





2018 년 2 월

석사학위논문

CuO 나노유체의 적용에 따른 평판형과 U-tube형 태양열 집열기의 성능비교에 대한 실험적 연구

조선대학교 교육대학원

기계 · 금속교육전공

주 운 천



CuO 나노유체의 적용에 따른 평판형과 U-tube형 태양열 집열기의 성능비교에 대한 실험적 연구

Experimental study on the efficiency comparison of flat-plate and U-tube solar collector using CuO nanofluid

2018년 2월 23일

조선대학교 교육대학원

기계 · 금속교육전공

주 운 천





CuO 나노유체의 적용에 따른 평판형과 U-tube형 태양열 집열기의 성능비교에 대한 실험적 연구

지도교수 조 홍 현

이 논문을 교육학 석사 학위신청 논문으로 제출함 2017년 10월

조선대학교 교육대학원

기계 · 금속교육전공

주 운 천





주운천의 석사학위논문을 인준함

| 위원 | 린장 | 조선대학교 | 교수 | 오 | 땅 | ٥٢ | (인) |
|----|----|-------|----|-------|---|----|--------|
| 위 | 원 | 조선대학교 | 교수 | 정 | 성 | 영 | (인) |
| 위 | 원 | 조선대학교 | アイ | 주 | 호 | 혀 | (ol) |

2017년 12월

조선대학교 교육대학원





목 차

| Contentsi |
|--|
| List of Nomenclaturesiv |
| List of Figuresvi |
| List of Tablesvii |
| Abstractviii |
| 제 1 장 서 론 |
| 제 1 절 연구 배경1 |
| 제 2 절 기존의 연구 |
| 제 3 절 연구 목적5 |
| 제 2 장 태양열 시스템6 |
| 제 1 절 태양열 시스템6 |
| 제 2 절 태양열 집열기의 종류8 |
| 1. 평판형 집열기(Flat-plate solar collector)8 |
| 2. 진공관형 U-tube 태양열 집열기(Evacuated U-tube solar collector)9 |
| 제 3 장 실험장치 및 방법10 |
| 제 1 절 실험장치 |



Collection @ chosun

| 1. 실험용 태양열 집열기의 제원 |
|---|
| 2. 온도측정 |
| 3. 일사량 측정15 |
| 4. 유량측정16 |
| 5. 축열탱크 |
| 6. 데이터 수집장치18 |
| 제 2 절 나노유체의 제작 |
| 1. 나노유체 제조방법 |
| 2. CuO 나노유체 |
| 제 3 절 실험방법 및 집열기 효율 계산 |
| 1. 실험방법 및 조건 |
| 2. 태양열 집열기의 효율 및 불확실성 계산23 |
| 제 4 장 태양열 집열기의 성능 실험결과 및 고찰 ·26 |
| 제 1 절 CuO 나노유체의 열전도도 고찰 |
| 제 2 절 CuO 나노유체의 농도에 따른 태양열 집열기의 성 능 고찰 |
| 제 3 절 CuO 나노입자의 크기에 따른 태양열 집열기의 성 능 고찰32 |



| 나른 태양열 집열기의 | 유량에 | 질량 | 동유체의 | 절 | 제 4 |
|-------------|-------|-------------------------|-----------------------------------|------|--------|
| | | ••••• | 능 고찰 | | |
| 고 물을 적용한 태양 | 유체, 그 | 나노 | <i>O</i> ₃ 와 CuO | 절 | 제 5 |
| 비교 | 실험 결괴 | 성능실 | 집열기의 | Q | |
| 43 | | ••••• | 로 _ | 당 결 | 제 5 경 |
| 4 5 | | • • • • • • • • • • • • | • • • • • • • • • • • • • • • • • | ence | Refere |





Nomenclatures

| Ac | : | surface area of solar collector (m²) |
|----------------|---|--|
| С | : | conductance (W/K·m) |
| Cp | : | specific heat (J/kg·K) |
| F _R | : | heat removal factor (-) |
| G | : | solar radiation (W/m²) |
| h | : | heat transfer coefficient (W/m²K) |
| k | : | conductivity (W/K·m) |
| L | : | length (m) |
| m | : | mass flow rate (kg/s) |
| Q | : | heat (W) |
| Qu | : | useful heat gain (W) |
| r | : | radius (m) |
| Т | : | temperature (K) |
| t | : | thickness (m) |
| U | : | overall heat transfer coefficient (W/m²K) |
| W | : | circumferential distance between U-tubes (m) |

Greeks

| η | : efficiency (-) |
|----|---|
| 3 | : emissivity (-) |
| μ | : viscosity (-) |
| τα | : transmission absorbance coefficient (-) |
| φ | : nanoparticles volume concentration (-) |
| ρ | : density (-) |





Subscripts

| а | ambient (-) | |
|----|---------------------------------|----|
| b | fin base (-) | |
| bf | base fluid (-) | |
| С | absorber coating, copper fin (- | -) |
| е | edge (-) | |
| fu | fluid (-) | |
| g | glass tube (-) | |
| h | header tube edge (-) | |
| i | inlet, inside (-) | |
| 1 | loss (-) | |
| nf | nano fluid (-) | |
| np | nano particle (-) | |
| 0 | outlet (-) | |
| р | pipe (-) | |
| S | synthetic (-) | |
| t | tube (-) | |
| u | useful (-) | |





| Fig. 2.1 Construction of flat-plate solar collector |
|--|
| Fig. 2.2 Construction of evacuated U-tube solar collector |
| Fig. 3.1 Photograph of the experimental apparatus |
| Fig. 3.2 Schematic diagram of solar collector test facility 11 |
| Fig. 3.3 Photograph of flat-plate and U-tube solar collector |
| Fig. 3.4 Photograph of T-type thermocouple |
| Fig. 3.5 Photograph of pyranometer15 |
| Fig. 3.6 Photograph of flow meter |
| Fig. 3.7 Photograph of storage tank 17 |
| Fig. 3.8 Photograph of data acquisition system |
| Fig. 3.9 Photograph of ultrasonic homogenizer |
| Fig. 3.10 Scanning Electron Microscope(SEM) of CuO Nanofluid21 |
| Fig. 4.1 Thermal conductivity ratio as a function of temperature for different |
| concentration of nanofluid(nanoparticle size 40 nm) |
| Fig. 4.2 Thermal conductivity ratio as a function of temperature for different |
| concentration of nanofluid(nanoparticle size 80 nm) |
| Fig. 4.3 Variation of efficiency of flat-plate solar collector for different |
| nanofluid concentrations |
| Fig. 4.4 Variation of efficiency of U-tube solar collector for different |
| nanofluid concentrations |
| Fig. 4.5 Variation of efficiency of flat-plate solar collector for different |
| nanopaticle size······ 33 |
| Fig. 4.6 Variation of efficiency of U-tube solar collector for different |
| nanopaticle size······ 33 |
| Fig. 4.7 Variations of efficiency in the flat-plate solar collector for |
| different mass flow rates |
| Fig. 4.8 Variations of efficiency in the U-tube solar collector for different |
| mass flow rates |
| Fig. 4.9 Comparison of efficiency in the flat-plate solar collector using |
| AI_2O_3 nanofluid, CuO nanofluid, and water \cdots |
| Fig. 4.10 Comparison of efficiency in the U-tube solar collector using Al_2O_3 |
| nanofluid, CuO nanofluid, and water |



조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

List of Tables

| Table 2.1 Classification of solar collectors |
|--|
| Table 3.1 Specification of flat-plate solar collector |
| Table 3.2 Specification of U-tube solar collector |
| Table 3.3 Specification of thermocouple14 |
| Table 3.4 Specification of pyranometer 15 |
| Table 3.5 Specification of flow meter |
| Table 3.6 Specification of storage tank |
| Table 3.7 Specification of data acquisition system |
| Table 3.8 Specification of ultrasonic homogenizer |
| Table 3.9 Specification of CuO nanopaticle |
| Table 3.10 Experiment conditions |
| Table 4.1 Parameters of efficiency in the flat-plate solar collector according |
| to CuO nanofluid concentration |
| Table 4.2 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to |
| CuO nanofluid concentration31 |
| Table 4.3 Parameters of efficiency in the flat-plate solar collector according |
| to CuO nanoparticle size······34 |
| Table 4.4 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to |
| CuO nanoparticle size······34 |
| Table 4.5 Parameters of efficiency in the flat-plate solar collector according |
| to mass flow rates |
| Table 4.6 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to |
| mass flow rates |
| Table 4.7 Parameters of efficiency in the flat-plate solar collector according |
| to working fluid |
| Table 4.8 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to |
| working fluid |



조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY



ABSTRACT

Experimental study on the efficiency comparison of flat-plate and U-tube solar collector using CuO nanofluid

Un-cheon Ju

Advisor : Prof. Cho, Hong-hyun Mechanical&Metallurgical Education Chosun University

In this study, thermal efficiency of a flat-plate solar collector and a U-tube solar collector using a CuO nanofluid and water as a working fluid was investigated according to CuO nanoparticle size and concentration. Experiment was carried out under the mass flow rates of 0.033 kg/s and 0.047 kg/s respectively. Additionally, CuO nanoparticles with the size of 40 nm and 80 nm were used and concentration of nanofluid was changed by 0.1vol%, 0.3vol%, 0.5vol%, and 0.7vol%, respectively. The thermal conductivity increased non-linearly as the CuO nanofluid concentration increased. In addition, it was confirmed that the increase of thermal conductivity ratio gradually decreased when concentration of CuO nanofluid increased.

Experimental results showed that the efficiency of solar collector showed the maximum when a mass flow rate of working fluid was 0.047 kg/s, CuO nanoparticle size was 40 nm, and CuO nanofluid concentration was





0.5vol%. In this case, the heat gain and heat loss coefficient of a flat-plate collector was 0.735 and 22.8, respectively. In addition, Heat gain and heat loss coefficient of U-tube solar collector was 0.695 and 16.66, respectively. When the efficiency of flat-plate and U-tube solar collector using CuO nanofluid was improved by 11.32% and 7.82%, respectively, compared to that using water. In order to increase the efficiency of the solar collector, the size of nanoparticle and concentration of nanofluid should be appropriately controlled and the mass flow rate in the system should be designed optimally. The smaller the size of nanoparticle in the nanofluid, the more active the Brownian motion, resulting in the better the absorption of solar energy. The high volume concentration of CuO nanofluid has good thermal conductivity, but the viscosity increases and the heat transfer performance decreases. On the other hand, the optimal concentration of CuO nanofluid is very important because it can not absorb whole of solar energy if the concentration of CuO nanofluid is low.

Thus, the size and concentration of nanofluid are very important factors on the performance of solar collector. From the experimental result, the use of CuO nanofluid is superior to absorption of solar energy than the use water. Therefore, when the CuO nanofluid is used with optimal conditions, it is sure to improve the efficiency of solar collector.







제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

20세기의 주요 에너지원인 화석에너지는 현 인류사회의 눈부신 경제발전을 이 룰 수 있게 도와준 에너지이다. 그러나 화석에너지는 매장량을 다 쓰게 되면 더 이상 쓸 수 없게 되고 화석에너지의 사용은 온실가스를 발생시켜 환경을 오염시 키고 지구온난화를 초래하기 때문에 비고갈성, 환경친화적인 에너지의 개발이 절실히 필요하다.

신재생에너지는 화석에너지의 고갈문제와 환경적 문제를 해결할 가장 깨끗한 에너지로서 각광받고 있고 최근 기후변화 협약 등으로 신재생에너지 개발 및 상 용화의 중요성이 재인식 되고 있으며 개발, 이용, 보급촉진을 위한 법안이 발의 되고 있는 실정이다. 신·재생에너지의 종류에는 태양열, 태양광, 바이오텍, 소 수력, 풍력, 지열, 해양, 폐기물에너지 등 8가지 재생에너지와 연료전지, 석탄 액화가스화, 수소에너지 등의 3개의 신에너지로 구분되어지며 이중 무공해, 무 한량, 청정에너지원인 태양열 에너지는 지구온난화의 대책으로 탄산가스 배출을 저감할 수 있는 재생가능한 에너지원이라는 평을 받고 있다. 비록, 에너지 밀도 및 효율이 낮고 에너지 시장에 안정적 공급이 어렵다는 단점이 있지만 화석에너 지에 비해 지역적 편중이 적은 분산형 에너지 원이다. 현재, 세계 10대 에너지 소비국이며 0ECD국가중 에너지소비율 1위, 에너지 원료의 98%를 수입에 의존하 고 있는 우리나라는 태양열에너지의 상용화를 위하여 효율을 높이는 연구를 지 속화하고 장기적이고 집중적인 투자가 필요할 것으로 판단된다.

일반적으로 태양열에너지의 시스템은 집열부, 축열부, 이용부로 구성되어있고 집열기 종류에는 크게 평판형 태양열 집열기(Flat-plate solar collector)와 진 공관형 U-tube 태양열 집열기(Evacuated U-tube solar collector), 진공관형 Heat-pipe 태양열 집열기(Heat-pipe solar collector) 등이 있다.

집열기는 태양으로부터 복사에너지를 흡수해서 열로 전환시키며 작동유체에 열을 전달하는 중요한 역할을 하지만 집열된 열원을 열교환 형태로서 작동유체 에 열을 전달하는 과정에서 집열기의 효율을 향상시키는데 한계점을 가지고 있



다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 뛰어난 분산특성과 열적 물성치를 갖는 나 노유체를 열교환기 및 자동차 히트파이프, 태양열 시스템 등 실제 열전달 시스 템에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

나노유체는 기존의 열전달용 작동유체에 나노크기의 금속이나 비금속을 고르 게 분산시켜 만든 유체로 금속성 입자에 Cu, AI, Fe, Au, Ag 등이 있고 비금속 입자에 Al_2O_3 , CuO, Fe_3O_4 , TiO_2 , SiC, 탄소튜브 등이 있다. 나노유체는 기 본 유체에 비해 열전도도 및 대류열전달계수, 태양 복사에너지의 흡수에 대한 물성 등이 매우 뛰어나며 열전도도는 나노유체의 물성치 중에서도 가장 많이 연 구되고 있는 분야이고, 대류열전달계수는 이러한 열전도도 보다 기본유체 대비 상승폭이 더 크다고 알려져 있다. 이러한 물성치에 대한 연구는 많은 연구자들 이 나노유체의 열전도도나 대류열전달과 관련한 매커니즘을 제시하고 있지만, 아직까지 이에 대한 확립된 이론이나 결과는 미흡한 실정이다. 따라서 태양열 집열기를 활용한 시스템의 성능을 향상시키고 시스템의 신뢰성을 확보하기 위해 서는 나노유체를 태양열 시스템에 적용하여 집열기의 효율에 대한 해석과 실험 을 통한 나노유체의 특성의 비교 또는 시스템 효율의 최적화를 위한 연구가 필 요하다.



제 2 절 기존의 연구

나노유체는 열전달 분야에서 열적 물성치나 분산특성으로 인해 열효율의 향 상시키기 위한 많은 연구들에서 진행되고 있다. 특히, 태양열 시스템에서 집 열기의 효율을 향상시키기 위해 나노유체를 접목하는 연구들도 활발하게 진행 되고 있다. 관련된 연구로 Lee et al.(2013)는 물 기반 SWCNH(Single wall carbon nanohorn) 나노유체를 평판형 집열기에 이용하여 기존의 평판형 집열 기의 효율과 비교하고 나노유체의 태양열 집열기의 적용 가능성에 대하여 모 색하였는데 그 결과 부피비 80 ppm의 물·기반 SWCNH(Single wall carbon nanohorn) 나노유체를 사용할 경우 집열기 길이에 따른 효율이 일정 형상조건 이내에서 기존의 평판형 태양열 집열기 이상의 효율을 가지는 것을 확인하였 다.

Mahendran et al.(2012)은 TiO_2 나노유체를 이용한 진공관 태양열 집열기의 성능을 확인하기 위한 연구를 진행하였다. 진공관 집열기 출구에서 0.3%- TiO_2 나노유체의 온도상승이 물보다 19% 더 높다는 것을 확인하였으며 0.3%- TiO_2 나노유체를 사용한 시스템의 최대 효율은 0.730미 증류수의 경우는 0.53, 시 스템 효율은 물에 비해 16.67% 증가하였음을 확인하였다. 또한 산화알루미나 (Al_2O_3) 나노유체를 사용하는 ETSC(Evacuated tube solar collector) 시스템 이 TiO_2 나노유체보다 8% 가량 더 높은 효율을 가질 것으로 예측하였다.

Hussain et al.(2014)은 은과 지르코늄(Zr) 산화물 나노유체를 이용한 진공 관형 집열기의 열효율에 관한 실험분석을 실시하였는데 증류수에 비해 높은 열전도율로 인하여 Ag, ZrO₂ 나노유체의 5%vol에서 집열효율이 증류수보다 높 다는 것을 확인하였다. 또한 Ag+DW(Distilled water)와 ZrO₂+DW(Distilled water)의 질량유량이 30, 90 ℓ/hr • m²일 때의 열특성값은 5%~10% 증가되었다. 실험 결과 Ag+DW(Distilled water)와 ZrO₂+DW(Distilled water)를 작동유체로 사용할 경우 증류수를 작동유체로 사용했을 때 보다 높은 집열성능을 갖는 것으 로 나타났다.

Liu et al.(2013)은 고온공기 진공관형 태양열 집열기에 나노유체를 이용한





개방형 열사이펀(Thermosyphon)의 열성능을 확인하기 위한 연구를 진행하였 다. 실험결과에 따르면 개방형 열사이펀의 집열성능이 집광관(concentric tube)보다 뛰어남을 확인하였다. 또한 개방형 열사이펀의 작동유체로 나노유 체를 사용하면 집열성능이 좋아짐을 확인하였다.

Tong et al.(2015)은 MWCNT(Multi-walled carbon nanotube)이용한 EEUSC (Enclosed-type evacuated U-tube solar collector)의 효율에 대해 연구하였 다. 시뮬레이션을 통하여 MWCNT 나노유체의 농도를 0.24vol%로 했을 때에 가 장 높은 열전달계수를 가지며 이때의 열전달계수는 물만 사용했을 때 보다 약 8% 높았다고 밝혔으며 실험결과와의 비교에서 상당부분이 시뮬레이션과 일치 함을 검증하였다.

Kim et al.(2016)은 다양한 종류의 나노유체를 이용하여 U-tube형 집열기의 효율을 이론적으로 연구하였는데 나노유체는 20%-PG(Propylene glycol)-water를 작동유체로 사용하였을 때 보다 좋은 효율들을 보여주었다. 그 중 0.2vol%-MWCNT 나노유체가 20%-PG(Propylene Glycol)-water 보다 5.6%~9.7% 상승된 효 율을 보여주었고, 3vol%-*SiO*₂ 나노유체는 1.7%~2.9%로 가장 적은 효율상승을 보였다. 또한, 일사량이 많을 때 나노유체의 효율이 더 좋아지는 것을 확인하 였다.



- 4 -

제 3 절 연구 목적

태양열 집열기의 효율을 높이기 위한 연구는 꾸준히 진행되고 있지만 단순 히 집열기의 성능을 향상시키는 데에는 분명한 한계점이 있다. 평판형 집열기 는 설치비용이 저렴하고 유지 및 보수가 간편하여 많이 사용되고 있지만 대류 열전달로 인한 열손실을 피할수 없다. 진공관형 태양열 집열기는 평판형 집열 기의 단점을 보완하는 중온 집열에 좋은 효율을 갖는 집열기이지만 열에 의한 진공관의 파손이나 시스템 수명의 단축, 열매체의 누수 등의 해결해야 할 과 제가 많다.

최근에는 집열기 성능을 극대화하는 연구에서 기존 집열기에서 사용되는 작 동유체의 변화를 통하여 집열성능을 향상시키고자 하는 연구가 활발히 진행되 고 있다. 그 중 높은 열전도도로 인해 열전달 분야에서 각광 받고있는 나노유 체를 태양열 집열기에 적용시키기 위한 다양한 연구가 진행중이다. 그러나 다 양한 나노유체를 이용하여 태양열 시스템 효율을 높이는 연구는 아직까지 실 험적 연구를 통한 데이터가 부족하며 운전조건에 따른 시스템 성능 분석에 대 한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 CuO 나노유체를 동일한 작동조건에서 농도와 입자크 기의 변화를 통하여 평판형 집열기와 U-Tube형 집열기 성능에 미치는 영향에 대해서 고찰하고 성능을 비교하였다. 이를 통하여 비교하고 다양한 운전조건 에서 CuO 나노유체를 적용한 두 가지 태양열 집열기의 성능특성에 따른 데이 터를 제시하고자 한다.





Collection @ chosun

제 2 장 태양열 시스템

제 1 절 태양열 시스템

태양열 시스템은 태양광선의 파동성질을 이용하는 광열학적 이용분야로 태 양열의 흡수·저장·열변환 등을 통하여 건물의 냉난방 및 급탕 등에 활용하 는 기술이다. 태양열 에너지 이용기술의 핵심은 태양열 집열기술, 축열기술, 시스템 제어기술, 시스템 설계기술 등이 있으며 세계시장의 약 60%를 중국이 점유하고 있고 유럽 국가들을 중심으로 기술개발 및 보급이 이루어지고 있다.

태양열 시스템은 열매체의 구동장치 유무에 따라서 자연형(passive)시스템 과 설비형(active)시스템으로 구분되는데 집열기를 별도로 설치해서 열매체 구동장치를 활용하여 태양열을 집열하는 설비형(active)시스템을 흔히 태양열 시스템이라 한다. 설비형 태양열 집열기의 일반적인 구성은 집열부, 축열부, 이용부 그리고 이용부의 수요에 맞게 열 공급을 위한 제어장치로 구성된다. 집열부는 태양열을 집열하는 부분이며 집열온도는 집열기의 열손실율과 집광 기의 유무 및 성능에 따라 결정된다. 집열기를 통하여 집열된 열원은 이용시 기가 상이 하기 때문에 버퍼(buffer) 역할을 하는 열저장 탱크(축열부)가 필 요하다. 이용부는 축열조에 저장된 태양열을 효과적으로 공급하는 역할을 하 거나 필요시에 보조열원에 공급하는 역할을 하며 제어장치는 태양열을 효과적 으로 집열 및 축열하고 공급한다. 태양열을 이용하는 시스템은 집열 온도에 따라 저온(90℃이하)분야는 건물의 냉난방 및 급탕에 이용되고 중·고온(300℃ 이하)분야는 산업공정 열 및 열 발전 등에 이용된다.



| | Passive system | Active system | | | | |
|----------------------|--|--|---|---|--|--|
| Section | Low temperature | Middle temperature | High | temperature | | |
| Use temperature | Less than 60℃ | Less than 100°C | Less than 300℃ | More than 300℃ | | |
| Collecting type | Passive system Airheated solar collector | Flat-plate collector collector Flat-plate collector Flat-plate concentrator, Evacuated solar collector | | Dish Stirling system, Power Tower | | |
| Heat storage area | Tromb Wall | Low Temperature Thermal Storage | Middle Temperature Thermal Storage | High Temperature Thermal Storage | | |
| Field of usage | Building space heating | Solar water heating system, Agriculture and Fisheries (dry, heating) | Buildings & Agriculture & Fisheries Cooling and heating, water conversion, Industrial Process Heat, thermal power | Industrial Process Heat, thermal power, Space, Photocatalytic Wastewater treatment, Photocatalytic wastewater treatment, photochemistry, New materials manufacturing, New materials manufacturing | | |

| Table 2.1 | Classification | of | solar | collector |
|-----------|----------------|----|-------|-----------|
|-----------|----------------|----|-------|-----------|



제 2 절 태양열 집열기의 종류

1. 평판형 집열기(Flat-plate solar collector)

태양열을 저온으로 집열하는 사용되는 평판형 집열기는 그림과 같이 평판 형태로 되어 있다. 분산 및 직달, 산란 일사를 모두 집열할 수 있는 특징이 있으며 태양 추적 장치를 사용하지 않는다. 평판형 집열기는 전체에 흡수판 이 존재하여 면적의 증가에 따라 외부로의 열손실이 증가해 100℃이상의 열 원을 얻기는 어렵다는 단점이 있다.

평판형 태양열 집열기는 구조가 간단하고 저렴하며 유지 및 보수가 간편 하기 때문에 널리 사용된다. 집열기는 흡수판, 열전달매체, 도관, 단열재, 집열기틀 및 투명 덮개 등으로 구성되어 있다. 상단부는 태양일사광선을 투 과시키고 열손실을 방지할 수 있는 투과체(transparent cover)로 구성되어 있으며, 하단부에는 투과된 일사광선을 흡수하여 열에너지로 변환시켜주는 흡수판(absorber plate)이 있고 그 아래로 단열재에 의해 단열이 되어있다.



Fig. 2.1 Construction of flat-plate solar collector



2. 진공관형 U-tube 태양열 집열기(Evacuated U-tube solar collector)

진공관형 집열기는 그림과 같은 구조로 구성되어 있으며 평판형 집열기와 집열하는 방식은 거의 동일하나 흡수판을 진공유리관 내부에 위치시켜서 대 류에 의한 열손실을 없게 만든 집열기이다. 현재 상용화된 진공관식 집열기 는 진공 유리관이 이중으로 되어있고 그 사이가 진공인 이중진공관식 집열 기와 단일 유리관을 사용하고 그 유리관 내부 전체가 진공인 단일 진공관식 집열기 2종류가 있다. 평판형 집열기에 비해 집열기에서 외부로의 열손실이 적고 고온에서 집열효율이 높아 급탕, 난방 및 흡수식 냉방 등에서 적용할 수 있다.

Fig. 2.2은 U-tube형 태양열 집열기의 구조를 나타낸 것이다. 진공관은 내·외부 유리관, 흡수판, 진공층, 흡수 코팅층 등으로 구성된다. 내부 유 리관은 보다 많은 태양에너지를 흡열하기 위해 표면에 흡열 코팅처리가 되 어있다. 작동유체가 관을 따라 이동하면서 열전달을 통하여 태양열을 흡수 하는 구조이다. 내·외부의 유리관 사이에 진공을 걸어 열손실을 최소화하 기 때문에 겨울철에도 높은 집열효율을 보인다.



Fig. 2.2 Construction of evacuated U-tube solar collector



Collection @ chosun

제 3 장 실험장치 및 방법

제 1 절 실험장치

Fig. 3.1은 본 연구에서 제작된 실험장치 사진을 나타내었다. 동일한 운 전조건에서 물과 CuO 나노유체를 적용한 집열기의 성능을 비교하기 위해 동 일한 크기와 형태의 평판형과 U-tube형 집열기를 사용하였다. Fig. 3.2은 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 본 실험장치는 광주광역시 조선대학교 (위도 35°, 경도 126°)에 위치해 있으며, 모든 태양열 집열기는 남향 45° 각도로 설치되어 있다. 작동유체인 CuO 나노유체와 물은 순환펌프를 통하여 유량계에서 유량을 측정한 후 펌프를 통해 집열기로 들어간다. 작동유체인 물과 나노유체는 집열기에서 집열을 수행 후 내부 열교환기가 설치된 100 L 용량의 축열탱크에 유입되어 열을 전달 후 다시 순환하는 구조를 가진다. 태양열 집열기의 입구, 출구와 외기온도를 측정하기 위해서 주요부위에 T-type 열전대를 사용하여 측정하였으며 이 열전대의 작동범위는 -200℃~30 0℃이다. T-type열전대는 실험전 물의 어는점과 끓는점에서 정밀온도계를 사용하여 보정하였다.



Fig. 3.1 Photograph of the experimental apparatus

태양의 일사량은 일사량계 QMS101(Solar radiation sensor)을 사용하여 측정하였으며 일사랑계의 측정범위는 0~2000 W/m²이며, 오차범위는 약 1.95%다. 태양열 시스템에 설치한 열전대, 유량계, 일사량계에 대한 정보를 수집하기 위해 데이터 수집 장치인 데이터 로거(Data logger, Yokogawa MX100)를 사용하였다. 또한, 실험전 모든 집열기와 관은 고압의 물과 아세 톤을 이용하여 반복해서 깨끗이 세척한 후 사용하였다.



Fig. 3.2 Schematic diagram of solar collector test facility





1. 실험용 태양열 집열기의 제원

Fig. 3.3은 평판형 태양열 집열기(Flat-plate solar collector)와 진공관 형 U-tube 태양열 집열기(Evacuated U-tube solar collector)의 실제 사진 을 보여준다. 평판형 태양열 집열기의 총면적은 2.03 m^2 , 무게는 35.5 kg이 다. 흡수판의 소재는 구리(Copper)이며 두께는 0.2 mm, 흡수판의 표면처리 는 Selective coating처리 되었다. 진공관형 U-tube 태양열 집열기의 총면 적은 2.37 m^2 이며 무게는 51.5 kg이다. 흡수판 소재는 구리(Copper)이고, 파이프의 내경(Inner diameter of pipes)은 10 mm, 외경(Outer diameter of pipes)은 15 mm이다. Table 3.1과 Table 3.2는 평판형 태양열 집열기와 진 공관형 U-tube 태양열 집열기의 상세 제원을 보여준다.



Fig. 3.3 Photograph of flat-plate and U-tube solar collector





| Parameter | Flat-plate solar collector | | | |
|-------------------------|----------------------------|--|--|--|
| Collector length (mm) | 2,010 | | | |
| Collector width (mm) | 1,010 | | | |
| Gross area (m^2) | 2.03 | | | |
| Absorber area (m^2) | 1.877 | | | |
| Weight (kg) | 35.5 | | | |
| Absorber material | Copper | | | |
| Absorber Thickness (mm) | 15 | | | |
| Insulation material | Glass wool | | | |
| | | | | |

Table 3.1 Specification of flat-late solar collector

Table 3.2 Specification of U-tube solar collector

| Parameter | U-tube solar collector | | | |
|----------------------------------|------------------------|--|--|--|
| Collector length (mm) | 1,445 | | | |
| Collector width (mm) | 1,640 | | | |
| Gross area (m^2) | 2.37 | | | |
| Weight (kg) | 51.5 | | | |
| Riser tube material | Copper | | | |
| Inner diameter of pipes (mm) | 10 | | | |
| Outer diameter of pipes (mm) | 15 | | | |
| Absorptivity of absorber coating | 0.95 | | | |

2. 온도측정

태양열 집열기의 성능 측정을 위해 입구, 출구 그리고 외기의 온도를 측 정하였다. T-type 열전대의 온도범위는 -250℃~350℃이며 기전력의 직진성이 양호하고 또한 내열, 내식성이 높은 장점이 있다. 이에 본 연구에서는 각 위치의 온도를 -200℃~350℃ 범위의 온도를 측정 할 수 있는 T-type 열전대 를 사용하였다. 열전대는 집열기 설치 전에 오차범위를 ±0.2℃범위 안으로 보정하여 설치하였다. Fig 3.4은 본 연구에서 사용된 T-type 열전대의 실물 사진이며, Table 3.3는 T-type 열전대의 상세제원을 나타내었다.



Fig. 3.4 Photograph of T-type thermocouple

| ltem | Specification | | |
|-------------------------------|----------------|--|--|
| Туре | T-type | | |
| Range | -200°C ~ 300°C | | |
| Ansi standard limits of error | 0.75% | | |
| Ansi special limits of error | 0.40% | | |

Table 3.3 Specification of thermocouple





3. 일사량 측정

태양열 집열기의 성능은 일사량에 연관이 있다. 이에 본 연구에서는 태양 일사량 측정을 위해 측정범위는 0~2000 W/m^2 , 기기의 오차는 약 1.95%를 갖는 태양 일사량계 QMS101(Solar radiation sensor)을 사용하여 측정하였 다. Fig. 3.5와 Table 3.4는 태양열 집열기 성능을 측정하기 위하여 실험장 치에 사용된 일사량계의 실제사진과 상세제원을 나타내었다.



Fig. 3.5 Photograph of pyranometer

| Table 3.4 | Specification | of | pyranometer |
|-----------|---------------|----|-------------|
|-----------|---------------|----|-------------|

| ltem | Specification | | | |
|-------------|-------------------------|--|--|--|
| Туре | Silicon pyranometer | | | |
| Sensitivity | 76 | | | |
| Range | 0~2000 W/m ² | | | |
| Accuracy | 1.95% | | | |





4. 유량측정

태양열 집열기 성능 시험장치의 작동유체 유량을 측정하기 위해 본 연구 에서는 체적유량계인 E-MAG-I를 사용하였다. 체적유량계는 실험에 사용된 집열기의 출구에 각각 설치하였다. 본 연구에서 사용된 체적유량계의 실제 사진은 Fig. 3.6이며, 시스템의 상세제원은 Table 3.5에 나타내었다.



Fig. 3.6 Photograph of flow meter

Table 3.5 Specification of flow meter

| ltem | Specification | | |
|----------|---------------|--|--|
| Model | E-MAG-1 | | |
| Size | 1CA | | |
| Ser No. | 191525 | | |
| Output | 4-20 mADC | | |
| Max Flow | 1.4 m3/hr | | |
| Power | 100-240 VAC | | |



5. 축열탱크

본 연구에서 사용된 축열탱크는 본 실험의 조건 및 용도에 맞게 주문제작 하였다. 축열탱크는 무가교 발포 단열처리 되었으며 스테인레스 코일을 이 용하여 제작하였다. 축열탱크에 유체 저장 최대 용량은 100 L 이다. Fig. 3.7 과 Table 3.6 는 본 연구에 사용된 축열탱크의 실제사진과 상세제원을 보여준다.



Fig. 3.7 Photograph of storage tank

| ltem | Specification |
|-------------------------|---------------|
| Model | SUN 100 |
| Storage of heat | 100 <i>l</i> |
| Size($\phi \times H$) | 570×1,300 mm |
| Hot water coil length | 7 m |
| Pipe diameter | 15 A |

Table 3.6 Specification of storage tank





6. 데이터 수집장치

태양열 시스템의 주요부에 센서에서 측정된 데이터를 수집하기 위해 데이 터 수집장치인 MX100(Yokogawa)을 사용하였다. 데이터 수집 장치는 주요 데 이터를 수집한 후 Ethernet 통신방법을 통해 PC에 수집한다. 수집된 데이터 는 Yokogawa사에서 제공된 MX100 standard program을 통해 모니터링 할 수 있으며, 실험 종료 후 수집된 데이터를 엑셀파일로 종합하여 제공한다. Fig. 3.8과 Table 3.7는 데이터 수집 장치의 실물과 상세 사양을 보여준다.



Fig. 3.8 Photograph of data acquisition system

| | · | . 2 | | | |
|----------------------|--------------|------------------------|--|--|--|
| I | tem | Specification | | | |
| Мс | ode I | MX 100 (Yokogawa Inc.) | | | |
| Measurement interval | | 100 ms (shortest) | | | |
| Supplying Voltage | | 100~220 VAC | | | |
| Accuracy | Thermocouple | ±0.05% of rdg. | | | |
| | DC voltage | ±0.05% of rdg. | | | |

Table 3.7 Specification of data acquisition system







제 2 절 나노유체의 제작

1. 나노유체 제조방법

본 실험에서는 나노유체 제조방법으로 이단계 방법(Two-step method)으로 제작하였다. 이단계 방법(Two-step method)은 나노 분말 가루를 생산 한 후 유체 내에 분산시켜서 나노유체를 생산하는 방식이다. 제조된 나노입자를 구매하여 초음파 분산기를 사용하여 나노입자를 기본유체에 분산시켜서 나 노유체를 제작하였다. 또한 실험 수행 시 약 18 L의 작동유체가 소요되기 때문에 연속 순환식 대용량 초음파 분산기를 사용하여 나노유체를 제조하였 다. 나노유체는 해당 농도 제조에 필요한 나노유체와 물 그리고 분산 안정 성을 향상시켜주는 Arabic gum인 분산안정제를 교반기에 30분간 교반을 수 행 후 초음파 분산 장치에서 6시간 동안 분산작업을 수행하여 나노유체를 제조하였다. 본 연구에서는 40 nm와 80 nm 두 가지 종류의 나노입자 사용하 였다. 본 연구에서 사용된 초음파 분산기의 실물사진과 세부규격을 Fig. 3.9와 Table 3.8에 나타내었다.







Fig. 3.9 Photograph of ultrasonic homogenizer

Table 3.8 Specification of ultrasonic homogenizer

| ltem | Specification | | | |
|--------------|------------------|--|--|--|
| Model | HUH-2000 | | | |
| Power | AC 220 V, 60 Hz | | | |
| Output Power | 2000 W | | | |
| Frequency | 20 kHz ± 100 Hz | | | |
| Converter | PZT, BLT Type | | | |
| Horn | Ti 기본 (φ20, φ30) | | | |



2. Cu0 나노유체

CuO 나노유체를 제조하기 위해 본 연구에서는 AVENTION 사에서 제조된 나 노분말인 CuO 나노 분말을 구매하여 나노유체를 제조하였다. Fig. 3.10은 AVENTION 사에서 제공한 CuO 나노 분말의 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진이며 Fig. 3.10의 (a)는 CuO 나노입자의 크기가 40 nm, (b)는 80 nm의 분산성을 보여주고 있다. Table 3.9는 CuO 나노 분말의 함유 량을 보여준다. 본 연구에서 CuO 나노유체의 농도는 각각 0.1vol%, 0.3vol%, 0.5vol%, 0.7vol%으로 제조하였다.



Fig. 3.10 Scanning Electron Microscope(SEM) of CuO Nanofluid

| Specification | | | |
|-----------------------------|--|--|--|
| Cu0 (80% alpha : 20% gamma) | | | |
| 99% | | | |
| 40, 80 nm | | | |
| 6,500 kg/m3 | | | |
| 17.65 W/m·K | | | |
| 533 J/kg·K | | | |
| AVENTION | | | |
| | | | |

Table 3.9 Specification of CuO nanopaticle





제 3 절 실험방법 및 집열기 효율 계산

1. 실험방법 및 조건

평판형 태양열 집열기와 진공관형 U-tube 태양열 집열기를 동일한 유량조 건에서 나노입자 크기와 농도 변화에 따른 CuO 나노유체와 기본유체인 물을 적용한 집열기의 열효율을 측정하기 위해 동일한 장소와 조건에서 실험을 수행하였다. Table 3.10은 본 연구에서 설정된 실험조건을 나타내고 있다. 본 연구에서 사용된 평판형 태양열 집열기의 면적은 2 m^2 , U-tube형 태양열 집열기의 면적은 2.37 m^2 이고, 동일한 작동유체의 유량조건으로 오전 10:00 부터 오후 5:00까지 실험을 수행하였다. 또한 태양열 시스템에 흐르는 작동 유체는 각각 0.033 kg/s와 0.047 kg/s로 고정시켰다. 나노유체의 농도는 0.1vol%, 0.3vol%, 0.5vol%, 0.7vol%로 변화시켜 최적의 농도를 확인할 수 있도록 실험을 수행하였고, 나노입자 크기는 40 nm, 80 nm로 하여 크기에 따른 성능 변화를 확인하였다. 또한 모유체인 물과 나노유체의 성능비교를 수행하기 위해 각각의 집열 폐회로를 갖는 집열기 성능측정 실험장치에서 동시에 실험을 수행하여 성능비교 실험을 수행하였다.

| ltem | Specification |
|--------------------------------------|--------------------|
| Type of working fluid | CuO, Water |
| Concentration of CuO nanofluid(vol%) | 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 |
| CuO nanopaticle size(nm) | 40, 80 |
| Experiment time(hr) | 10:00~17:00 |
| Solar radiation(W/m^2) | 279~939 |
| Solar collector inlet temp.(℃) | 8~9.5 |
| Solar collector Mass flow rate(kg/s) | 0.033, 0.047 |

Table 3.10 Experiment conditions



2. 태양열 집열기의 효율 및 불확실성 계산

평판형과 진공관형 U-tube 태양열 집열기의 효율을 비교·분석하기 위하 여 동일한 집열기를 사용하여 같은 장소와 외기조건에서 동시에 실험을 수 행하였고, 작동유체는 물과 나노유체를 적용하였다. 작동유체에 획득된 열 량은 흡수체에 의해 흡수된 에너지와 같으며 식 (3-1)과 같이 표현된다.

$$Q_u = \dot{m}c_v (T_0 - T_i) = A_c F_R [G(\tau \alpha) - U_L (T_i - T_a)]$$
(3-1)

위 식에서 Q_u 는 유용 열획득(Useful heat gain), \dot{m} 은 작동유체의 질량유 량(Mass flow rate), c_p 는 작동유체의 비열(Specific heat), T_0 는 태양열 집열기의 출구온도, T_i 는 태양열 집열기의 입구온도, A_c 는 태양열 집열기의 면적, F_R 은 열손실변수, G는 태양일사량, $\tau \alpha$ 는 집열기 흡수율-투과율, U_L 은 집열기 전체손실계수, T_a 는 외기온도를 의미한다.

식 (3-2)과 식(3-3)은 CuO 나노유체의 비열과 밀도를 나타내는 식이다.

$$c_{p(nf)} = \frac{\rho_{bf}c_{p(bf)}(1-\phi) + \rho_{np}c_{p(np)}\phi}{(1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np}}$$
(3-2)

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np} \tag{3-3}$$

작동유체의 열획득량(Q_u)를 집열기의 면적과 일사량의 곱으로 나눠주어 계산하면 태양열 집열기의 효율을 구할 수 있으며 이를 나타내면 식 (3-4) 와 같다.

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_{f,o} - T_{f,i})}{GA_c} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_0)}{G}$$
(3-4)

- 23 -





본 연구에서 태양열 집열기 효율의 측정과 계산에 있어서 불확실도는 Moffat(1985)에 의해 권고된 식으로 식(3-5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta m}{\eta} = \left[\left(\frac{\delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\delta (T_0 - T_i)}{T_0 - T_i}\right)^2 + \left(\frac{\delta c_p}{c_p}\right)^2 + \left(\frac{\delta G}{G}\right)^2 \right]^{0.5}$$
(3-5)

위의 식으로부터 질량유량의 오차는 식 (3-6)과 같이 계산하였다.

$$\frac{\delta m}{m} \le 0.5\% \tag{3-6}$$

또한, 온도의 오차는 식 (3-7)과 같이 계산하였다.

$$\frac{\delta(T_0 - T_i)}{T_0 - T_i} \le \left[\left(\frac{\delta T_0}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_i}{T_i}\right)^2 \right]^{0.5} = \left[\left(\frac{0.2}{15}\right)^2 + \left(\frac{0.2}{11}\right)^2 \right]^{0.5} = 2.25\%$$
(3-7)

그리고, 일사량의 오차는 식 (3-8)과 같이 나타낼 수 있고, 나노유체 비 열의 오차는 식 (3-9)와 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{\delta G}{G} \le 1.95\% \tag{3-8}$$

$$\frac{\delta c_p}{c_p} \le 2.23\% \tag{3-9}$$

따라서, 본 연구에서 사용된 태양열 집열기 전체 효율의 오차는 식 (3-10)과 같이 나타낼 수 있다.





$$\frac{\delta\eta}{\eta} \le 3.75\% \tag{3-10}$$



제 4 장 태양열 집열기의 성능 실험결과 및 고찰

제 1 절 CuO 나노유체의 열전도도 고찰

본 연구에서는 CuO 나노유체의 나노입자 크기와 농도에 따른 집열기의 효율 변화를 실험적으로 고찰하였으며 실험에 앞서 집열기의 효율을 분석하기 위해 CuO 나노유체의 열전도도를 고찰하였다. Fig. 4.1은 나노 입자크기가 40 nm인 CuO 나노유체에 대하여 온도와 농도에 따라 열전도비 k_{nf}/k_{bf} 를 나타내고 있으 며 k_{nf} 는 CuO 나노유체의 열전도도, k_{bf} 는 기본 작동유체인 물의 열전도도이 다. CuO 나노유체의 열전도비는 나노유체의 크기가 작고 나노유체의 농도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하고 열전도비의 증가율은 농도가 증가함에 따라 점차 감소한다. CuO 나노유체의 나노입자 크기가 40 nm이고 농도가 0.1vol%일 때 나노유체의 온도가 50℃로 증가하면 열전도비는 약 1.3% 향상되 었고, CuO 나노유체의 크기가 80 nm이고 농도가 0.1vol%일 때 나노유체의 온 도가 50℃로 증가하면 열전도비는 약 0.9% 향상되었다. CuO 나노유체의 나노 입자 크기가40 nm이고 CuO 나노유체의 농도가 0.7vol%일 때 나노유체의 나노입 자 크기가 80 nm이고 CuO 나노유체의 농도가 0.7vol%일 때 나노유체의 나노입 자 크기가 80 nm이고 CuO 나노유체의 농도가 0.7vol%일 때 나노유체의 온도가

CuO 나노유체의 나노입자의 크기가 40 nm에서 80 nm로 커질 때 열전도비는 평균적으로 작동온도가 10℃일 때 약 0.25%, 50℃일 때 약 0.81% 정도로 감소 하였다. 또한 10℃의 작동온도에서 CuO 나노유체의 농도가 0.1vol%~0.7vol%로 증가하였을 때 CuO 나노입자 크기가 40 nm에서의 열전도비는 약 1.57% 향상되 었고, CuO 나노입자 크기가 80 nm에서의 열전도비는 약 1.28% 향상되었다. 5 0℃작동온도에서 CuO 나노유체의 농도가 0.1vol%~0.7vol%로 증가하였을 때 CuO 나노입자 크기가 40 nm에서의 열전도비는 약 4.67% 향상되었고, CuO 나노 입자 크기가 80 nm에서의 열전도비는 약 4.08% 향상되는 것으로 나타났다.







Fig. 4.1 Thermal conductivity ratio as a function of temperature for different concentration of nanofluid (Nanoparticle size : 40 nm)



Fig. 4.2 Thermal conductivity ratio as a function of temperature for different concentration of nanofluid (Nanoparticle size : 80 nm)



제 2 절 CuO 나노유체의 농도에 따른 태양열 집열기의 성 능 고찰

Fig. 4.3와 Fig. 4.4은 작동유체의 질량유량 0.047 kg/s이고 40 nm 나노 입자 크기의 CuO 나노유체와 기본유체인 물을 적용하여 평판형과 U-tube형 태양열 집열기에서 작동유체의 농도에 따른 효율 변화를 나타내고 있다. CuO 나노유체를 사용했을 때 집열기의 효율이 기본유체인 물을 사용한 집열 기 보다 효율이 크게 향상됨을 알 수 있다. $T_i = T_a$ 일 때, 태양열 집열기의 효율은 최대이며, $(T_i - T_a)/G$ 가 증가할수록 효율이 감소한다. $T_i = T_a$ 일 때 평판형과 U-tube형 태양열 집열기 둘 다 나노유체의 농도가 0.5vol%일 때 가장 높은 효율을 보였으며, 평판형 태양열 집열기의 최대효율은 73.5%, U-tube형 태양열 집열기의 최대효율은 69.5%로 나타났다. 기본유체인 물을 사용한 두 태양열 집열기의 회대효율은 69.5%로 나타났다. 기본유체인 물을 사용한 두 태양열 집열기의 효율이 평균적으로 각각 11.32%와 7.82%씩 향상 된 결과를 보였다. 또한 평판형 태양열 집열기에서 나노유체의 농도가 0.5vol%일 때, 0.1vol%, 0.3vol% 그리고 0.7vol%인 CuO 나노유체를 사용했 을 때 보다 평균적으로 각각 3.69%, 1.7%, 0.5%씩 향상되었고 U-tube형 태 양열 집열기에서는 평균적으로 4.49%, 2.26%, 0.32%씩 향상되었다.

CuO 나노유체를 적용한 태양열 집열기의 효율은 나노유체의 농도가 증가 할수록 높은 효율을 나타냈으나 CuO 나노유체의 농도가 증가할수록 효율의 증가폭은 감소함을 알 수 있었다. 대체로 나노유체의 열전도도는 농도가 증 가함에 따라 향상되지만 고농도에서는 나노입자의 분산 안정성이 낮아져 시 스템내에 침전이 발생할 가능성이 커지며 입자 사이에 열에너지 전달 및 흡 수력이 감소하고 이에 열전달 효율이 감소하게 된다. 이러한 현상으로 인해 나노유체의 농도가 증가한다 하더라도 더 이상 효율은 향상되지 않으며 나 노유체마다 최적의 효율을 보여주는 농도가 각각 다르게 나타난다.

본 연구에서는 CuO 나노유체의 농도 변화에 따른 평판형과 U-tube형 태양 열 집열기의 효율을 실험을 통해서 측정한 후 기본유체인 물을 적용했을 때 와 효율을 비교하였다. 우선 작동조건과 일사량에 따른 태양열 집열기의 입



출구 온도를 비교하기 위하여 하루동안의 데이터를 수집하였다. Table 4.1 과 Table 4.2는 작동유체의 질량유량 0.047 kg/s, 40 nm 나노입자 크기의 CuO 나노유체와 기본유체인 물을 적용한 평판형과 U-tube형 태양열 집열기 에서 작동유체의 농도에 따른 효율에 관한 매개변수를 선형방정식을 이용하 여 계산된 결과를 보여주고 있다. 평판형 태양열 집열기는 $F_R(\tau\alpha)$ 의 나노유 체의 농도가 0.5vol%일 때 최대값을 가지며 나노유체의 농도가 0.5vol%인 경우 $F_R(\tau\alpha)$ 의 값은 0.739, F_RU_L 의 값은 22.88이다. U-tube형 태양열 집열 기에서도 $F_R(\tau\alpha)$ 의 나노유체의 농도가 0.5vol%에서 최대값을 가지며 $F_R(\tau\alpha)$ 의 값은 0.692, F_RU_L 의 값은 16.66이다. 여기서, 나노입자의 크기가 40 nm 인 0.5vol% CuO 나노유체를 사용하였을 때 평판형 태양열 집열기의 F_RU_L 값이 더 높은 이유는 열에너지 전달 및 흡수력의 감소로 인해 외부 열손실 이 많음에 기인하고 이는 이전 연구 자료를 통하여 확인하였다. 또한 U-tube형 태양열 집열기가 더 넓은 운전범위에서 높은 효율을 갖는 것으로 확인되었다.





Fig. 4.3 Variation of efficiency of flat-plate solar collector for different nanofluid concentrations (CuO nano particle size : 40 nm, \dot{m} :0.047 kg/s)



Fig. 4.4 Variation of efficiency of U-tube solar collector for different nanofluid concentrations (CuO nanoparticle size : 40 nm, m:0.047 kg/s)





| Working fluid | $F_R(au lpha)$ | $F_R U_L$ | R^2 | | |
|-----------------|-----------------|-----------|-------|--|--|
| Water | 0.626 | 18.05 | 0.964 | | |
| CuO nanofluid | 0.600 | 01.00 | 0.067 | | |
| (40nm, 0.1vol%) | 0.699 | 21.00 | 0.967 | | |
| CuO nanofluid | 0 791 | 00.00 | 0.074 | | |
| (40nm, 0.3vol%) | 0.721 | 66.66 | 0.974 | | |
| CuO nanofluid | 0 730 | 22.88 | 0.073 | | |
| (40nm, 0.5vol%) | 0.759 | 22.00 | 0.975 | | |
| CuO nanofluid | 0 7 3 5 | 22.86 | 0.055 | | |
| (40nm, 0.7vol%) | 0.755 | 22.00 | 0.900 | | |

| Table | 4.1 | Parameters | of | efficiency | in | the | flat-plate | solar | collector |
|-------|-----|-------------|------|-------------|------|-------|------------|-------|-----------|
| | | according t | o Cu | 0 nanofluid | conc | entra | tion | | |

Table 4.2 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to CuO nanofluid concentration

| Working fluid | $F_R(au lpha)$ | $F_R U_L$ | R^2 |
|----------------------------------|-----------------|-----------|-------|
| Water | 0.619 | 18.75 | 0.916 |
| CuO nanofluid (40nm, 0.1vol%) | 0.647 | 15.56 | 0.955 |
| CuO nanofluid (40nm, 0.3vol%) | 0.668 | 15.89 | 0.966 |
| CuO nanofluid (40nm, 0.5vol%) | 0.691 | 16.66 | 0.969 |
| CuO nanofluid (40nm, 0.7vol%) | 0.688 | 16.82 | 0.964 |



제 3 절 CuO 나노입자의 크기에 따른 태양열 집열기의 성 능 고찰

Fig. 4.5와 Fig. 4.6은 CuO나노유체 농도가 0.5vol%, 작동유체의 질량유 량이 0.047 kg/s일 때 CuO 나노입자의 크기에 따른 태양열 집열기의 효율변 화를 보여주고 있다. 나노입자의 크기의 상이성은 열전도도에 영향을 주기 때문에 열전달 성능에 직접적인 영향을 미친다. 이에 나노입자의 크기의 영 향성을 조사하였다. 모든 운전조건에서 나노입자의 크기가 가장 작은 40 nm 로 제작된 CuO 나노유체를 사용하였을 때 가장 높은 효율을 보였다. 즉, 평 판형과 U-tube형 태양열 집열기에서 나노입자의 크기가 40 nm인 나노유체를 적용하였으며 최대 효율은 73.5%와 69.5%로 나타났다. 이는 80 nm의 CuO 나 노입자를 사용한 집열기의 효율보다 평균적으로 각각 3.5%와 1.9%가 향상됨 을 보였다. 이는 보다 작은 크기의 나노입자를 갖는 나노유체 보다 우수한 열전도도를 가지며 이러한 특징은 태양열 집열기의 성능에 주요한 영향을 미친 것으로 판단된다.

Table 4.3과 Table 4.4는 동일한 농도에서 두 가지 나노입자의 크기에 따 른 집열기의 효율과 관련된 특성 매개 변수의 값을 제시하였다. 평판형 태 양열 집열기인 경우 나노입자의 크기가 40 nm에서 에너지 흡수변수인 F_R(πα)가 0.739으로 가장 높은 값을 보였으며 80 nm의 입자크기를 갖는 나 노유체가 0.689로 상대적으로 낮은 값을 보였다. U-tube형 태양열 집열기 역시 나노입자의 크기가 40 nm에서 에너지 흡수변수인 F_R(πα)가 0.692으로 가장 높은 값을 보였으며, 80 nm의 입자크기를 갖는 나노유체가 0.672으로 상대적으로 낮은 값을 보였다. 나노입자의 크기가 작을수록 태양에너지 흡 수력이 우수함을 알 수 있다. 또한 태양열 집열기의 (T_i - T_a)/G가 작을 때 입자크기가 40 nm인 나노유체를 적용한 집열기의 효율차가 크게 나타났지만 (T_i - T_a)/G가 클수록 외부로의 열손실이 커져 40 nm-Cu0 나노유체의 집열기 효율과 80 nm-Cu0 나노유체의 집열기 효율의 차이가 조금씩 감소함을 의미 한다.









Fig. 4.6 Variation of efficiency of U-tube solar collector for different nanopaticle sizes (CuO nanofluid concentration : 0.5vol%, m=0.047 kg/s)





| Table | 4.3 | Parameters | of | efficiency | in | the | flat-plate | solar | collector |
|-------|-----|-------------|------|--------------|------|-----|------------|-------|-----------|
| | | according t | o Cu | 0 nanopartic | le s | ize | | | |

| Working fluid | $F_R(au lpha)$ | $F_R U_L$ | R^2 |
|----------------------------------|-----------------|-----------|-------|
| CuO nanofluid (40nm, 0.5vol%) | 0.739 | 22.88 | 0.973 |
| CuO nanofluid (80nm, 0.5vol%) | 0.689 | 20.95 | 0.949 |

Table 4.4 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to CuO nanoparticle size

| Working fluid | $F_R(\tau\alpha)$ | $F_R U_L$ | R^2 |
|----------------------------------|-------------------|-----------|-------|
| CuO nanofluid (40nm, 0.5vol%) | 0.692 | 16.66 | 0.969 |
| CuO nanofluid (80nm, 0.5vol%) | 0.672 | 17.4 | 0.948 |



제 4 절 작동유체의 질량 유량에 따른 태양열 집열기의 성 능 고찰

Fig. 4.7와 Fig. 4.8은 CuO 나노입자의 크기가 40 nm이고 CuO 나노유체의 농도가 0.5vol% 조건에서 CuO 나노유체와 물의 질량유량 변화에 따른 태양 열 집열기의 효율변화를 비교하여 보여주고 있다. 질량유량이 0.033 kg/s에 서 0.047 kg/s로 증가함에 따라 평판형과 U-tube형 태양열 집열기의 효율은 향상되었다. 작동유체의 질량유량 증가 시 집열기 내에 집열된 열에너지를 보다 많이 이송할 수 있기 때문에 상대적으로 큰 질량유량을 갖는 0.047 kg/s 의 경우 보다 높은 집열효율을 가짐을 확인할 수 있다. 동일 일사량에 서 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s의 경우 0.047 kg/s의 경우에 비해 열 용량이 작고 관내 유속이 느리기 때문에 보다 긴 집열시간을 가져 출구 온 도가 증가된다. 반면 유량이 0.047 kg/s 의 경우 관내 빠른 유속과 작동유 체의 열용량이 크기 때문에 집열기 출구 온도는 낮게 형성된다. 평판형 태 양열 집열기의 경우 0.033 kg/s와 0.047 kg/s에서 CuO 나노유체 적용 시 효 율은 2.7%와 10.7% 향상되었다. 반면 U-tbue 태양열 집열기의 경우 질량유 량이 0.033 kg/s와 0.047 kg/s에서 CuO 나노유체 적용 시 효율은 1.9%와 7.7% 향상되어 평판형 태양열 집열기에 비해 낮은 효율 개선을 보였다. 태 양열 집열기의 효율은 집열기에서 얻은 태양열 획득에너지와 작동유체에 전 달되는 열에너지 양의 비로 정의된다. 이는 작동유체의 열용량과 입출구 온 도차는 효율에 상호적으로 영향을 미치기 때문에 단순히 질량유량의 변화만 으로 효율개선을 평가하기에는 어려움이 있다.

Table 4.5와 Table 4.6은 나노유체와 물의 질량유량이 0.033 kg/s와 0.047 kg/s일 때 특성 매개 변수인 열획득계수인 $F_R(\tau\alpha)$ 와 열손실계수인 F_RU_L 을 비교하였다. 태양열 집열기의 작동유체의 질량유량의 증가는 열용 량을 증가시켜 $F_R(\tau\alpha)$ 을 증가되며 열손실계수는 외기의 온도와 집열기 출구 의 온도차에 큼에 따라 증가 때문에 질량유량이 작은 경우 열손실계수는 증 가한다. 평판형 집열기에서 물의 경우 질량유량이 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 증가 시 $F_R(\tau\alpha)$ 은 0.609와 0.625로 증가한 반면 F_RU_L 은 21.15에서

- 35 -





17.66으로 감소하였다. 반면 CuO 나노유체의 경우 질량유량이 0.033 kg/s에 서 0.047 kg/s로 증가 시 $F_R(\tau\alpha)$ 은 물에 비해 15.8%와 17.1% 향상된 0.705 와 0.732로 나타난 반면 F_RU_L 의 경우 18.2%와 12.0% 증가한 21.15와 19.78 로 나타났다. 반면에 U-tube형 태양열 집열기의 경우 물의 질량유량이 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 증가 시 $F_R(\tau\alpha)$ 은 0.595에서 0.614로 증가한 반면 F_RU_L 은 15.65에서 15.61로 감소하였다. CuO 나노유체의 경우 질량유 량이 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 증가 시 $F_R(\tau\alpha)$ 은 12.9%와 12.5% 향상된 0.672와 0.691로 증가하였고 F_RU_L 의 경우 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 증가함에 따라 15.1%와 15.6% 증가한 18.01과 18.05 로 나타났다. 이로 미루어 볼 때 CuO 나노유체의 활용은 평판형 집열기가 U-tube 태양열 집열기에 비해 질량유량이 증가함에 따라 $F_R(\tau\alpha)$ 를 크게 개 선시키며 F_RU_L 의 증가를 감소시켜 효율 개선을 이룸을 알 수 있다.







Fig. 4.7 Variations of efficiency in the flat-plate solar collector for different mass flow rates (CuO nanoparticle size : 40 nm, Concentration : 0.5vol%)



Fig. 4.8 Variations of efficiency in the U-tube solar collector for different mass flow rates (CuO nanoparticle size : 40 nm, Concentration : 0.5vol%)





| Mass flow rate(kg/s) | Working fluid | $F_R(au lpha)$ | $F_R U_L$ | R^2 |
|-------------------------|------------------|-----------------|-----------|-------|
| 0.033 - | CuO nanofluid | 0.705 | 21.15 | 0.963 |
| | Water | 0.609 | 17.89 | 0.894 |
| 0.047 - | CuO nanofluid | 0.732 | 19.78 | 0.96 |
| | Water | 0.625 | 17.66 | 0.957 |

Table 4.5 Parameters of efficiency in the flat-plate solar collector according to mass flow rates

Table 4.6 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to mass flow rates

| Mass flow | Working | $F(\pi_{2})$ | F U | \mathbf{p}^2 | |
|------------|---------------|----------------|----------------|----------------|--|
| rate(kg/s) | fluid | $F_R(1\alpha)$ | $\Gamma_R O_L$ | R^{\perp} | |
| 0.033 - | CuO nanofluid | 0.672 | 18.01 | 0.948 | |
| | Water | 0.595 | 15.65 | 0.928 | |
| 0.047 - | CuO nanofluid | 0.691 | 18.05 | 0.97 | |
| | Water | 0.614 | 15.61 | 0.939 | |



제 5 절 Al_2O_3 와 CuO 나노유체, 그리고 물을 적용한 태양 열 집열기의 성능실험 결과 비교

Fig. 4.9와 Fig. 4.10은 본 실험에서 평판형과 U-tube형 태양열 집열기에 CuO 나노유체를 적용하였을 때 가장 성능이 우수한 효율곡선을 선행연구인 Kim et al.(2016)의 평판형과 U-tube형 태양열 집열기에 Al_2O_3 나노유체를 적용했을 때 가장 우수한 효율곡선과 비교하여 보여주고 있다. CuO 나노유 체를 사용한 경우, 나노입자의 크기가 40 nm이고 농도가 0.5vol%일 때 두 집열기 모두 가장 높은 효율을 보였다. 이 때 평판형 태양열 집열기의 최대 효율은 73.5vol%이고 U-tube형 태양열 집열기의 최대효율은 69.5%로 나타났 다. 이는 물을 작동유체로 사용했을 때 보다 각각 평균 11%와 8%정도 향상 된 결과이다.

또한 선행연구 Kim et al.(2016)의 결과에 따르면 Al_2O_3 나노유체를 사용 한 경우, 나노입자의 크기가 20 nm이고 농도가 1.0vol%일 때 가장 우수한 효율을 보였다. 이 때 평판형 태양열 집열기의 최대효율은 74.51%이고 U-tube형 태양열 집열기의 최대효율은 72.4%로 나타났다. 이는 물을 작동유 체로 사용하였을 때 보다 각각 평균 12%와 10%정도 향상된 결과이다.

평판형 태양열 집열기와 U-tube형 태양열 집열기에서 가장 효율이 높았던 CuO 나노입자 크기가 40 nm이고 농도가 0.5vol%인 CuO 나노유체를 적용한 경우와 나노입자 크기가 20 nm이고 농도가 1.0vol%인 Al_2O_3 나노유체를 적 용한 경우를 비교해 보면 Al_2O_3 나노유체를 사용했을 때 집열기 효율이 평 균적으로 각각 1%와 1.9% 더 높은 효율을 보였다. 이는 Al_2O_3 나노유체의 농도가 CuO 나노유체 농도보다 2배가 높으므로 인해 열전도도가 높아져 열 전달 성능이 우수해짐에 기인한다. 또한 Al_2O_3 나노입자의 크기가 작아 미 세운동 강도가 증가하여 나노유체의 대류 현상을 증가시켜 열전달이 증가하 게 된 것도 하나의 원인으로 판단된다. 본 연구에서 CuO 나노유체의 농도를 더 높게 설정하지 못한 이유는 앞서 CuO 나노유체의 농도에 따른 성능비교 에서 밝혔듯이 CuO 나노유체의 밀도가 높아 Al_2O_3 와 같은 고농도에서는 나





노입자의 분산 안정성이 낮아져 시스템에 침전이 발생할 가능성이 커지게 되며 입자 사이에 열에너지 전달 및 흡수력이 감소하고 오히려 효율이 감소 하게 되기 때문이다.







Fig. 4.9 Comparison of efficiency in the flat-plate solar collector using Al203 nanofluid, CuO nanofluid, and water



Fig. 4.10 Comparison of efficiency in the U-tube solar collector using Al203 nanofluid, CuO nanofluid, and water





Water

| according to working fluid | | | | | |
|---|----------------|-----------|-------|--|--|
| Working fluid (particle size, concentration) | $F_R(aulpha)$ | $F_R U_L$ | R^2 | | |
| CuO nanofluid (40nm, 0.5vol%) | 0.735 | 22.88 | 0.973 | | |
| Al_2O_3 nanofluid (20nm, 1.0vol%) | 0.745 | 19.32 | 0.872 | | |

0.626

Table 4.7 Parameters of efficiency in the flat-plate solar collector according to working fluid

Table 4.8 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to working fluid

18.05

0.964

| Working fluid (particle size, concentration) | $F_R(\tau \alpha)$ | $F_R U_L$ | R^2 |
|---|--------------------|-----------|-------|
| CuO nanofluid (40nm, 0.5vol%) | 0.695 | 18.05 | 0.97 |
| Al_2O_3 nanofluid (20nm, 1.0vol%) | 0.725 | 14.58 | 0.905 |
| Water | 0.614 | 15.61 | 0.939 |



제 5 장 결 론

본 논문에서는 CuO 나노유체를 사용하여 다양한 농도와 나노입자의 크기 에 따른 평판형과 U-tube형 태양열 집열기의 효율을 기본유체인 물과 비교 하였다. 실험은 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s와 0.047 kg/s 두 가지를 사용하여 진행하였다. 또한, 사용된 CuO 나노입자의 크기는 40 nm와 80 nm 가 사용되었고, 농도는 0.1vol%, 0.3vol%, 0.5vol%, 0.7vol% 네 가지로 변 화시켜 실험을 실시하였다. 태양열 집열기의 작동유체인 CuO 나노유체의 열 전도도를 조사한 결과 나노유체의 열전도도는 농도가 증가함에 따라 비선형 적으로 증가되었다. 하지만 CuO 나노유체의 열전도도 증가율은 농도가 증가 함에 따라 감소하였으며 열전도도는 나노입자의 크기가 작을수록 증가하였 다.

실험에서 사용된 평판형 태양열 집열기와 U-tube형 태양열 집열기에 0.5vol% 농도를 가지는 CuO 나노유체에 대하여 나노입자 크기에 따른 효율을 분석한 결과 크기가 작은 40 nm-CuO 나노유체에서 각각 73.5%와 69.5%로 가장 높은 효율을 보였고 80 nm-CuO 나노유체에서 각각 70%와 67.6%의 효율을 보였다.

가장 높은 효율을 보였던 40 nm-CuO 나노유체에 다양한 체적농도를 적용 하여 평판형 태양열 집열기와 U-tube형 태양열 집열기의 효율을 측정하였 다. 측정한 결과, 0.5vol%에서 각각 73.5%와 69.5%로 가장 높은 효율을 보 였으며, 이 결과는 물을 작동유체로 사용하였을 경우보다 각각 11.3%와 7.3% 더 향상되는 것으로 나타났다. 또한 0.5vol% CuO 나노유체를 작동유체 로 사용한 경우 0.1vol%, 0.3vol%, 0.7vol%를 사용하였을 때 보다 평판형 태양열 집열기는 각각 3.69%, 1.7%, 0.5% 향상된 효율을 보여주었으며 U-tube형 태양열 집열기는 각각 4.49%, 2.26%, 0.32% 향상된 효율을 보였 다.

그리고 작동유체의 질량유량의 변화에 따른 태양열 집열기의 효율을 측정 하였다. 실험에 사용된 질량유량은 0.033 kg/s와 0.047 kg/s를 사용하였다. 실험결과, 물을 작동유체로 사용한 경우, 작동유체의 질량유량이 0.047



kg/s일 때 평판형 집열기의 효율은 63%로 질량유량이 0.033 kg/s를 사용하 였을 때 보다 약 3% 정도 효율이 더 증가하였으며 질량유량이 0.047 kg/s일 때 U-tube형 집열기의 효율은 61.67%로 0.033 kg/s의 질량유량을 사용하였 을 때 보다 약 1.48% 정도 효율이 향상되었다. Cu0 나노유체를 작동유체로 사용한 경우, 질량유량이 0.047 kg/s일 때 평판형 집열기의 효율은 73.5%로 질량유량 0.033 kg/s를 사용하였을 때 보다 약 3.7% 정도 효율이 더 향상되 었으며 질량유량이 0.047 kg/s일 때 U-tube형 집열기의 효율은 69.5%로 0.033 kg/s의 질량유량을 사용하였을 때 보다 약 1.7% 정도 효율이 증가하 였다.

본 연구의 결과를 검토해 보았을 때 태양열 집열기의 효율을 높이기 위해 서는 CuO 나노유체의 농도와 나노입자의 크기가 알맞게 선택되어야 하고 시 스템의 질량유량 또한 최적으로 제어되어야 한다. 나노유체는 크기가 작을 수록 브라운운동이 활발해지며 태양에너지의 흡수력이 우수해진다. 나노유 체의 높은 체적농도는 열전도도가 좋으나 점성력이 증가되어서 열전달 성능 이 감소된다. 반면에 체적농도가 낮으면 태양에너지를 모두 흡수하기 어렵 기 때문에 알맞은 농도를 선택하는 것은 매우 중요하다. 이처럼 나노유체의 크기와 농도는 태양열 집열기 성능에 미치는 영향이 아주 큰 변수이며, 기 본유체인 물보다 나노유체의 사용이 태양에너지의 흡수에 더 우수함을 보여 준다. 따라서 최적의 설계조건을 고려하여 CuO 나노유체를 사용한다면 태양 열 집열기의 효율 향상에 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

- 44 -



Reference

- S. Lee, S. Jang, Study on Efficiency of Flat-Plate Solar Collector Using Nanofluids, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Volume 37, Issue 9, (2013) 799-805.
- M. Mahendran, Lee. G. C, K. V Sharma, A. Shahrani, Performance Evaluation of Evacuated Tube Solar Collector using Water-Based Titanium Oxide Nanofluid, Journal of Mechanical Engineering and Sciences, Volume 3, (2012) 301-310.
- Hashim A. Hussain, Qusay Jawad, Khalid F. Sultan, Experimental analysis on thermal efficiency of evacuated tube solar collector by using nanofluids, International Journal of Sustainable and Green Energy, Volume 4, Issue 3-1, (2014) 19-28.
- Zhen-Hua Liu, Ren-Lin Hu, Lin Lu, Feng Zhao, Hong-Shen Xiao, Thermal performance of an open thermosyphon using nanofluid for evacuated tubular high temperature air solar collector, Energy Conversion and Management, Volume 73 (2013) 135-143.
- Yijie Tong, Jinhyun Kim, Honghyun Cho, Effects of thermal performance of enclosed-type evacuated U-tube solar collector with multi-walled carbon nanotube/water nanofluid, Renewable Energy, Volume 83, (2015) 463-473.
- P.K. Nagarajan, J. Subramani, S. Suyambazhahan, Ravishankar Sathyamurthy. Nanofluids for solar collector applications: A Review. Energy

- 45 -





Procedia 61 (2014) 2416-2434.

- G. Colangelo, E. Favale, A. de Risi, D. Laforgia. A new solution for reduced sedimentation flat panel solar thermal collector using nanofluids, Appl. Energy 111 (2013) 80–93.
- H. Chaji, Y. Ajabshirchi, E. Esmaeilzadeh, S.Z. Heris, M. Hedayatizadeh,
 M. Kahani. Experimental study on thermal efficiency of flat-plate solar collector using TiO2/water nanofluid. Mod. Appl. Sci. 7 (10) (2013) 60-69.
- A.K. Tiwari, P. Ghosh, J. Sarkar. Solar water heating using nanofluids a comprehensive overview and environmental impact analysis. Int J Emerg Technol Adv Eng 3 (2013) 221–224.
- V. Khullar, H. Tyagi, P.E. Phelan, T.P. Otanicar, H. Singh, R.A. Taylor. Solar energy harvesting using nanofluids-based concentrating solar collector. J. Nanotechnol. Eng. Med 3(3) (2013) 031003.
- M.M. Rahman, S.Mojumder, S. Saha, S.Mekhilef, R. Saidur, Augmentation of natural convection heat transfer in triangular shape solar collector by utilizing water based nanofluids having a corrugated bottom wall, Int. Commun. Heat Mass Transfer 50 263 (2014) 117–127.
- R. Saidur, T.C. Meng, Z. Said, M. Hasanuzzaman, A. Kamyar. Evaluation of the effect of nanofluid-based absorbers on direct solar collector. International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012) 5899-907.
- E. Natarajan, R. Sathish. Role of nanofluids in solar water heater. Int.





J. Adv. Manuf. Technol. 2009. 10.1007/s00170-008-1876-8.

- M. Keshavarz, S. Razvarz, Experimental investigation of aluminum oxide nanofluid on heat pipe thermal performance, Int. Commun. Heat Mass. 39 (2012) 1444–1448.
- Z. Said, M.H. Sajid, M.A. Alim, R. Saidur, N.A. Rahim. Experimental investigation of the thermophysical properties of Al203-nanofluid and its effect on a flat-plate solar collector. Int. Commun. Heat Mass Transf. 48 (2013) 99-107.
- Y. He, S. Wang, J. Ma, F. Tian, Y. Ren. Experimental study on the light-heat conversion characteristics of nanofluids. Nanoscience and Nanotechnology Letters 3 (2011) 494-496.
- Y. Li, H.Q. Xie, W. Yu, J. Li. Investigation on heat transfer performances of nanofluids in solar collector. Materials Science Forum 694 (2011) 33-36.
- Y. Tong, H. Cho, Comparative Study on the Thermal Performance of Evacuated Solar Collectors with U-Tubes and Heat Pipes. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration 23(3) (2015) 1550019.