creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000265962

2017년 2월
석사학위 논문

나노유체를 적용한 평판형과 U관형 태양열 집열기의 성능 비교에 대한 실험적 연구

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 형 민

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나노유체를 적용한 평판형과 U관형 태양열 집열기의 성능 비교에 대한 실험적 연구

Experimental study on the efficiency comparison between a flat plate and U-tube solar collector using nanofluids

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 형 민

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나노유체를 적용한 평판형과 U관형 태양열 집열기의 성능 비교에 대한 실험적 연구

지도교수 : 조 홍 현

이 논문을 공학석사 학위신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 형 민

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

김형민의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 오 동 욱 (인)

위 원 조선대학교 교 수 박 정 수 (인)

위 원 조선대학교 교 수 조 홍 현 (인)

2016년 11월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

Contents ····· i
Nomenclature ····· iv
List of figures ····· vi
List of tables ····· viii
Abstract ····· x

제 1 장 서 론 ····· 1

제1절 연구 배경 ····· 1
제2절 기존의 연구 ····· 4
제3절 연구 목적 ····· 8

제 2 장 태양열 시스템 및 집열기 구조 ····· 9

제1절 태양열 시스템 ····· 9
제2절 평판형 태양열 집열기 구조 ····· 11
제3절 U관형 태양열 집열기 구조 ····· 13

제 3 장 실험장치 및 방법 ····· 15

제1절 실험 장치 ····· 15

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. 온도측정 ····· 17
2. 일사량측정 ····· 18
3. 유량측정 ····· 19
4. 축열탱크 ····· 20
5. 데이터 수집장치 ····· 21
제2절 나노유체 제작 ····· 22
1. 나노유체 제조방법 ····· 22
2. Al_2O_3 나노유체 ····· 24
3. CuO 나노유체 ····· 25
제3절 실험방법 및 효율 계산 ····· 26
1. 실험방법 및 조건 ····· 26
2. 태양열 집열기의 효율 및 불확실성 계산 ····· 27

제 4 장 다양한 나노유체 적용 U관형 태양열 집열기 모델링 및 해석결과 ····· 29

제1절 U관형 태양열 집열기 및 나노유체 모델링 ····· 29
제2절 다양한 나노유체 적용 U관형 태양열 집열기의 성능 해석 결과 ····· 36

제 5 장 태양열 집열기의 성능 실험결과 및 고찰 42

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제1절 Al_2O_3 나노유체 적용 태양열 집열기 성능실험 결과 ····· 42

1. Al_2O_3 나노유체 농도에 따른 태양열 집열기 성능 고찰 48

2. Al_2O_3 나노입자 크기에 따른 태양열 집열기 성능 고찰 52

3. 작동유체의 질량 유량에 따른 태양열 집열기 성능 고찰 55

제2절 CuO 나노유체 적용 태양열 집열기 성능실험 결과 ····· 58

1. CuO 나노유체의 농도에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰 ····· 60

2. CuO 나노입자 크기에 따른 태양열 집열기 성능 고찰 ·· 64

3. 작동유체의 질량 유량에 따른 태양열 집열기 성능 고찰 67

제3절 Al_2O_3와 CuO 나노유체, 그리고 물을 적용한 태양열 집열기의 성능실험 결과 비교 ····· 71

제 6 장 결 론 ····· 74

References ····· 77

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Nomenclatures

A_c	: surface area of solar collector (m^2)
C	: conductance (W/K · m)
C_p	: specific heat (J/kg · K)
F_R	: heat removal factor (-)
G	: solar radiation (W/m^2)
h	: heat transfer coefficient (W/m^2K)
h_{fu}	: heat transfer coefficient between fluid and tube (W/m^2K)
h_{ga}	: convective heat transfer coefficient from outer glass tube to surrounding (W/m^2K)
h_{pgd}	: heat transfer coefficient through thermal conductivity between absorber tube and glass tube (W/m^2K)
h_{pgc}	: radiative heat transfer coefficient between absorber tube and glass tube (W/m^2K)
k	: conductivity (W/Km)
L	: length (m)
MWCNT	: multi-walled carbon nanotube
m	: mass flow rate (kg/s)
Q	: heat (W)
Q_u	: useful heat gain (W)
r	: radius (m)
T	: temperature (K)
t	: thickness (m)
U	: overall heat transfer coefficient (W/m^2K)
W	: circumferential distance between U-tubes (m)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Greeks

η	: efficiency (-)
ε	: emissivity (-)
μ	: viscosity (-)
$\tau\ \alpha$	: transmission absorbance coefficient (-)
ϕ	: nanoparticles volume concentration (-)
ρ	: density (-)

Subscripts

a	: ambient (-)
b	: fin base (-)
bf	: base fluid (-)
c	: absorber coating, copper fin (-)
e	: edge (-)
fu	: fluid (-)
g	: glass tube (-)
h	: header tube edge (-)
i	: inlet, inside (-)
l	: loss (-)
nf	: nano fluid (-)
np	: nano particle (-)
o	: outlet (-)
p	: pipe (-)
s	: synthetic (-)
t	: tube (-)
u	: useful (-)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

List of Figures

Fig. 2.1 Configuration of solar collector system ····· 9
Fig. 2.2 Construction the flat plate solar collector ····· 11
Fig. 2.3 Structure of the flat plate solar collector ····· 12
Fig. 2.4 Appearance of the U-tube solar collector ····· 13
Fig. 2.5 Specific structure of the U-tube solar collector ····· 14
Fig. 3.1 Photograph of experimental setup ····· 15
Fig. 3.2 Schematic diagram of the solar collector system ····· 16
Fig. 3.3 Photograph of T-type thermocouple ····· 17
Fig. 3.4 Photograph of pyranometer ····· 18
Fig. 3.5 Photograph of flow meter ····· 19
Fig. 3.6 Photograph of storage tank ····· 20
Fig. 3.7 Photograph of data acquisition system ····· 21
Fig. 3.8 Photograph of the ultrasonic homogenizer ····· 23
Fig. 3.9 SEM image of Al_2O_3 nanopowder ····· 24
Fig. 3.10 SEM image of CuO nanopowder ····· 25
Fig. 4.1 Cross section of U-tube ····· 31
Fig. 4.2 Energy analyses on the copper fin ····· 32
Fig. 4.3 Efficiency prediction of U-tube solar collector with solar radiation for various nanofluids ····· 37
Fig. 4.4 Efficiency prediction of U-tube solar collector in different nanofluid concentrations ····· 39
Fig. 4.5 Comparison of efficiency prediction of solar collector for different nanofluids under maximum concentration ····· 41
Fig. 5.1 Thermal conductivity ratio according to volume concentration for different temperature (Al_2O_3 nanoparticle size: 20 nm) ····· 43
Fig. 5.2 Thermal conductivity ratio as a function of temperature for different nanoparticle sizes (Al_2O_3 Concentration: 1.0vol%) ····· 45
Fig. 5.3 Variations of working fluids temperature and according to the time in the solar collector(Al_2O_3 nanoparticle size: 20 nm, Concentration: 0.5vol%) 47
Fig. 5.4 Variations of efficiency in the solar collector for different Al_2O_3 nanofluid concentrations (Al_2O_3 particle size: 20 nm, m= 0.047 kg/s) ····· 50

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 5.5 Variations of efficiency in the solar collector for different Al_2O_3 nanoparticle sizes (Concentration: 1.0vol%, m= 0.047 kg/s) ····· 53
Fig. 5.6 Variations of efficiency in the solar collector for different mass flow rates (Al_2O_3 particle size: 20 nm, Concentration: 1.0vol%) ····· 56
Fig. 5.7 Thermal conductivity ratio according to volume concentration for different temperature (CuO nanoparticle size: 40 nm) ····· 59
Fig. 5.8 Thermal conductivity ratio as a function of temperature for different nanoparticle sizes (CuO nanofluid concentration: 0.3vol%) ····· 59
Fig. 5.9 Variations of efficiency in the solar collector for different CuO nanofluid concentrations (CuO particle size: 40 nm, m= 0.047 kg/s) ····· 62
Fig. 5.10 Variations of efficiency in the solar collector for different CuO nanoparticle sizes (Concentration: 0.4vol%, m= 0.047 kg/s) ····· 65
Fig. 5.11 Variations of efficiency in the solar collector for different mass flow rates (CuO particle size: 40 nm, Concentraion: 0.4vol%) ····· 69
Fig. 5.12 Comparison of efficiency in the solar collector using Al_2O_3 and CuO nanofluid and water ····· 72

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

List of Tables

Table 1.1 Representative previous studies of nanofluid in solar collectors ····· 7
Table 2.1 Type of the solar collector according using temperature ····· 10
Table 3.1 Specification of thermocouple ····· 17
Table 3.2 Specification of pyranometer ····· 18
Table 3.3 Specification of flow meter ····· 19
Table 3.4 Specification of storage tank ····· 20
Table 3.5 Specification of data acquisition system ····· 21
Table 3.6 Specification of the ultrasonic homogenizer ····· 23
Table 3.7 Specification of Al_2O_3 nanoparticle ····· 24
Table 3.8 Specification of CuO nanoparticle ····· 25
Table 3.9 Experimental conditions ····· 26
Table 4.1 Specifications of U-tube solar collector for simulation ····· 30
Table 4.2 Thermophysical properties of the nanoparticle and base fluid ····· 35
Table 5.1 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector using Al_2O_3 nanofluid and water ····· 51
Table 5.2 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector using Al_2O_3 nanofluid and water ····· 51
Table 5.3 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector according to nanoparticle sizes ····· 54
Table 5.4 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to nanoparticle sizes ····· 54
Table 5.5 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for different mass flow rates(Al_2O_3 particle size: 20 nm, Concentration: 1.0vol%) ····· 57
Table 5.6 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for different mass flow rates(Al_2O_3 particle size: 20 nm, Concentration: 1.0vol%) ····· 57
Table 5.7 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector using CuO nanofluid and water ····· 63
Table 5.8 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector using CuO nanofluid and water ····· 63
Table 5.9 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector according to nanoparticle sizes (CuO nanofluid) ····· 66

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 5.10 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to nanoparticle sizes (CuO nanofluid) ····· 66
Table 5.11 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for different mass flow rates(CuO particle size: 40 nm, Concentration: 0.4vol%) ····· 70
Table 5.12 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for different mass flow rates(CuO particle size: 40 nm, Concentration: 0.4vol%) ····· 70
Table 5.13 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector according to working fluid ····· 73
Table 5.14 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to working fluid ····· 73

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Experimental study on the efficiency comparison between a flat plate and U-tube solar collector using nanofluids

Hyeong-min Kim
Advisor : Prof. Cho, Hong-hyun
Department of Mechanical Engineering,
Chosun University

In this study, the efficiency of a flat plate and U-tube solar collector as a function of the concentration of Al_2O_3 and CuO nanofluid and the size of nanoparticles was investigated experimentally. Moreover, the efficiency improvement of a flat plate and U-tube solar collector with Al_2O_3 and CuO nanofluid as the working fluid was compared to that with water.

The thermal conductivity of the Al_2O_3 and CuO nanofluid was found to increases with increase in its concentration and decreases with the nanoparticle size. But it's increasing rate decreased. As an experimental result, when the inlet fluid and ambient environment were the same temperature, the flat plate and U-tube solar collector with 1.0vol% Al_2O_3 nanofluid, 20 nm-nanoparticles and a mass flow rate of 0.047 kg/s showed the highest efficiency, which was 17.6% and 17.9% higher than that of the solar collector with water. In addition, the

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

efficiency of the flat plate solar collector with 1.0vol% Al_2O_3 nanofluid was 3.54% and 5.53% higher than those with 1.5vol% and 0.5vol% nanofluid, respectively. For the use of CuO nanofluid, the flat plate and U-tube solar collector with 0.4vol% CuO nanofluid, 40 nm-nanoparticles and a mass flow rate of 0.047 kg/s showed the highest efficiency, which was 7.29% and 7.27% higher than that of the solar collector with water.

As the experimental result, the $F_R U_L$ value of the flat plate collector was relatively larger than that of the U tube type solar collector. It is predictable that U-tube solar collectors will have higher performance at high temperatures and wide operating temperature range. However, the maximum efficiency of flat plate solar collector was higher than that of U-tube solar collector.

The synthesize results of this study are to increase solar radiation absorption and increase the efficiency of solar collectors, the nanofluid must be uniformly dispersed in the base fluid. Besides, in order to improve the performance of the solar collector, the optimal nanofluid concentration according to nanofluid should be considered appropriately. One more thing, the size of the nanoparticles has a significant effect on the performance improvement of the solar collector and the smaller nanoparticles increased the more active the Brownian motion and the higher the effective thermal conductivity. In conclusion, the concentration of nanofluid and nanoparticle size are important factors to improve the performance of the solar collector. When nanofluids are used as working fluid in the solar collector. In addition, nanofluids can make better the efficiency in the solar collector more than water because of their superior ability to absorb solar energy and heat transfer. Therefore, Al_2O_3 and CuO nanofluid are effective to the increasing of the efficiency in the solar collector.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

산업혁명(1970년대) 이후 인구가 증가하고 산업이 발달하면서 에너지 소비는 급격하게 증가하여 에너지 부족에 대한 위협은 과학자들로 하여금 새로운 대체에너지를 찾게 하였다. 또한 지난 10년간, 화석 연료의 가격이 급등하였으며 화석 연료 사용의 증가는 대기오염 및 온실가스 배출을 가속화하여 지구온난화 현상의 주된 원인이 되고 있고 화석 연료 사용량이 많은 국가에게 패널티를 주는 등 화석 연료의 사용 감축 운동이 활발해지고 있다. 따라서 화석 연료의 고갈과 지구온난화와 같은 환경적인 문제를 해결하기 위하여 자연 친화적인 신재생에너지에 관한 연구가 많이 수행되고 있다. 신재생에너지의 종류로는 태양, 풍력, 지열, 조류, 바이오에너지 등이 있으며, 그 중 무공해 에너지인 태양에너지는 21세기 가장 유용한 에너지원중의 하나로 대두되고 있다.

태양 에너지는 태양으로부터 방사되어 지구상에 도달하는 열과 빛 형태의 복사에너지를 의미한다. 태양 에너지는 무한하며 온실가스 배출이 없는 무공해 에너지 자원이며 환경에 미치는 영향이 낮은 신재생에너지이다. 태양 에너지는 발전, 건물 냉·난방, 온수 급탕 등 다양한 분야에서 활용 가능하다. 태양 에너지는 기존의 화석 연료와 달리, 지구에 있는 모든 장소에서 일반적으로 사용할 수 있다. 태양으로부터 지구에 도달하는 태양 에너지 양은 연간 1.304×10^{21} Kcal 이며, 1년 동안 지구에서 받는 에너지양은 연간 세계에너지 소비량의 약 20,000배에 해당된다(2013). 이용 가능한 태양 에너지의 양이 무한함에도 불구하고 현재 전 세계의 에너지 사용의 약 80% 이상을 여전히 석탄, 석유, 천연 가스 등 화석 연료를 사용하고 있으며, 반면에 태양 에너지의 활용은 0.02%이 미치고 있다. 많은 연구자들은 태양 에너지를 유효하게 잘 활용만 할 수 있다면 화석 연료의 의존도를 줄일 수 있으며 자연 환경에 영향을 최소화 하고 고갈될 염려가 없는 에너지를 사용할 수 있다고 보고 있다.

태양열 기술은 태양으로부터 오는 에너지를 물과 공기 같은 작동유체를 사용하여 열로 전환하여 사용하거나 저장한다. 태양열 집열기는 태양으로부터 오는 에너

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

지를 열로 변환시켜주는 장치를 말한다. 태양열을 이용하는 시스템은 설비형(Active Solar System)과 자연형 태양열 시스템(Passive Solar System)으로 분류된다. 자연형 태양열 시스템은 태양열에 의해 집열기에서 얻어지는 열을 펌프나 팬(Fan)과 같은 구동장치를 사용하지 않고 직접 이용하는 시스템을 의미하며, 열전달이 자연대류에 의하므로 열적 성능이 낮다는 단점이 있으나, 경제성이 우수하고 고장이 적으며 관리가 쉽다는 장점이 있다. 설비형 태양열 시스템은 열에너지로 변환된 열매체를 구동 장치에 의해서 이용부로 이동되는 시스템을 의미하며, 집열효율이 높도록 별도의 제어가 가능하여 자연형 태양열 시스템보다 효율이 높다. 그러나 추가적인 순환펌프와 제어장치 등이 필요하고 추가적인 구동장치의 사용에 따라 고장 가능성이 증가한다는 단점을 가지고 있다. 설비형 태양열 시스템은 통상적으로 태양열을 집열하는 집열부, 집열된 열을 저장하는 축열부, 태양 일사량이 없거나 부족할 경우 열을 공급해주는 보조열원장치, 이용부와 이를 전체적으로 제어하는 제어장치로 구성된다.

태양열 집열기는 집열온도에 따라 저온용, 중온용 및 고온용으로 분리되며, 집열온도는 집열기의 열손실 정도와 집광장치의 유무에 따라 결정된다. 저온용 태양열 집열기는 태양광선을 고밀도로 집광하는 집광장치 없이 집열을 하는 집열기이며 여기에는 평판형 집열기, 히트파이프형(Heat pipe type), U관형(U-tube type)과 같은 진공관형 집열기가 대표적이며 주택 및 건물의 온수급탕 및 난방용으로 주로 활용되고 있다. 진공관형 집열기는 평판형 집열기는 보다 대류 열손실율이 작도록 진공 유리관으로 제작되어 높은 온도를 집열하는데 효과적이다. 중온 및 고온용 태양열 집열기는 태양광선을 고밀도로 집광하는 집광장치를 이용해 집열하는 집열기로, PTC(Parabolic Trough Concentrator)형 집열기와 접시(Dish)형 집열기와 같은 집열기들의 대표적이며 태양열 발전 및 산업 공정열 등 산업 분야에 널리 보급되어 활용되고 있다.

태양 에너지는 무한한 에너지를 이용할 수 있다는 장점이 있으나 날씨에 따라 큰 영향을 받고 에너지 밀도가 매우 낮아 태양 에너지를 모아 열로 변환시켜주는 태양열 집열기의 역할이 매우 중요하다. 일반적인 태양열 시스템의 열매체로 물을 사용하고 있다. 하지만 물을 기반으로 하는 태양열 시스템은 다양한 작동 조건에서 얻을 수 있는 최대 효율은 제한이 되어 있다. 따라서 태양열 활용의 최대 문제

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

점은 태양열 집열기의 효율을 얼마나 향상시킬 수 있는지가 최대 변수이다. 태양열 집열기의 효율을 개선시키기 위하여 태양열 집열기의 구조를 더 많은 에너지가 모일 수 있도록 최적화 설계를 하거나 새로운 유형의 열매체를 개발하는 등 다양한 연구들이 수행되고 있다.

최근 나노 기술의 발전과 함께 혁신적인 열전달 유체인 나노유체가 개발되었다. 나노유체란 1-100 nm 크기를 가지는 금속 또는 비금속을 물, 오일 등과 같은 일반적인 유체에 분산시킨 유체이다. 나노유체는 Choi(1995)에 의하여 처음으로 제안되었으며, 초기에는 나노유체의 열전도도는 열전도도가 모유체 보다 급격히 향상됨을 보고하였다. 이후 많은 연구자들이 다양한 분야에서 나노유체에 대한 연구를 진행하고 있다. 태양열 시스템에도 열물성이 우수한 나노유체를 적용하는 연구를 진행하고 있으나 대부분 평판형 집열기에 대한 연구가 대부분이다. 따라서 다양한 태양열 집열기에 나노유체를 적용하여 성능 특성을 비교하고 효율을 향상시키는 방안을 모색하는 연구가 필요하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 기존의 연구

태양열 집열기의 효율 향상을 위해 나노유체를 적용한 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 특히 평판형 집열기에 나노유체를 적용한 연구가 많이 진행되었는데 이와 관련된 연구로 Yousefi et al.(2012)은 0.2wt%와 0.4wt%을 가진 Al_2O_3 나노유체를 적용하여 평판형 태양열 집열기의 효율은 실험을 통해 분석하였다. 그 결과 0.2wt%에서 높은 열효율을 보였으며 약 28.3% 향상됨을 보였다. 그들은 또한 나노유체에 계면활성제를 더하면 효율을 상당히 증가함을 보였다. 이어지는 연구에서 Yousefi et al.(2012)은 0.2wt%와 0.4wt%을 가진 MWCNT(Multi Wall Carbon Nano Tube) 나노유체를 적용하여 평판형 태양열 집열기의 효율은 실험을 통해 분석하였는데 0.4wt%는 0.2wt%보다 더 높은 효율을 보이는 것으로 보고하였다.

Prasher et al.(2009)은 직접 흡수형 태양열 집열기(DAC, Direct Absorption Solar Collector)와 평판형 집열기의 효율은 이론적으로 비교 분석하였는데 작동유체로 Al-H_2O 나노유체를 사용했다. 그들은 나노유체의 일사량 흡수는 순수한 물보다 9배 이상 많고 나노유체를 작동유체로 사용한 DAC는 평판형 집열기보다 효율이 약 10%까지 증가할 수 있다고 보고하였다.

Colangelo et al.(2013)은 Al_2O_3 나노유체의 침전을 최소화함으로써 평판형 집열기의 열전달계수를 25%까지 향상을 보였으며 Chaji et al.(2013)은 평판형 태양열 집열기의 성능을 TiO_2-water 나노유체를 작동유체로 사용하여 실험적 연구를 통하여 0.3wt% TiO_2 나노입자를 추가가 효율을 증가시킨다는 것을 확인하였다. Tiwari et al.(2013)은 서로 다른 나노유체를 사용하여 난방을 위한 평판형 태양열 집열기의 열적 성능에 대한 연구를 진행하였는데 평판형 집열기에 Al_2O_3 나노유체의 1.5vol%을 사용한 결과 열효율이 증가할 뿐만 아니라 물을 작동유체로 한 태양열 집열기 하이브리드 시스템과 비교하여 약 31.64%의 CO_2 발생량(CO_2 kg/kWh)도 절감된다고 보고하였다.

또한 다른 형태의 태양열 집열기에 나노유체를 적용한 연구로 Taylor et al.(2012)은 Therminol VP-1를 기본유체로 알루미늄 나노입자를 사용하여 집광 접시형(parabolic) 태양열 집열기의 효율을 조사하였고 그 결과 10% 더 높은 효율을 얻었으며, Otanicar et al.(2010)은 실험으로 마이크로 태양열 집열기의 효율에 나노

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

유체의 영향에 대한 연구를 진행하였는데 흡수 매체로 나노유체를 사용하여 태양열 집열기의 효율이 5%까지 향상됨을 보고하였다. 삼각형 모양의 태양열 집열기에 Cu-water, Al_2O_3-water 그리고 TiO_2-water 나노유체의 자연 대류 현상을 Rahman et al.(2014)에 의해 평가되었는데 물 대신 체적 농도가 10%인 Cu-water 나노유체를 사용함으로써 열전달율을 24%까지 증가한다고 주장하였다. Si et al.(2009)은 복사 특성과 SiO_2, TiO_2, 그리고 ZrC 나노유체를 사용한 직접 흡수형 태양열 집열기(DAC, Direct Absorption Solar Collector)의 열적 성능을 연구하였으며 ZrC 나노유체가 다른 두 나노유체보다 태양 흡광도가 더 우수함을 보였다. Saidur et al.(2012)은 Direct solar collector에 Al_2O_3 나노입자의 크기가 1.0/5.0/10/20 nm 인 2vol% Al_2O_3-Water 나노유체의 효과를 수치적으로 분석하였으며, 흡광 계수는 체적 분율에 선형적으로 비례하고 나노유체의 광학적 특성에 대한 입자 크기의 효과는 미미함을 보였다.

작동유체에 나노입자를 첨가시킨 나노유체의 열적 물성치와 열전달에 대한 특성연구는 시스템의 성능에 직접 영향을 줌으로 매우 중요하다. 이에 대한 선행연구로 Zamzamian et al.(2011)은 난류에서 이중관 및 판형 열교환기의 Al_2O_3-EG (Ethylene Glycol)와 CuO-EG 나노유체의 대류 열전달계수를 조사하여 나노유체의 대류 열전달계수가 온도와 농도 증가와 함께 증가함을 보고하였다. Natarajan and Sathish(2009)은 CNT(Carbon nano tube)를 사용한 기본유체의 열전도율 향상을 조사하였고 열수송 매체로 CNT 나노유체를 사용하여 태양열 온수기의 효율 향상을 제안했다. Keshavarz and Razvarz(2012)은 다른 작동조건에서 히트 파이프의 효율 향상을 위해 Al_2O_3 나노유체의 영향에 대한 연구를 통하여 순수한 물을 작동유체로 사용한 집열기의 효율보다 나노유체를 사용한 집열기의 효율이 더 높음을 보였다. Said et al.(2013)은 Al_2O_3 나노유체의 열적 물성치를 조사하였으며 Ethylene Glycol-Water 혼합물에 나노입자를 섞은 유체보다 물에 나노입자를 섞는 유체가 더 침전 및 응집이 발생하지 않음을 보고하고 두 가지 유체에 대한 열전도율 측정은 농도가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 보였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

열적성능이 우수한 진공관형 U관형 형태의 태양열 집열기에 성능에 관한 기존의 연구들은 매우 제한적인데 He et al.(2011)은 진공관형 태양열 집열기를 사용하여 실험적으로 연구하였으며 TiO_2-Water보다 CNT-Water 나노유체가 더 적합하다고 주장하였다. Li et al.(2011)은 Tubular 태양열 집열기에 Al_2O_3-Water, ZnO-Water, MgO-Water을 작동유체로 사용하여 실험적으로 분석하였으며, 그 결과 0.2vol% ZnO-Water 나노유체가 가장 우수함을 보였다. 또한 Cho et al.(2015)은 이중관식 진공관형 집열기 중에 가장 널리 쓰이는 히트파이프 형태와 U관 형태의 집열기의 성능을 운전조건에 따라 해석적으로 비교하였으며 U관형 태양열 집열기에 작동유체로 0.24vol% MWCNT(Multi-walled carbon nanotube)-water 나노유체를 적용한 경우 U관형과 작동유체 사이의 열전달계수가 기존에 물을 작동유체로 사용하였을 때보다 약 8% 향상됨을 보였다.

태양열 집열기에 나노유체를 사용하였을 때 물성치의 변화 및 성능향상에 대한 기존의 이론과 실험적 연구를 Table 1.1에 요약하였다. 대부분의 연구는 0.2-4vol% 나노유체 농도에서 분산 안정성을 고려하여 실험 및 해석적 연구를 수행하였고 이 때 집열기의 효율이 약 8-55% 향상된 결과를 제시하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 1.1 Representative previous studies of nanofluid in solar collectors

Reference	Type of solar collector	Nanofluid	Concentration	Efficiency Enhancement (%)	Thermal conductivity enhancement (%)	*Note
Yousefi *et al.*	Flat-plate	Al_2O_3-water MWCNT-water	0.2 and 0.4wt%	28.3		E
Tyagi *et al.*	Non-Concentration Direct Absorption	Al_2O_3-water CuO-water	1.8-5.0vol%	8		N
Faizal *et al.*	Flat-plate	Al_2O_3-water TiO_2-water SiO_2-water	3vol%	38.5 28.8		N
Faizal *et al.*	Flat-plate	MWCNT-water	0.2 and 0.4wt%	55.6		E
Indhuja *et al.*		MWCNT-water	0.14-0.24vol%			E
Das *et al.*		Al_2O_3-water CuO-water	1.0-4.0vol%		2-24 7-36	E
Masuda *et al.*	Circular tube	Al_2O_3-water TiO_2-water	0-4.0vol%		30 10	E

*Note: "E" is refer to experimental study, "N" is refer to numerically study

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 연구 목적

현재 전세계적으로 많은 연구자들이 태양열 집열기의 효율 향상을 위하여 나노유체를 적용하여 다양한 방법으로 연구를 진행하고 있다. 하지만 대부분 평판형 태양열 집열기에 대한 연구에 중점이 맞춰져 있으며 나노유체를 적용한 U관형 태양열 집열기 성능에 대한 설험적 연구는 미흡한 실정이다. 또한 다양한 작동 조건에서 나노유체의 입자 크기와 농도가 U관형 태양열 집열기의 효율에 미치는 다양한 상관관계에 대한 연구도 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 태양열 시스템의 전반적인 구성 및 작동원리와 평판형 태양열 집열기와 U관형 태양열 집열기의 구조에 대하여 설명하였다. 실험에 앞서 U관형 태양열 집열기를 모델링하여 다양한 나노유체를 적용하였을 때의 성능을 비교하였다. 또한 동일한 작동 조건에서 Al_2O_3와 CuO의 농도와 입자의 크기, 그리고 작동유체의 유량에 따른 평판형 집열기, U관형 집열기의 성능에 미치는 영향을 실험하였다. 다양한 작동조건에서 평판형 집열기와 U관형 집열기에 Al_2O_3 나노유체, CuO 나노유체와 기본유체인 물을 각각 작동유체로 사용하여 태양열 집열기의 성능 평가를 하였다. 또한 각각의 성능 향상 정도를 운전 조건별로 비교분석하였다. 본 연구를 통해 각각 다른 형태의 태양열 집열기의 최적의 운전 조건을 찾아 고효율 태양열 집열기 설계에 필요한 데이터를 제공하고 다양한 운전조건에서의 성능 특성을 비교고찰하여 각각의 특성에 대한 데이터를 제동하고자 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2장 태양열 시스템 및 집열기 구조

제 1 절 태양열 시스템

태양열 시스템은 Fig. 2.1와 같이 집열부, 축열부, 이용부, 제어부로 나눌 수 있다. 집열부는 태양 에너지를 열로 변환시켜 집열이 이루어지는 부분으로 집열기에 의해서 이루어진다. 집열온도는 집열기의 열손실의 크기와 집광장치의 유무에 따라 결정된다. 축열부는 태양의 일사량과 기후조건에 따라 획득할 수 있는 열에너지가 변화하는 태양열 시스템에서는 열에너지의 수요와 공급 사이에서 발생하는 시간적, 양적 그리고 질적 차이를 극복하기 위한 역할을 수행한다. 즉, 태양열 시스템에서는 변화하는 열에너지를 집열하여 축열부에 저장하였다가 유용한 열에너지를 균일하게 이용부로 전달되는데, 이 역할을 축열부가 담당하고 있는 것이다(2010). 이용부는 태양열 축열조에 저장된 열을 효과적으로 공급하고 열이 부족할 경우 보조열원에 의해 공급하는 역할을 수행한다. 또한 열을 효과적으로 집열 및 축열하고 공급하기 위해서 태양열 시스템의 성능 및 신뢰성 등에 중요한 역할을 하는 제어장치와 순환펌프, 열교환기 등이 있다.

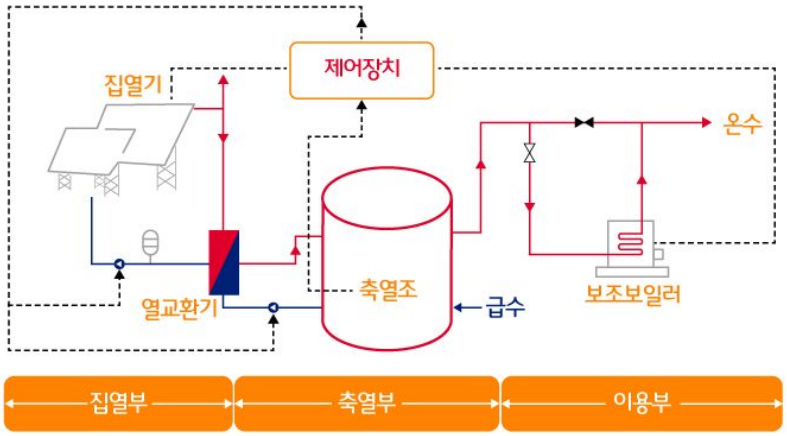


Fig. 2.1 Configuration of solar collector system

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 2.1 Type of the solar collector according using temperature

Specify	Low-temperature	Middle-temperature	High-temperature
Using temperature	Below 60°C	Below 100°C	Below 300°C
Solar collector	Flat plate solar collector	Evacuated tube solar collector	PTC or CPC type solar collector

태양열 집열기의 종류는 이용 목적에 따라서 저온용, 중온용 및 고온용으로 분리되며, 각각에 대해서 Table 2.1에 나타낼 수 있다. 100°C 이하 저온용 태양열 집열기는 급탕 및 난방에 이용되며, 이러한 태양열 집열기의 종류에는 평판형, 진공관형 태양열 집열기가 있다. 300°C 이하 중온용 태양열 집열기는 흡수식 냉동기를 활용한 냉방과 산업공정열에 사용되며 PTC(Parabolic Trough Concentrator)와 CPC (Compound Parabolic Concentrator) 태양열 집열기가 있다. 300°C 이상 고온용은 열발전이나 우주용으로 활용이 가능하며 반사면이 접시형상을 갖는 접시형과 반사판이 중앙에 있는 타워(Tower)에 집광하여 유체를 고압고온으로 올려 증기압력으로 터빈을 구동하여 발전하는 타워(Tower)형 태양열 집열기가 사용되고 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 평판형 태양열 집열기 구조

급탕과 난방을 위한 저온형 태양열 시스템에서 주로 사용되는 평판형 태양열 집열기는 분산 및 직달, 산란 일사 모두를 집열할 수 있으며 태양 추적 장치를 사용하지 않는다. 평판형 집열기는 전체에 흡수판이 존재하여 외부로의 열손실이 증가해 100°C 이상의 열원을 얻기 어렵다는 단점이 존재한다.

평판형 태양열 집열기는 구조가 간단하며 가격이 저렴하고 유지 및 보수가 편리하기 때문에 가장 많이 사용하는 집열기이다. Fig. 2.2와 Fig. 2.3과 같이 평판형 태양열 집열기는 평판 형태로 되어 있으며, 구성품으로는 투명 덮개, 흡수판, 열전달매체 도관, 단열재 및 집열기 틀로 이루어진다. 상단부는 태양일사광선을 투과시키고 열손실을 방지할 수 있는 투과체(transparent cover)로 구성되어 있으며, 하단부에는 투과된 일사광선을 흡수하여 열에너지로 변환시켜주는 흡수판(absorber plate)이 있고, 마지막으로 하단부에는 단열재에 의해 단열되어 있다. 현재 상용화된 평판형 태양열 집열기에서 투과체로 일반적으로 3 mm 두께의 강화유리 또는 저철분 강화유리기 사용하고 있으며, 흡수판 재료로는 열전도도가 우수한 구리와 알루미늄 등이 사용되고 있다.

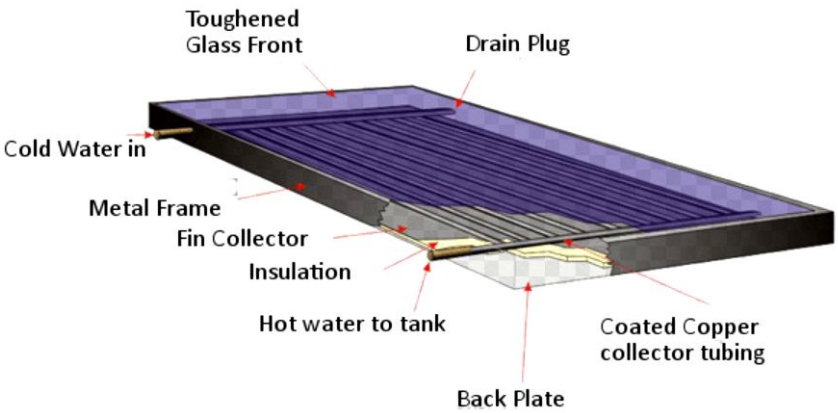


Fig 2.2 Construction the flat plate solar collector

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

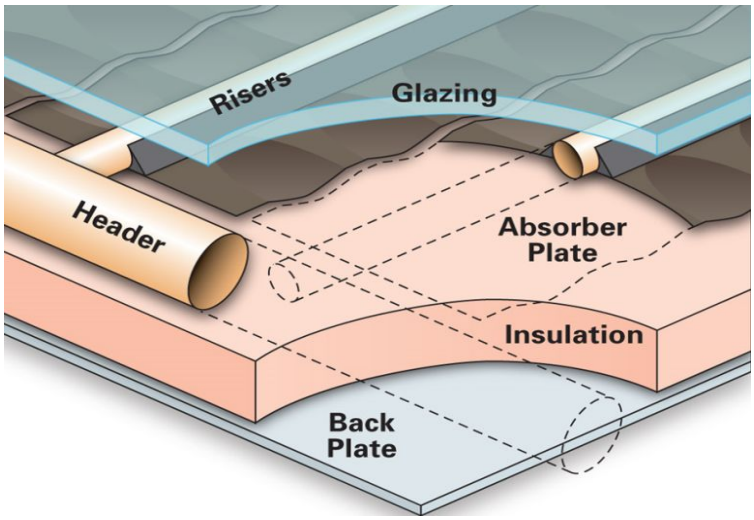


Fig 2.3 Structure of the flat plate solar collector

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 U관형 태양열 집열기 구조

진공관형 집열기는 Fig. 2.4와 같은 구조로 구성되어 있으며 평판형 집열기와 집열하는 방식은 유사하나 흡수판이 진공유리관 내부에 위치하여 대류에 의한 열손실을 최소화한 집열기이다. 현재 상용화된 진공관식 집열기는 진공 유리관이 2중으로 되어있고 종류로는 단일 진공관식과 이중 진공관식 집열기 2가지 종류가 있다. 평판형 집열기에 비해 집열기에서 외부로의 열손실이 적고 고온에서 집열 효율이 높아 급탕, 난방 및 흡수식 냉방 등에도 적용할 수 있다.

Fig. 2.5은 U관형 태양열 집열기의 구조를 나타낸 것이다. 진공관은 내・외부유리관, 흡수판, 진공층, 흡수 코팅층 등으로 구성된다. Fig. 2.5은 U관형 태양열 집열기의 세부구조를 나타내었다. 내부유리관의 표면에는 선택 흡열 코팅으로 처리되어 있어 보다 더 많은 태양 에너지를 열에너지로 변환시키는 역할을 한다. 작동유체가 관을 통하여 이동하면서 열전달 발생하여 온도가 상승하는 구조이다. 또한 외부 유리관과 내부 유리관 사이에는 진공으로 처리하여 외부와 열손실을 최소화하였으며 겨울철에도 우수한 집열 효율을 보인다.

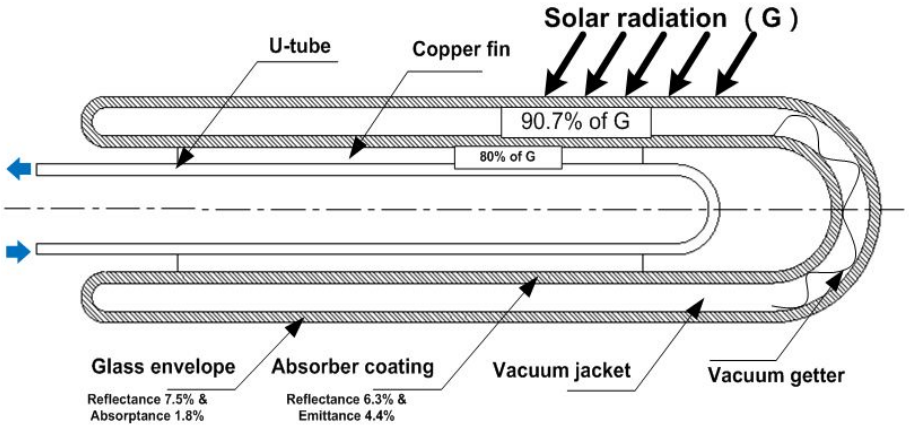


Fig. 2.4 Appearance of the U-tube solar collector

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

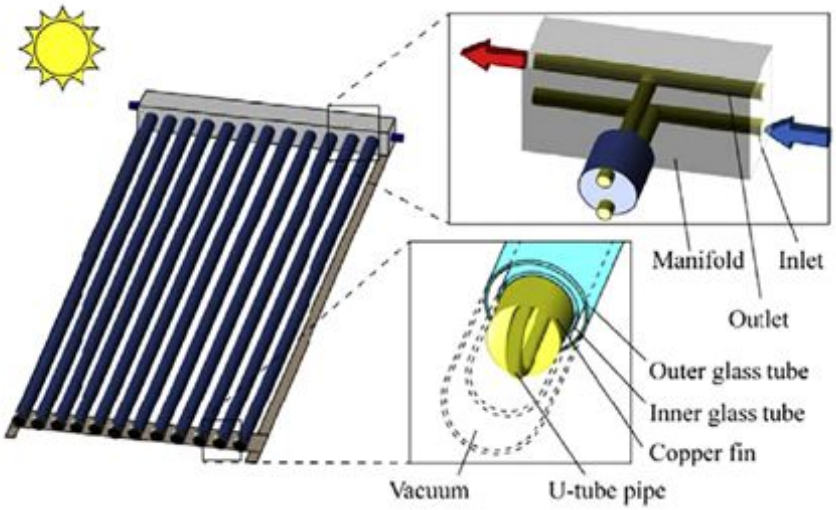


Fig. 2.5 Specific structure of the U-tube solar collector

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3장 실험장치 및 방법

제 1 절 실험 장치

Fig. 3.1은 본 연구에서 제작된 실험장치 사진을 나타내었다. 동일한 운전조건에서 물과 Al_2O_3, CuO 나노유체를 적용한 집열기의 성능을 비교하기 위해 동일한 크기와 형태의 평판형과 U관형 집열기를 사용하였다. Fig. 3.2는 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 본 실험장치는 광주광역시 조선대학교(위도 35°, 경도 126°)에 위치해 있으며, 모든 태양열 집열기는 남향 45° 각도로 설치되어 있다. 순환펌프를 통하여 작동유체는 유량계에서 유량을 측정한 후 집열기로 들어간다. 나노유체와 물을 적용한 태양열 시스템은 집열기에서 나온 작동유체가 내부열교환기가 장착된 용량이 100 l인 축열탱크로 들어가 냉각수와 열교환을 하여 열 부하를 전달하고 순환하는 형태를 가진다. 태양열 집열기의 입구와 출구의 온도와 외기온도를 측정하기 위해서 주요 부위에 T-type 열전대를 사용하여 측정하였으며 이 열전대의 작동범위는 -200℃～300℃이다. T-type 열전대는 물의 어는점과 끓는점에서 정밀온도계를 사용하여 보정하였으며, T-type 열전대의 오차범위는 ±0.2℃이다.

Fig. 3.1 Photograph of experimental setup

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

또한 태양의 일사량은 일사량계(Solar radiation sensor, QMS101)을 사용하여 측정하였으며 일사량계의 측정범위는 0-2000 W/m^{2}이며, 오차범위는 약 1.95%다. 태양열 집열기의 효율을 계산하여 분석하기 위해 설치한 열전대, 유량계, 일사량계에 대한 정보를 수집하기 위해 데이터 수집 장치인 데이터 로거(Data logger, Yokogawa MX100)를 사용하였다. 또한, 실험전에 모든 집열기와 관을 세척하기 위해 고압의 물과 아세톤을 사용하여 반복하여 깨끗이 세척해주었으며 추가적으로 실험을 실시하였다.

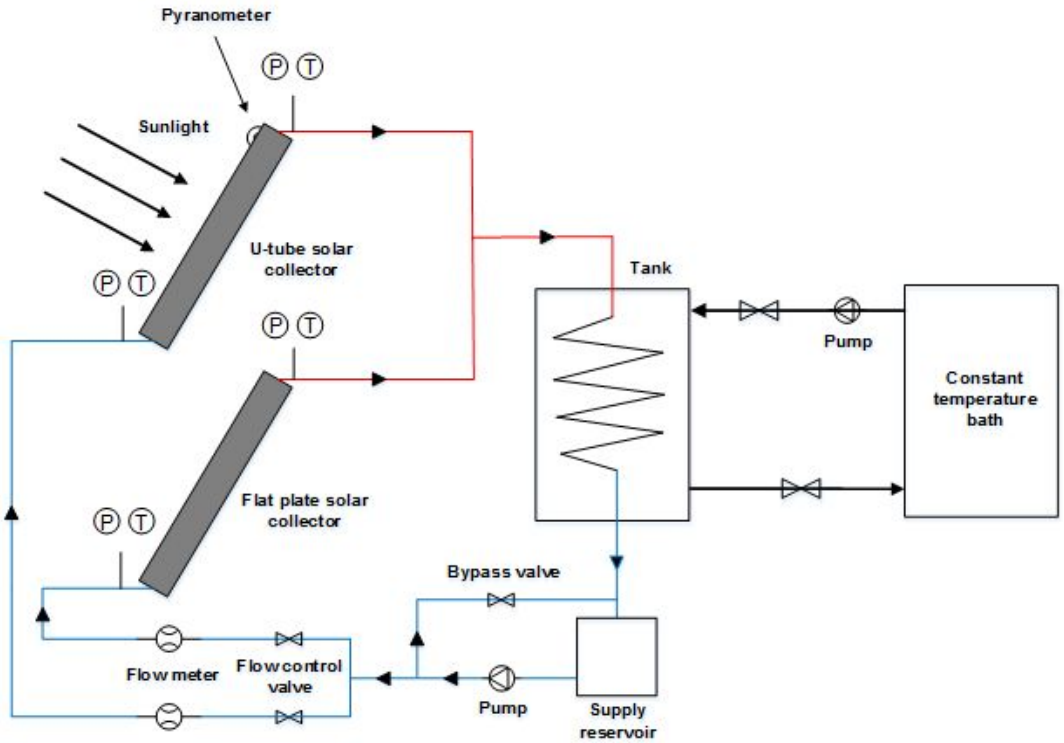


Fig. 3.2 Schematic diagram of the solar collector system

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. 온도측정

태양열 시스템의 주요 부위의 온도를 측정하기 위해 T-type 열전대를 각각의 집열기 주요 부분에 설치하였다. 또한 외기온도를 측정하기 위하여 외부에 추가로 열전대를 설치하였다. 열전대는 기전력의 크기로 인하여 온도차를 알 수 있어 기준점의 온도와 비교하여 온도를 측정한다. T-type 열전대의 온도범위는 -200℃～300℃이며 기전력의 직진성이 양호하고 또한 내열, 내식성이 높은 장점이 있다. 그리고 열전대를 태양열 시스템에 장착하기 전에 오차를 ±0.2℃ 범위 안에 보정하였다. Fig. 3.3과 Table 3.1은 T-type 열전대의 실제사진과 상세제원을 보여준다.

Fig. 3.3 Photograph of T-type thermocouple

Table 3.1 Specification of T-type thermocouple

Item	Specification
Type	T-type
Range	-200℃ ～ 300℃
Ansi standard limits of error	0.75%
Ansi special limits of error	0.40%

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 일사량 측정

태양의 복사를 일사라 하며, 일사의 세기를 일사량이라 한다. 태양의 일사량은 일사량계(Solar radiation sensor, QMS101)을 사용하여 측정하였으며 일사량계의 측정범위는 0-2000 W/m^{2}이며, 기기의 오차는 약 1.95% 이다. Fig. 3.4와 Table 3.2는 태양열 집열기 시스템에 사용된 일사량계의 실제사진과 상세제원을 보여준다..

Fig. 3.4 Photograph of pyranometer

Table 3.2 Specification of pyranometer

Item	Specification
Type	Silicon pyranomete
Sensitivity	76
Range	0~2000 W/m^2
Accuracy	1.95%

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 유량측정

태양열 집열기의 성능특성을 파악하고 효율을 계산하기 위해서 태양열 시스템의 순환하는 작동유체의 유량을 측정해야 한다. 사이클 내에 흐르는 작동유체의 유량 측정을 위하여 정밀 체적유량 측정 장치인 체적유량계(E-MAG-I)를 사용하였다. 체적유량계는 평판형과 U관형 태양열 집열기 입구에 설치하였다. 본 연구에서 사용된 체적유량계의 실제사진은 Fig. 3.5와 같으며, 체적유량계의 상세사양은 Table 3.3에 나타내었다.

Fig. 3.5 Photograph of flow meter

Table 3.3 Specification of flow meter

Item	Specification
Model	E-MAG-I
Size	1CA
Ser No.	191525
Output	4-20 mADC
Max Flow	1.4 m^3/hr
Power	100-240 VAC

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 축열탱크

본 연구에서 사용된 축열탱크는 본 실험의 용량에 최적화 되도록 주문제작 하였다. 축열탱크 내부에는 열교환기가 설치되어 있어 작동유체의 열부하를 냉각수에 전달하여 다시 집열기의 입구로 들어간다. 축열탱크의 용량은 100 l 이고, 이와 관련된 실제사진은 Fig. 3.6에 나타냈었다. 그리고 제작된 축열탱크의 상세 사양은 Table 3.4에 제시하였다.

Fig. 3.6 Photograph of storage tank

Table. 3.4 Specification of storage tank

Item	Specification
Model	SUN100
Storage of heat	100 l
Size(ϕ ×H)	570×1,300 mm
Hot water coil length	7 m
Pipe diameter	15 A

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5. 데이터 수집장치

태양열 시스템의 성능실험을 위해 시스템을 설치하고 주요 위치에 설치된 센서에서 얻은 정보를 수집하기 위해 데이터 수집 장치를 사용하였다. 데이터 수집 장치는 Yokogawa 사의 MX 100를 사용하였다. 데이터 수집 장치에서 수집한 데이터는 PC로 전송되며, 수집된 데이터는 Yokogawa사에서 제공된 MX100 standard 프로그램을 통해 모니터링을 할 수 있으며, 실험 종료 후 수집된 데이터를 Excel 파일로 저장하여 제공해준다. Fig. 3.7과 Table 3.5는 데이터 수집 장치의 실물과 상세 사양을 보여준다.

Fig. 3.7 Photograph of data acquisition system

Table. 3.5 Specification of data acquisition system

Item		Specification
Model		MX 100 (Yokogawa Inc.)
Measurement interval		100 ms (shortest)
Supplying Voltage		100～220 VAC
Accurancy	Thermocouple	±0.05% of rdg.
	DC voltage	±0.05% of rdg.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 나노유체 제작

1. 나노유체 제조방법

나노유체 제조 방법에는 크게 One-step과 Two-step 방법 두 가지가 있다. 먼저 One-step 방법의 경우에는 기본유체에 나노입자의 생성과 분산을 동시에 진행하며 이러한 방법은 나노입자들 사이에 작용하는 반 데르 발스의 힘을 극복하기 위해 개발되었다(2011). 또 다른 생산 방식은 Two-step 방법으로 나노 분말 파우더를 먼저 생산 한 후 유체 내에 분산시켜서 나노유체를 생산하는 방식이다. One-step 방법은 높은 분산 안정성을 갖지만 대량 생산이 힘들다. 이에 본 연구에서는 제조된 나노입자를 구매하여 초음파 분산기를 사용하여 나노입자를 기본유체에 분산시키는 Two-step 방법으로 나노유체를 제작하였다. 초음파 분산은 20 kHz 이상의 파를 혼합물에 진동시키면서 엉켜있는 입자들을 분산시켜준다. 본 태양열 시스템에서는 나노유체가 약 18 L 필요하기 때문에 챔버 안에서 연속적으로 순환하며 초음파 분산이 수행되는 연속순환식 초음파 분산장치를 사용하였다. 정량의 나노입자와 물, 약간의 분산 안정제(Arabic gum)를 넣고 교반기에 30분 동안 혼합하였으며 이후 초음파 분산 장치에 6시간 동안 분산하였다. 본 연구에서 사용된 초음파 분산기의 실물사진을 Fig. 3.8과 Table 3.6에 초음파 분산기의 세부 규격을 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 3.8 Photograph of the ultrasonic homogenizer

Table 3.6 Specification of the ultrasonic homogenizer

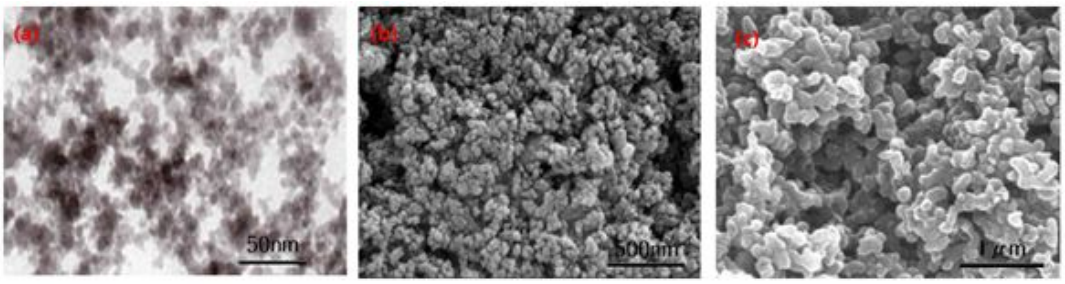
Item	Specification
Model	SHT 750S (Inc. Sonictopia)
Output Power	750 W
Frequency	19.97 khz
Converter	PZT(40 mm×6 ea, PZT-81) Length : 160 mm
Booster	ϕ 48×140 mm
Horn	ϕ 30×123 mm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. Al_2O_3 나노유체

Al_2O_3 나노유체를 제조하기 위해 본 연구에서는 AVENTION 사에서 제조된 나노분말인 Al_2O_3 나노 분말을 구매하여 나노유체를 제조하였다. Fig. 3.9는 AVENTION 사에서 제공한 Al_2O_3 나노 분말의 SEM(Scanning Electron Microscope) 이미지이며 Table 3.7은 Al_2O_3 나노 분말의 함유량을 보여준다. 본 연구에서 Al_2O_3 나노유체의 농도는 각각 0.5, 1.0, 1.5vol%으로 제조하였다.



(a) 20 nm (b) 50 nm (c) 100 nm

Fig. 3.9 SEM image of Al_2O_3 nanopowder

Table 3.7 Specification of Al_2O_3 nanoparticle

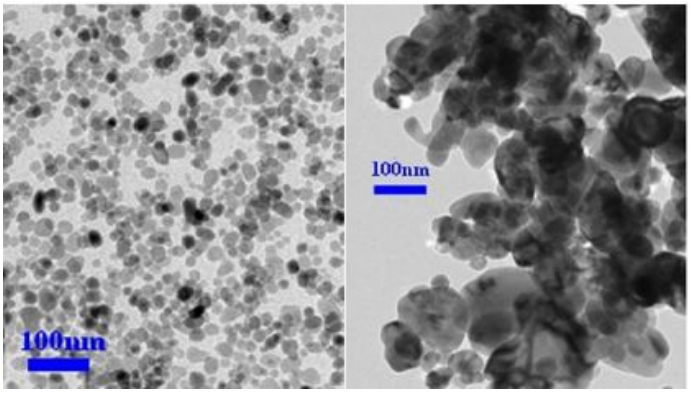
Item	Specification
Nanoparticle	Al_2O_3 (80% alpha : 20% gamma)
Pureity	99%
Size	20, 50, 100 nm
Density	3,960 kg/m^3
Thermal conductivity	36 W/m・K
Specific heat	773 J/kg・K
Manufactor	AVENTION

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. CuO 나노유체

CuO 나노유체를 제조하기 위해 본 연구에서는 AVENTION 사에서 제조된 나노분말인 CuO 나노 분말를 구매하여 나노유체를 제조하였다. Fig. 3.10는 AVENTION 사에서 제공한 CuO 나노 분말의 SEM(Scanning Electron Microscope) 이미지이며 Table 3.8은 CuO 나노 파우더의 함유량을 보여준다. 본 연구에서 CuO 나노유체의 농도는 각각 0.1, 0.2, 0.3, 0.4vol%으로 제조하였다.



(a) 20 nm (b) 50 nm

Fig. 3.10 SEM image of CuO nanopowder

Table 3.8 Specification of CuO nanoparticle

Item	Specification
Nanoparticle	CuO (80% alpha : 20% gamma)
Pureity	99%
Size	40, 80 nm
Density	6,500 kg/m^3
Thermal conductivity	17.65 W/m・K
Specific heat	533 J/kg・K
Manufactor	AVENTION

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 실험방법 및 효율 계산

1. 실험방법 및 조건

평판형 태양열 집열기와 U관형 태양열 집열기를 동일한 유량조건에서 나노입자 크기와 농도 변화에 따른 Al_2O_3, CuO 나노유체와 기본유체인 물을 적용한 집열기의 열효율을 측정하기 위해 동일한 장소와 조건에서 실험을 수행하였다. Table 3.9는 본 연구에서 설정된 실험조건을 나타내고 있다. 본 연구에서 사용된 평판형 태양열 집열기의 면적은 2 m^2, U관형 태양열 집열기의 면적은 2.37 m^2이고, 동일한 유량조건으로 오전 10:00부터 오후 5:00까지 실험을 수행하였다. 또한 태양열 시스템에 흐르는 작동유체는 각각 0.033 kg/s와 0.047 kg/s로 고정시켰다. 나노유체의 농도는 각각 3, 4가지로 변화시켜 최적의 농도를 확인할 수 있도록 실험을 수행하였다. 또한 물을 이용한 집열기의 성능을 동시에 측정하여 작동조건에 따른 성능을 비교하였다.

Table 3.9 Experimental conditions

Item		Specification
Type of working fluid		Al_2O_3, CuO, Water
Concentration of nanofluid (vol%)	Al_2O_3 nanofluid	0.5, 1, 1.5
	CuO nanofluid	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
Experiment time (hr)		10:00~17:00
Solar radiation (W/m^2)		279~939
Solar collector	Inlet temp. (℃)	8~9.5
	Mass flow rate (kg/s)	0.033, 0.047

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 태양열 집열기의 효율 및 불확실성 계산

작동유체를 기본유체인 물과 나노유체를 적용하여 평판형과 U관형 태양열 집열기의 효율을 비교·분석하기 위해 동일한 집열기를 사용하여 같은 장소와 외기조건에서 동시에 실험을 수행하였다. 작동유체의 열획득은 흡수체에 의해 흡수된 네너지와 같으며 식 (3-1)과 같이 표현된다.

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

여기서 Q_u는 유용 열획득, $\dot{m}$은 작동유체의 질량유량, c_p는 작동유체의 비열, T_i는 태양열 집열기의 입구 온도, T_o는 태양열 집열기의 출구 온도, A_c은 태양열 집열기의 면적이다. 또한 F_R은 열손실변수, G는 태양 일사량, $\tau\alpha$은 태양열 집열기의 흡수율-투과율, U_L은 태양열 집열기의 전체손실계수, 그리고 T_a는 외기온도를 의미한다.

나노유체의 비열과 밀도는 식 (3-2)과 식 (3-3)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

태양열 집열기의 효율은 작동유체의 열 획득량을 면적과 일사량의 곱으로 나눠줘 계산할 수 있으며 식 (3-4)과 같이 표현된다.

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

본 연구에서 태양열 집열기 효율의 불확실도는 크게 유량계, 온도계, 일사량계, 나노유체 비열의 특정오차에 의해 결정된다. 집열기 효율의 불확실도는 Moffat (1985)에 의해 제시된 식이며 식(3-5)과 같이 나타낼 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

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

위의 식으로부터 질량유량의 최대오차는 식 (3-6)와 같이 계산하였다.

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

또한, 온도의 최대오차는 식 (3-7)와 같이 계산하였다.

$$\frac{\delta(T_o-T_i)}{T_o-T_i} \leq \left[\left(\frac{\delta T_o}{T_o}\right)^2+\left(\frac{\delta T_i}{T_i}\right)^2\right]^{0.5} \tag{3-7}$$

$$=\left[\left(\frac{0.2}{15}\right)^2+\left(\frac{0.2}{11}\right)^2\right]^{0.5}=2.25\%$$

그리고, 일사량과 나노유체 비열의 최대오차는 식 (3-8)와 (3-9)과 같이 계산하였다.

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

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

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

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

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4장 다양한 나노유체 적용 U관형 태양열 집열기 모델링 및 해석결과

제 1 절 U관형 태양열 집열기 및 나노유체 모델링

본 연구에서는 U관형 태양열 집열기의 열적 성능을 이론적으로 분석하였다. U관형 태양열 집열기는 Fig. 2.4와 같이 크게 유리로 된 이중 진공관식과 U관으로 구성되어 있다. 이중진공관은 전도, 대류 그리고 복사로 인한 열손실이 작기 때문에 더 많은 열을 전달할 수 있다. 태양 일사량은 외부유리관과 흡수관을 통해 전달될 때 열손실로 인해 전체의 약 80%가 작동유체에 전달된다고 보고되고 있다(2007). 본 연구에서 해석의 간단화하기 위해 진공관 외부와 헤더관(Header tube)에서의 총괄열전달계수는 일정하고 진공관안의 공기의 대류를 무시하고 모든 과정은 정상상태라고 가정하였다(2007).

본 연구에서 사용한 U관형 태양열 집열기의 상세 사양을 Table 4.1에서 보여주고 있다. 에너지 평형에 따라 태양열 집열기에서 유용에너지는 일사량에서 태양열 집열기에 의해 손실되는 에너지를 빼주면 되고 다음과 같이 표현된다.

$$Q_u = G - Q_l \tag{4-1}$$

여기서, G는 선택적인 흡수코팅에 의해 흡수된 태양에너지 양이다. 이때 태양열 집열기의 총괄손실계수는 다음 식(4-2)와 같다.

$$U_l = U_a + U_h \tag{4-2}$$

여기서, U_h는 헤더관 모서리(header tube edge)의 손실계수이며 단열재 열전도도, 두께 그리고 헤더관의 표면적에 영향을 받으며 이는 0.1687 W/(m^2 · K)이다

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 4.1 Specifications of the U-tube solar collector for simulation

Parameter	Specification
Outer tube out diameter (mm)	47
Outer tube thickness (mm)	2
Transmittance	0.907
Inner tube outer diameter (mm)	37
Inner tube thickness (mm)	2
Absorptivity of the absorber tube	0.93
Solar collector length (mm)	1,200
Emissivity of the absorber tube	0.06
Copper fin thickness (mm)	0.6
Thermal conductivity of copper fin (W/m · K)	307
Air gap (mm)	1.5
Thermal conductivity of air gap (W/m · K)	0.025
U-tube out diameter (mm)	8
Bonf conductance (W/m · K)	30
Synthetical conductance (W/m · K)	29

(2006). 그리고 흡수관에서 외부로의 손실계수는 U_a이며 다음과 같다.

$$U_a = \frac{1}{\frac{1}{h_{ga}} + \frac{1}{h_{pg}}} \tag{4-3}$$

여기서 h_{ga}는 외부유리관에서 외부로의 대류 열전달계수이며(2006), 이것은 12.7 W/(m^2 · K)으로 주어졌다. h_{pg}는 h_{pgd}와 h_{pgc}의 합이며 흡수관과 유리관 사이의 전도와 복사를 통한 열전달계수로 표현되며 h_{pgc}는 흡수관의 바깥 표면적은 0.2796 W/(m^2 · K)로 가정할 수 있다. 그리고 h_{pgd}는 다음과 같이 정의할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$h_{pgd} = \frac{\sigma\epsilon_c}{1+\frac{\epsilon_c d}{\epsilon_g d_g(1-\epsilon_c)}}(T_t^2+T_g^2)(T_t+T_g) \tag{4-4}$$

여기서 ϵ_c는 흡수 코팅의 반사율, ϵ_g는 외부 유리관 내부 표면의 방사율, d_g는 유리관의 지름, d는 흡수관의 바깥지름, 그리고 σ는 Stefan-Bolzmann 상수 5.67×10^{-8} 이다. 또한 Fig. 4.1에서 진공 유리관의 열손실은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U_t(T_t-T_a) = h_{pgd}(T_t-T_g)+h_{pgc}(T_t-T_g) \tag{4-5}$$

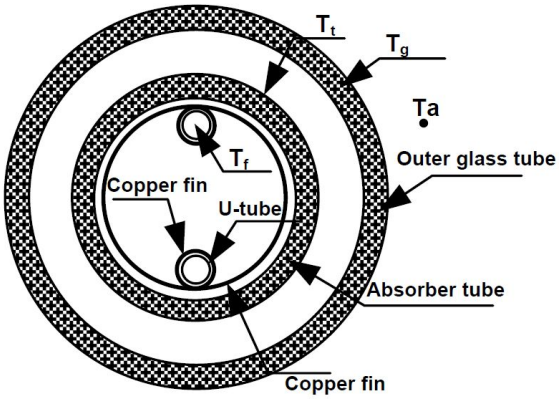


Fig. 4.1 Cross section of U-tube

식 (4-3)~(4-5)으로부터 외기온도 T_a와 흡수관의 온도 T_p가 주어지면 U_a와 T_g를 구할 수 있다. 해석에서 계산을 단순화하기 위해 흡수관은 구리핀과의 열전달 평판형 간주하며 U관 축방향의 온도 구배는 무시하고 흡수관의 온도는 일정하다고 가정하였다.(2007) Fig. 4.2는 구리핀에 대한 축 방향 에너지 평형이며 다음과 같은 방정식으로 표현될 수 있다.

$$-kt\frac{dT}{dx}|_x-(-kt\frac{dT}{dx}|_{x+\triangle x})+Q_u\triangle x=0 \tag{4-6}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

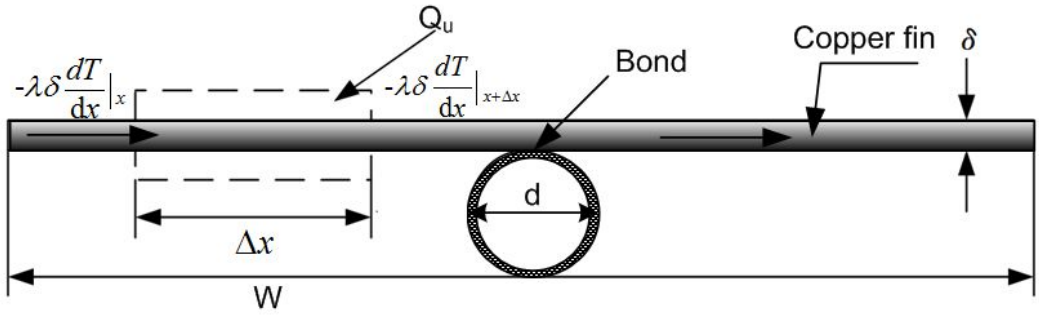


Fig. 4.2 Energy analyses on the copper fin

$$Q_u = \frac{T_t - T}{\frac{t_c}{k_a} + \frac{t_{air}}{k_{air}}} = C_s(T_t - T) \tag{4-7}$$

여기서 t_{air}와 t_c는 공극과 흡수관의 두께이며, k_{air}와 k_a는 공극과 흡수관의 열전도도이다. C_s는 합성전도도를 의미한다. 식 (4-3)~(4-5)을 결합하면 흡수관의 온도 식을 도출할 수 있다.

$$T_t = \frac{G + U_l T_a + C_S T}{U_l + C_S} \tag{4-8}$$

여기서 식 (4-7)과 (4-8)을 식 (4-2)에 대입하면 에너지 방정식을 얻을 수 있으며 방정식을 풀기 위해 다음과 같은 경계조건이 필요하다.

$$\frac{dT}{dx}|_{x=0} = 0, \quad T|_{x=(W-d)/2} = T_b \tag{4-9}$$

계산을 간단화하기 위해 m은 $m = \left[\frac{U_L}{kt\left(1 + \frac{U_L}{C_b}\right)}\right]$로 정의할 수 있으며, 온도 분

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

포식은 다음과 같이 표현된다.

$$T = \frac{\cos mx}{\cos(\frac{m(W-d)}{2})}(T_b - T_a - \frac{G}{U_l}) + T_a + \frac{G}{U_l} \tag{4-10}$$

열 취득은 U관의 수집된 양측 에너지 q_f 와 관에서의 열 취득 q_t 의 합과 같다. 또한 이것은 작동유체에 전달된 에너지의 양과 같고 다음과 같은 방정식으로 쓸 수 있다.

$$q_u = q_f + q_t = \frac{(W-d)(G-U_l(T_b-T_a))F + d(G-U_l(T_b-T_a))}{1+\frac{U_l}{C_S}} \tag{4-11}$$

$$q_u = \frac{((W-d)F+d)(G-U_l(T_b-T_a))}{1+\frac{U_l}{C_S}} \tag{4-12}$$

$$F = \frac{\tanh(\frac{m(W-d)}{2})}{\frac{m(W-d)}{2}} \tag{4-13}$$

$$q_u = \frac{(T_b - T_{fu})}{\frac{1}{h_{fu}\pi d} + \frac{1}{k_c}} \tag{4-14}$$

여기서 h_{fu}는 작동유체와 U관 벽 사이의 열전달계수이며 k_c는 구리핀의 열전도도이며 30 W/(m · K)보다 작아야 한다(1980). T_b에 대하여 식 (4-14)를 풀기 위해식 (4-12)에 대입하면 그 결과로 순열취득을 식 (4-15)와 같이 얻을 수 있다.

$$q_u = WF'(G-U_l(T_{fu}-T_a)) \tag{4-15}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

여기서 집열기 효율계수(F')와 작동유체와 구리관 사이의 열전달계수는 다음과 같은 방정식으로 계산된다.

$$F' = \frac{\frac{1}{U_l}}{W\left(\frac{1+\frac{U_l}{C_S}}{U_l((W-d)F+d)} + \frac{1}{h_{fu}\pi d} + \frac{1}{k_c}\right)} \tag{4-16}$$

$$h_{fu} = \frac{1}{\frac{1}{h_{nf}} + \frac{t_t}{k_t}} \tag{4-17}$$

파이프에서 작동유체에 의해 얻은 열은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{fu} = \dot{m}c_p(T_o - T_i) \tag{4-18}$$

여기서 $\dot{m}$과 c_p는 작동유체의 질량유량과 비열은 의미하며, 태양열 집열기의 효율은 다음과 같이 정의할 수 있다.

본 해석에서는 나노유체를 균일한 유체로 가정하였으며, 20% PG-water을 기본유체로 하여 MWCNT, Al_2O_3, CuO, SiO_2, TiO_2의 서로 다른 농도의 나노유체를 적용하였다. 본 연구에서 고려된 나노입자들의 열적 물성치는 Indhuja (2013), Mahian (2014)와 Ahmed (2014)에 의해 제시된 물성치를 참고하였으며, Table 4.2에 자세히 나와있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 4.2 Thermophysical properties of the nanoparticle and base fluid

Material	Density (kg/m^3)	Thermal conductivity (W/m · K)	Specific heat (J/kg · K)
MWCNT	1,350	3,000	650
Al_2O_3	3,960	36	773
CuO	6,500	17.65	533
SiO_2	2,220	1.38	745
TiO_2	4,175	8.4	710
20% PG-water	1,011	0.52	4,023

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 다양한 나노유체 적용 U관형 태양열 집열기의 성능 해석 결과

다양한 나노유체를 적용한 U관형 태양열 집열기의 성능 해석을 위하여 나노유체를 균일한 유체로 가정하였으며, 20% PG-water을 기본유체로 하여 MWCNT, Al_2O_3, CuO, SiO_2, TiO_2의 서로 다른 농도의 나노유체를 시스템에 적용하여 해석을 진행하였다. Fig. 4.3 은 다양한 나노유체를 적용하였을 때 태양열 일사량 변화에 따른 U관형 태양열 집열기의 효율 변화를 나타내고 있다. 외기온도가 고정되어 있을 때 태양의 일사량 증가에 따른 집열기의 열효율은 증가하며 그 기울기는 점점 감소하여 결국 일정하게 된다. 각각의 나노유체를 태양열 집열기에 적용한 결과 기본유체인 20% PG(Propylene Glycol)-Water 와 비교하여 상대적으로 높은 열전도성을 가지는 나노유체 태양열 집열기의 효율이 더 높게 나타났다. 가장 큰 차이가 나는 나노유체는 0.2vol% MWCNT로 기본유체인 물과 효율의 차이는 태양 일사량이 200 W/m^2 인 경우 5.6%, 1000 W/m^2 인 경우 9.7%를 보였으며 태양 일사량이 증가함에 따라 효율의 차이도 증가하는 것으로 나타났다. 반면에 기본유체와 효율 차이가 가장 작은 나노유체는 3vol% SiO_2 나노유체로 태양 일사량이 200 W/m^2 인 경우 1.7%, 1000 W/m^2 인 경우 2.9%로 나타났다. 모든 작동유체는 약 300 W/m^2 근처에서 급격한 효율의 증가를 보이는데 그 이유는 낮은 일사량 조건에서는 열유속이 매우 낮기 때문에 U관과 작동유체 사이의 열전달 성능이 상대적으로 낮기 때문이다. 또한 태양열 일사량이 약 800 W/m^2 이후부터는 집열기의 효율의 증가량이 일정해지는 경향을 보이는데 이는 집열기가 가지고 있는 열전달 성능의 한계에 도달하여 열용량이 크게 증가하지 않기 때문이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

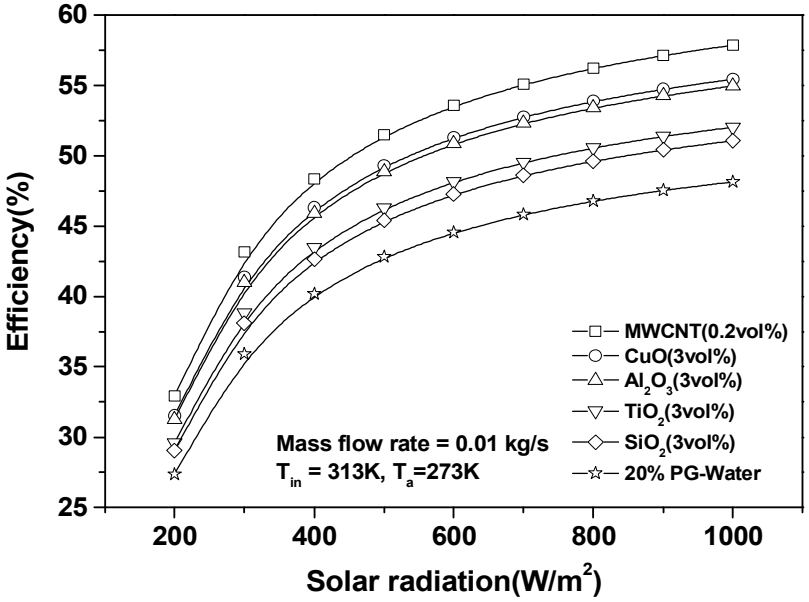


Fig. 4.3 Efficiency prediction of U-tube solar collector with solar radiation for various nanofluids

Collection @ chosun

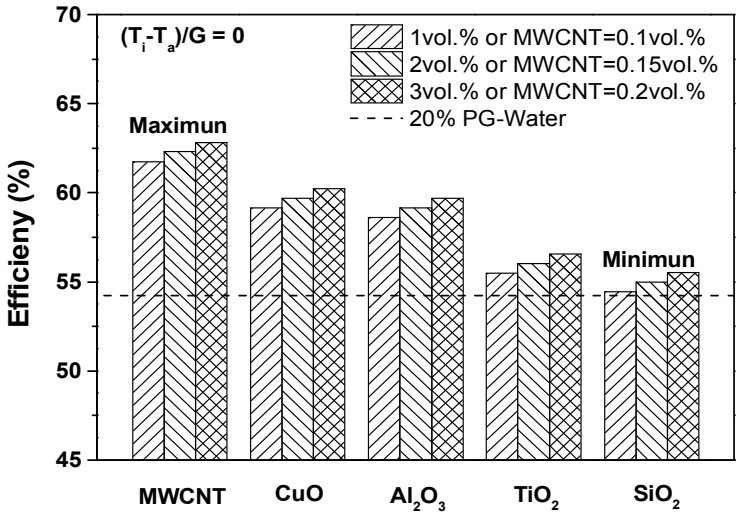
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 4.4은 나노유체의 질량유량이 0.01 kg/s이고 $(T_i-T_a)/G$가 각각 0과 0.15일 때 서로 다른 나노유체와 체적농도에 따른 태양열 집열기의 효율의 변화를 보여주고 있다. 일반적으로 태양열 집열기의 효율은 열손실변수 $(T_i-T_a)/G$의 변화에 많은 영향을 받기 때문에 이를 변수로 하여 태양열 집열기의 효율을 평가한다. 여기서 x축인 $(T_i-T_a)/G$는 순간적인 태양열 집열기의 효율을 결정하는 중요한 변수로 집열기의 형태가 정해지면 흡수관에서 흡수한 에너지와 외부로의 열손실은 크게 변화하지 않기 때문에 집열기의 효율곡선은 $(T_i-T_a)/G$에 의해 좌우된다.

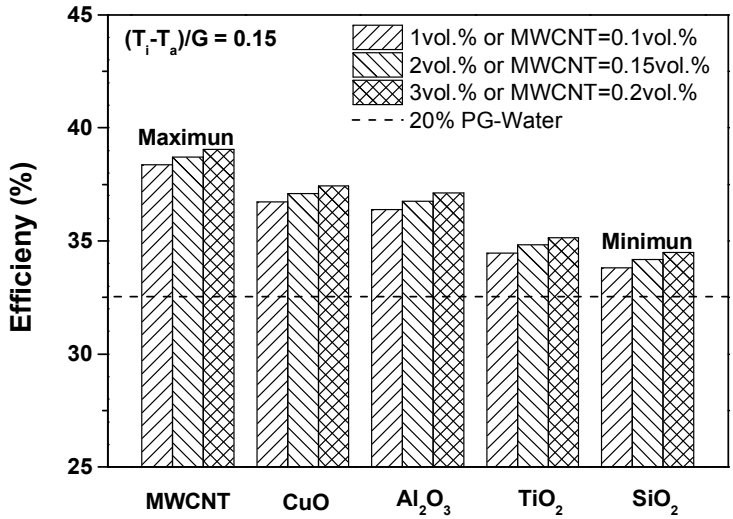
Fig. 4.4에서 볼 수 있듯이 기본유체에 나노입자를 추가할수록 태양열 집열기의 효율이 상승함을 볼 수 있다. 본 연구에서 $(T_i-T_a)/G=0$, 즉 집열기의 입구온도와 외기온도가 같으면 집열기의 효율이 최대로 나타나며 $(T_i-T_a)/G$가 증가할수록 효율이 감소한다. 또한 $(T_i-T_a)/G$이 0과 0.15 조건일 때 효율은 MWCNT, CuO, Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, 20% PG-water 순으로 나타났다. 이 때 0.2vol% MWCNT의 효율은 $(T_i-T_a)/G=0$에서 20% PG-water보다 약 10.5% 향상된 62.8%을, $(T_i-T_a)/G=0.15$에서는 4.2% 향상된 39%로 나타났다. 반면 0.3vol% SiO_2의 효율은 $(T_i-T_a)/G=0$에서 20% PG-water보다 약 3.1% 향상된 55.5%을, $(T_i-T_a)/G=0.15$에서는 2% 향상된 34.5%로 나타났다. 또한 $(T_i-T_a)/G$가 증가할수록 집열기의 효율은 감소하지만 모유체인 20% PG-water에 비하여 효율의 향상도는 증가하는 것으로 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Efficiency variation of U-tube solar collector at $(T_i-T_a)/G=0$



(b) Efficiency variation of U-tube solar collector at $(T_i-T_a)/G=0.15$

Fig. 4.4 Efficiency prediction of U-tube solar collector in different nanofluid concentrations

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 4.5은 본 연구에서 각 나노유체의 최대 농도의 $(T_i-T_a)/G$변화에 따른 태양열 집열기의 효율변화를 보여주고 있다. 모든 나노유체는 $(T_i-T_a)/G$가 증가할수록 온도차가 증가가 크므로 집열기에서 외부로의 열손실이 증가하여 집열기의 효율은 감소하며 나노유체 사이의 효율 차이도 감소하는 경향을 보이고 있다. 가장 높은 집열기 효율은 0.2vol% MWCNT을 적용한 경우로 나타났다. 이는 MWCNT 나노입자가 다른 나노입자와 비교하였을 때 98.8%~99.9%까지의 더 높은 열전도도와 CuO 나노입자를 제외하면 9%-17.7%까지의 작은 비열을 가지고 있기 때문에 다른 나노유체들에 비해 열전달 성능이 향상되고 이에 더 높은 집열기의 효율을 나타나는 것으로 사료된다. 그 다음으로 높은 효율을 보이는 나노유체는 3vol% CuO로 CuO 나노입자가 Al_2O_3에 비해 열전도도는 50% 작지만 상대적으로 39% 높은 밀도와 30% 낮은 비열로 열전달 성능이 우수하여 더 높은 효율을 나타내는 것으로 예측되었다. $(T_i-T_a)/G$가 0에서 0.15로 증가할 때 집열기의 효율은 0.2vol% MWCNT와 3vol%의 SiO_2의 경우 각각 23.8%와 21% 감소하였으며 기본 유체인 20%-PG water의 경우 19.9% 감소하는 것으로 예측되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

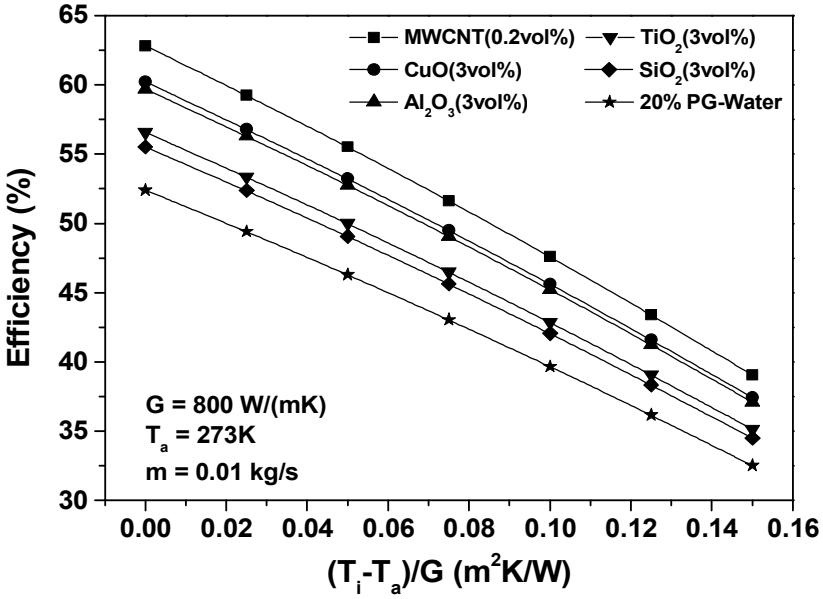


Fig. 4.5 Comparison of efficiency prediction of solar collector for different nanofluids under maximum concentration

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5장 태양열 집열기의 성능 실험결과 및 고찰

제 1 절 Al_2O_3 나노유체 적용 태양열 집열기 성능실험 결과

태양열 집열기에 적용되는 입자크기와 나노유체의 농도에 따른 집열기의 효율 변화를 분석하기 위해 나노유체의 농도에 따른 각각의 열전도도를 우선적으로 고찰하였다. Fig. 5.1은 나노 입자크기가 20 nm인 Al_2O_3 나노유체에 대하서 온도와 농도에 따라 열전도비를 나타내었다. 여기서 k_{nf}와 k_{bf}는 각각 나노유체와 물의 열전도도를 의미한다. 열전도비는 나노유체의 농도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. 하지만 열전도비의 증가율은 농도가 증가함에 따라 점차 감소하는데, 이때 나노유체의 온도가 20°C일 때 1.0vol%와 1.5vol% Al_2O_3 나노유체의 열전도도 증가율은 각각 3.6%와 4.6%이다. 또한 나노유체의 온도가 50°C일 때 각각 9.5%와 12.1%로 나타났다. Lee et al.(2008)의 선행연구에서도 Al_2O_3-Water 나노유체에 대한 열전도도와 체적농도 사이에 선형적인 관계가 있음을 실험적으로 검증하였다. Lee et al.(2008)은 나노입자 크기가 30 nm 보다 작은 경우 나노유체의 온도 21°C에서 체적농도가 0.01-0.3vol%인 Al_2O_3-Water 나노유체의 열전도도가 최대 1.44% 향상되었다고 보고하였다. Fig. 5.1의 결과로 나노유체의 농도가 나노유체의 열전도도에 영향을 미치는 중요한 변수 중에 하나임을 확인할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

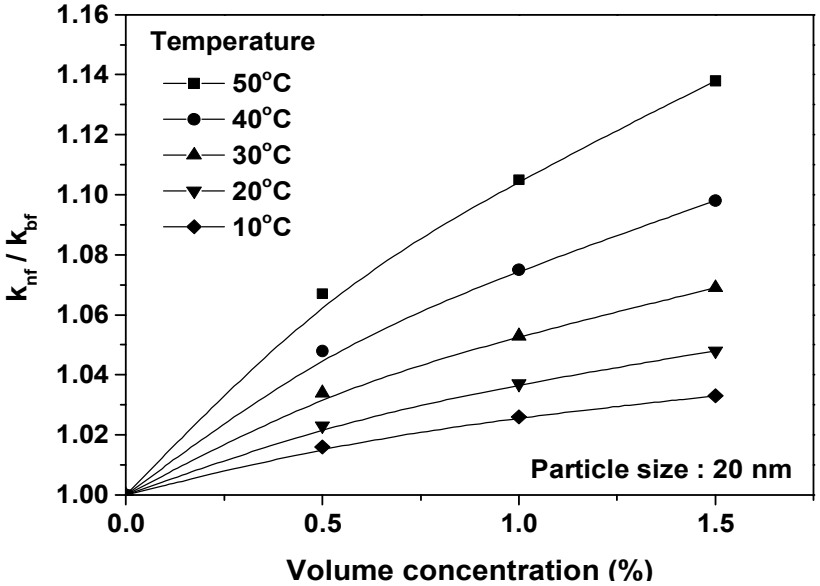


Fig. 5.1 Thermal conductivity ratio according to volume concentration for different temperature (Al_2O_3 nanoparticle size: 20 nm)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 5.2은 동일한 나노유체의 농도에서 입자의 크기에 따른 열전도비를 각각의 온도에서 보여주고 있다. Fig. 5.2에서 볼 수 있듯이 나노 입자의 크기가 작을수록 더 높은 열전도도를 나타내었다. 나노유체의 온도가 30°C에서 나노입자의 크기가 20 nm의 열전도비의 향상율은 50 nm와 100 nm인 경우에 비하여 각각 1.54%와 2.43% 더 크다. 이는 동일한 농도를 나노유체를 제조할 때, 동일한 부피 안에 상대적으로 작은 입자가 큰 입자보다 더 많이 들어간다. 이는 더 많은 수의 나노입자가 들어간 나노유체는 물과 나노입자들 사이의 열전달이 커져 열전도도의 증가로 이어진다. 또한 나노입자의 미세운동과 관련하여 이유를 설명 할 수 있다. 크기가 작은 입자가 큰 나노입자보다 나노입자와 물 사이의 미세운동의 강도가 증가하여 열전달을 촉진시기 때문이다. 즉, 동일한 나노유체의 농도에서 작은 나노입자로 제작된 나노유체가 더 높은 열전도도를 가지는 것을 알 수 있다. Jang et al.(2007)에 따르면 입자 크기 작은 나노입자는 브라운 운동(Brownian motion)이 크고 입자들 사이에 대류가 활발해진다고 주장하였다. 브라운 운동이란 액체 또는 기체 속에서 미소입자들이 불규칙하게 운동하는 현상을 의미한다. 결과적으로 상대적으로 입자 크기가 큰 나노유체 보다 입자 크기가 작은 나노유체의 열전도도는 커지게 된다. 이러한 영향은 나노유체의 대류 현상을 증가시키기 때문에 나노유체 열전도도가 증가하게 된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

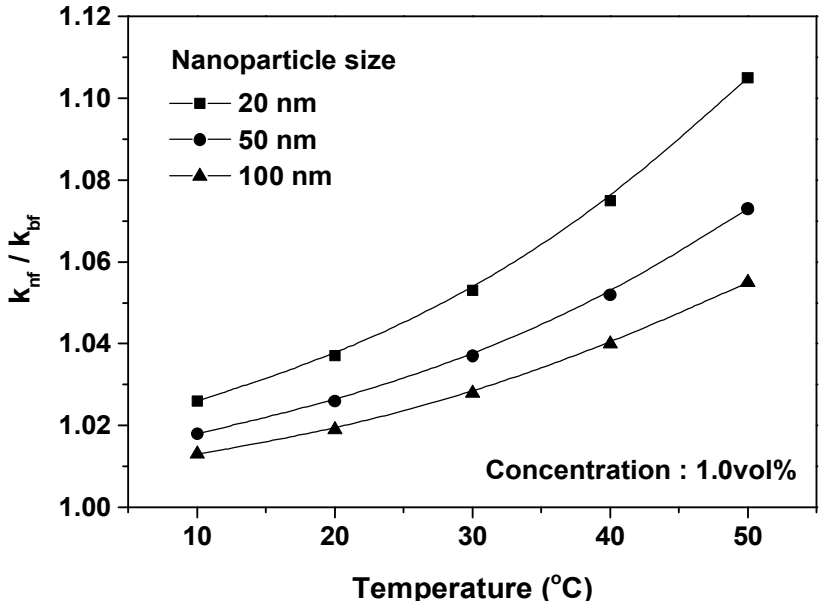


Fig. 5.2 Thermal conductivity ratio as a function of temperature for different nanoparticle sizes (Al_2O_3 Concentration: 1.0vol%)

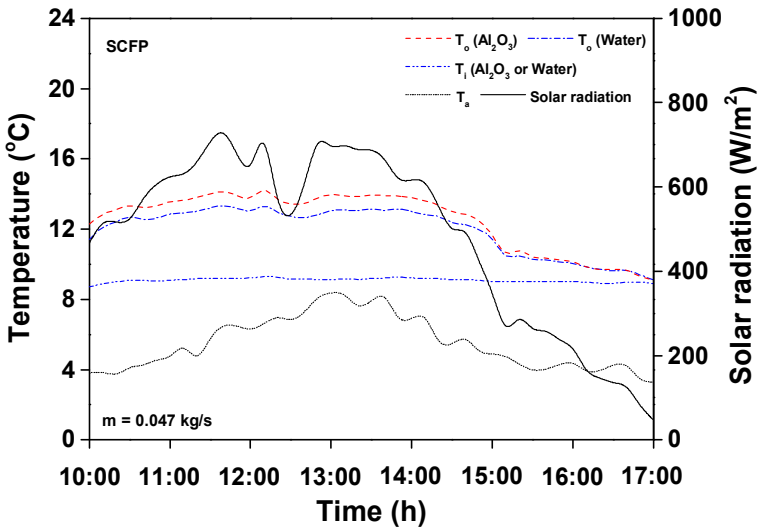
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

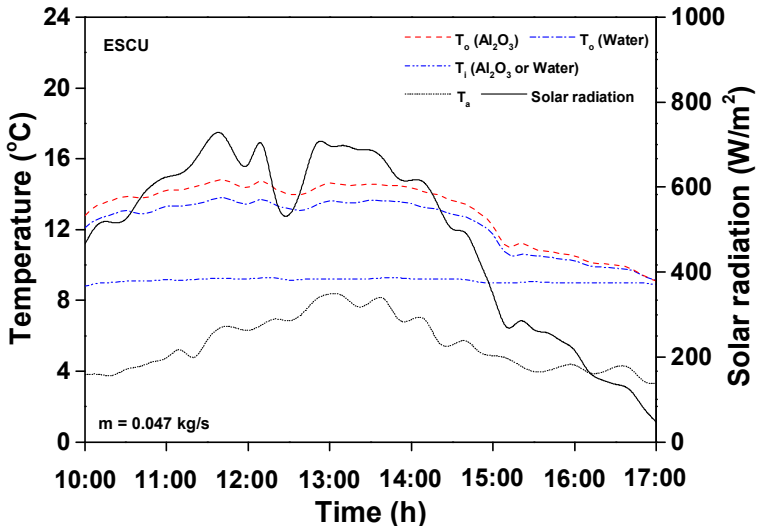
태양열 집열기 시스템에 작동유체로 Al_2O_3-Water 나노유체를 사용하였을 때 집열기의 성능향상을 분석하기 위해 Al_2O_3 나노입자 크기와 농도가 서로 다른 조건에서 각각 수차례 실험을 수행하였으며 얻어진 평균적인 데이터를 분석하여 사용하였다. Fig. 5.3은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s, 작동유체를 물과 입자크기가 20 nm의 Al_2O_3 나노유체의 농도가 0.5vol%로 실험을 수행하였을 때 특정한 날 하루 동안에 대한 평판형과 U관형 태양열 집열기의 입·출구 온도, 외기온도, 일사량의 변화를 보여주고 있다. 각각의 집열기에 대하여 입구온도는 동일하며, 외기조건과 일사량의 변화에 따라 출구온도가 변하는 것을 볼 수 있다. 실험 결과 나노 입자의 크기가 20 nm이며 농도가 0.5vol% Al_2O_3 나노유체를 적용한 평판형 태양열 집열기의 출구온도는 물을 사용한 평판형 태양열 집열기 보다 평균적으로 0.54°C 상승하였으며 최대 1.0°C 상승하였고 U관형 태양열 집열기의 출구온도는 평균적으로 0.7°C 상승하였으며 최대 1.1°C 상승함을 알 수 있다. 특히, 높은 일사량에서는 나노유체의 출구온도가 물보다 크게 향상되는 것을 확인할 수 있으며 이에 반하여 낮은 일사량에서는 나노유체을 사용하는 경우의 출구온도 차는 점점 감소함을 알 수 있다. 이는 일사량이 높을 때 나노유체가 상대적으로 태양 에너지 흡수력이 우수하며 열용량이 크고 열손실이 작기 때문이다. 하지만 일사량이 낮은 조건에서는 나노유체의 열손실이 물보다 크다는 것을 확인할 수 있다. 또한 나노유체의 비열이 물의 비열보다 작기 때문에 낮은 일사량에서는 출구 온도의 감소 기울기가 더 급격함을 알 수 있다. 따라서 태양 일사량이 감소함에 따라 태양열 집열기에서 나노유체의 출구온도는 물의 출구온도와 거의 유사함을 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Flat plate solar collector



(b) U-tube solar collector

Fig. 5.3 Variations of working fluids temperature and according to the time in the solar collector(Al_2O_3 nanoparticle size: 20 nm, Concentration: 0.5vol%)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. Al_2O_3 나노유체 농도에 따른 태양열 집열기 성능 고찰

Fig. 5.4은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 20 nm 나노입자 크기의 Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형과 U관형 태양열 집열기에서 작동유체의 농도에 따른 효율 변화를 보여주고 있다. Fig. 5.4와 같이 모든 농도조건에서 Al_2O_3 나노유체를 사용한 집열기의 효율이 물을 사용한 집열기보다 우수함을 알 수 있다. 여기서 T_i=T_a일 때 태양열 집열기의 효율은 최대이며, (T_i-T_a)/G가 증가할수록 효율이 감소한다. T_i=T_a일 때 두 집열기 모두 나노유체의 농도가 1.0vol% 일 때 가장 높은 효율을 보였으며, 평판형 태양열 집열기의 최대효율은 73.8%, U관형 태양열 집열기의 최대효율은 72.4%로 나타났다. 작동유체로 물을 사용한 집열기와 비교하였을 때 Al_2O_3 나노유체를 적용한 평판형과 U관형 태양열 집열기의 효율은 평균 약 17.6%와 17.9%씩 향상된 결과를 보였다. 또한 평판형 태양열 집열기에서 나노유체의 농도가 1.0vol% 일 때, 1.5vol%과 0.5vol% Al_2O_3 나노유체를 사용했을 때 보다 각각 3.54%, 5.53% 향상되었고 U관형 태양열 집열기는 각각 6.04%와 8.77% 향상되었다.

본 연구에서 태양열 집열기의 효율은 나노유체의 농도가 1.0vol%일 때 가장 높은 효율을 나타냈으며 특히, 나노유체의 농도가 1.5vol%인 집열기의 효율보다 높았다. 일반적으로 나노유체의 열전도도는 농도가 증가함에 따라 향상된다. 그로 인해 나노유체의 농도가 1.5vol%일 때 열전도도는 나노유체의 농도 1.0vol%일 때보다 더 크다. 하지만 나노유체가 고농도 일수록 나노입자의 분산 안정성이 낮아져 입자 사이에 열 에너지 전달 및 흡수력이 감소한다. 서로 다른 Al_2O_3 나노유체의 농도에 따른 효율의 향상을 비교하기 위해서 얻어진 결과를 바탕으로 특성 매개 변수를 갖는 선형 방정식을 활용하여 Table 5.1과 Table 5.2와 같이 계산하였다. Table 5.1와 같이 평판형 태양열 집열기에서 열획득계수인 $F_R(\tau\alpha)$의 나노유체의 농도가 1.0vol%에서 최대값을 보이며 이때 열손실계수인 F_RU_L의 값은 23.25이다. 나노유체의 농도가 1.5vol%인 경우 $F_R(\tau\alpha)$의 값은 0.734이며 F_RU_L의 값은 22.18이다. 즉, 나노유체의 농도가 1.5vol%일 때 열에너지 전달과 흡수력이 감소하며 외부로의 열손실이 더 많다는 것을 확인할 수 있다. U관형 태양열 집열기에서도 $F_R(\tau\alpha)$의 나노

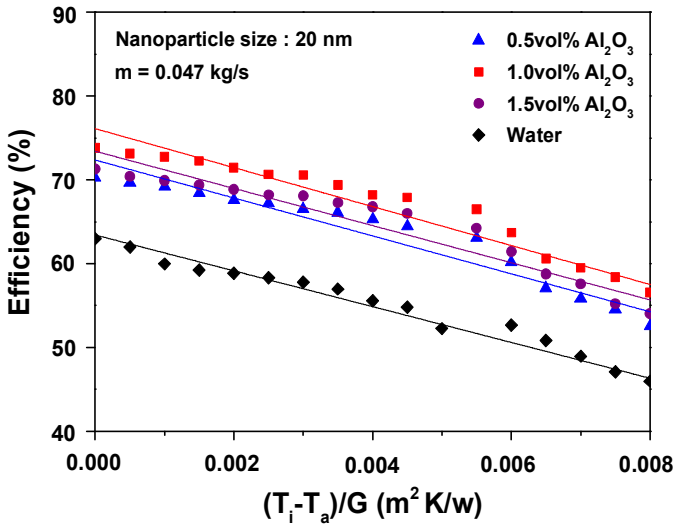
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

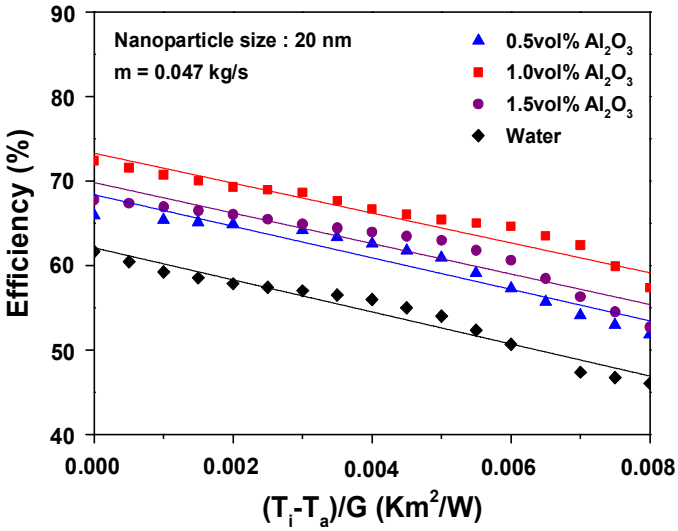
유체의 농도가 1.0vol%에서 최대값을 보이며 나노유체의 농도가 1.5vol%인 경우 $F_R(\tau\alpha)$의 값은 0.698이며 F_RU_L의 값은 18.05이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Flat plate solar collector



(b) U-tube solar collector

Fig. 5.4 Variations of efficiency in the solar collector for different Al_2O_3 nanofluid concentrations (Al_2O_3 particle size: 20 nm, m= 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 5.1 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector using Al_2O_3 nanofluid and water

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 0.5vol%)	0.724	22.64	0.929
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0vol%)	0.761	23.25	0.944
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.5vol%)	0.734	22.18	0.920
Water	0.634	21.37	0.972

Table 5.2 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector using Al_2O_3 nanofluid and water

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 0.5vol%)	0.684	18.67	0.889
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0vol%)	0.733	17.69	0.938
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.5vol%)	0.698	18.05	0.863
Water	0.620	18.98	0.956

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

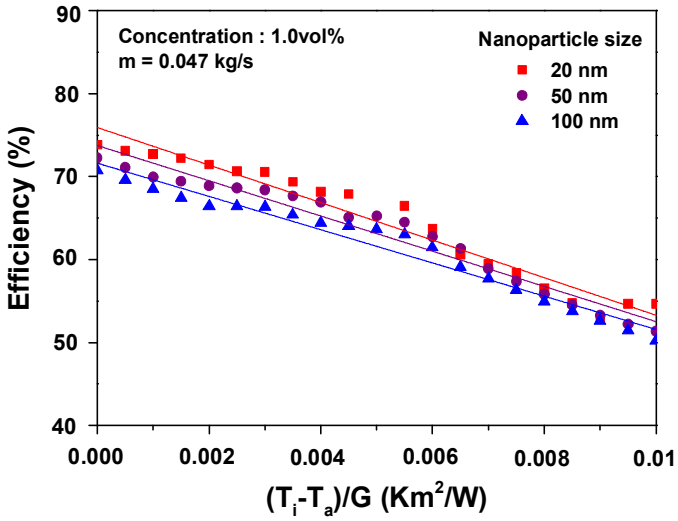
2. Al_2O_3 나노입자 크기에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰

Fig. 5.5은 나노유체 농도가 1.0vol%, 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 나노입자의 크기 변화에 따른 태양열 집열기의 효율곡선 변화를 나타내고 있다. 나노입자의 크기는 열전도도에 있어 중요한 영향을 미치므로 나노입자 크기에 따른 태양열 집열기의 효율을 분석하는 것은 매우 중요하다. 모든 운전조건에서 나노입자의 크기가 가장 작은 20 nm로 제작된 Al_2O_3 나노유체를 사용하였을 때 가장 높은 효율을 보였다. 평판형과 U관형 태양열 집열기에서 나노입자의 크기가 20 nm인 나노유체의 최대 효율은 73.3%와 72.4%이며 이는 100 nm을 사용한 집열기의 효율보다 각각 평균 4.70%와 4.60% 향상됨을 보였다. 즉, 입자의 크기가 상대적으로 작은 나노유체는 열전도도가 우수하여 더 빠른 열전달을 발생시켜 태양열 집열기의 성능에 주요한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

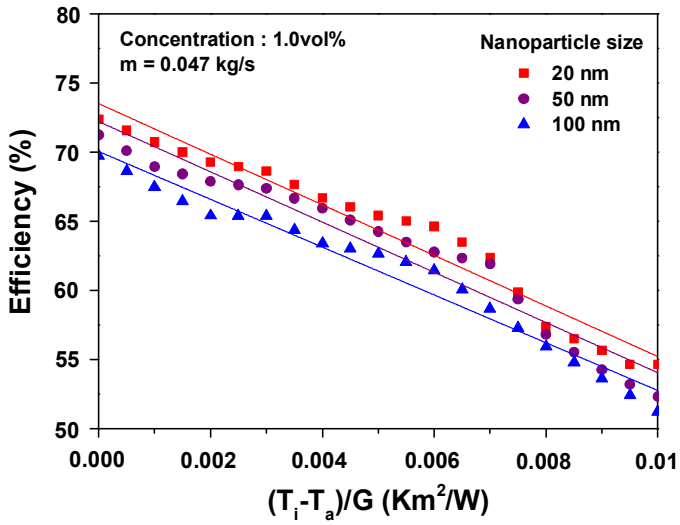
Table 5.3와 Table 5.4는 동일한 농도에서 세 가지 나노입자의 크기에 따른 효율과 관련된 특성 매개 변수의 값을 제시하였다. 평판형 태양열 집열기인 경우 나노입자의 크기가 20 nm에서 에너지 흡수 변수인 $F_R(\tau\alpha)$가 0.761으로 가장 높은 값을 보였으며, 100 nm의 입자크기를 갖는 나노유체가 0.716, 물을 사용하였을 때는 0.634로 상대적으로 낮은 값을 보였다. U관형 태양열 집열기 역시 나노입자의 크기가 20 nm에서 에너지 흡수 변수인 $F_R(\tau\alpha)$가 0.733으로 가장 높은 값을 보였으며, 100 nm의 입자크기를 갖는 나노유체가 0.700, 물을 사용하였을 때는 0.620로 상대적으로 낮은 값을 보였다. 나노입자의 크기가 작을수록 태양 에너지 흡수력이 우수함을 알 수 있다. 또한 태양열 집열기의 $(T_i-T_a)/G$가 작을 때 입자크기가 20 nm인 나노유체를 적용한 집열기의 효율과 100 nm 나노유체를 적용한 집열기의 효율 차가 크게 나타났지만 $(T_i-T_a)/G$가 클수록 외부로의 열손실이 커져 20 nm Al_2O_3 나노유체의 집열기 효율과 100 nm를 Al_2O_3 나노유체의 집열기 효율의 차이가 조금씩 감소함을 의미한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Flat plate solar collector



(b) U-tube solar collector

Fig. 5.5 Variations of efficiency in the solar collector for different Al_2O_3 nanoparticle sizes (Concentration: 1.0vol%, m= 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 5.3 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector according to nanoparticle sizes

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0vol%)	0.761	23.25	0.944
Al_2O_3 nanofluid (50 nm, 1.0vol%)	0.737	21.23	0.955
Al_2O_3 nanofluid (100 nm, 1.0vol%)	0.716	20.04	0.962
Water	0.634	21.37	0.972

Table 5.4 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to nanoparticle sizes

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0vol%)	0.733	17.69	0.938
Al_2O_3 nanofluid (50 nm, 1.0vol%)	0.722	18.16	0.944
Al_2O_3 nanofluid (100 nm, 1.0vol%)	0.700	17.29	0.966
Water	0.620	18.98	0.956

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

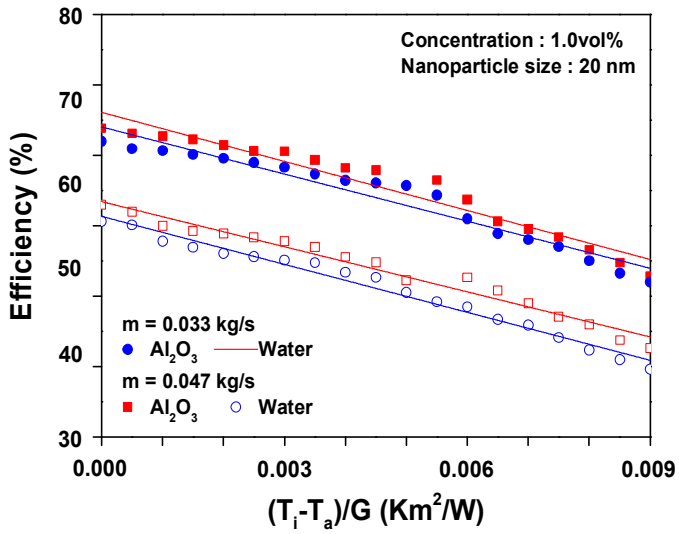
3. 작동유체의 질량 유량에 따른 태양열 집열기 성능 고찰

Fig. 5.6는 나노입자의 크기가 20 nm일 때 나노유체의 농도가 1.0vol% 조건에서 Al_2O_3-water 나노유체와 물의 유량 변화에 따른 태양열 집열기의 효율 변화를 비교하여 보여주고 있다. 태양열 집열기의 효율은 유량이 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 증가함에 따라 증가한다. 이는 효율의 정의 식인 (3-1)를 기초로 하여, 상대적으로 큰 유량 조건에서 집열기의 효율이 증가됨을 알 수 있다. 작동유체의 유량이 0.033 kg/s에서는 집열기에서 유체가 머무는 시간이 상대적으로 길고 열전달량이 증가하여 출구 온도는 증가한다. 집열기 출구 온도의 상승은 집열기에서 외기로 더 많은 열손실을 발생시켜 집열기의 입구와 온도차를 줄여 집열기에서 작동유체가 흡수하는 집열량이 감소하고 이는 곧 효율의 감소로 이어진다. 반면에 유량이 0.047 kg/s에서는 집열기에서 상대적으로 유체가 머무는 시간이 짧고 집열기 안에서 흐르는 작동유체의 단위질량 당 에너지 흡수량이 감소되어 태양열 집열기의 입출구 온도차는 감소하게 된다. 태양열 집열기와 유체와의 열전달량이 증가하는 반면 외기로의 열손실이 감소하여 결과적으로 작은 유량 조건보다 집열기의 효율이 향상된다. 그러나 집열기 출구의 온도는 상대적으로 감소한다. 즉, 태양열 집열기의 효율은 유량이 클수록 상승하나 집열기 출구의 온도는 상대적으로 감소하여 고온의 출구온도를 얻을 수 없다. 본 연구 결과, 두 집열기 모두 유량이 클수록 나노유체를 적용한 태양열 집열기의 효율이 향상됨을 확인하였다.

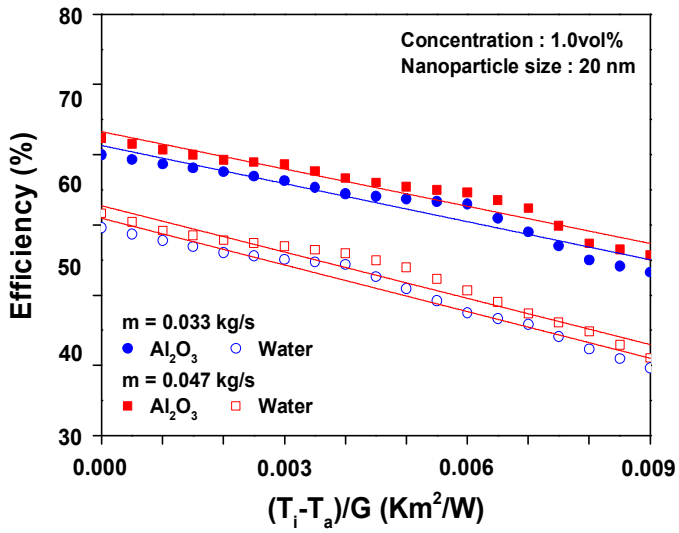
Table 5.5와 Table 5.6에 나노유체와 물의 유량에 따른 특성 매개 변수의 값을 제시하였다. Table 5.5에서 보듯이 평판형 태양열 집열기는 $F_R(\tau\alpha)$은 나노유체의 질량유량이 0.047 kg/s에서 0.761으로 최대값을 보이며 이는 질량유량이 동일한 물에 비해 14.7% 향상됨을 확인할 수 있었다. U관형 태양열 집열기에서도 $F_R(\tau\alpha)$은 나노유체의 질량유량이 0.047 kg/s에서 0.733으로 최대값을 보이며 이는 질량유량이 동일한 물에 비해 14.8% 향상됨을 확인할 수 있었다. 따라서 본 실험에서는 태양열 집열기의 효율은 작동유체의 유량의 증가함에 따라 증가하고 나노유체를 적용하는 경우 유량이 클수록 성능의 향상도가 증가함을 알 수 있다. 반면 집열기의 출구온도는 상대적으로 낮아진다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Flat plate solar collector



(b) U-tube solar collector

Fig. 5.6 Variations of efficiency in the solar collector for different mass flow rates (Al_2O_3 particle size: 20 nm, Concentration: 1.0vol%)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 5.5 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for different mass flow rates(Al_2O_3 particle size: 20 nm, Concentration: 1.0vol%)

Mass flow rate (kg/s)	Working fluid	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
0.033	Al_2O_3 nanofluid	0.740	22.33	0.940
	Water	0.613	22.73	0.980
0.047	Al_2O_3 nanofluid	0.761	23.25	0.944
	Water	0.634	21.37	0.972

Table 5.6 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for different mass flow rates(Al_2O_3 particle size: 20 nm, Concentration: 1.0vol%)

Mass flow rate (kg/s)	Working fluid	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
0.033	Al_2O_3 nanofluid	0.713	18.08	0.936
	Water	0.609	19.05	0.962
0.047	Al_2O_3 nanofluid	0.733	17.69	0.938
	Water	0.620	18.98	0.956

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 CuO 나노유체 적용 태양열 집열기 성능실험 결과

태양열 집열기에 적용되는 CuO 나노유체 또한 농도와 입자크기에 따른 집열기의 효율 변화를 분석하기 위해 나노유체의 농도에 따른 각각의 열전도도를 우선적으로 고찰하였다. Fig. 5.7은 나노 입자크기가 40 nm인 CuO 나노유체에 대하서 온도와 농도에 따라 열전도비를 나타내었다. 여기서 k_{nf}와 k_{bf}는 각각 CuO 나노유체와 물의 열전도도이다. CuO 나노유체의 열전도비는 나노유체의 농도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 하지만 열전도비의 증가율은 농도가 증가함에 따라 점차 감소하는데, 이때 CuO 나노유체의 온도가 20°C일 때 0.1vol%와 0.4vol% CuO 나노유체의 열전도도 증가율은 각각 0.6%와 1.48%이다. 또한 나노유체의 온도가 50°C일 때 각각 1.7%와 4.1%로 나타났다. Fig. 5.8은 동일한 CuO 나노유체의 농도에서 입자의 크기에 따른 열전도비를 각각의 온도에서 보여주고 있다. Fig. 5.8에서 볼 수 있듯이 나노 입자의 크기가 작을수록 더 높은 열전도도를 나타내었다. 0.4vol% CuO 나노유체의 온도가 30°C일 때 나노입자의 크기가 40 nm의 열전도비의 향상율은 80 nm인 경우에 비하여 0.49% 더 큰 것으로 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

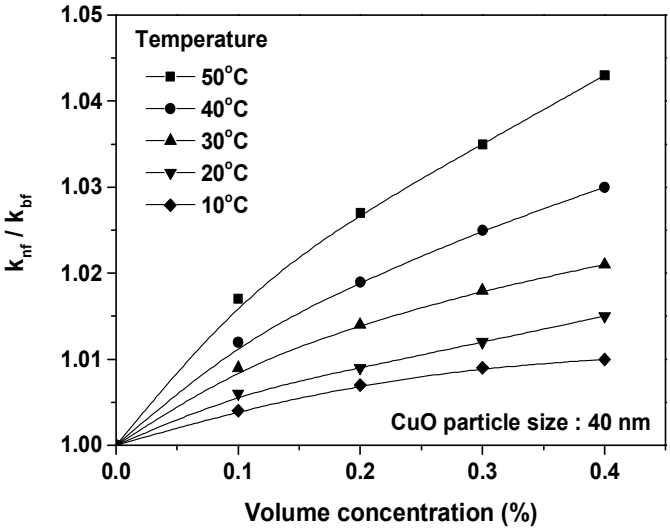


Fig. 5.7 Thermal conductivity ratio according to volume concentration for different temperature (CuO nanoparticle size: 40 nm)

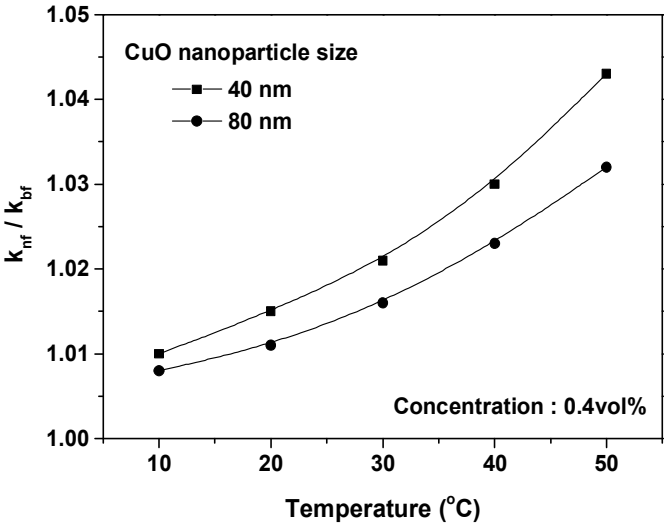


Fig. 5.8 Thermal conductivity ratio as a function of temperature for different nanoparticle sizes (CuO nanofluid concentration: 0.3vol%)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. CuO 나노유체의 농도에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰

Fig. 5.9은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 40 nm 나노입자 크기의 CuO 나노유체와 물을 적용한 평판형과 U관형 태양열 집열기에서 작동유체의 농도에 따른 효율 변화를 보여주고 있다. CuO 나노유체를 사용한 집열기의 효율이 물을 사용한 집열기 보다 향상됨을 알 수 있다. 여기서 T_i=T_a일 때 태양열 집열기의 효율은 최대이며, (T_i-T_a)/G가 증가할수록 효율이 감소한다. T_i=T_a일 때 두 집열기 모두 나노유체의 농도가 0.4vol% 일 때 가장 높은 효율을 보였으며, 평판형 태양열 집열기의 최대효율은 67.4%, U관형 태양열 집열기의 최대효율은 66.1%로 나타났다. 물을 사용한 태양열 집열기와 비교하였을 때 CuO 나노유체를 적용한 평판형과 U관형 태양열 집열기의 효율보다 평균적으로 각각 7.29%와 7.27%씩 향상된 결과를 보였다. 또한 평판형 태양열 집열기에서 나노유체의 농도가 0.4vol% 일 때, 0.1vol%, 0.2vol% 그리고 0.3vol%인 Al_2O_3 나노유체를 사용했을 때 보다 평균적으로 각각 4.46%, 2.89%, 0.8%씩 향상되었고 U관형 태양열 집열기는 평균적으로 5.48%, 3.55%, 1.11%씩 향상되었다.

본 연구에서 CuO 나노유체를 적용한 태양열 집열기의 효율은 나노유체의 농도가 증가할수록 높은 효율을 나타났으나 증가폭은 점점 감소함을 알 수 있었다. 일반적으로 나노유체의 열전도도는 농도가 증가함에 따라 향상된다. 하지만 나노유체가 고농도 일수록 나노입자의 분산 안정성이 낮아져 시스템에 침전이 생길 가능성이 크며 입자 사이에 열 에너지 전달 및 흡수력이 감소한다. 이러한 현상에 의하여 나노유체의 농도가 증가한다 하더라도 더 이상 효율은 향상되지 않고 최적의 효율값을 가지는 농도가 각 나노유체 별로 다르게 나타난다.

서로 다른 CuO 나노유체의 농도에 따른 효율의 향상을 비교하기 위해서 얻어진 결과를 바탕으로 특성 매개 변수를 갖는 선형 방정식을 활용하여 Table 5.7과 Table 5.8와 같이 계산하였다. Table 5.7와 같이 평판형 태양열 집열기에서 $F_R(\tau\alpha)$의 나노유체의 농도가 0.4vol%에서 최대값을 보인다. 나노유체의 농도가 0.4vol%인 경우 $F_R(\tau\alpha)$의 값은 0.676이며 F_RU_L의 값은 20.62이다. U관형 태양열 집열기에서도 $F_R(\tau\alpha)$의 나노유체의 농도가 0.4vol%에서 최대값을 보이며 $F_R(\tau\alpha)$의 값은 0.661이며 F_RU_L의 값은 18.53이다.

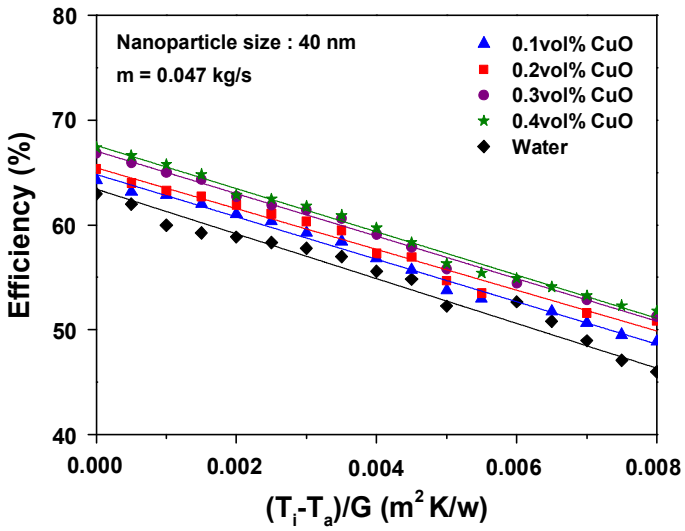
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

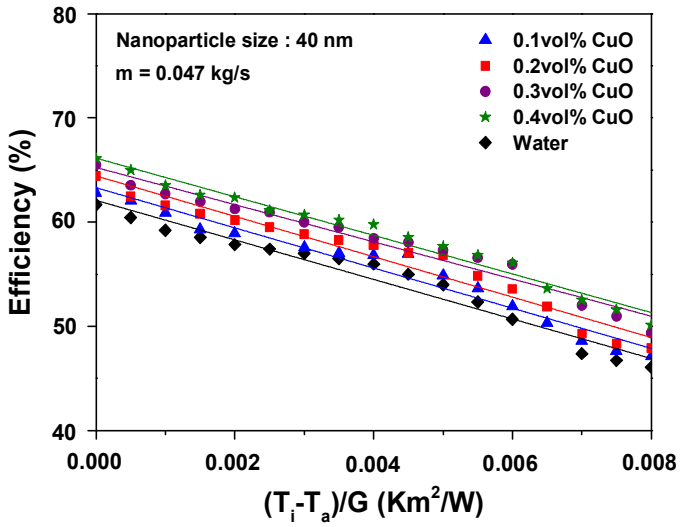
나노입자의 크기가 40 nm인 0.4vol% CuO 나노유체를 사용하였을 때 $F_R U_L$의 값이 평판형 집열기가 U관형 집열기보다 높은 이유는 열에너지 전달 및 흡수력이 감소하여 외부로의 열손실이 더 많다는 것을 간접적으로 확인할 수 있다. 또한 U관형 태양열 집열기가 더 넓은 작동온도 범위에서 높은 효율을 갖는 것으로 확인되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Flat plate solar collector



(b) U-tube solar collector

Fig. 5.9 Variations of efficiency in the solar collector for different CuO nanofluid concentrations (CuO particle size: 40 nm, m=0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 5.7 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector using CuO nanofluid and water

Working fluid (particle size, Concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
CuO nanofluid (40 nm, 0.1vol%)	0.648	20.26	0.991
CuO nanofluid (40 nm, 0.2vol%)	0.654	19.46	0.978
CuO nanofluid (40 nm, 0.3vol%)	0.670	20.28	0.991
CuO nanofluid (40 nm, 0.4vol%)	0.676	20.62	0.991
Water	0.634	21.37	0.972

Table 5.8 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector using CuO nanofluid and water

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
CuO nanofluid (40 nm, 0.1vol%)	0.633	19.28	0.957
CuO nanofluid (40 nm, 0.2vol%)	0.644	19.39	0.953
CuO nanofluid (40 nm, 0.3vol%)	0.652	17.84	0.962
CuO nanofluid (40 nm, 0.4vol%)	0.661	18.53	0.975
Water	0.620	18.98	0.956

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

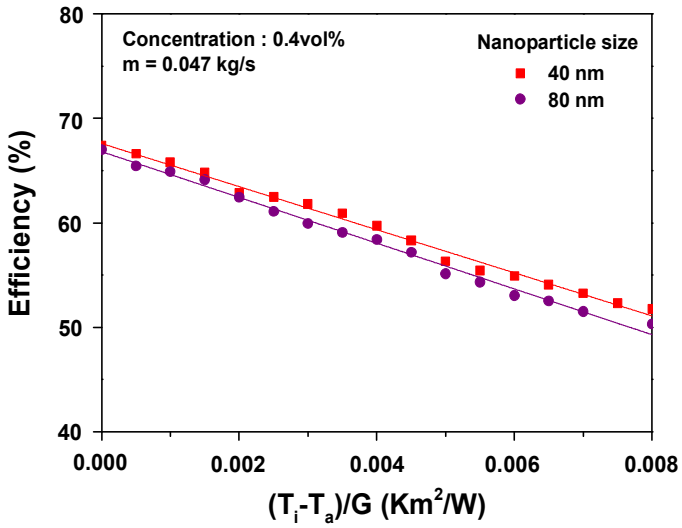
2. CuO 나노입자 크기에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰

Fig. 5.10은 나노유체 농도가 0.4vol%, 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 나노입자의 크기에 따른 태양열 집열기의 효율 변화를 보여주고 있다. 나노입자의 크기는 열전도도에 있어 중요한 영향을 미치므로 나노입자 크기에 따른 태양열 집열기의 효율을 분석하는 것은 매우 중요하다. 모든 운전조건에서 나노입자의 크기가 가장 작은 40 nm로 제작된 CuO 나노유체를 사용하였을 때 가장 높은 효율을 보였다. 따라서 평판형과 U관형 태양열 집열기에서 나노입자의 크기가 40 nm인 나노유체를 적용하였으며 최대 효율은 67.4%와 66.1%이다. 이는 80 nm의 CuO 나노입자를 사용한 집열기의 효율보다 이 때 평균적으로 각각 2.14%와 2.52% 향상됨을 보였다. 즉, 입자의 크기가 상대적으로 작은 나노유체는 열전도도가 우수하여 더 빠른 열전달을 발생시켜 태양열 집열기의 성능에 주요한 영향을 미치는 것을 확인 수 있다. 평판형의 경우 높은 일사량에서 효율의 차가 작으나 일사량이 줄어들수록 그 차는 감소함을 확인할 수 있다. 반면 U관형 집열기에서는 거의 일정한 차를 보임을 확인할 수 있다.

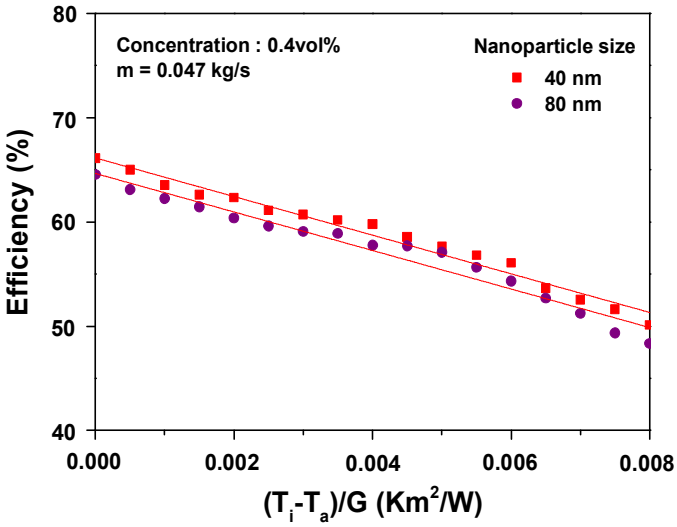
Table 5.9와 Table 5.10는 동일한 농도에서 두 가지 나노입자의 크기에 따른 효율과 관련된 특성 매개 변수의 값을 제시하였다. 평판형 태양열 집열기인 경우 나노입자의 크기가 40 nm에서 에너지 흡수 변수인 $F_R(\tau\alpha)$가 0.676으로 가장 높은 값을 보였으며, 80 nm의 입자크기를 갖는 나노유체가 0.668로 상대적으로 낮은 값을 보였다. U관형 태양열 집열기 역시 나노입자의 크기가 40 nm에서 에너지 흡수 변수인 $F_R(\tau\alpha)$가 0.661으로 가장 높은 값을 보였으며, 80 nm의 입자크기를 갖는 나노유체가 0.646로 상대적으로 낮은 값을 보였다. 나노입자의 크기가 작을수록 태양 에너지 흡수력이 우수함을 알 수 있다. 또한 태양열 집열기의 $(T_i-T_a)/G$가 작을 때 입자크기가 40 nm인 나노유체를 적용한 집열기의 효율과 80 nm 나노유체를 적용한 집열기의 효율 차가 크게 나타났지만 $(T_i-T_a)/G$가 클수록 외부로의 열손실이 커져 40 nm CuO 나노유체의 집열기 효율과 80 nm를 CuO 나노유체의 집열기 효율의 차이가 조금씩 감소함을 의미한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Flat plate solar collector



(b) U-tube solar collector

Fig. 5.10 Variations of efficiency in the solar collector for different CuO nanoparticle sizes (Concentration: 0.4vol%, m=0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 5.9 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector according to nanoparticle sizes (CuO nanofluid)

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
CuO nanofluid (40 nm, 0.4vol%)	0.676	20.62	0.992
CuO nanofluid (80 nm, 0.4vol%)	0.668	21.89	0.990

Table 5.10 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to nanoparticle sizes (CuO nanofluid)

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
CuO nanofluid (40 nm, 0.4vol%)	0.661	18.53	0.975
CuO nanofluid (80 nm, 0.4vol%)	0.646	18.47	0.960

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 작동유체의 질량 유량에 따른 태양열 집열기 성능 고찰

Fig. 5.11는 CuO 나노입자의 크기가 40 nm이고 나노유체의 농도가 0.4vol% 조건에서 CuO 나노유체와 물의 유량 변화에 따른 태양열 집열기의 효율 변화를 비교하여 보여주고 있다. 태양열 집열기의 효율은 유량이 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 증가함에 따라 증가한다. 이는 효율의 정의 식인 (3-1)를 기초로 하여, 상대적으로 큰 유량 조건에서 집열기의 효율이 증가됨을 알 수 있다. 작동유체의 유량이 0.033 kg/s에서는 집열기에서 유체가 머무는 시간이 상대적으로 길고 열전달량이 증가하여 출구 온도는 증가한다. 집열기 출구 온도의 상승은 집열기에서 외기로 더 많은 열손실을 발생시켜 집열기의 입구와 온도차를 줄여 집열기에서 작동유체가 흡수하는 집열량이 감소하고 이는 곧 효율의 감소로 이어진다. 반면에 유량이 0.047 kg/s에서는 집열기에서 상대적으로 유체가 머무는 시간이 짧고 집열기 안에서 흐르는 작동유체의 단위질량 당 에너지 흡수량이 감소되어 태양열 집열기의 입출구 온도차는 감소하게 된다. 태양열 집열기와 유체와의 열전달량이 증가하는 반면 외기로의 열손실이 감소하여 결과적으로 작은 유량 조건보다 집열기의 효율이 향상된다. 그러나 집열기 출구의 온도는 상대적으로 감소한다. 결과적으로 태양열 집열기의 효율은 작동유체의 유량과 집열기의 효율에 의해 결정된다. 즉, 태양열 집열기의 효율은 유량이 클수록 상승하나 집열기 출구의 온도는 상대적으로 감소하여 고온의 출구온도를 얻을 수 없다. 본 연구 결과, 두 집열기 모두 유량이 클수록 나노유체를 적용한 태양열 집열기의 효율이 향상됨을 확인하였다.

Table 5.11와 Table 5.12에 나노유체와 물의 유량에 따른 특성 매개 변수의 값을 제시하였다. 평판형 태양열 집열기는 $F_R(\tau\alpha)$은 나노유체의 질량유량이 0.047 kg/s에서 0.676으로 최대값을 보이며 이는 질량유량이 동일한 물에 비해 효율이 7.29% 향상되었으며 질량유량이 0.033 kg/s인 CuO 나노유체에 비해 효율이 약 3% 향상됨을 확인할 수 있었다. U관형 태양열 집열기에서도 $F_R(\tau\alpha)$은 나노유체의 질량유량이 0.047 kg/s에서 0.661으로 최대값을 보이며 이는 질량유량이 동일한 물에 비해 효율이 7.27% 향상되었으며 질량유량이 0.033 kg/s인 CuO 나노유체에 비해 효율이 약 2.8% 향상됨을 확인할 수 있었다. 따라서 본 실험에서는 태양열 집열기의

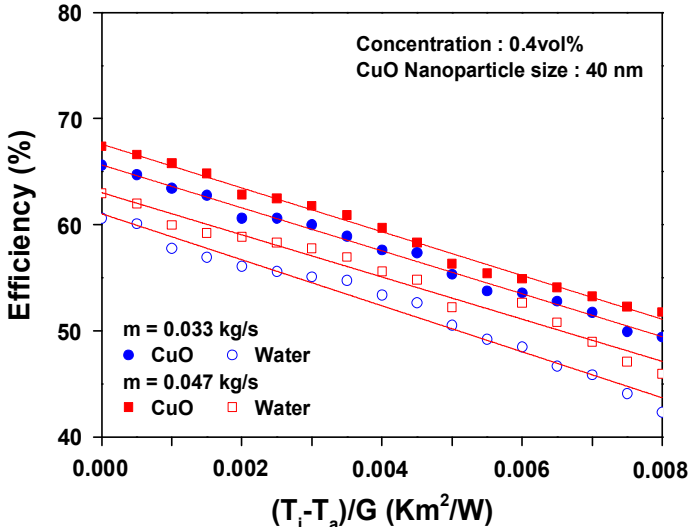
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

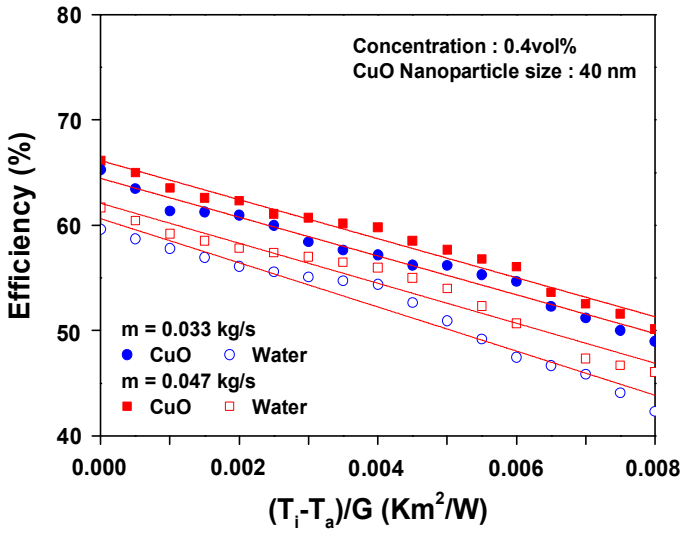
효율은 작동유체의 유량의 증가함에 따라 증가하고 나노유체를 적용하는 경우 유량이 클수록 성능의 향상도가 증가함을 알 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Flat plate solar collector



(b) U-tube solar collector

Fig. 5.11 Variations of efficiency in the solar collector for different mass flow rates (CuO particle size: 40 nm, Concentraion: 0.4vol%)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 5.11 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for different mass flow rates(CuO particle size: 40 nm, Concentration: 0.4vol%)

Mass flow rate (kg/s)	Working fluid	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
0.033	CuO nanofluid	0.656	20.23	0.992
	Water	0.610	21.67	0.978
0.047	CuO nanofluid	0.676	20.62	0.991
	Water	0.634	21.37	0.972

Table 5.12 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for different mass flow rates(CuO particle size: 40 nm, Concentration: 0.4vol%)

Mass flow rate (kg/s)	Working fluid	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
0.033	CuO nanofluid	0.644	18.4	0.977
	Water	0.606	20.96	0.963
0.047	CuO nanofluid	0.661	18.53	0.976
	Water	0.620	18.98	0.956

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

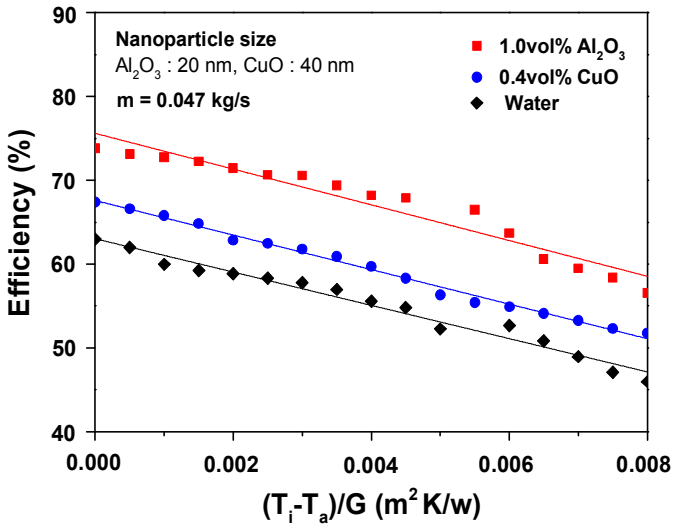
제 3 절 Al_2O_3와 CuO 나노유체, 그리고 물을 적용한 태양열 집열기의 성능실험 결과 비교

Fig. 5.12은 본 실험에서 평판형과 U관형 태양열 집열기에 Al_2O_3와 CuO 나노유체, 그리고 물을 사용하였을 때 가장 성능이 우수한 효율곡선을 비교하여 보여주고 있다. Al_2O_3 나노유체를 사용한 경우, 나노입자의 크기가 20 nm이고 농도가 1.0vol%일 때 두 집열기 모두 가장 높은 효율을 보였다. 이 때 평판형 태양열 집열기의 최대효율은 73.8%, U관형 태양열 집열기의 최대효율은 72.4%로 나타났다. 이는 물을 사용한 평판형과 U관형 태양열 집열기보다 평균적으로 각각 17.6%과 17.9%씩 향상된 결과이다. CuO 나노유체를 사용한 경우, 나노입자의 크기가 40 nm이고 농도가 0.4vol%일 때 두 집열기 모두 가장 높은 효율을 보였으며, 평판형 태양열 집열기의 최대효율은 67.4%, U관형 태양열 집열기의 최대효율은 66.1%로 나타났다. 이는 물을 사용한 평판형과 U관형 태양열 집열기보다 각각 평균 7.29%와 7.27%씩 향상된 결과이다.

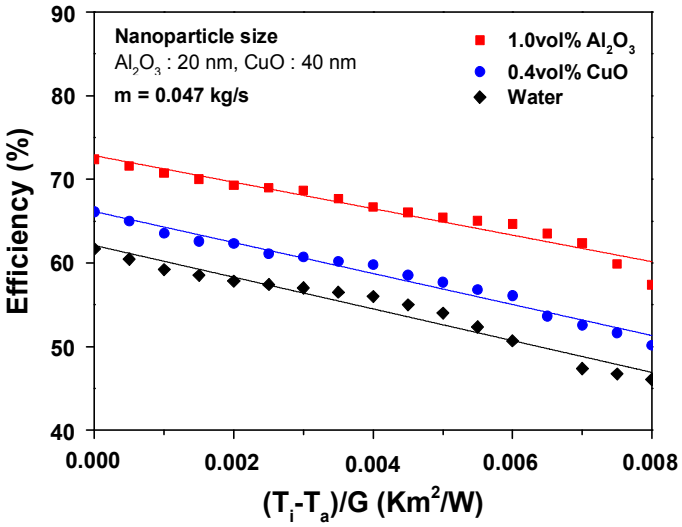
또한 평판형과 U관형 태양열 집열기에서 나노입자의 크기가 20 nm이고 농도가 1.0vol%인 Al_2O_3 나노유체를 사용하는 경우 나노입자의 크기가 40 nm이고 농도가 0.4vol%인 CuO 나노유체를 사용한 집열기 효율이 평균적으로 각각 11.4%와 11.7%씩 높았다. 이는 Al_2O_3 나노유체의 농도가 CuO 나노유체보다 약 2.5배 높으며 열전도도가 높아 열전달 성능이 우수함에 기인한다. 본 연구에서 CuO 나노유체도 Al_2O_3 나노유체와 동일한 농도 조건에서 실험을 진행하려 하였으나 CuO 나노입자의 밀도가 높아 Al_2O_3와 같은 높은 농도의 경우 시스템내에서 침전이 발생하여 실험을 진행하지 못하였다. 또한 Al_2O_3 나노입자의 크기가 상대적으로 작아 미세운동 강도가 증가하여 나노유체의 대류 현상을 현저하게 증가시키고 이에 열전달이 증가하게 된 것도 하나의 원인으로 파악된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Flat plate solar collector



(b) U-tube solar collector

Fig. 5.12 Comparison of efficiency in the solar collector using Al_2O_3 and CuO nanofluid and water

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 5.13 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector according to working fluid

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0vol%)	0.756	21.32	0.935
CuO nanofluid (40 nm, 0.4vol%)	0.676	20.62	0.992
Water	0.634	21.37	0.972

Table 5.14 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to working fluid

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0vol%)	0.728	15.85	0.944
CuO nanofluid (40 nm, 0.4vol%)	0.661	18.53	0.976
Water	0.620	18.98	0.956

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5장 결 론

본 논문에서는 평판형과 U관형 태양열 집열기에 Al_2O_3와 CuO 나노유체를 사용하여 다양한 농도와 나노입자의 크기, 질량유량에 관한 영향에 대하여 실험적으로 분석하였다. 추가적으로 Al_2O_3와 CuO 나노유체를 사용한 태양열 집열기의 효율 향상에 대하여 다양한 운전 조건에서 물을 사용한 태양열 집열기의 효율과 비교 분석하였다. 우선, 물성치 조사에서 태양열 집열기의 작동유체로 사용되는 나노유체의 열전도도는 농도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 반면 열전도도의 증가율은 농도가 증가함에 따라 감소함을 보였다. 또한 열전도도는 나노입자의 크기가 작을수록 증가하였다. 유체의 온도가 30°C일 때 입자 크기가 20 nm인 1.0vol% Al_2O_3 나노유체의 열전도비 향상율은 50 nm와 100 nm인 경우 보다 각각 1.54%와 2.43% 더 높았으며 0.3vol% 농도인 CuO 나노유체도 온도가 30°C에서 나노입자의 크기가 40 nm의 열전도비의 향상율은 80 nm인 경우에 비하여 0.49% 더 증가함을 확인하였다.

Al_2O_3와 CuO 나노유체를 사용한 태양열 집열기의 효율은 모든 작동조건에서 물을 이용한 태양열 집열기의 효율보다 높게 나타났다. Al_2O_3 나노유체를 사용한 경우 태양열 집열기의 효율이 최대인 T_i=T_a일 때 두 집열기 모두 나노유체의 농도가 1.0vol% 일 때 가장 높은 효율을 보였으며, 평판형 태양열 집열기의 최대효율은 73.8%, U관형 태양열 집열기의 최대효율은 72.4%로 나타났다. 작동유체로 물을 사용한 집열기와 비교하였을 때 Al_2O_3 나노유체를 적용한 평판형과 U관형 태양열 집열기의 효율은 평균 약 17.6%와 17.9%씩 향상된 결과를 보였다. 또한 평판형 태양열 집열기에서 나노유체의 농도가 1.0vol% 일 때, 1.5vol%과 0.5vol% Al_2O_3 나노유체를 사용했을 때 보다 각각 3.54%, 5.53% 향상되었고 U관형 태양열 집열기는 각각 6.04%, 8.77% 향상되었다. 또한 모든 운전조건에서 나노입자의 크기가 가장 작은 20 nm로 제작된 Al_2O_3 나노유체를 사용하였을 때 가장 높은 효율을 보였으며 평판형과 U관형 태양열 집열기에서 나노입자의 크기가 20 nm인 나노유체의 최대효율은 73.3%와 72.4%으로 이는 100 nm을 사용한 집열기의 효율보다 각각 평균 4.70%와 4.60% 향상됨을 보였다. 즉, 입자의 크기가 상대적으로 작은 나노유체는

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

열전도도가 우수하여 더 빠른 열전달을 발생시켜 태양열 집열기의 성능에 주요한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

CuO 나노유체를 사용한 경우 태양열 집열기의 효율이 최대인 T_i=T_a일 때 두 집열기 모두 나노유체의 농도가 0.4vol% 일 때 가장 높은 효율을 보였으며, 평판형 태양열 집열기의 최대효율은 67.4%, U관형 태양열 집열기의 최대효율은 66.1%로 나타났다. 물을 사용한 태양열 집열기와 비교하였을 때 CuO 나노유체를 적용한 평판형과 U관형 태양열 집열기의 효율보다 평균적으로 각각 7.29%와 7.27%씩 향상된 결과를 보였다. 또한 평판형 태양열 집열기에서 나노유체의 농도가 0.4vol% 일 때, 0.1vol%, 0.2vol% 그리고 0.3vol%인 Al_2O_3 나노유체를 사용했을 때 보다 평균적으로 각각 4.46%, 2.89%, 0.8%씩 향상되었고 U관형 태양열 집열기는 평균적으로 5.48%, 3.55%, 1.11%씩 향상되었다. 또한 모든 운전조건에서 나노입자의 크기가 가장 작은 40 nm로 제작된 CuO 나노유체를 사용하였을 때 80 nm의 크기를 가지는 CuO 나노유체에 대하여 가장 높은 효율을 보였다. 평판형과 U관형 태양열 집열기에서 나노입자의 크기가 40 nm인 나노유체의 최대 효율은 67.4%와 66.1%이다. 이는 80 nm을 사용한 집열기의 효율보다 평균적으로 각각 2.14%와 2.52% 향상됨을 보였다. 모든 조건에서 평판형 집열기의 $F_R U_L$ 값이 U관형 태양열 집열기보다 상대적으로 크게 나타났으며, 이는 U관형 태양열 집열기가 작동온도 조건에 고온에서 더 높은 성능을 갖는 것을 예측할 수 있다. 반면 U관형 태양열 집열기의 경우 $F_R U_L$이 평판형 집열기에 비하여 작기 때문에 넓은 운전범위에서 높은 성능을 유지할 수 있는 것으로 나타났다. 실험결과를 종합하여 볼 때 Al_2O_3와 CuO 나노유체가 사용되었을 때 태양열 집열기의 태양 에너지 흡수 성능은 물을 사용된 경우보다 우수했다.

또한 평판형과 U관형 태양열 집열기에서 나노입자의 크기가 20 nm이고 농도가 1.0vol%인 Al_2O_3 나노유체를 사용하는 경우 나노입자의 크기가 40 nm이고 농도가 0.4vol%인 CuO 나노유체를 사용한 집열기 효율이 평균적으로 각각 11.4%와 11.7% 정도 높게 나타났다. 이는 Al_2O_3 나노유체의 농도가 CuO 나노유체보다 약 2.5배 높으며 나노집자의 크기도 상대적으로 작아 열전도도가 높아 열전달 성능이 우수함에 기인한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

본 실험 결과를 종합적으로 검토해 보았을 때 태양 복사에너지 흡수를 향상시키고 태양열 집열기의 효율을 증가시키기 위해 나노입자는 기본 유체에 균일하게 분산되어야 한다. 나노유체는 기본유체와 비교하였을 때 높은 흡수 계수를 가지고 있으므로 우수한 분산 안정성을 가지는 나노유체는 태양 복사에너지 흡수성 유체로 적합하다. 태양열 집열기의 성능을 향상시키기 위해서는 나노유체의 농도를 알맞게 선택해야 한다. 그 이유는 높은 농도의 나노유체는 점성력을 증가시키고 열전달 성능을 감소시키며, 낮은 농도의 나노유체는 태양 복사에너지를 모두 흡수하지 못하기 때문이다. 또한 나노입자의 크기는 태양열 집열기의 성능 향상에 큰 영향을 준다. 나노입자의 크기가 작을수록 브라운 운동이 활발해지며 유효 열전도율이 증가하게 된다. 그리고 동일한 농도의 나노유체에서 나노입자의 수는 나노입자의 크기의 반비례한다. 이는 나노입자의 크기가 작을수록 나노유체 내의 입자 사이의 전체 접촉 면적이 증가하여 이 결과로 유효 열전도율이 증가하게 된다. 결론적으로 나노유체의 농도와 입자 크기는 태양열 집열기의 성능 향상에 중요한 영향을 미치는 변수 중에 하나이며, 기본유체인 물보다 태양 에너지 흡수력이 우수하여 효율 향상에 효과적임을 보였다. 따라서 분산 안정성이 확보된 상태에서 Al_2O_3와 CuO 나노유체의 사용은 태양열 집열기의 효율 향상에 도움이 될 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

REFERENCES

A. Indhuja, K.S. Suganthi, S. Manikandan, K.S. Rajan, Viscosity and thermal conductivity of dispersions of gum arabic capped MWCNT in water: Influence of MWCNT concentration and temperature. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 44 (2013) 474 - 479.

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.

A. Zamzamiana, O.S. Nasseri, A. Doosthoseinic, A. Joneidic, M. Pazoukia. Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al_2O_3/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow. Exp. Therm. Fluid Sci. 35 (2011) 495-502.

E. Natarajan, R. Sathish. Role of nanofluids in solar water heater. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2009. 10.1007/s00170-008-1876-8.

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 TiO_2/water nanofluid. Mod. Appl. Sci. 7 (10) (2013) 60 - 69.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

H. Tyagi, P. Phelan, R. Prasher. Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solar collector, J. Sol. Energy Eng. 131 (2009) 041004.

J.A. Duffie, W.A. Bechman, Solar engineering of thermal processes. New York, USA: Jhon Wiley & Sons; 1980.

J.H. Lee, K.S. Hwang, S.P. Jang, B.H. Lee, J.H. Kim, S.U. Choi. Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al_2O_3 nanoparticles. Int J Heat Mass Transfer 51 (2008) 2651 - 2656.

J.T. Kim, H.T. Ahn, H. Han, H.T. Kim, W. Chun. The performance simulation of all glass vacuum tubes with coaxial fluid conduit. Int. Communications in Heat and Mass Transfer. 2007; 34: 587-97.

L.J. Mu, Q.Z. Zhu, L.L. Si, Radiative properties of nanofluids and performance of a direct solar absorber using nanofluids, Proceedings of the ASME 2009 2nd Micro / Nanoscale Heat & Mass Transfer International Conference, MNHMT 2009-18402, pp. 549-553.

M.A. Ahmed, M.Z. Yusoff, K.C. Ng, N.H. Shuaib, Effect of corrugation profile on the thermal-hydraulic performance of corrugated channels using CuO-water nanofluid, Case Studies in Thermal Engineering 4 (2014) 65-75.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

M. Keshavarz, S. Razvarz, Experimental investigation of aluminum oxide nanofluid on heat pipe thermal performance, Int. Commun. Heat Mass. 39 (2012) 1444 - 1448.

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.

O. Mahian, A. Kianifar, A.Z. Sahin, S. Wongwises, Performance analysis of a minichannel-based solar collector using different nanofluids. Energy Conversion and Management 88 (2014) 129 - 138.

P.K. Nagarajan, J. Subramani, S. Suyambazhahan, Ravishankar Sathyamurthy. Nanofluids for solar collector applications: A Review. Energy Procedia 61 (2014) 2416-2434.

Q. Tian. Study on thermal efficiency and performance of U-tubular all-glass evacuated tube solar collector. Energy Engineering 2006, 6, 36 - 40.

Q. Tian. Thermal performance of the U-type evacuated glass tubular solar collector. Building Energy & Environment 2007;26(3):51-4.

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.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

S. Pil Jang, S.U.S. Choi, Effect of various parameters on nanofluid thermal conductivity, J. Heat Transfer 129 (2007) 617.

T. Otanicar, P.E. Phelan, R.S. Prasher, G. Rosengarten, R.A. Taylor, Nanofluid based direct absorption solar collector, J. Renew. Sust. Energy 2 (2010) 033102.

T. Yousefi, F. Veysi, E. Shojaeizadeh, S. Zinadini. An experimental investigation on the effect of Al_2O_3 - H_2O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors. Renew. Energy 39 (2012) 293 - 298.

T. Yousefi, F. Veysi, E. Shojaeizadeh, S. Zinadini. An experimental investigation on the effect of MWCNT - H_2O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collector. Exp. Therm. Fluid Sci. 39 (2012) 207 - 212.

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.

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. Kim, T. Seo, Thermal performances comparisons of the glass evacuated tube solar collectors with shapes of absorber tube. Renewable Energy 2007;32:772e95.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

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, J. Kim, H. Cho, Effects of thermal performance of enclosed-type evacuated U-tube solar collector with multi-walled carbon nanotube/water nanofluid, Renewable Energy. 83 (2015) 463-473.

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.

Z. Said, M.H. Sajid, M.A. Alim, R. Saidur, N.A. Rahim. Experimental investigation of the thermophysical properties of Al_2O_3-nanofluid and its effect on a flat plate solar collector. Int. Commun. Heat Mass Transf. 48 (2013) 99-107.

김지현, 방인철. 갈륨 나노 유체의 고속로 적용 타당성을 위한 실험 연구. UNIST AIRC. 2011. 03.

김효상. 학교건물의 태양열 냉난방시스템 성능 및 경제성 분석. 한양대학교. 2010

한승구 외 11인. 비중앙급전발전기 공급능력 산정에 관한 연구. 기초전력연구원 최종보고서. 2013. 11. 15 page.

Collection @ chosun