팽창계수의 영향으로 유체 유동은 부력에 의하며, 밀도에 비해 점도가 상대적으로 클 경우는 온도에 따른 점도에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

그림 5의 점도 $100\text{mm}^2/\text{s}$ 인 실리콘오일의 실험결과에서 보는 것처럼 본 실험에 사용된 시스템의 유로 관경이 10mm 인 경우 온도에 따른 점도 변화가 크다고 해도 원활한 유동이 이루어지기 위한 유로 관경이 작아 관벽면의 마찰 저항이 커 유체 유동을 억제하게 된다. 이렇게 점도가 커질 경우에는 유체 유동에 있어 시스템의 기하학적인 특성의 영향을 무시할 수 없게 된다.

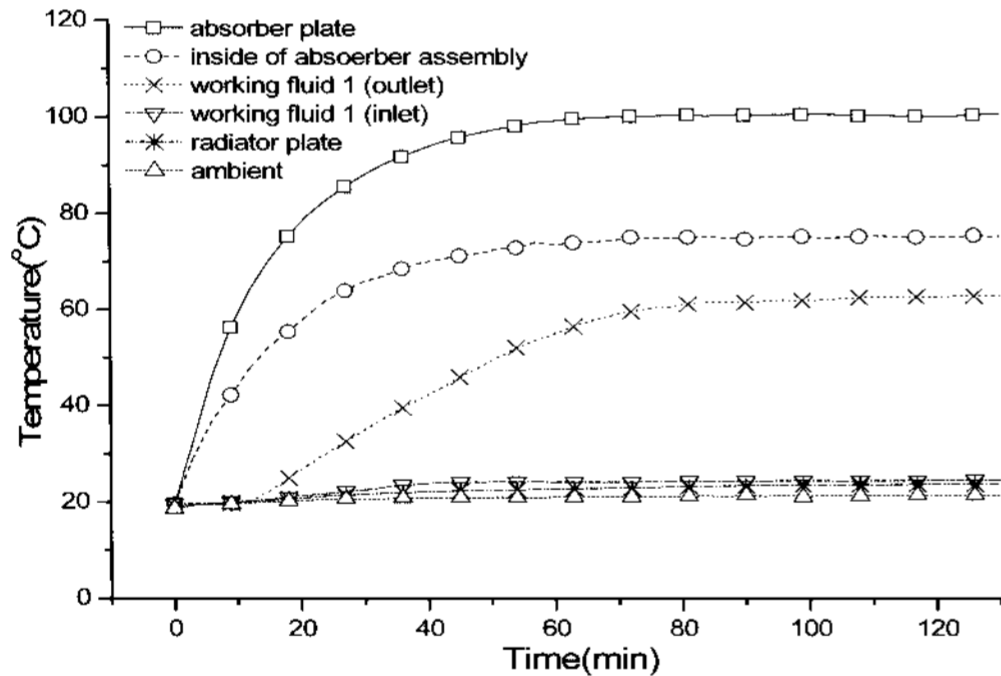


그림 5. 작동유체 $100\text{mm}^2/\text{s}$ 실리콘오일실험데이터 (열속 $1000\text{W}/\text{m}^2$)

그림 6는 온도에 대한 작동유체의 열팽창계수를 비교한 것이다. 그림 7에 점성력에 대한 부력의비를 나타내는 무차원수인 Grashof수(Gr)와 온도의 관계를 나타내었다. 그림을 보면 알 수 있는 것과 같이 온도에 따른 실리콘오일의 점도변화가 크다 하더라도($100\text{mm}^2/\text{s}$ 인 경우) 자연대류흐름을

유발하는 부력이 점성력보다 상대적으로 작아 유동 유발이 억제된다.

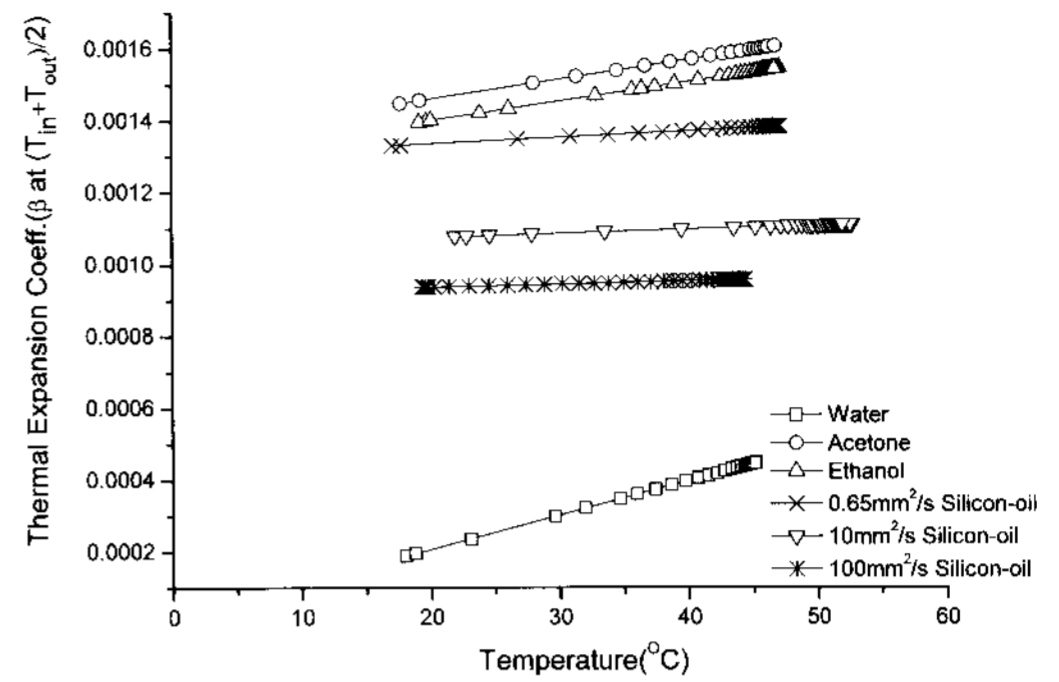


그림 6. 집열관 평균온도($T_{in}+T_{out}/2$)에 따른 작동유체의 열팽창계수 비교

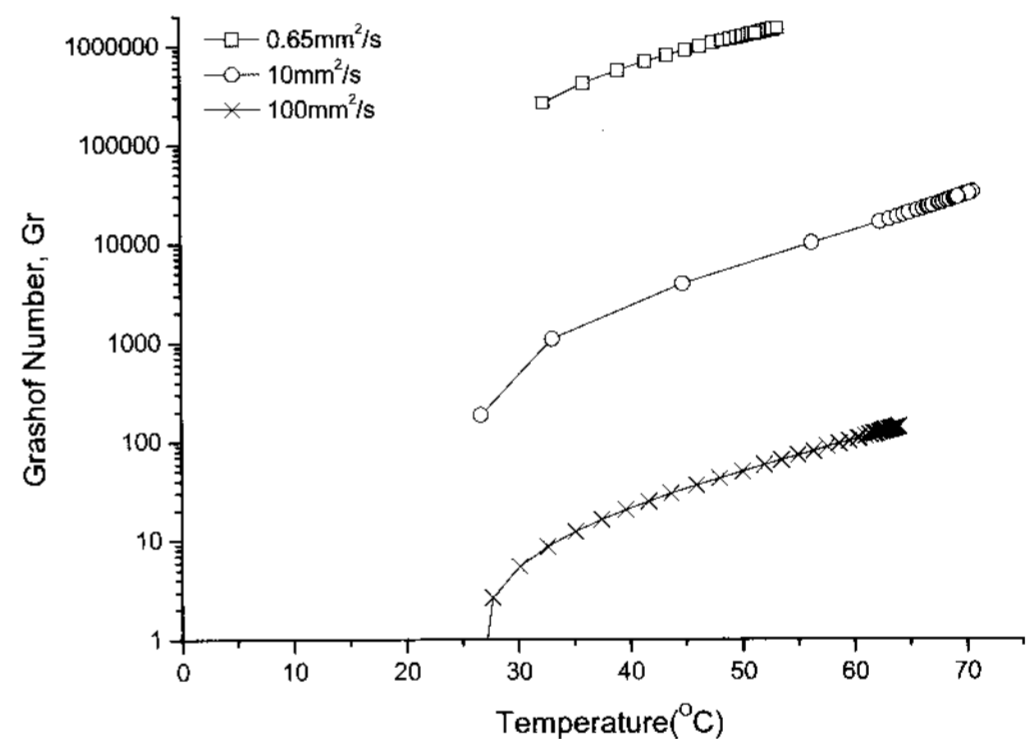


그림 7. 실리콘 오일의 점도에 따른 Grashof수와 온도관계

물과 에틸알코올과의 혼합유체를 작동유체로 사용한 실험 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8은 혼합비에 따른 집열판의 온도변화를 나타낸 것으로 동작점의 나타나는 시간과 온도를 비교함으로써 보다 시스템내의 활발한 열전달과 안정된 열성능을 갖는 혼합비를 알 수 있다.

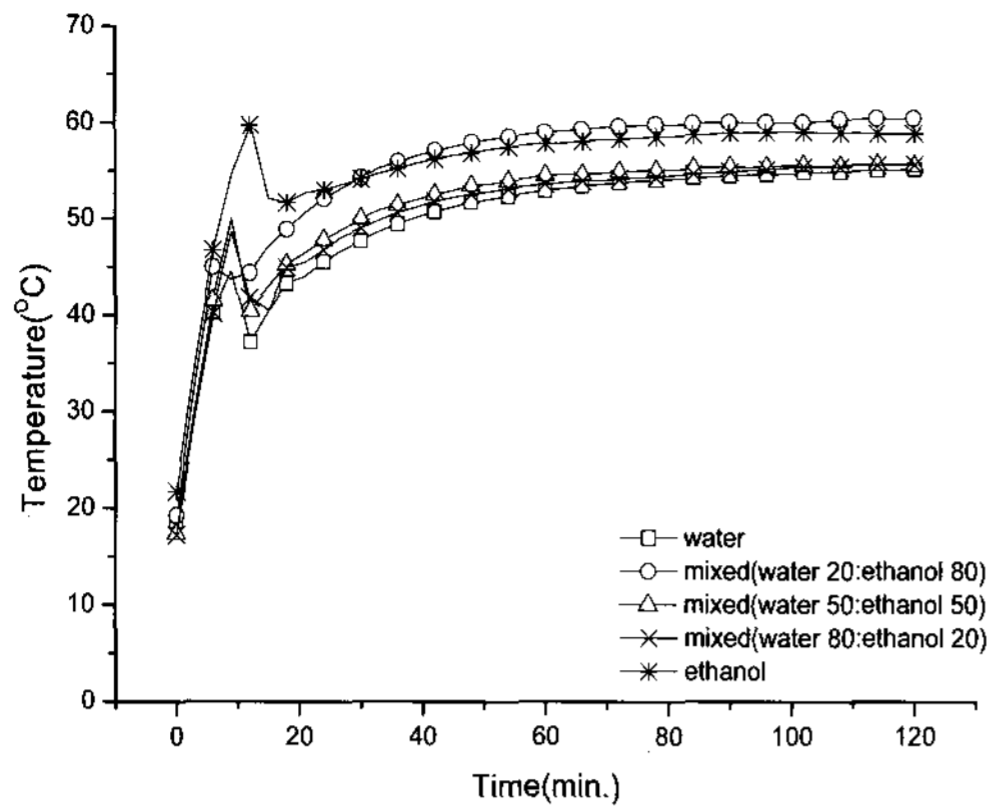


그림 8. 집열판 온도변화

그림에서 알 수 있듯이 혼합비가 20:80인 경우 동작점이 낮은 온도에서 빠른 시간에 생성되는 것을 볼 수 있다. 이것은 시스템 내의 유체 유동이 빠르게 일어나 다른 혼합비에 비해 열전달이 잘 이루어지고 있음을 보여주고 있다.

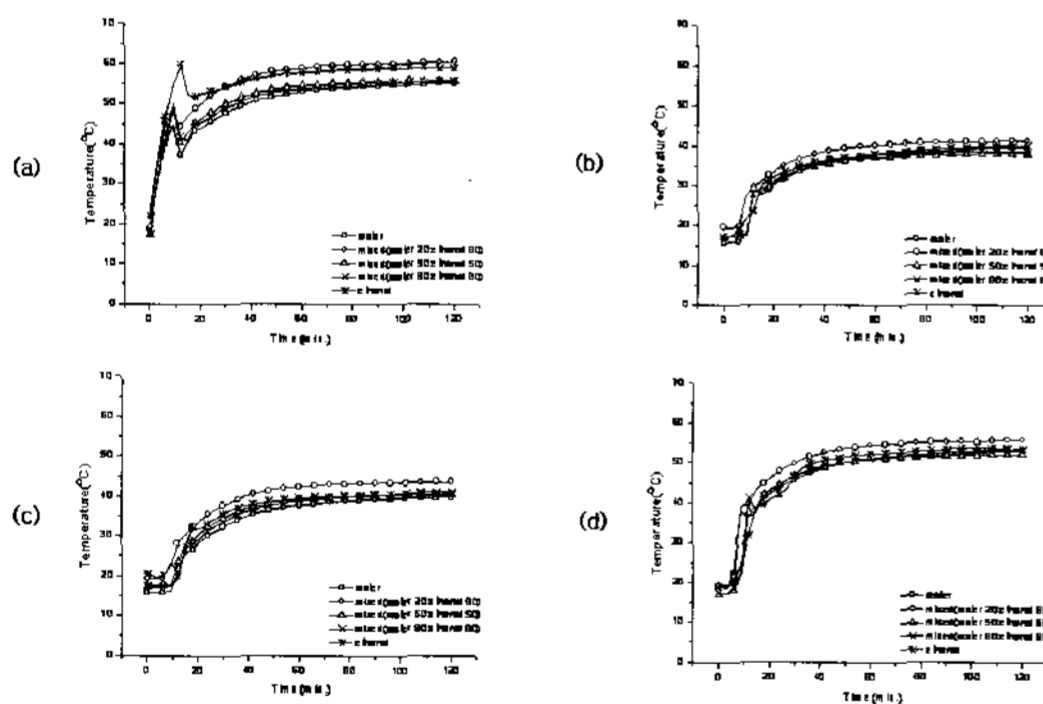


그림 9. 혼합유체의 부피비에 따른 집열기 위치의 온도변화 (a) 집열판 온도 (b) 방열판 온도 (c) 집열판 입구온도 (d) 집열판 출구온도

그림 9는 혼합비에 따른 각 위치별 온도 변화를 나타내고 있다. 그림 9의 각 위치에 따른 온도 변화를 비교해 보면 혼합비에 따른 큰 차이는 볼 수 없지만 그림 7의 결과에서 알 수 있었던 것과 같이 각 위치에 따

라서도 혼합비가 20:80인 경우 열전달이 가장 향상되는 것을 알 수 있다. 본 실험에서는 이상에서 언급한 작동유체 이외에 최근 열교환기 등의 열성능 향상을 위해 주목받고 있는 나노유체(Nano Fluid)를 사용하여 열전달 현상을 파악하는 시도를 하였다. 열매체에 입자를 고루 분산시킴으로써 유체와 유로내에서의 입자의 충돌과 상호작용에 의한 열전달 향상을 유도하게 된다. 나노유체는 30nm Al_2O_3 나노분말을 Deionized Water(DI Water)에 혼합하여 분산정도를 증가시키기 위해 초음파세척기에서 열을 가하여 장시간 혼합하였다. 표 2에 Al_2O_3 나노유체의 물성치를 나타내고 있다.

표 2. 물과 산화알루미늄의 물성치

	ρ	c_p	α	k	$\frac{k_p}{k_f}$	$\frac{\rho_p}{\rho_f}$	$\frac{(\rho c_p)_p}{(\rho c_p)_f}$
물	0.998	4.18	1.34×10^5	0.56			
Al_2O_3	3.970	0.765	11.9×10^{-6}	36	60.71	3.98	0.73

Al_2O_3 나노유체는 0.01, 0.02, 0.03, 0.1, 0.2% 부피비의 5가지를 사용하여 실험하였다.

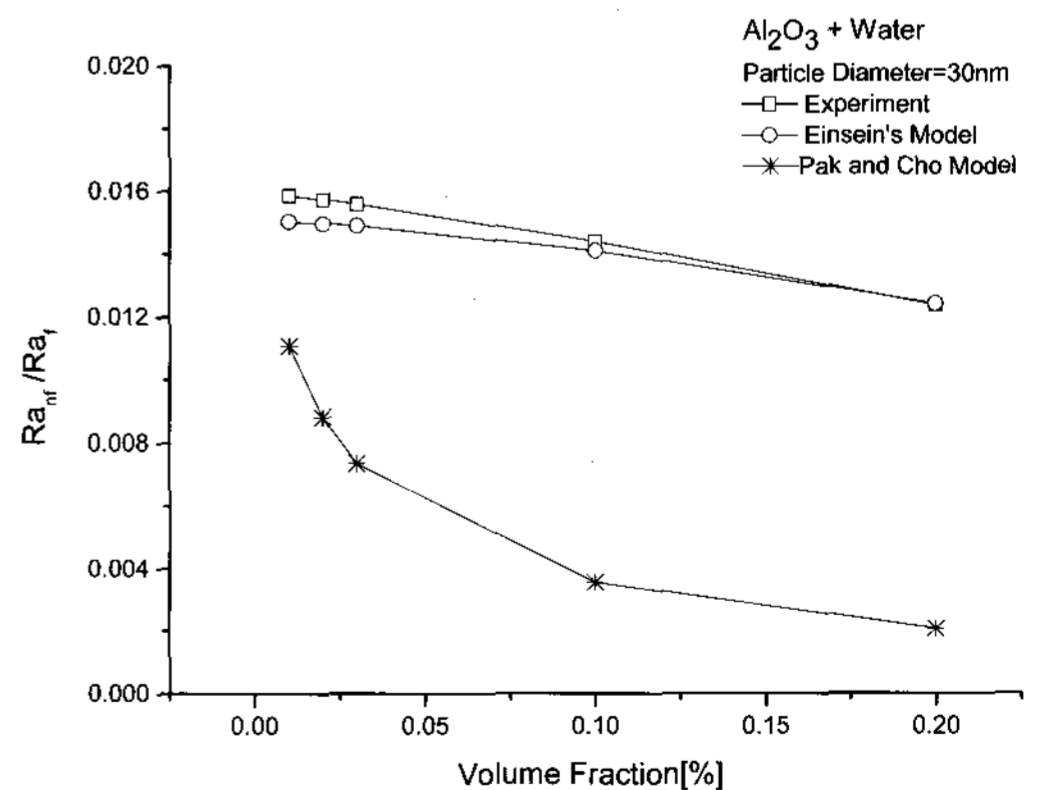


그림 10. Rayleigh 수비와 부피비의 관계

그림 10은 나노입자의 부피가 증가할 때, 실험치와 두가지 모델에 의해 구해진 Rayleigh 수를 비교한 것을 보여준다. Rayleigh수(Ra_D)는 자연대류 현상을 잘 설명해주는 무차원 인자로 부력에 의한 자연대류 현상을 해석하는데 중요한 인자이다. Einstein모델⁴⁾은 상대적으로 낮은 점성계수비를 갖고 Pak and Cho모델⁵⁾은 높은 점성계수비를 갖기 때문에 Pak and Cho모델이 Einstein모델보다 동일 부피비에서 Rayleigh 수비가 더 작게 예측된다. Einstein모델과 실험치는 거의 비슷한 경향을 띄고 있다. 그리고 그림 10을 보면 나노유체의 부피비가 0.03% 보다 클 경우 Rayleigh 수비가 급격히 작아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 유체속에 있는 입자와 입자사이에 형성되는 액막의 영향으로 유체 유동이 방해받기 때문이라고 생각된다. 물론 열전달량 역시 감소하게 된다. 반면 부피비가 0.03%보다 작을 경우에는 입자사이의 액막의 영향이 작아지므로 유체 유동이 활발해 질것으로 생각된다. 본 실험에서는 나노유체와 물과의 Rayleigh 수비가 아주 작기 때문에 부피비에 따른 열전달량의 차이가 크지 않으리라 예상된다. 그러나 아마도 나노유체의 부피비 0.03%에서 열전달량이 가장 향상될 것으로 예상된다.

4) A. Einstein, Investigation on the theory of Brownian motion, Dover, New York, 1956.
 5) B. C. Pak, y. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particle, Experimental Heat Transfer, Vol. 11, pp. 151-170, 1998.

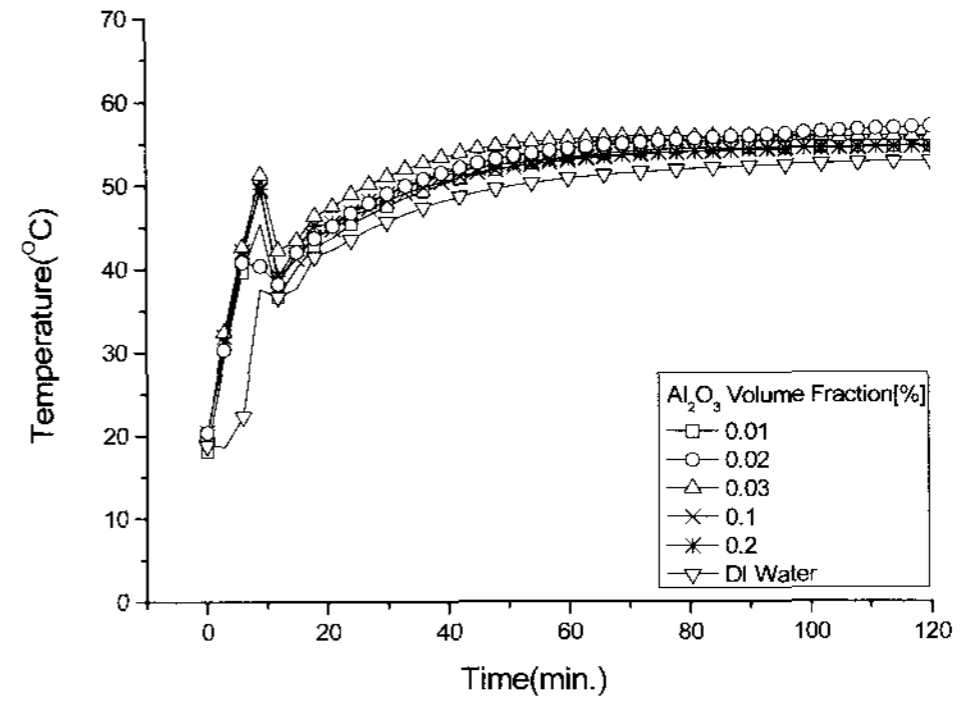


그림 11. Al₂O₃+DI Water나노유체의 부피별 집열판의 시간에 따른 온도변화

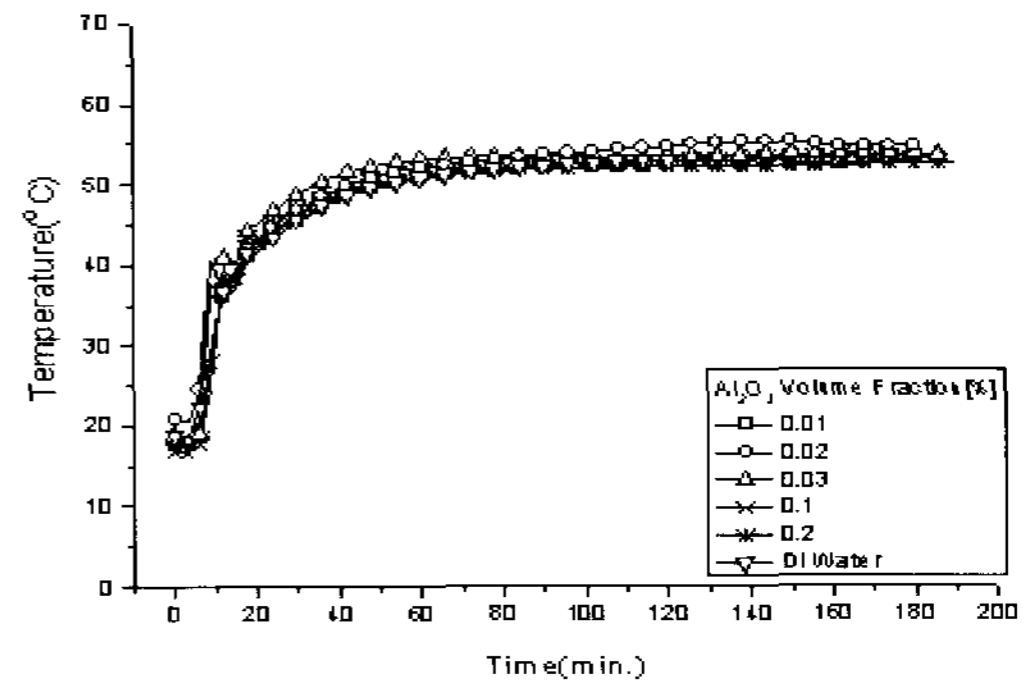


그림 12. Al₂O₃+DI Water나노유체의 부피별 집열판 출구의 시간에 따른 온도변화

그림 11과 12에 Al₂O₃+DI Water 나노유체의 부피별 집열판의 시간에 따른 온도변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 Al₂O₃나노유체를 작동유체로 사용함으로써 집열판에서의 열 흡수는 DI Water만을 사용했을 때보다 증가하는 것을 볼 수 있다. 나노입자의 부피비가 증가함에 따라 열흡수율은 더욱 증가하리라 예상하였으나 그림에서 알 수 있는 것처럼 열흡수율이 가장 좋을 것으로 예상했던 0.1, 0.2% 나노유체의 열흡수율은 0.01% 나노유체와 거의 비슷한 양상을 보이고 있다. 부피비가 0.02, 0.03%의 나노유체를 비교해 보면, 동작점이 생기는 시간과 온도를 보면 0.02%의 경우

가 0.03%의 경우 보다 낮은 온도 빠른 시간에 유체 유동이 시작됨을 알 수 있다. 부피비 0.03%의 나노유체는 높은 온도에서 유동이 시작되어 작동유체의 온도가 증가하다가 100분이 지나는 점에서 0.02%쪽이 온도가 더 상승하고 있음을 알 수 있다. 이것은 나노입자와 유체의 속도 차에 의해 관내에 압력강하가 증가하여 열흡수의 저항치로 작용하기 때문이라 생각된다. 그리고 앞에서 설명한 것처럼 동작점이 형성되는 시간과 온도가 안정적인 열전달과 열성능에 영향을 미치고 있기 때문이라 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 태양열 적용의 극대화와 효과적인 열전달 향상을 위해 루프형 열다이오드식 태양열 Smart Module 시스템을 이용하여 작동유체를 물리적인 특성에 따라 6종류와 물과 에틸알코올의 혼합유체를 사용하여 실험, 그 결과를 비교해 보았다. 그리고 열전달 향상을 파악하기 위해 나노유체를 추가로 실험에 사용하였다.

유동시작점인 동작점(CP, Circulation Point)이 존재한다. 동작점에 이르는 시간과 온도차는 작동유체의 특성과 시스템의 성능에 밀접한 관계를 갖는다. 그러나 모든 유체에 동작점이 존재하지는 않는다. 이 동작점은 작동유체의 물리적 특성인 점도, 밀도 및 열팽창계수 등의 영향을 받는 것을 알 수 있다. 물과 에틸알코올의 부피비 20: 80일 경우가 가장 안정적인 열전달과 열성능을 보이는 것을 알 수 있었다. 열전달이 월등히 향상되리라 생각했던 Al₂O₃나노유체를 사용한 실험에서는 물과 비교하였을 경우에는 열전달이 향상됨을 알 수 있었으나, 나노유체의 부피비가 클수록 열전달이 향상될 것으로 생각했던 것과는 달리 0.02, 0.03%의 부피비의 경우가 열전달이 보다 향상됨을 알 수 있었다. 나노유체 역시 동작점에 이르는 시간과 온도가 열성능에 영향을 미

치는 것을 알 수 있었다. Al₂O₃나노유체 이외의 보다 열전도도가 큰 나노분말의 나노유체를 사용하여 본 시스템에 보다 안정적이면서 효과적인 열전달과 열성능을 갖는 유체를 파악하기 위한 실험이 향후 필요하다.

후기

이 논문은 2006년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(No. R01-2006-000-10626-0)을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. K. Chen, and W. G. Chun, et al. Solar Energy : New Research, 1st ed., Nova Science Publishers, Hauppauge, NY 2006.
2. 오 정무, 태양열 냉난방 및 온수급탕시스템: 개념, 설계기법 및 경제성 분석 1, 2006.
3. 천원기 외, Thermo-Diode식 태양열 이용 모듈 개발(Ⅲ), 연구보고서, 통상산업부, pp.89~93, 1998.
4. H. H. Bau, and K. E. Torrance, On the Stability and Flow Reversal of an Asymmetrically Heated Open Convection Loop. J. Fluid Mech., 106, pp. 417-433, 1981.
5. M. Groll, et al. Development of a Liquid-Trap Heat Pipe Thermal Diode, J. Spacecraft, Vol. 16, No. 4, pp.195-202, 1979.
6. K. Chen, The Optimum Configuration of Natural Convection Loops. Sol. Energy, 34(4/5), pp. 407-416, 1985a.
7. K. Chen, On the Oscillatory Instability of Closed-Loop Thermosyphons. ASME J. Heat Transfer, 107(4), pp. 826-832, 1985b.
8. K. Chen, Design of a Plane-Type

- Bidirectional Thermal Diode. ASME J. Solar Energy Engineering, 110, pp. 299-305, 1988.
9. K. Chen, R. W. Shorthill, S. S. Chu, P. Chailapo, and Narasimhan, S. An Energy-Efficient Construction Module of Variable Direction of Heat Flow, Heat Capacity, and Surface Absorptivity, USAF Report WL-TR-95-3046. 1995.
 10. K. Chen, P. Chailapo, W. G. Chun, S. Kim, and K. J. Lee, The Dynamic Behavior of a Bayonet-Type Thermal Diode. Solar Energy, 64(4-6), pp. 257-263, 1998.
 11. 황용하, 재생형 태양열 집열기의 성능에 대한 연구. 충남대학교 논문집 제 36호 1호 2001.
 12. B. C. Pak, y. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particle, Experimental Heat Transfer, Vol. 11, pp. 151-170, 1998.
 13. S. P. Jang, S. U. S. Choi, Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids, Applied Physics Letters Vol. 84, No. 21, pp. 4316-4318, 2004.
 14. J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu, L. J. Thompson, Anomalously Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol-based nanofluids Containing Copper Nanoparticles, Applied Physics Letters Vol. 78, No. 6, pp. 718-720, 2001.
 15. U. S. Choi, Enhance thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Development and application of non-Newtonian flows. ASME, FED-Vol. 231/MD-Vol. 66, pp. 99-105, 1995.
 16. A. Einstein, Investigation on the theory of Brownian motion, Dover, New York, 1956.
 17. Y. Xuan, Rortzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, Int.J. Heat Mass Transfer Vol. 43, pp.3701-3707, 2000.
 18. Davalos-Orozco, Hydrodynamic and suspension of polar particles, Encyclopedia of surface and colloid science, Vol. 4, pp. 2375-2396, 2005.