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]I804:24011-200000265592

2016년 8월
박사학위 논문

Al_2O_3 나노유체 적용 다양한 태양열 집열기의 성능 비교에 대한 연구

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 진 현

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Al_2O_3 나노유체 적용 다양한 태양열 집열기의 성능 비교에 대한 연구

Comparison Study on the efficiency of Various Solar Collectors using Al_2O_3 nanofluid

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 진 현

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Al_2O_3 나노유체 적용 다양한 태양열 집열기의 성능 비교에 대한 연구

지도교수 : 조 홍 현

이 논문을 공학박사 학위신청 논문으로 제출함

2016년 4월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 진 현

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

김진현의 박사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 오 동 욱 (인)

위 원 조선대학교 교 수 박 설 현 (인)

위 원 조선대학교 교 수 조 홍 현 (인)

위 원 호서대학교 교 수 박 차 식 (인)

위 원 고려대학교 교 수 이 호 성 (인)

2014년 6월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

Contents ····· i
Nomenclature ····· v
List of Figures ····· viii
List of Tables ····· xv
Abstract ····· xvii

제 1 장 서 론 ····· 1
1.1 연구배경 ····· 1
1.2 국내·외 연구동향 ····· 4
1.3 연구목적 ····· 9

제 2 장 태양열 시스템의 종류 및 구성 ····· 12
2.1 평판형 태양열 집열기 구조 ····· 22
2.2 U-tube형 태양열 집열기 구조 ····· 23
2.3 히트파이프형 태양열 집열기 구조 ····· 25

제 3 장 태양열 집열기 시스템 모델링 ····· 29
3.1 평판형 태양열 집열기 시스템 모델링 ····· 31
3.1.1 시스템 모델링 및 열효율 분석 ····· 31
3.2 U-tube형 태양열 집열기 시스템 모델링 ····· 35
3.2.1 시스템 모델링 및 열효율 분석 ····· 35

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.3 히트파이프형 태양열 집열기 시스템 모델링 ····· 42
3.3.1 시스템 모델링 및 열효율 분석 ····· 42
3.4 태양열 집열기의 효율 분석 ····· 48
3.5 나노유체 모델링 ····· 50

제 4 장 실험장치 및 방법 ····· 52
4.1 실험장치 ····· 52
4.1.1 온도측정 ····· 54
4.1.2 일사량측정 ····· 55
4.1.3 유량측정 ····· 56
4.1.4 축열탱크 ····· 57
4.1.5 데이터 수집장치 ····· 58
4.2 작동유체 ····· 59
4.2.1 산화알루미나(Al_2O_3) 나노유체 ····· 59
4.3 실험방법 및 조건 ····· 64
4.3.1 실험방법 ····· 64
4.3.2 실험조건 ····· 65

제 5 장 태양열 집열기의 성능 해석결과 및 고찰 ····· 69
5.1 평판형 태양열 집열기의 성능 해석결과 및 고찰 ····· 69
5.1.1 성능해석 모델의 검증결과 ····· 69
5.1.2 해석결과 및 고찰 ····· 72
5.2 U-tube형 태양열 집열기의 성능 해석결과 및 고찰 ····· 75

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5.2.1 성능해석 모델의 검증결과 ····· 75
5.2.2 해석결과 및 고찰 ····· 78
5.3 히트파이프형 태양열 집열기의 성능 해석결과 및 고찰 ····· 82
5.4 평판형, U-tube형 그리고 히트파이프형 태양열 집열기의 성능 해석결과의 비교 ····· 86

제 6 장 태양열 집열기의 성능 실험결과 및 고찰 ····· 91
6.1 평판형 태양열 집열기의 성능평가 결과 ····· 91
6.1.1 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) · 91
6.1.2 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) · 94
6.1.3 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) · 97
6.1.4 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 50 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) 100
6.1.5 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 100 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)103
6.1.6 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)106
6.1.7 나노유체 농도, 입자의 크기, 질량유량 변화에 따른 효율 고찰 ····· 109
6.2 U-tube형 태양열 집열기의 성능평가 결과 ····· 115
6.2.1 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) 115
6.2.2 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) 118
6.2.3 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) 121
6.2.4 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 50 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) 124
6.2.5 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 100 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)127
6.2.6 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)130
6.2.7 나노유체 농도, 입자의 크기, 질량유량 변화에 따른 효율 고찰 ····· 133

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6.3 평판형 태양열 집열기와 U-tube형 태양열 집열기의 성능비교 · 139

제 7 장 결 론 ····· 154

References ····· 157

Recommendation for future work ····· 163

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Nomenclatures

A	: area (m^2)
C_p	: heat capacity (J/kg · K)
D	: diameter (m)
F	: fin efficiency of straight fin (-)
F_a	: solar collector efficiency factor (-)
F_R	: heat removal factor (-)
G	: solar radiation (W/m^2)
h	: heat transfer coefficient (W/m^2K)
I	: absorbed solar radiation by absorber coating, (W/m^2)
k	: conductivity (W/K · m)
L	: length (m)
m	: flow rate (kg/s)
Nu	: Nusselt number (-)
Pr	: Prandtl number (-)
Q	: heat (W)
Q_L	: thermal loss (W)
Q_u	: net heat gained by the working fluid (W)
R	: thermal resistance (K/W)
Re	: Reynolds number (-)
r	: radius (m)
T	: temperature (K)
t	: thickness (m)
U	: heat loss coefficient (W/m^2K)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Greeks

η : efficiency (-)

ε : emissivity (-)

$\tau\ \alpha$: transmission absorbance coefficient (-)

ϕ : nanoparticles volume concentration (-)

Subscripts

a : ambient (-)

b : bond (-)

bf : base fluid (-)

bulk : bulk material (-)

c : absorber tube (-)

con : condenser (-)

com : component (-)

evap : evaporator (-)

edge : edge of the header tube (-)

f : fluid (-)

fu : fluid and U-tube wall (-)

g : glass tube (-)

ga : outer glass tube to the surroundings (-)

hp : heat pipe (-)

I : inlet, inside (-)

lv : liquid-vapor interfaces (-)

nf : nano fluid (-)

np : nano particle (-)

o : outlet (-)

p : pipe (-)

pgc : between the absorber tube and the glass tube (-)

pgd : through conductivity between the absorber tube and the glass

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

	tube (-)
s	: synthetic/solid particle (-)
t	: tube (-)
u	: useful (-)
v	: vapor (-)
w	: wick (-)

abbreviation

AC&R	: air conditioning and refrigeration
CPC	: compound parabolic collector
ESCHP	: evacuated solar collector of heat pipe
ESCU	: evacuated solar collector of U-tube
HVAC	: heat, ventilation and air conditioning
IEA	: international inergy igency
NVR	: nanofluid-based volumetric receiver
PTC	: prabilic though concentrator
SCFP	: solar collector of flat-plate
SEM	: scanning electron microscope

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

List of Figures

Fig. 1.1 World energy demand by region share outlook ····· 4
Fig. 2.1 Solar system configuration ····· 13
Fig. 2.2 Solar system components ····· 14
Fig. 2.3 Flat plate solar collector ····· 16
Fig. 2.4 Evacuated solar collector ····· 17
Fig. 2.5 Dish stirling system ····· 17
Fig. 2.6 Central receiver system ····· 18
Fig. 2.7 Parabilic trough collector ····· 18
Fig. 2.8 Various types of solar collectors ····· 19
Fig. 2.9 Applications of solar collector according to used temperature ····· 21
Fig. 2.10 Appearance of the flat plate solar collector ····· 22
Fig. 2.11 Structure of the flat plate solar collector ····· 23
Fig. 2.12 Appearance of the U-tube solar collector ····· 24
Fig. 2.13 Structure of the U-tube ····· 24
Fig. 2.14 System configuration of heat pipe solar collector ····· 26
Fig. 2.15 Cross-section of single heat pipe and heat flow ····· 27
Fig. 3.1 Construction and schematic of energy flow about flat plate solar collector ····· 32
Fig. 3.2 Optical loss of glass evacuated tube ····· 37
Fig. 3.3 Cross section of U-tube ····· 37
Fig. 3.4 Energy analyses on copper fin of U-tube Solar Collector ····· 38
Fig. 3.5 Construction and schematic of energy flow about heat pipe solar collector 43
Fig. 3.6 System configuration of heat pipe solar collector ····· 46
Fig. 4.1 Photograph of the experimental apparatus ····· 52
Fig. 4.2 Schematic diagram of solar collector test facility ····· 53
Fig. 4.3 Photograph of T-type thermocouple ····· 54
Fig. 4.4 Photograph of pyranometer ····· 55
Fig. 4.5 Photograph of flow meter ····· 56
Fig. 4.6 Photograph of storage tank ····· 57
Fig. 4.7 Photograph of data acquisition system ····· 58
Fig. 4.8 Photograph of Ultrasonic homogenizer ····· 60

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 4.9 Scanning Electron Microscope(SEM) of nanofluid ····· 61
Fig. 5.1 Comparison of the variation of efficiency in the flat plate solar collector for different nanofluid concentration(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 71
Fig. 5.2 Variation of efficiency in the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water according to concentration of nanofluid(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 72
Fig. 5.3 Variation of efficiency in the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water according to concentration of nanofluid(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 73
Fig. 5.4 Variation of efficiency in the flat plate solar collector for different nanofluid Concentration(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 74
Fig. 5.5 Comparison of the variation of efficiency in the U-tube solar collector for different nanofluid concentrations(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 77
Fig. 5.6 Variation of efficiency in the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water according to concentration of nanofluid(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 80
Fig. 5.7 Variation of efficiency in the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water according to concentration of nanofluid(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 80
Fig. 5.8 Variation of efficiency in the U-tube solar collector for different nanofluid concentration(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 81
Fig. 5.9 Variation of efficiency in the heat pipe solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water according to concentration of nanofluid(nanoparticle size: 20 nm, Mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 84
Fig. 5.10 Variation of efficiency in the heat pipe solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water according to concentration of nanofluid(nanoparticle size: 20 nm, Mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 84
Fig. 5.11 Variation of efficiency in the heat pipe solar collector for different nanofluid concentration(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 85
Fig. 5.12 Variation of efficiency in the flat solar collector and U-tube solar collect and heat pipe solar collector for different nanofluid Concentrations(nano

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

particle size: 20nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 87
Fig. 6.1 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and wate during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 92
Fig. 6.2 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 93
Fig. 6.3 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 93
Fig. 6.4 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 95
Fig. 6.5 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 96
Fig. 6.6 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 96
Fig. 6.7 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 98
Fig. 6.8 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 99
Fig. 6.9 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 99
Fig. 6.10 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 101
Fig. 6.11 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 102

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 6.12 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 102
Fig. 6.13 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 104
Fig. 6.14 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 105
Fig. 6.15 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 105
Fig. 6.16 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 107
Fig. 6.17 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 108
Fig. 6.18 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 108
Fig. 6.19 Variation of efficiency in the flat plate solar collector for different nanofluid concentration(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 110
Fig. 6.20 Variation of efficiency in the flat plate solar collector for different nanoparticle sizes(concentration: 1.0 vol%, mass flow rate: 0.047 kg/s) · 112
Fig. 6.21 Variation of efficiency in the flat plate solar collector for different mass flow rates(nano particle size: 20 nm, concentration: 1.0 vol%) ····· 114
Fig. 6.22 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 116
Fig. 6.23 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 117
Fig. 6.24 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 117
Fig. 6.25 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 119
Fig. 6.26 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 119
Fig. 6.27 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 120
Fig. 6.28 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 122
Fig. 6.29 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 123
Fig. 6.30 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 123
Fig. 6.31 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size : 50 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 125
Fig. 6.32 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size : 50 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 126
Fig. 6.33 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 126
Fig. 6.34 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 128
Fig. 6.35 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 100 nm,

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 129
Fig. 6.36 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s) ····· 129
Fig. 6.37 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 131
Fig. 6.38 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 132
Fig. 6.39 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 132
Fig. 6.40 Variation of efficiency in the U-tube solar collector for different nanofluid concentration(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 134
Fig. 6.41 Variation of efficiency in the U-tube solar collector for different nano particle sizes(concentration: 1.0 vol%, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 136
Fig. 6.42 Variation of efficiency in the U-tube solar collector for different mass flow rates(nanoparticle size: 20 nm, concentration: 1.0 vol%) ····· 137
Fig. 6.43 Thermal conductivity ratio as a function of temperature at different volume concentrations(nanoparticle size: 20 nm) ····· 139
Fig. 6.44 Thermal conductivity ratio as a function of nanoparticle size at different temperatures(concentration: 1.0 vol%) ····· 140
Fig. 6.45 Variations of temperature and solar radiation in the flat plate solar collector for 1 day(nanoparticle size: 20 nm, concentration: 0.5 vol%) ·· 143
Fig. 6.46 Variations of temperature and solar radiation in the U-tube solar collector for 1 day(nanoparticle size: 20 nm, concentration: 0.5 vol%) ····· 143
Fig. 6.47 Variation of efficiency in the flat plate solar collector and U-tube solar collector for different nanofluid concentration(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 145
Fig. 6.48 Variation of efficiency in the flat plate solar collector and U-tube solar collector for different nanoparticle sizes(concentration: 1.0 vol%, mass flow rate: 0.047 kg/s) ····· 147
Fig. 6.49 Variation of efficiency in the flat plate solar collector and U-tube solar

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

collector for different mass flow rates(nanoparticle size: 20 nm, concentration: 1.0 vol%) ····· 149

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

List of Tables

Table 2.1 Classification of solar collectors according to the heat collection ····· 15
Table 3.1 Collectors specifications ····· 49
Table 4.1 Properties of base fluid and nanoparticle ····· 51
Table 4.2 Specification of thermocouple ····· 54
Table 4.3 Specification of pyranometer ····· 55
Table 4.4 Specification of flow meter ····· 56
Table 4.5 Specification of storage tank ····· 57
Table 4.6 Specification of data acquisition system ····· 58
Table 4.7 Specification of Ultrasonic homogenizer ····· 61
Table 4.8 Experiment at condition ····· 65
Table 5.1 Comparison on the Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for Al_2O_3 nanofluid and water(m= 0.047 kg/s) ····· 71
Table 5.2 Comparison on the Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for Al_2O_3 nanofluid and water(m= 0.047 kg/s) ····· 77
Table 5.3 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for different concentration(m= 0.047 kg/s) ····· 90
Table 5.4 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for different concentration(m= 0.047 kg/s) ····· 90
Table 5.5 Parameters of efficiency in the heat-pipe solar collector for different concentration(m= 0.047 kg/s) ····· 90
Table 6.1 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for Al_2O_3 nano fluid and water ····· 110
Table 6.2 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector according to nano particle size ····· 112
Table 6.3 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for different mass flow rates (nano particle size: 20 nm, concentration: 1.0 vol%) ····· 114
Table 6.4 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for Al_2O_3 nanofluid and water ····· 135
Table 6.5 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to nano particle size ····· 136
Table 6.6 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for different mass

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

flow rates (nanoparticle size: 20 nm, concentration: 1.0 vol%) ····· 138
Table 6.7 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for Al_2O_3 nano fluid and water ····· 151
Table 6.8 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector according to nano particle size ····· 151
Table 6.9 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for different mass flow rates (nanoparticle size: 20 nm, concentration: 1.0 vol%) ····· 151
Table 6.10 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for Al_2O_3 nano fluid and water ····· 153
Table 6.11 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to nano particle size ····· 153
Table 6.12 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for different mass flow rates (nanoparticle size: 20 nm, concentration: 1.0 vol%) ····· 153

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Comparison Study on the efficiency of Various Solar Collectors using Al_2O_3 nanofluid

Jin-hyun Kim
Advisor : Prof. Cho, Hong-hyun
Department of Mechanical Engineering,
Graduate School of Chosun University

The study on performance characteristics of a solar collector has been carried out in various ways. The analytical models for a flat plate type, an U-tube and a heat pipe solar collector were developed and performance of these solar collectors were compared and analyzed. Besides, performance of solar collectors; the flat plate and U-tube solar collector, was investigated and compared experimentally under a wide range of operating conditions. In the experiment, the mass flow rate of the working fluid used in the solar collector was fixed at 0.033 kg/s and 0.047 kg/s respectively. In addition, the concentration of nanofluid was changed to 0.5 vol%, 1.0 vol%, and 1.5 vol%, and nanoparticle size was varied to 20, 50, and 100 nm.

As experimental results, the efficiency of the U-tube solar collector was the maximum value as 65.4% when the concentration of nanofluid was 1.0 vol%. At the same condition, the highest efficiency of the flat plate solar collector was

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

67.9% with the nanofluid concentration of 1.5 vol%. The instant maximum efficiency of the flat plate solar collector was about 70% when the solar radiation was high. When nanofluid and water were applied to the solar collector, the collector efficiency of the flat plate solar collector was enhanced by 4.6%~5%.

As theoretical results, the efficiency of the flat plate solar collector was 9.5% higher than that of the U-tube solar collector. The heat absorbed parameter of the flat plate solar collector ($F_R(\tau\alpha)$) was 0.659 which was highest one in case of 1.5 vol% and it was the lowest one in case of 0.5 vol%. When the heat absorbed parameter was the maximum and the heat loss parameter ($F_R U_L$) was 6.04.

In the experiment, the heat absorbed parameter ($F_R(\tau\alpha)$) of the flat plate solar collector was 0.774 which was the highest one in case of 1.5 vol%, and heat loss parameter ($F_R U_L$) was 20.309. When water was used to the solar collector, the heat absorbed parameter ($F_R(\tau\alpha)$) in theoretical and experimental results was the lowest ones which was 0.533 and 0.615, respectively.

The heat absorbed parameter of U-tube solar collector in the theoretical result was 0.565 which was the highest one in case of 1.5 vol%, and it was 0.558 which was the lowest one in case of 0.5 vol%. At these concentrations, the heat loss parameter was 4.83 and 4.82, respectively. In the experimental result, the heat gain parameter of the U-tube solar collector was 0.733 in case of 1.0 vol% and heat loss parameter was 17.69. In the theoretical result, the heat gain parameter of the U-tube solar collector was 0.537 which was the lowest one when the working fluid was water. Same result was shown in the experimental result.

In both of theoretical and experimental results in the flat plate and U-tube solar collectors, the heat absorbed parameter of the solar collector using nanofluid was higher than 2.79%~17.29% that using water. By therefore, the thermal performance of the solar collector using nanofluid was superior to that using water.

Normally, the efficiency of the solar collector increases with an increase of the heat gain parameter and with a decrease of the heat loss parameter. In the

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

theoretical result of the the flat plate and U-tube solar collector, the best efficiency was showed in the nanofluid concentration of 1.5 vol%. However, in the experimental result for both two solar collectors, the best performance was showed in the nanofluid concentration of 1.0 vol% and 1.5 vol%. Besides, the efficiency of the flat plate solar collector was higher than that of U-tube solar collector. When the Al_2O_3 nanofluid was used to the solar collector as the working fluid, the efficiency of the solar collector was superior to that using water. Therefore, Al_2O_3 nanofluid is enough to be used as the working fluid in the solar collector, and it can be expected to improve the efficiency of solar collector.

From the results of this study, the performance of the solar collector system using nanofluid is improved because the efficiency of the solar collector has significant impact on system performance. The use of binary nanofluids like Al_2O_3 nanofluid is recommended in the solar collector system because the performance of the solar collector system can improve when it uses as the working fluid in the system.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

20세기 이후로 온실가스 배출이 지속적인 증가로 인하여 지구온난화가 가속화 되고 있다. 따라서 국제사회는 온실가스 배출에 대한 여러가지 제도를 내놓고 있는 실정이다. 대한민국처럼 에너지 자원이 부족한 나라에서는 에너지 사용의 효율성을 높이고 에너지 사용 절검을 생활화 하는 것이 중요하다. 그중 하나로 우리나라는 온실가스를 뿜어내는 업체들에 매년 배출할 수 있는 할당량을 부여해 남거나 부족한 배출량을 사고팔 수 있도록 하는 온실가스 배출권 거래제를 2015년 1월 12일부터 시행하고 있다. 이런 제도 이외에도 화석에너지의 사용은 환경오염과 지구온난화를 초래하기 때문에 자연에너지나 청정에너지원의 개발이 시급하다.

2014년 세계의 신재생에너지 시장은 사상 첫 100 GW를 돌파한 이후 성장세가 더욱더 가파르게 증가하였고, 2015년에는 전년대비 29% 증가한 133 GW를 기록하였으며, 누적기준 전 세계 신재생에너지 설치량은 800 GW를 넘어서고 있다. 파리 기후협약 이후 선진국에 국한되어 있는 신재생에너지 수요가 개도국으로 확산되는 계기가 될 것으로 보여, 신재생에너지 시장의 성장세가 상당 기간 지속될 것으로 전망된다. 2015년 저유가 상황으로 신재생에너지 투자가 위축될 것이라는 우려가 많았으나, 저유가와 상관없이 세계 신재생에너지 산업에 대한 투자는 순항중이며, 2015년 세계 신재생에너지 투자액은 3,300억 달러를 넘어서 사상 최고치를 기록했다.

2015년은 1850~1900년 평균 온도보다 1.02℃ 상승해 지구 온난화에 따른 재앙의 관문으로 여겨지는 '지구 기온 2℃ 상승'의 절반에 이르러 지구온난화 방지대책이 시급한 상황이다. 2℃까지 상승을 막기 위해서는 2050년까지 전 세계 온실가스 배출량을 2010년 배출량 대비 40~70%를 감축해야 하며, 2030년까지 온실가스 배출량은 약 30~50 $GtCO^2$ eq/년 수준에서 유지가 필요하다. 현 추세로 온실가스를 배출할 경우 21세기 말까지 약 3.7℃ 더 오를 것으로 예상되어 지구를 살리기 위한 대책 마련이 시급한 상황이다. 2020년 이후 새로운 신 기후 변화체제 출범에 대한 합의가 2015년 12월 파리에서 도출되었으며, 주요 합의 내용을 살펴보면 기존 목표

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

였던 지구의 평균기온 상승을 산업화 이전 대비 2℃에서 1.5℃ 이하로 제한하기로 합의하였다(한국수출입은행, 2016). 이렇듯 지구온난화 문제는 대두가 되고 있으며, 환경문제 등을 해결할 수 있는 대표적인 것으로 태양열 에너지, 풍력에너지 등이 있다. 태양열 에너지는 신재생 에너지원 중에 가장 친환경적인 에너지 중에 하나이다.

지구가 태양으로부터 받는 에너지는 상상할 수 없을 정도로 막대한 양이며 태양이 존재하는 한 50억년 이상은 사용가능하다고 여러 연구에서 밝힌 바 있다. 지구의 대기권에서 반사되는 에너지양은 2.4×10^{15} kcal/min, 또는 1.7×10^{14} kW로 이중 약 35%는 대기권에서 반사되고 18%는 대기권에서 흡수되고 바람을 일으키며 47%가 지구에 도달한다. 국내 연평균 1일 수평면 전일사량은 3,079 kcal/m^2 로 그 결과 우리나라 면적의 태양 에너지 자원의 부존량은 1.11×10^{17} kcal/Yr 로 연간 111억 toe의 석유에너지에 해당된다. 태양에너지 자원의 연간 가용량은 국토면적 중 임야를 임야와 하천면적 등을 제외한 사람이 살 수 있는 거주지 면적(30,870 km^2)으로 계산하여 31.5%(35억 toe) 규모로 추정되고 계절별로는 연중 여름철과 봄철의 태양열 조건이 가장 좋으며, 가을철과 겨울철은 연 평균치에도 훨씬 못 미치는 낮은 수준이다. 연평균치에 대한 계절별 태양열 조건은 봄과 여름철에는 각각 25%와 20%로 높았으며 상대적으로 가을과 겨울철은 12%와 33%정도 낮게 나타났다. 우리나라의 태양열 자원에 대한 월별 수평면 전일사량을 1년 기준으로 볼 때 태양열 조건이 가장 좋은 달은 5월로 하루 5.05 kWh/m^2이고 가장 낮은 달은 12월로 하루에 2.03 kWh/m^2 로 나타났다. 봄철과 가을철의 태양열 조건은 대체로 내륙지역보다 해안지역이 좋고 여름철은 전국이 고른 분포를 보이지만 겨울철은 남해 지역의 일사량이 다른 지역보다 상대적으로 높게 나타났다.

일반적인 태양열 이용시스템은 집열부, 축열부, 이용부로 구성되어 지는데 태양열 집열기는 태양열 에너지를 집열하는 가장 중요한 장치이다. 집열기의 종류에는 형상에 따라 평판형 집열기, U-tube형 집열기, 히트파이프형 집열기 등이 있다. 특히 국내에서는 평판형과 U-tube형 태양열 집열기의 보급이 가장 많이 이루어지고 있다. 하지만 U-tube형 태양열 집열기는 대부분 수입에 의존하고 있어서 우리나라 실정에 맞는 집열기 개발에 많은 연구들이 이루어지고 있다. 또한, 태양열 집열기는 태양 복사에너지를 열로 전환시켜주며 작동매체에 열을 전달하여 준다. 하지만

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

태양열 집열기의 효율은 한계가 있어 태양열 집열기 작동유체에 나노유체를 적용하여 효율을 향상시키는 연구도 활발히 진행되고 있다. 나노유체의 열전달 상승 원인으로는 유체 내에서 입자의 브라운 운동과 입자와 유체사이의 경계에 형성되는 분자 층의 효과 그리고 나노입자내의 특이한 열전도성, 나노입자들 사이의 가상적 응집 등이다.

나노유체는 1995년 처음 개념이 전해졌으며 모유체에 100 nm 이하의 나노입자가 분산되어 있는 유체로 정의할 수 있다(Choi, 1995). 나노유체는 뛰어난 분산특성과 열적 물성치로 인해 열전달 분야에서 많은 주목을 받고 있다. 최근 다양한 나노입자를 이용하여 제조된 나노유체의 열전달 특성과 열전도도에 많은 연구가 진행되었다. 특히, 다양한 태양열 집열기에 나노유체를 적용하여 그에 따른 열효율에 대한 구조 해석과 실험을 통한 성능 특성 비교와 검증을 통해 청정에너지인 태양열 에너지의 이용기술을 확대하는 등의 연구가 필요하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.2 국내 · 외 연구동향

국내에서는 집열기 흡수판과 흡수율과 투과 체의 투과율 향상, 최적운전을 위한 제어기술, 다양한 방법의 축열조 소형화 기술 등이 개발 또는 연구 중에 있다. Fig. 1.1에 나타낸 것처럼 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)에 따르면, '40년 세계 에너지수요는 신규 에너지정책을 시행할 경우 2012년 대비 37% 증가한 182.9억 toe에 이를 것으로 전망하였다. 이는 현재 에너지정책을 유지할 경우의 에너지수요인 200.4억 toe보다 8.7% 절감된 수치로 지속적으로 경제성장과 생활수준이 향상되고 있는 중국, 인도 및 중동국가들이 향후 세계 에너지수요 증가분의 60%를 차지할 것이라 전망하였다.

석탄, 석유, LNG 등 전통 화석연료는 2040년에도 여전히 주력 에너지로 사용될 예정이며(74%), 신·재생에너지는 정책적 인센티브 및 기술 발전, 화석연료 가격 상승 등

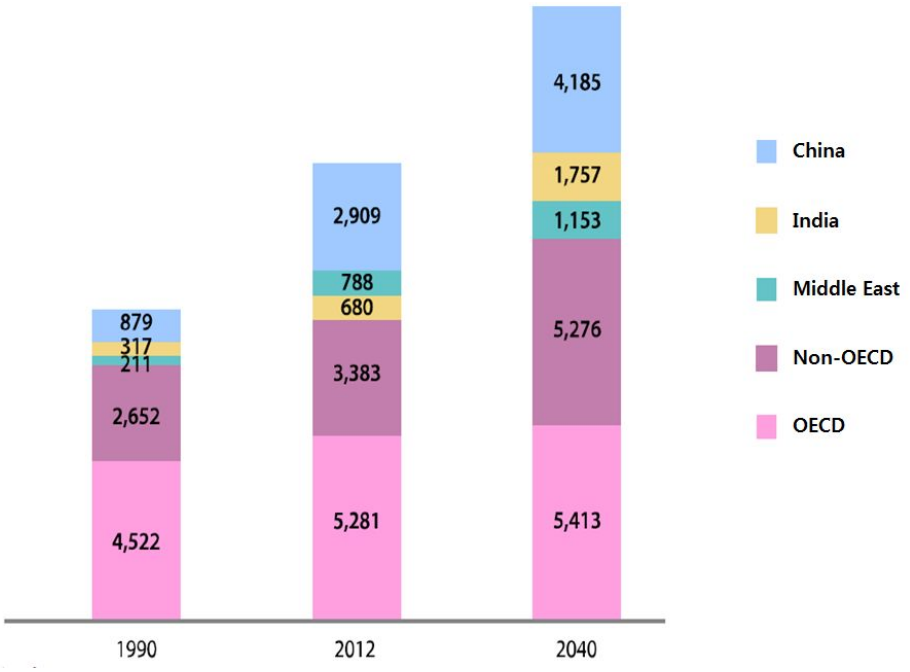


Fig. 1.1 World energy demand by region share outlook(Unit : Million toe)
Source : World Energy Outlook 2014 New Policies scenario(IEA)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

으로 공급비중이 19%까지 확대 될 전망이다. 전 세계 최종 에너지 소비의 경우, 2012년 대비 약 40% 증가하여 125억 toe에 달할 것으로 전망되었다.

해외 주요 선진국의 태양열 집열기 연간 생산량은 중국이 저렴한 인건비 등의 이유로 가장 많은 생산량을 보이고 있으며 그 뒤를 그리스, 독일, 오스트리아, 미국 네덜란드 등이 생산하고 있다. 저온용 태양열 집열기는 세계 각국에서 생산하고 보급하고 있는데 특히, 미국, 일본과 호주 등에서 많이 보급하고 있다. 중·고온용 태양열 집열기는 미국과 일본에서 주로 생산하고 있다. 특히 미국은 고온용 태양열 집열기 보급에도 큰 관심을 보이고 있으며, 태양열 발전기술을 저가화하여 2020년에는 발전단가를 5 cent/kwh로 하여 2천만 MW를 보급 추진 중에 있다. 미국의 태양열 발전단가를 2020년까지 20,000 MW 발전보급을 목표로 진행 중이다. 발전단가는 kwh 당 cent 기준으로 2020년까지 5 cent 까지 낮출 계획이다. 국외의 집열 및 축열기술은 대부분의 기술이 상용화 수준에 도달하였고 대량생산에 의한 시스템의 저가화와 신뢰성이 확보되어 있다. 태양에너지는 무궁무진하고 친환경적이라는 점만 감안한다면 다른 에너지원에 비해 가장 매력이 있다. 하지만 태양에너지를 전기에너지로 변환하여 필요할 때 쓸 수 있도록 저장하는 등의 기술은 쉽지만은 않다. 하여 해외 주요 태양열 선진국들은 에너지 저장을 위한 연구에 최선을 다하고 있는 실정이다.

태양열 집열기 성능 평가에 대한 국내 연구를 보면 Kim et al.(2004)은 수치해석을 바탕으로 흡열부의 형상 변화 및 입사각 변화에 따른 진공관형 집열기의 성능을 비교분석하였다. 그 결과 집열기 내부 형상 변화에 따라서 입사각의 변화에 따른 집열기의 성능 변화 특성을 얻었다. Ju et al.(2007)은 집열기 설치각도가 20°, 40°, 60° 일 때 작동유체(물, 에탄올, MA)에 따른 단일진공관형 집열기의 열성능 연구를 수행하여 작동유체로 MA를 사용한 집열기가 구리와의 화학반응이 없고 사용 온도 범위가 넓어서 진공관형 집열기의 작동유체로 적합함을 확인하였다.

Oh et al.(2008)은 비유리식(No-glass) 진광관형 태양열 집열기 개발을 통한 집열기의 내구성 향상에 대한 연구를 수행하여 유리식과는 달리 비유리식의 특성상 진공도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

유지를 위해 별도의 배기장치가 필요하며 진공관의 진공도가 목적 진공도까지 유지된다면 비유리식 진공관형 태양열 집열기 개발에 큰 기여를 할 것으로 기대하며 진공관 내부의 고진공을 유지할 수 있는 기술 개발이 필요함을 확인하였다. Seo et al.(2005)은 이중진공관형 태양열 집열기 설계 기초자료 확보를 위한 진공관형 태양열 집열기 흡수관의 형상에 따른 성능비교 연구를 통해 집열관의 관과 관 사이에 Plate를 넣은 형상이 다른 집열관에 비해 높은 성능을 보이며, Fin-tube, Plate-tube와 같은 형상에서 직경 증가를 통해 보다 높은 열 흡수를 할 수 있다는 것을 확인하였다.

Choi et al.(2005)은 이중진공관형 태양열 집열기의 U-tube를 용접, U-tube에 휜을 부착한 형상에 따른 집열기 성능에 관한 비교 연구를 통해 U-tube 용접시 유량이 적은 경우에는 효율이 감소되나 유량이 큰 경우에는 다른 형상의 집열기보다 높은 효율을 나타내며, U-tube에 휜을 부착한 형상의 경우 집열 면적 증가로 인해 집열기 성능이 높아짐을 확인하였다.

Otanicar et al.(2010)는 흑연 나노입자(D= 30 nm, Φ= 0.1%), 은 나노입자(D= 20/40 nm, Φ= 0.25%), 탄소나노튜브(D= 6-20 nm, LCNT= 1-5 μm, Φ= 0.1%)를 포함한 다양한 물-나노유체를 사용하여 소규모 태양열 집열기에 대한 실험과 수치적인 연구를 수행하였다. 연구 결과, 나노유체의 NVR(nanofluid-based volumetric receiver)의 효율은 순수 물을 적용한 소규모 태양열 집열기보다 효율이 높음을 확인하였다.

Sarawut and Tanongkiat(2011)는 물을 적용한 집열기보다 은나노유체를 적용한 태양열 집열기의 열성능이 향상되었으며, 특히 높은 입구온도에서 성능차이가 크게 나타나는 것을 확인하였다. Yousefi et al.(2012)는 첨가제로써 Triton X-100으로 평판형 태양열 집열기의 효율에서 MWCNT/water 나노유체의 PH 변화에 대한 영향을 조사하였으며 또 다른 연구에서 0.2 wt%에서 0.4 wt%의 질량분율과 0.0167 ~ 0.05 kg/s의 MWCNT/water 나노유체의 유량을 변화시킴으로써 평판형 집열기의 효율을 측정하였다.

Ali et al.(2014)은 흡수매체로써 CuO/water 나노유체를 이용한 태양열 집열기의 열

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

적 성능향상을 조사하였다. 체적분율은 40 nm의 입자 크기와 0.4%로 설정하였다. 그 결과 CuO/water 나노유체를 사용한 집열기의 효율은 물을 이용한 집열기보다 16.7% 향상됨을 입증하였으며 Faizal et al.(2015)은 SiO_2/water 나노유체를 사용하여 태양열 집열기의 성능분석에 대한 실험적인 연구를 수행하였다. 그 결과 태양열 집열기의 효율은 SiO_2 나노입자의 체적분율 0.2%를 사용함으로써 23.5% 증가함을 확인하였다.

Ji et al.(2002)은 진공유리관 집열기에 히트파이프를 적용한 형태와 U-tube형을 적용한 형태의 집열기 성능을 평판형 태양열 집열기와 비교실험을 통해 히트파이프형 진공관 집열기가 평판형 집열기와 U-tube형 집열기에 비해 집열 온도는 다소 떨어지지만 축열 성능은 높은 결과를 얻었다. 또한 히트파이프형 진공관 집열기는 일사량이 낮은 기상 조건에서도 충분한 열량을 획득 할 수 있다는 것을 확인하였다.

Choi et al.(2005)은 U-tube형 태양열 집열기의 유량변화와 최적형상설계 연구를 통해 집열기 형상이 집열기 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 유량에 따른 효율 변화를 분석하였다. 유량이 적은 경우 출구온도 및 흡열관 평균온도가 높고 효율이 크게 나오지만, 유량을 증가시키면 효율이 적어진다는 결과를 얻었으며, Hyun et al.(2003)은 단일 진공관식 태양열 집열기와 이중 진공관식 태양열 집열기의 열성능 분석 연구를 통해 최적의 운전 조건은 시스템 성능을 극대화하며 이는 집열기의 구조적 특성에 따라 다르게 나타남을 확인하였다.

나노유체는 기존의 물이나 에틸렌글리콜과 같은 열전달용 작동 유체에 나노크기의 금속 혹은 비금속 입자를 분산시켜 만든 유체인데 Al_2O_3 나노유체를 적용한 태양열 집열기의 기존 연구를 살펴보면, Wang et al.(1999)은 28 nm사이즈의 입자를 가지고 단성분인 증류수에 3vol.% 로 분산시켜 12% 열전도도 향상결과를 가져 왔다.

Wen and Ding(2004)은 층류에서 직경 10 mm, 길이 800 mm인 튜브에서 27-56 nm 사이즈의 Al_2O_3 입자의 크기 증가에 따른 Nu수의 증가를 분석하였다. S.Zwinali Heris et al.(2006)은 Al_2O_3 20 nm 입자의 크기를 이용하여 길이 1 m, 직경 32 mm인 원형관에서 입자의 농도 증가에 따른 열전달 계수의 향상 연구를 분석하였다. Yousefi et

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

al.(2012)은 0.2 wt%와 0.4 wt% 조건에서 Al_2O_3 나노유체를 사용하여 평판형 태양열 집열기의 효율을 실험적으로 수행하였으며, 0.2 wt% Al_2O_3-water 나노유체일 때 효율이 28.3%로 가장 크게 향상되었음을 보였다. Otanicar et al.(2010)은 마이크로 태양열 집열기의 효율에 대하여 다양한 나노유체에 따른 효과를 연구하였으며, 그 결과 태양열 집열기의 효율을 5% 정도 향상시켰다.

현재 태양열 집열기의 집열 효율을 증가시키기 위해 집열기의 구조, 태양열 집열방식, 태양광의 반사율, 유리면의 표면처리, 나노유체 적용 등의 방법 등에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 그러나 기존 제품에 대한 나노유체의 적용 연구는 아직 미흡한 편이며 이에 본 연구에서는 해석을 통하여 평판형과 U-tube형 그리고 히트파이프형 집열기에 대한 성능예측과 실험을 통하여 평판형과 U-tube형 태양열 집열기의 나노유체의 농도에 따른 효율을 평가하고 비교하고자 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.3 연구 목적

화석연료를 대체할 에너지원 중 태양열에너지는 지속적인 사용 가능한 양과 자연 친화적이고 안전하다는 장점을 가지고 있기 때문에 태양에너지의 사용기기에 대한 고효율화를 위한 노력은 계속되고 있다. 특히 태양에너지의 이용은 냉난방 및 급탕 등 다양한 분야에 적용되고 있으며 이들 대부분은 태양에너지를 받아들이고 열을 흡수하는 집열기를 필요로 한다. 집열기는 유용한 태양에너지를 흡수하기 위한 가장 중요한 요소이다. 그중 평판형 집열기는 구조가 간단하고 가격이 저렴하여 가장 많이 사용되어지고 있지만 집열기의 효율을 향상시키는데 한계를 가지고 있고, U-tube형 집열기는 유체에 열을 직접적으로 전달하는 방식으로 효율을 20% 이상 증가하는 장점이 있지만 환경이나 열에 의해 진공관이 파손되는 등의 문제는 해결해야 할 과제 중 하나이다. 히트파이프형 태양열 집열기는 진공관 및 히트파이프가 고온에 노출될 경우 팽창되어 파손되는 문제점이 발생하고 있다. 또한 물이나 thermal-oil 같이 기존 집열기에서 사용되던 열교환 작동유체들은 열 수송특성은 좋지만 태양열 흡수 특성이 매우 낮기 때문에 흡수율을 높이기 위한 첨가물이 필요하다.

기존 연구자들은 중 · 저온 영역에서 검은색의 India Ink를 사용하였고, 고온 영역에서는 Micro Carbon 입자를 사용하여 광학적 흡수특성을 높이고자 노력하였다. 하지만 India Ink 와 같은 유기잉크의 경우 고온에서 빛과 열에 의해 쉽게 열화(degradation)되어 고온에서 적합하지 못하다는 단점을 가지고 있다. 또한, Micro 크기의 Carbon 입자의 경우 작동유체에 안정적으로 분산이 되지 못하고 쉽게 가라앉아 펌프를 막거나(clogging) 파이프에 축적되어 (fouling effect) 요구되는 펌프의 소요 동력을 높이는 단점을 가지고 있었다. 이에 다양한 형태의 태양열 집열기의 해석모델을 개발하고 다른 형태의 나노유체를 적용한 새로운 형태의 태영열 집열기의 연구가 필요하다.

히트파이프는 난방용으로 개발되어 사용되었으나 태양열 집열기로는 집열면적과 태양흡수 코팅 등이 반드시 필요하며 난방용 시스템과 반대의 기능을 갖추어야 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

특히 파이프 내의 열매체는 가열체에 의해 하부에서 상부로 작동하기 때문에 하부에 비등점(보통 30℃)이상의 기초열원이 필요하므로 구조적으로 최적의 설계가 필요하다. 기존의 시스템에 비하여 집열 면적을 넓게 해주어야 하고 열전도성이 좋은 재질 선정과 규격 등이 선정되어야 하며 성형 등의 최적형태가 개발되어야 한다. 평판형과 U-tube형 집열기 역시 효율의 향상에 한계를 가지고 있기 때문에 이를 극복하기 위한 방법으로 3가지 형태의 태양열 집열기를 모델링하여 최적 설계를 위한 기초데이터를 확보하여야 하고 그 비교 Data를 토대로 새로운 형태의 집열기에 대한 연구가 필요한 실정이다.

최근 나노기술의 발달과 함께 나노유체에 대한 연구가 활발히 진행되면서, 나노유체를 적용하여 집열기의 성능을 극대화 하려는 연구가 주목받고 있다. 기존 집열기에서 사용되던 열교환 작동유체들은 열 수송특성은 좋지만 태양열 흡수 특성이 매우 낮기 때문에 흡수율을 높이기 위한 다양한 첨가물이 필요하며 이를 적용하였을 때 나타나는 여러 가지 현상과 효율에 대한 연구가 요구되고 있다. 이중 Al_2O_3 나노유체를 적용할 경우 나노유체의 열전달 증가와 열 및 물질 전달특성으로 인하여 성능 및 효율 등에 상당한 영향을 끼치는 것으로 전해지지만, 최근 사용량이 증가하고 있는 평판형 태양열 집열기와 U-tube형 태양열 집열기에 직접 적용하여 성능특성에 대한 비교를 한 연구는 시간과 날씨의 제약으로 매우 미비한 편이다. 작동유체로 Al_2O_3 나노유체를 사용했을 경우 물질전달이 촉진되어 시스템의 성능이 향상될 것으로 기대되지만 그에 대한 실험적 연구는 매우 제한적이기 때문에 이를 극복하고 성능향상에 대한 기초적인 연구가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 산화알루미나 나노입자의 크기와 농도, 그리고 작동유체의 유량변화에 따른 평판형 집열기, U-tube형 집열기와 히트파이프형 집열기의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 각각의 집열기 형태에 대한 해석적 모델을 개발하였으며 이를 통하여 다양한 운전조건에서의 집열기의 효율을 비교 분석하였다. 또한 태양열 집열기의 성능을 평가하기 위하여 평판형과 U-tube형 태양열 집열기의 성능평가 실험장치를 설계 및 제작하여 다양한 조건에서 실험을 실시하였다. 그리고 실험을 통

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

하여 기존 평판형 태양열 집열기와 U-tube형 태양열 집열기의 성능을 평가하고 나노유체를 적용하여 여러 가지 운전조건에 따른 성능향상 정도를 고찰하였다. 또한 각각의 태양열 집열기에 나노유체를 적용하였을 때와 기본유체인 물을 적용하였을 때의 성능특성을 비교하여 고찰하고 다양한 조건의 나노유체를 적용하여 성능의 비교를 통해 최적의 운전조건에 대한 연구를 진행하였다. 본 연구에서 진행한 나노유체의 다양한 태양열 집열기의 해석모델 검증과 성능평가를 통하여 최적의 나노유체를 적용한 태양열 집열기의 적용 가능성과 새로운 형태의 집열기 개발에 기초데이터를 제공하고자 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2장 태양열 시스템의 종류 및 구성

태양열 발전 시스템의 종류는 발전방식에 따라 크게 세 가지로 중앙 집중형 시스템(central receiver solar themal electric power system), 분산형 시스템(distributed solar thermal lectric power system), 독립형 시스템(stand-alone system) 등으로 구분한다. 중앙 집중형 시스템은 태양 추적 장치(heliostat)라 불리는 거대한 태양 추적 반사경에서 반사된 태양광을 중앙에 위치한 탑의 한 점에 모아 고열을 얻고, 이 고열로 열교환기 등을 이용하여 고압 수증기를 발생시켜 전기를 얻는 방식이다. 집광비는 1000 정도이며 증기 터빈은 약 600℃로 운전된다. 분산형 시스템은 선초점형이나 접시형 등 집광 집열기를 이용한 단위 집광 집열 시스템을 다수 분산 배치하여 배관 내를 흐르는 열매체를 가열시키고, 이를 스털링(stirling) 엔진과 같은 열기관을 구동시켜 발전하는 방식이다. 독립형 시스템은 앞에서 언급한 집광 집열기를 이용하는 5~25 kWh 급의 시스템으로서 전력 계통으로부터 독립된 소규모 전원으로 이용되는 것을 말한다. 또한 태양열 발전 시스템은 그 규모에 따라 소규모 태양열 발전 시스템, 중규모 태양열 발전 시스템, 대규모 태양열 발전 시스템으로 분류하기도 한다.

태양열 시스템은 Fig. 2.1에서와 같이 집열부, 축열부, 이용부로 나눌 수 있는데 집열부는 태양열 집열이 이루어지는 부분으로 집열온도는 집열기의 열손실율과 집광장치의 유무에 따라 결정된다. 축열부는 열 시점과 집열량이 이용시점과 부하량에 일치하지 않기 때문에 필요한 일종의 버퍼(buffer) 역할을 할 수 있는 열저장 탱크이고, 이용부는 태양열 축열조에 저장된 태양열을 효과적으로 공급하고 부족할 경우 보조열원에 의해 공급하는 역할을 한다. 또한 태양열을 효과적으로 집열 및 축열하고 공급, 태양열 시스템의 성능 및 신뢰성 등에 중요한 역할을 해주는 제어장치가 있다. 태양열에너지는 에너지밀도가 낮고 계절별, 시간별 변화가 심한 에너지이므로 집열과 축열기술이 가장 기본이 되는 기술이다.

태양열 시스템은 열매체의 구동장치 유무에 따라서 자연형(passive) 시스템과 설비

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

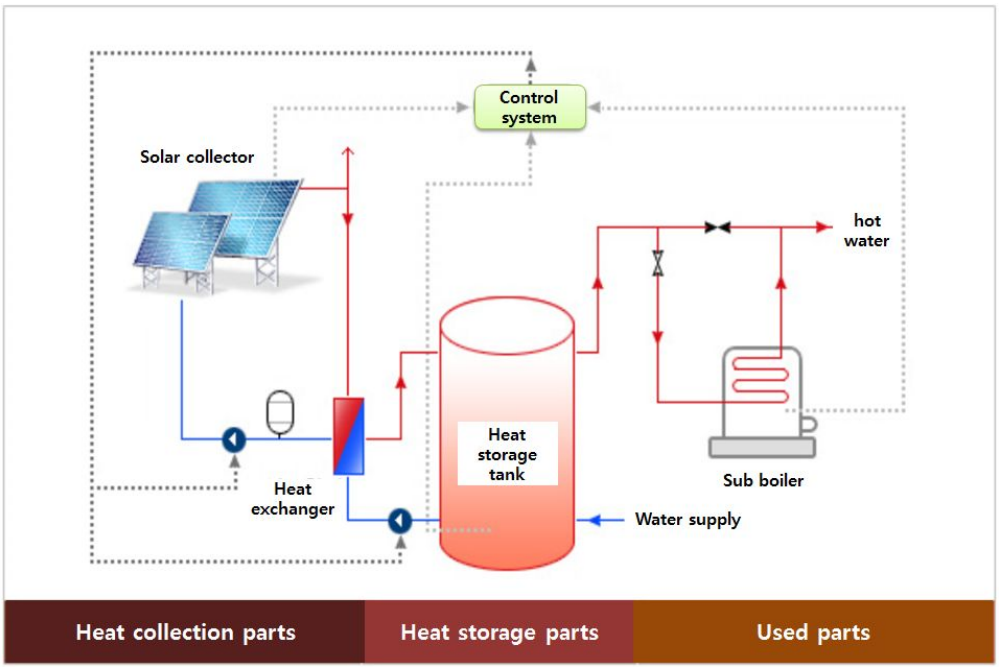


Fig. 2.1 Solar system configuration

형(active) 시스템으로 구분되어진다. 자연형 시스템은 온실, 트롬월과 같이 남측의 창문이나 벽면 등 주로 건물 구조물을 활용하여 태양열을 집열하는 장치이며, 설비형 시스템은 집열기를 별도 설치해서 펌프와 같은 열매체 구동장치를 활용해서 태양열을 집열하는 시스템으로 설비형 시스템을 흔히 태양열 시스템이라 한다.

태양에너지는 그 에너지 밀도가 낮기 때문에 태양열을 집열하는 집열기의 역할이 매우 중요하다. 평판형, 진공관형, 집광형 집열기로 구분되며 활용 온도에 따라 저온용, 중온용, 고온용으로 나눌 수 있다. 집열온도에 따른 태양열 집열기 분류를 Table 2.1에 나타내었고 구성요소를 Fig. 2.2에 나타내었다. 각 온도별 적정 집열기, 축열방법 및 이용분야는 다음과 같다.

이용분야를 중심으로 분류하면 태양열 온수급탕시스템, 태양열 냉난방 시스템, 태양열 산업공정열 시스템, 태양열 발전 시스템 등이 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

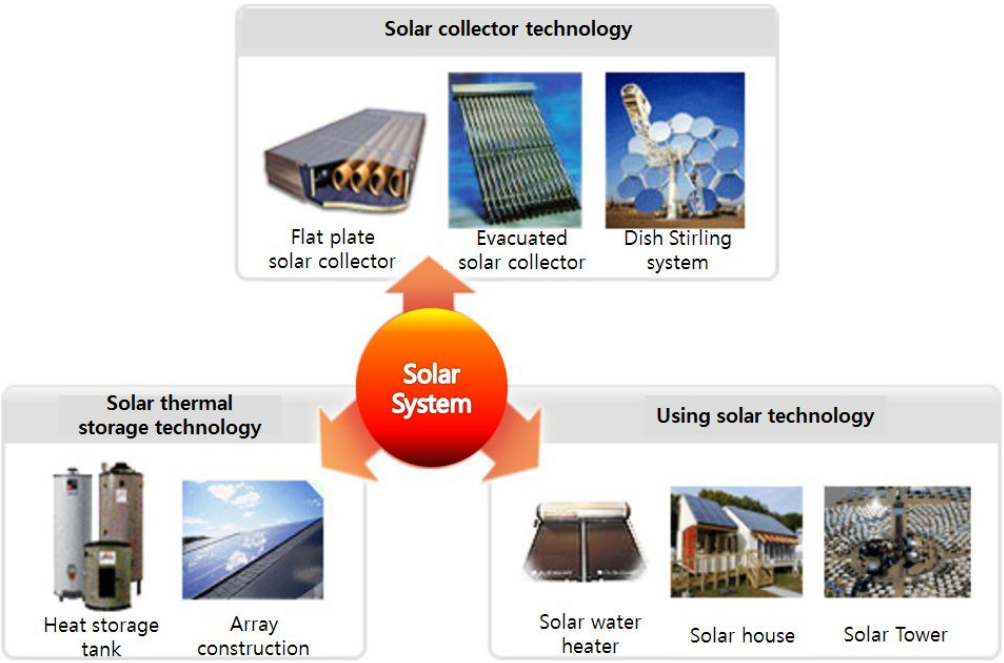


Fig. 2.2 Solar system components

집광형 집열기는 높은 온도를 얻을 수 있어 태양열 발전 및 산업 공정열 등에 적용되고 있으며 집열기 형태의 구조에 따라 PTC(prabilic though concentrator)형 집열기, Dish형 집열기, 평판형 집열기, 진공관형 집열기로 구분되어진다.

태양열의 집열은 집열기에 의해서 이루어진다. 태양열 집열기는 편의상 집열온도에 따라서 저온용, 중온용 및 고온용으로 분리되며, 각각에 대해서 Table. 2.2에 나타낼 수 있다. 집열 온도는 집열기의 열손실율의 크고 작음과 집광장치의 유무에 따라서 결정된다. 저온용 태양열 집열기는 태양광선을 고밀도로 집광해서 집열하는 집광장치 없이 집열을 하는 집열기가 여기에 포함되며, 평판형 집열기와 진공관식 집열기가 그 대표적인 집열기이다. 이중에서 진공관식 집열기는 평판형 집열기보다도 열손실율이 작도록 만들어진 집열기로 평판형 집열기보다도 높은 온도를 집열하는 데 효과적이다. 중온용 및 고온용 집열기는 집광장치가 있어서 일사광선을 고밀도로 집광

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

해서 집열하는 집열기들이 여기에 포함되며, 대체적으로 집광비에 따라 집열온도가 달라진다. 즉, 집광비가 큰 것일수록 집열온도가 높은 집열기이다.

Table 2.1 Classification of solar collectors according to the heat collection

Section	Passive system	Active system		
	Low temperature	Middle temperature	High temperature	
Use temperature	Less than 60℃	Less than 100℃	Less than 300℃	More than 300℃
Collecting area	Passive system Airheated solar collector	Flat plate collector	Parabilic trough collector, Compound parabolic 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

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

평판형 집열기는 Fig. 2.3과 같은 구조로 이루어져 있으며 태양열을 저온으로 집열할 때 사용하는데 저온용 집열기는 직달 및 산란 일사 성분 모두 집열할 수 있는 장점이 있으며, 태양광을 추적하지 않아도 된다. 또한 저온에서 집열효율이 높은 편이다. 하지만, 집열온도가 높을수록 집열 효율이 크게 저하되는 일정온도 이상에서는 거의 집열이 되지 않는 단점도 있다.(동절기의 경우 80℃ 이상)

진공관형 집열기는 Fig. 2.4와 같은 구조로 평판형 집열기와 집열방식은 비슷하나 흡수판을 진공유리관 내부에 위치시켜 대류에 의한 열손실을 없게 만든 집열기이다. 현재 상용화된 진공관식 집열기는 유리관이 2중으로 되어있고 그 사이가 진공인 이중진공관식 집열기와 단일 유리관을 사용하고 그 유리관 내부 전체가 진공인 단일 진공관식 집열기 2가지 종류가 있다. 평판형 집열기에 비해 집열기에서의 열손실이 적고 고온에서 집열 효율이 높아 난방뿐만 아니라 흡수식 냉방 등에도 적용이 가능하다.

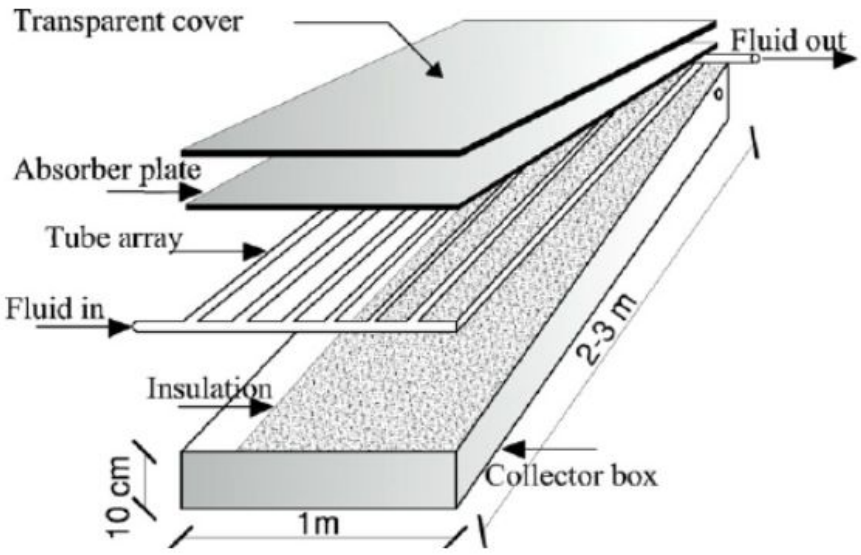


Fig. 2.3 Flat plate solar collector

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Dish형 집열기는 Fig. 2.5와 같이 접시형 집열기라 불리며, 반사면이 접시형상을 갖는 집광형 집열기로 반사체에 의해 반사된 일사광선이 한 점에 모이는 점집광형 집열기이다. 이 시스템은 수천 sun의 집광비를 얻을 수 있고, 스터링(stirling) 엔진을 집광부에 장착하여 주로 태양열 발전용으로도 사용되고 있다. 또한, 300℃ 이상의 높은 열을 얻을 수 있으며 집광된 열을 직접 이용하거나 변환시켜 전력 생산용으로 사용된다. 중온형 집열기는 태양에너지를 이용하여 중 · 고온을 얻기 위해서는 일사광선을 집광하여 고밀도의 에너지형태로 변환시키는 집광장치(concentrator)를 포함한다. 집광형 집열기는 집광형태의 기하학적 구조에 따라 CPC(compound parabolic collector)형, PTC형이나 parabolic dish형, Tower형 등이 있다.

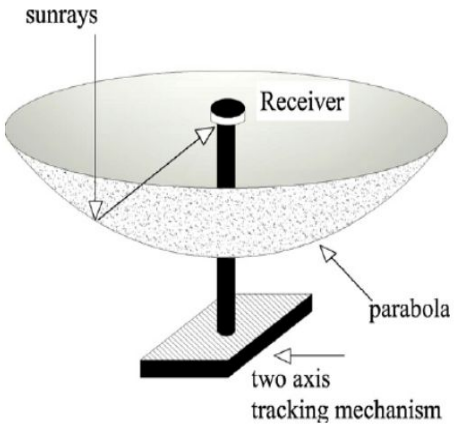


Fig. 2.5 Dish Stirling system

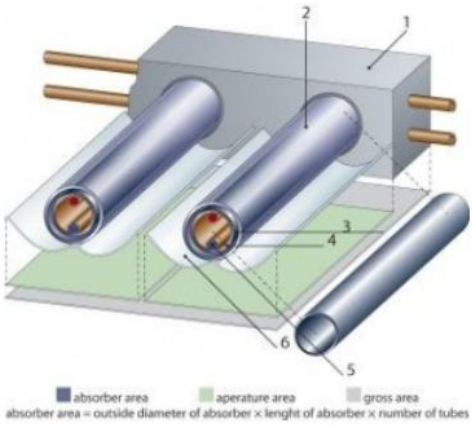


Fig. 2.4 Evacuated solar collector

Fig 2.6은 파워타워(power tower)의 중앙수신 시스템(일광반사 장치분야)을 나타낸 그림이다. 파워타워 시스템에서는 heliostat가 중앙타워에 설치된 집열기에 태양 일사를 반사하고 모으는 역할을 한다. 집열기의 열전달 매체로는 molten salt, 공기 또는 액체 금속 등이 사용된다. 가열된 열매체는 축열조를 통해 전력변환장치에서 전기를 생산한다. 이 시스템의 집광 비는 300~1500 sun 정도이며 1500℃ 이상에서도 작동이 가능하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 2.7은 PTC형 집열기로 기하학적으로 포물선형 반사체를 갖는 집열기로서 평행하게 입사하는 일사광선이 포물선 축에 초점이 맞춰지도록 해서 포물선 축에 집열관을 위치시켜 태양열을 모으는 선집광형 집열기이다. 이 집열기는 집열관을 중심으로 반사면이 상하로 태양을 추적되며, 직접 지표면에 도달하는 일사만이 집열이 가능하다. 집열관 내의 가열된 열매체는 파이프를 통해 터빈 또는 발생기에서의 사용을 위해 열교환기로 수송되어 증기로, 때로는 직접 집열관에서 증기로 만들어지기도 한다. PCT형 집열기는 1축은 고정되어 태양을 추적한다. 또한 PTC형 집열기는 온수용으로 사용되기는 하지만 대부분이 열 발전용으로 사용된다. 이 기술은 공정 열이나 화학반응을 위해 열을 제공하기 위해 사용되며, 현재는 전력 생산을 위해 많이 사용되고 있다. 집광비는 10～30 sun 정도이다.

태양열 이용기술은 태양광선의 파동성질을 이용하는 태양에너지 광열학적 이용분야로 태양열의 흡수・저장・열변환 등을 통하여 건물의 냉난방 및 급탕 등에 활용하는 기술이다. 또한 태양열 이용기술의 핵심은 태양열 집열기술, 축열기술, 시스템 제어기술, 시스템 설계기술 등이 있다.

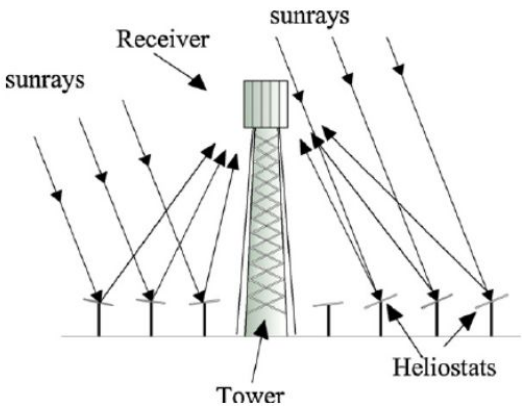


Fig. 2.6 Central receiver system

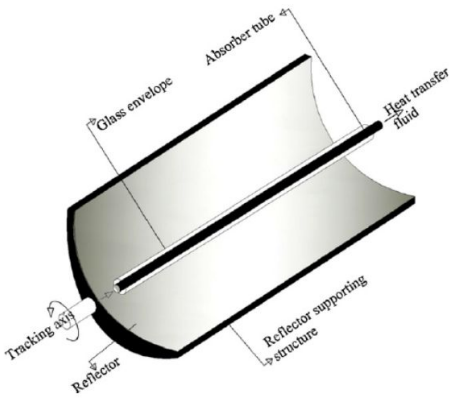


Fig. 2.7 Parabilic trough collector

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 2.8에 다양한 태양열 집열기 종류를 나타내었고 Fig. 2.9에 온도에 따른 태양열 집열기 활용분야를 나타내었다. 250℃～450℃ 온도범위를 요하는 태양열 발전소에는 데저텍(desertec) 프로젝트 같은 집열기 사용이 아주 이상적이다. 데저텍은 사막(desert)과 테크놀로지(technology)의 합성어이다. 유럽의 13개 기업이 이 프로젝트에 참여하고 있다. 150℃～300℃ 공정열을 생산하기 적합한 저집광형 집열기는 전기 생산과 열병합뿐만 아니라 태양열 냉방에도 적합하여 산업용과 냉난방과 전기의 직접 공급을 가능하게 한다. 인도처럼 전기수요가 불안정한 전기 열결이나 전기연결에서 멀리 떨어진 원격 지역에 적합하다. 태양에너지를 이용하여 전기를 생산하는 방법은 일반적으로 태양 광선으로 직접 냉각재를 가열하여 물을 증기로 만든 뒤 증기가 터보 교류 발전기를 돌려 전기를 생산한다.

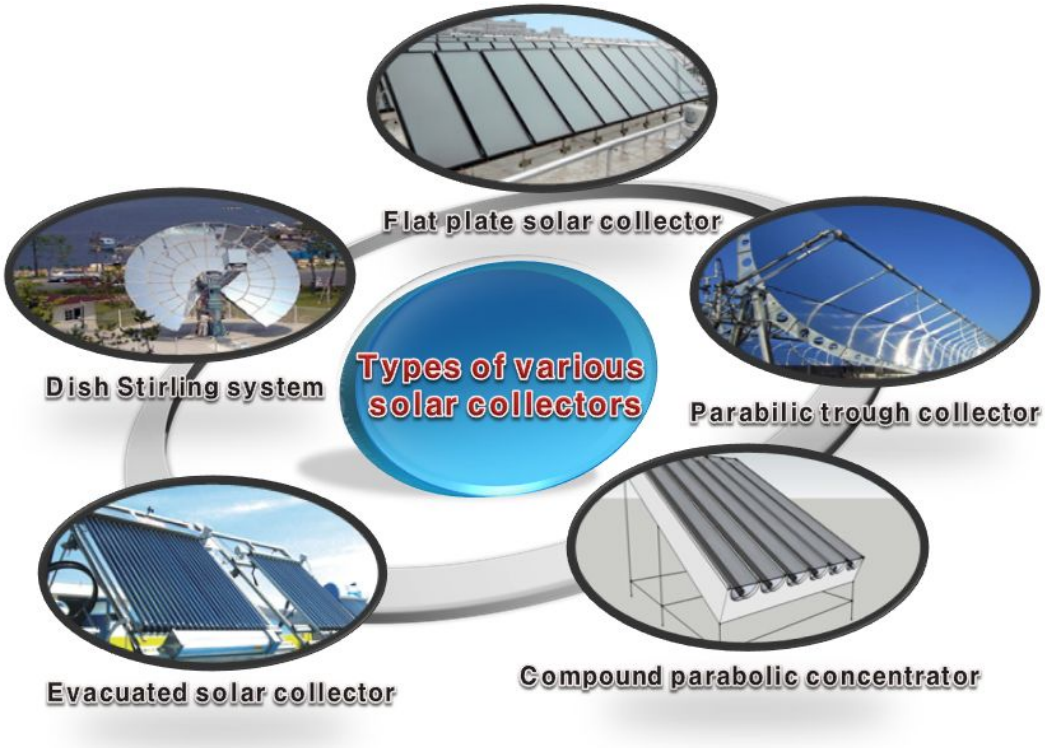


Fig 2.8 Various type of solar collectors

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

태양열을 이용한 장치는 난방 및 온수용 외에 냉방장치가 있다. 태양열을 이용한 냉방장치는 우리나라에는 없지만 이미 개발되어 유럽 각지에서 조금씩 사용되고 있다. 태양열 냉방은 여러 가지 방식이 있지만 습기를 제거하는 실리카겔을 이용하는 장치는 물이 증발할 때 주위에서 열을 빼앗고 그 결과 주위의 온도를 낮추는 원리를 이용한다. 실내로 들어오는 공기는 먼저 실리카겔을 통과하면서 습기가 제거되어 건조해진다. 그 후 이 공기에 가는 물방울이 뿌려지는데, 건조한 공기와 만난 물방울은 증발하고 이로 인해서 실내로 들어오는 공기가 차가워진다. 실리카겔은 어느 정도 습기를 빨아들이면 더 이상 작용하지 않는데, 이때 열을 가해서 습기를 제거해주면 기능이 살아난다. 태양열은 습기를 잔뜩 품은 실리카겔을 가열해서 재생시켜주는 작용을 한다. 태양열 냉방 장치는 현재 널리 사용되는 에어컨에 비해서 여러 가지 장점을 가지고 있다. 에어컨은 실내의 공기를 폐쇄 상태에서 순환시키면서 냉각하기 때문에 환기가 잘 이루어지지 않지만, 태양열을 이용하면 신선한 공기가 계속해서 들어오기 때문에 환기 걱정을 할 필요가 없다. 또한 에어컨의 냉매로 이용되는 프레온 등의 냉매가스가 대기로 방출되면 지구온난화와 오존층 파괴를 일으키지만, 태양열 냉방을 하면 이러한 일도 발생하지 않는다. 더운 여름날 에어컨을 많이 사용하면 다른 때보다 전력수요가 크게 올라가고, 이때 필요한 전기를 공급하기 위해 여름철에만 가동하는 발전소를 준비해 두어야 하는데, 태양열로 냉방을 하면 이러한 발전소 건설에 들어가는 비용과 전기를 절약할 수 있다.

분산발전(distributed generation)이란 전력 수요자 인근지역에 설치 가능한 소규모 발전설비를 이용하여 수요자에게 필요한 전력을 전량 공급하거나 이미 사용 중인 중앙 집중식 전력 공급 체계의 단점을 보완하기 위한 용도로 적용 가능한 발전방식이다. 일반적으로 집광형 집열기는 약 100℃～1000℃의 온도를 얻을 수 있어 태양열 발전 및 산업 공정열 등에 널리 보급되어 활용되고 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

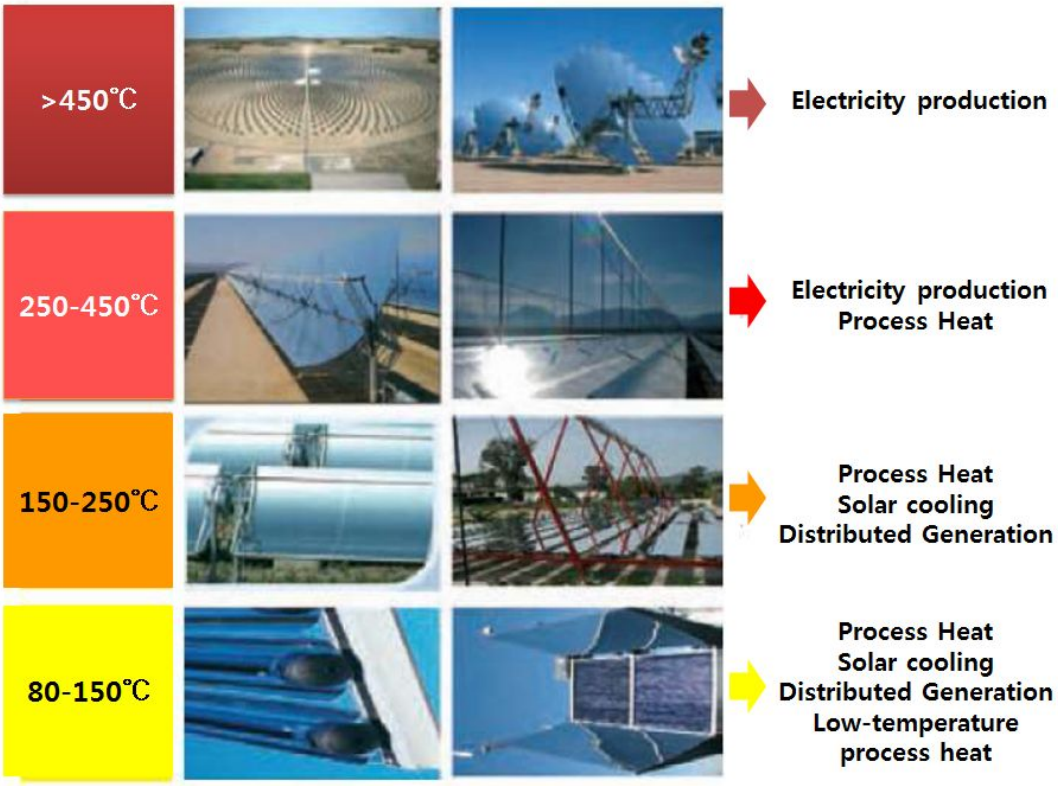


Fig 2.9 Applications of solar collector according to used temperature

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.1 평판형 태양열 집열기 구조

평판형 태양열 집열기는 간단한 구조와 저렴한 가격, 그리고 유지보수가 간편하기 때문에 가장 많이 사용하는 집열기이다. Fig. 2.10와 Fig. 2.11은 태양열을 저온으로 집열하는데 사용되는 평판형 집열기의 외형과 내부구조를 나타내고 있다. 상단 부는 일사광선을 투과시키고 열손실을 줄일 수 있는 투과체(transparcent cover)가 있으며 (경우에 따라서는 없는 것도 있으며, 주로 투과체 1개가 있는 것이 가장 일반적임), 그 하단부에는 투과된 일사광선을 흡수해서 열에너지로 변환시켜주는 흡수판 (absorber plate)이 있고, 하단부에는 단열재로 단열되어 있다.

흡수판에는 집열순환 매체가 지나갈 수 있는 관(액체식 집열기인 경우)이 부착되어 있거나 또는 그 하단부에 공기가 통할 수 있는 공간(공기식 집열기인 경우)이 있다. 이 관이나 통로를 통해서 흡수판에 집열된 열에너지가 열매체로 전달되어 이용부나 축열조로 이송한다.

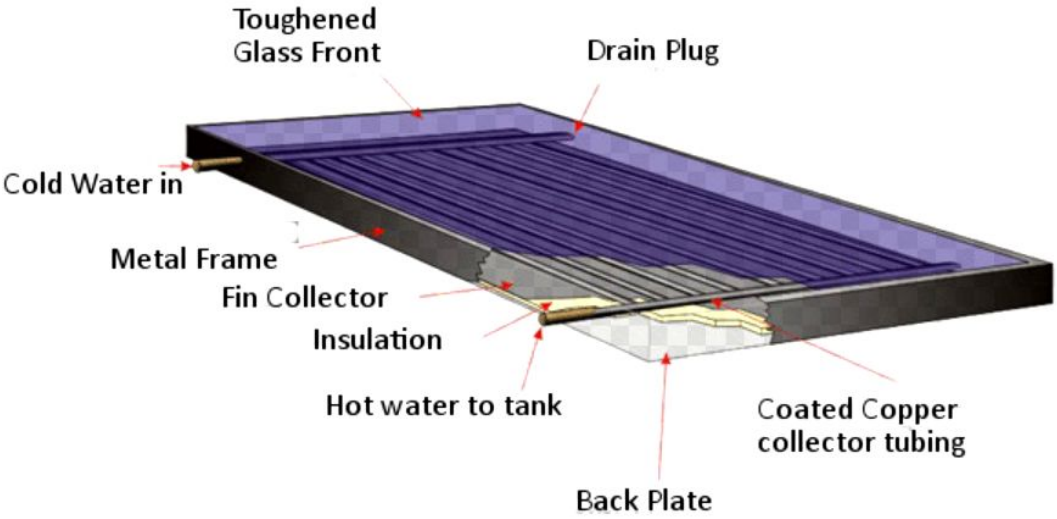


Fig 2.10 Appearance of the flat plate solar collector

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

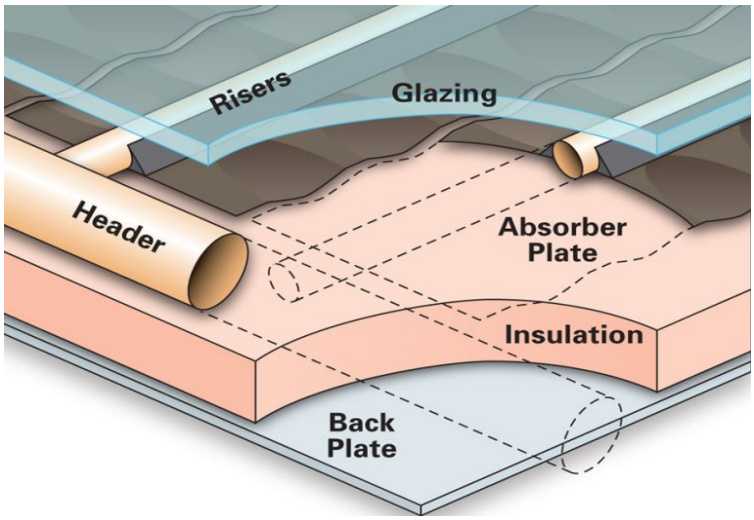


Fig 2.11 Structure of the flat plate solar collector

2.2 U-tube형 태양열 집열기 구조

Fig. 2.12은 U-tube 형태의 태양열 집열기 구조를 나타낸 것이다. 진공관은 내·외부유리관, 흡수면, 진공층, 흡수 코팅층으로 구성된다. Fig. 2.13은 U-tube형 태양열 집열기의 세부구조를 나타내었다. 내부유리관의 표면에는 흡열 코팅이 처리되어 있어 태양에너지를 열에너지로 변환시키는 역할을 한다. 작동유체가 관을 따라 이동하면서 열전달을 통해 태양열을 흡수하는 구조이다.

외부 유리관과 내부 유리관 사이에 진공을 걸어 외부와의 열손실을 최소화하여 겨울철에도 우수한 집열 효율을 나타낸다. 외부의 강한 충격에 의한 유리관 파손 시에도 진공관 내부의 유체는 외부로 누출되지 않고 동관 내부에서 정상적으로 작동한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

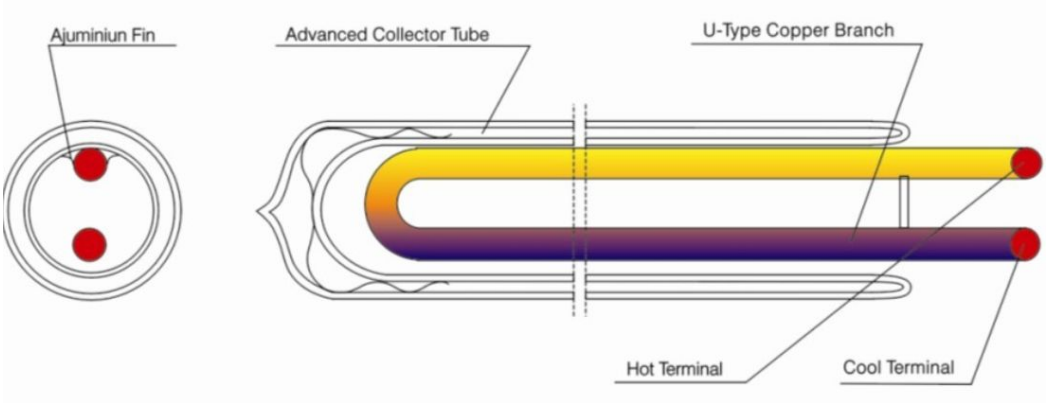


Fig. 2.12 Appearance of the U-tube solar collector

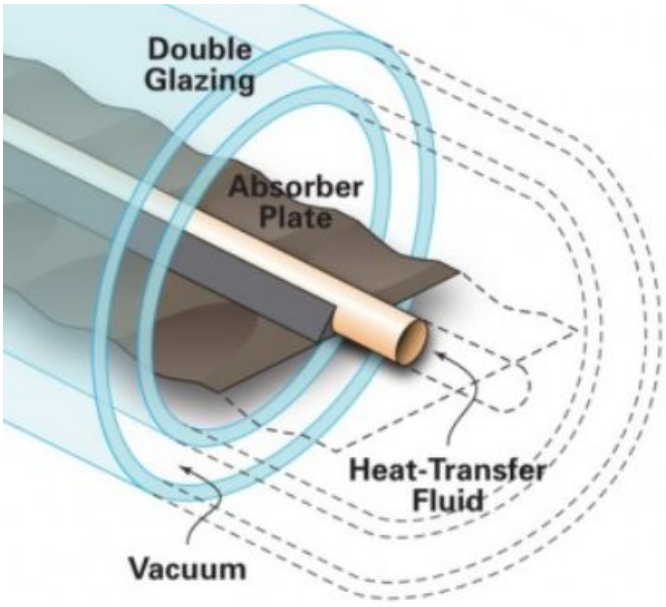


Fig. 2.13 Structure of the U-tube

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.3 히트파이프형 태양열 집열기 구조

히트파이프는 액체가 증발할 때 주변의 기화열을 흡수하는 장치이다. Fig 2.14에서 히트파이프 태양열 집열기 시스템 구성도를 나타내었다. 파이프내의 2상변화에서 발생하는 증기압 즉 80℃에서 0.5 kg/cm^{2}와 100℃에서는 1 kg/cm^{2}의 차이로서 고압의 가열부에서 저압의 증발부로 이동시켜 자연순환 시키는 것이다. 기본 구조는 양단을 밀폐한 금속 파이프이며, 작동 유체는 관내에 봉입되어 열 수송 매체의 역할을 하는 것으로서 증발 응축의 가역 2상변화를 행하고 잠열이 크며 유동 저항이 작은 유체가 선택된다. 내부의 공기를 빼고 작동유체를 주입시킨 후공기의 침입을 방지하기 위해 밀폐하여 완성한다. 히트파이프 내의 일정 온도의 상태에서는 그 온도에 있어서의 증기압을 가진 증기와 증기가 되지 못하는 액체가 공존하고 있다. 액체가 기체로 변화하는 데는 기화열을 필요로 한다. 기체가 액체로 변할 때는 응축열을 방출한다. 이때 온도 변화는 없고 기체 서로의 변화만으로 열의 출입이 생기므로 이것을 잠열 이동이라 한다. 잠열 이동의 특성을 이용하면 기본적으로 온도차가 없는 다량의 열을 이동시킬 수 있다. 열원에서 유입한 열은 심지내의 액상의 작동유체를 가열하고 증기를 발생시킨다. 그 결과 증발부의 증기압이 높아져서 다른 온도가 낮은 부분(응축부)이 저압이기 때문에 증기가 이동하여 여기서 액체로 응축하고 응축열이 발생하며 외부에 열을 방출한다. Fig. 2.15에 히트파이프의 열적 흐름과 세부구조를 나타내었다.

이와 같은 유형으로 증발부에 들어온 열은 순간적으로 응축부에 수성되어 방열한다. 응축한 액체는 심지가 가진 모세관력 또는 중력에 의해 증발부에 환류 하여 싸이클을 형성한다. 이 증발・응축의 사이클은 증발부의 온도를 응축보다 높게 유지하고 있는 연속적 또는 자동적으로 행하여져서 열을 수송하는 것을 계속한다. 증발・응축에 의하여 열이동이 일어나기 때문에 지극히 적은 온도차로 대량의 열을 수송할 수가 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

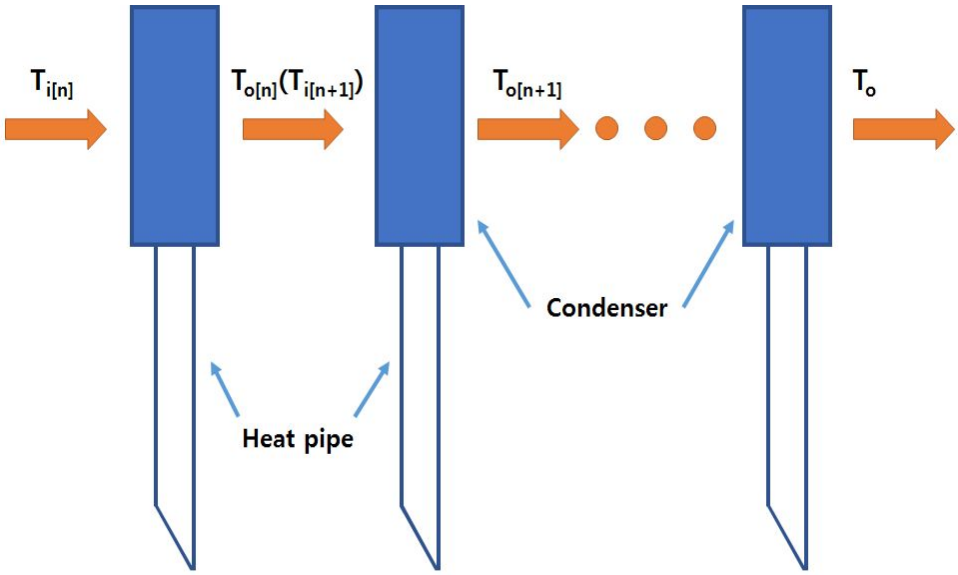


Fig. 2.14 System configuration of heat pipe solar collector

1) 작동유체의 작동 원리

외부의 열원으로부터 열이 히트파이프의 한쪽 끝(증발부)을 가열하고 또 한쪽 끝(냉각부)을 냉각시키면 액은 상변화를 하여 전열이 일어난다. 액의 온도가 상승하면 액면으로부터 증발이 일어나게 되고, 이때 가해진 열은 증기의 잠열 형태로 변한다. 온도가 상승하기 때문에 포화 증기압이 상승하게 되며 따라서 증기는 증기통로의 중앙을 통해 낮은 온도 즉, 보다 낮은 압력의 응축부 쪽으로 흐르게 된다. 증기는 응축부에서 기·액체의 경계면에서 응축되고 이때 응축잠열을 방출하게 된다. 열은 기·액체 경계면에서부터 증발부로 윅의 모세관에 의해서 합류되며 이로서 사이클을 완성시키게 된다. 즉 액체가 기체로 변화할 때는 기화열이 필요하고 기체가 액체로 변화 할 때는 반대로 응축열을 방출한다. 이때 온도변화는 없고 기체 서로의 변화만으로 열의 출압이 생기므로 이것을 잠열이라 하며 100℃의 수증기가 되기 위하여 539 kcal의 열이 필요하고 다시 수증기가 물로 될 때에는 같은 양의 열을 방출한다. 이 잠열이동의 특성을 이용하면 기본적으로 온도차가 없는 다량의 열을 이동시킬 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

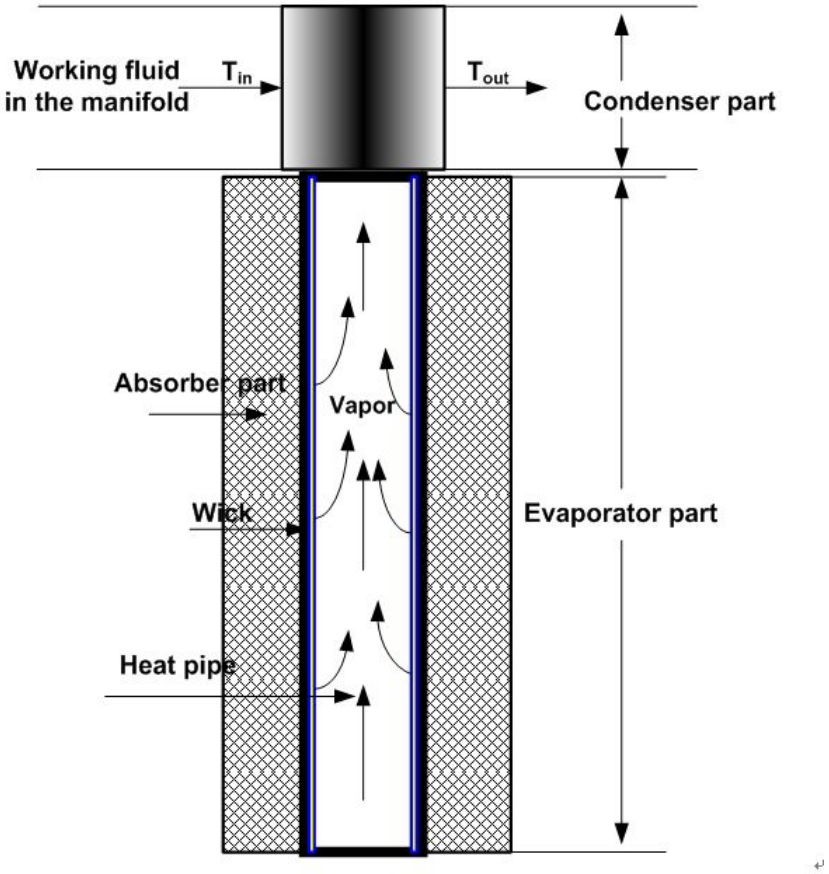


Fig. 2.15 Cross-section of single heat pipe and heat flow

2) 히트파이프의 기본구조

(1) 용적 : 원칙적으로는 양단을 밀폐한 금속 파이프이며 단순한 파이프 또는 핀 달린 파이프를 사용한다. 특수한 형상으로서는 직방체, 편형봉 튜브 등이 있다.

(2) 윅 : 히트파이프 내의 작동유체의 환류를 모세관력으로 행하는 물체이며 용기 내에 삽입하는 것과 용기와 일체가 되어 성형되는 것이 있다. 이것의 기본구조를 살펴보면 다음과 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

① 원주금망 : 히트파이프의 내면 벽에 금망을 밀착시킨 것이며 망의 눈과 벽면과의 간격에 의해서 모세관력이 생긴다.

② 복합원주상 금망 : ①의 금망을 몇 겹으로 한 것이며, 원주금망마다 모세관력이 증대된다.

③ 축 방향 그룹 : 파이프내의 벽면 축 방향에 홈이 형성된 것으로서 압출하여 가공 등에 의해 파이프와 동시에 성형된다. 모세관력은 적으나 액의 유동 저항이 작으며 내부전열 면적도 증대되므로 실용적이다.

④ 금망으로 덮은 그룹 : 축 방향의 그룹 내면에 금망을 덮은 것으로서 모세관력이 약한 결점을 보완한 것이다.

(3) 작동유체 : 용기의 내부에 봉입되어 열 수송 매체의 역할을 하는 것으로서 증발 응축의 가역 2상변화를 행하고 잠열이 크며 유동저항이 적은 유체가 선택된다. 내부의 공기를 빼고 작동유체를 주입시킨 후 공기의 침입을 방지하기 위해 밀폐하여 완성한다. 히트파이프 내에는 일정 온도의 상태에서는 그 온도에 있어서의 증기압을 가진 증기(물을 작동유체라고 한다면 80℃에서는 5 kg/cm^2의 압력)와 증기가 되지 못하는 액체가 공존하고 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3장 태양열 집열기 시스템 모델링

본 연구에서는 태양열 시스템의 기본 원리는 그대로 적용하되, 집열기의 종류와 나노유체를 적용하여 태양열 시스템의 효율 등을 고찰하였다. 모든 조건에 대하여 실험이 어렵게 때문에 실험을 통하여 검증된 모델을 통하여 실험으로 검증할 수 없는 조건에 대한 성능을 예측하기 위하여 모델링을 실시하였다. 2 장에서 기술한 바와 같이 컴퓨터를 이용한 모델링은 태양열 시스템 구성요소의 선정 및 전체 시스템의 평가에 있어서 비용 및 시간이 적게 소모된다는 이점을 지니므로 초기 단계에서 주로 이용되는 방법이지만, 실제적으로 모델링은 특성 변수들의 변화를 모두 고려한 상태에서 수행되어야 하며 각각의 변수들을 정량화 하는 것이 쉽지 않기 때문에 많은 제약이 따른다. 따라서 본 장에서는 EES 프로그램을 이용하여 태양열 시스템의 해석을 수행하려고 한다.

■ 태양열 집열기 모델링에 대한 가정

태양열 집열기는 종류에 따라 구조가 다르지만 기본적으로 태양열은 흡수체에 흡수되어 작동유체로 전달되지만 태양열 집열기 외부에서 복사와 대류손실이 발생하기 때문에 복사와 대류 손실을 제외한 나머지 열이 흡수체로 전달된다. 흡수체에 흡수된 열은 태양열 집열기를 구성하는 구성요소로 전도 손실을 제외한 나머지 유효 에너지가 구리 튜브를 통해 작동유체로 전달된다. 이에 본 연구에서는 Duffie와 Deckman(2013)이 제시한 모델링을 기반으로 태양열 집열기의 설계를 수행하였으며 본 모델링에 대한 가정은 다음과 같다.

1) 본 해석은 정상 상태를 기반으로 수행함

2) 태양열 집열기를 구성하는 구성요소의 열 물성은 일정함

3) 흡수된 태양열의 열 흐름은 1차원임

4) 관내에서의 온도구배는 무시할 수 있음

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5) 집열기 흡수체의 음영효과는 무시함

6) 접착에 의한 열 저항은 무시함

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.1 평판형 태양열 집열기 시스템 모델링

3.1.1 평판형 태양열 집열기의 모델링 및 열효율 분석

평판형 태양열 집열기는 유리판, 흡수판, 구리관, 단열재, 구리 튜브, 헤더로 구성된다. Fig. 3.1은 태양열 집열기의 구조와 에너지 흐름도를 보여준다. 태양열은 우선 태양열 집열기의 유리 덮개를 통과하여 흡수판에 흡수된다. 하지만 유리 덮개에서는 실외에 설치되며 유리 커버에서의 반사로 인해 복사와 대류에 의한 열손실이 발생한다. 또한 흡수 판에 흡수된 태양열은 작동유체가 흐르는 구리 관으로 열전달시 평판형 집열기를 구성하는 요소에 전도 손실이 발생한다. 이로 인해 실질적으로 평판형 태양열 집열기에 전달되는 유효 에너지는 태양열 집열기에 유입되는 일사량과 유리커버에서의 복사와 대류손실, 집열기 내에서의 전도 손실을 고려해야 한다.

평판형 집열기의 총괄 열손실계수는 식 (3-1)로 표현할 수 있다.

$$U_L = U_{top} + U_{back} \tag{3-1}$$

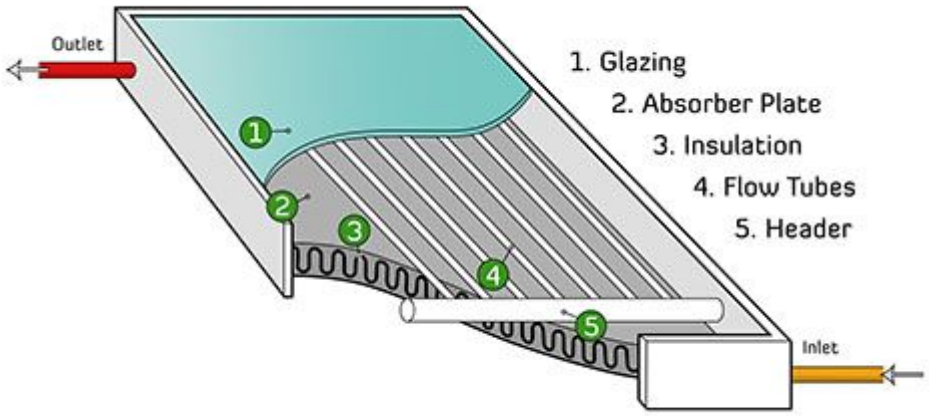
Klein (1975)은 평판형 집열기 상부의 열손실계수를 식 (3-2)으로 제안하였다.

$$U_{top} = \left(\frac{N_c}{\frac{C}{T_p}\left[\frac{T_p - T_a}{N_c + f}\right]^e} + \frac{1}{h_w} \right)^{-1} + \frac{\sigma (T_p + T_a)\left(T_p^2 + T_a^2\right)}{\left(\epsilon_p + 0.00591 N_c h_w\right)^{-1} + \frac{2N_c + f - 1 + 0.113\epsilon_p}{\epsilon_c} - N_c} \tag{3-2}$$

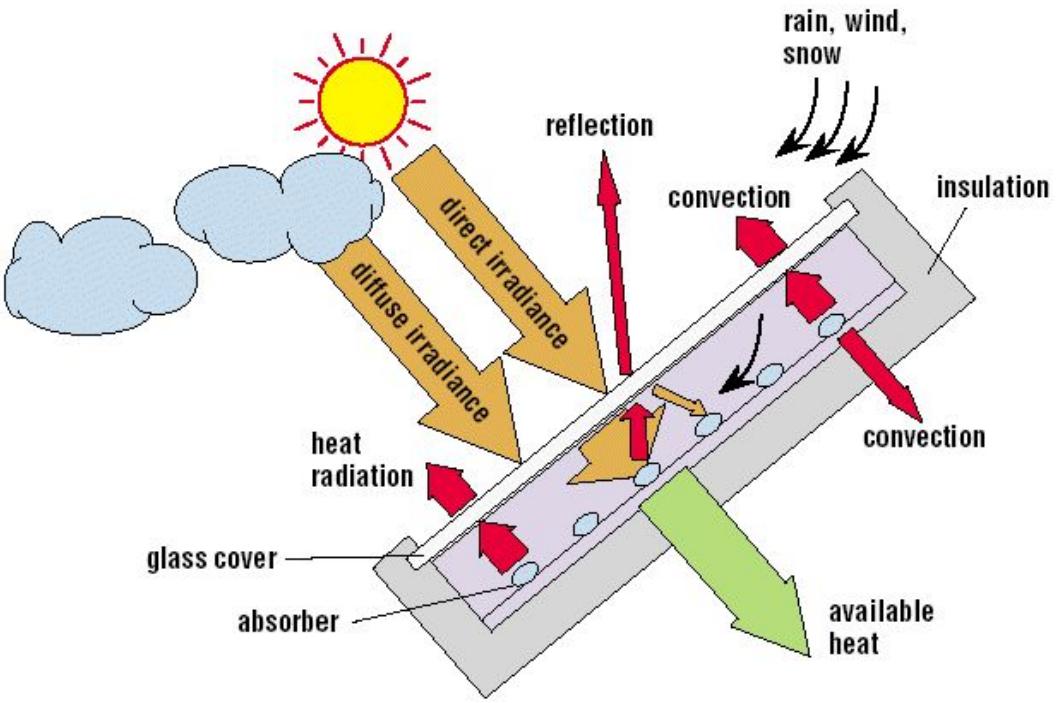
여기서 N_c 는 유리 커버의 수, β는 평판형 집열기 설치 각도, ϵ_g는 유리의 방사율, ϵ_p는 판의 방사율, T_a는 대기 온도, T_p는 평판형 집열기 판의 평균온도, h_w는 평판형 집열기 판에서의 대류열전달계수이다. 평판형 집열기 상부의 열손실계수 계

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Construction of flat plate solar collector



(b) Schematic of energy flow about flat plate solar collector

Fig. 3.1 Construction and schematic of energy flow about flat plate solar collector

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

산에 필요한 파라미터 f, C, e는 다음과 같이 표현된다.

$$f=\left(1+0.089h_w-0.1166h_w\epsilon_p\right)\left(1+0.07866N_c\right) \tag{3-3}$$

$$C=520\left(1-0.000051\beta^2\right)\begin{cases}0^\circ<\beta<70^\circ\\70^\circ\le\beta<90^\circ,\beta=70^\circ\end{cases} \tag{3-4}$$

$$e=0.430\left(1-\frac{100}{T_p}\right) \tag{3-5}$$

하부 평판형 집열기의 열손실계수는 식 (3-6)으로 표현 할 수 있다.

$$U_{back}=\frac{k_{ins}}{L_{ins}} \tag{3-6}$$

여기서 k_{ins}는 단열재의 열전도율, L_{ins}는 단열재의 두께이다.

평판형 집열기의 흡수판에서 얻은 유용에너지는 작동유체에 전달된다. 평판형 집열기가 얻은 유용에너지는 일사량과 총괄열손실을 고려하여 식 (3-7)로 표현된다.

$$Q_u=A_pG(\tau\alpha)-Q_L=A_p\left[G(\tau\alpha)-U_L\left(T_p-T_a\right)\right] \tag{3-7}$$

여기서 A_p, S_{in}, T_p, T_a는 평판형 집열기의 유효집열 면적, 유효일사량, 집열판의 평균온도, 대기온도이다.

유용에너지는 열손실계수(F_R)를 이용하여 재정의할 수 있으며 이는 식 (3-8)로 표현 할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$Q_u = \dot{m}c_p(T_{f,o} - T_{f,i}) = A_p F_R[G(\tau\alpha) - U_l(T_{f,i} - T_a)] \tag{3-8}$$

열 제거계수는 식 (3-9)로 표현된다.

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p}{A_p U_L}\left[1 - \exp\left(\frac{-A_p U_L F'}{\dot{m}c_p}\right)\right] \tag{3-9}$$

F'은 평판형 집열기의 효율계수이며 식 (3-10)으로 표현된다.

$$F' = \frac{U_L^{-1}}{W[U_L(D_o + (W - D_o)F)]^{-1} + (C_b)^{-1} + (\pi D_i h_f)^{-1}} \tag{3-10}$$

여기서 C_b는 접착제의 열전도율이다. 접착제의 열전도율은 매우 낮기 때문에 본 연구에서는 무시하였다. F는 핀 효율이며 식 (3-11)로 표현된다.

$$F = \frac{\tanh[m(W - D_o/2)]}{m(W - D_o/2)}, \quad m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}} \tag{3-11}$$

평판형 집열기 내의 구리 관내에서 대류열전달계수(h_f)는 P_r 수와 Nu 수에 의해 정의 할 수 있다. 구리 관내로 일정한 열 유속이 유입되며 Nu 수는 식 (3-12)에 의해 정의할 수 있다.(Xuan, 2003)

$$Nu = \begin{cases} 0.4328(1 + 11.285\phi^{0.754}Pe^{0.218})Re^{0.333}\mathrm{Pr}^{0.4} & Re < 2300 \\ 0.0059(1 + 7.628\phi^{0.6886}Pe^{0.001})Re^{0.9238}\mathrm{Pr}^{0.4} & 2300 < Re < 25000 \end{cases} \tag{3-12}$$

여기서, P_e 수는 식 (3-13)으로 표현할 수 있다.

$$Pe = Re \times \mathrm{Pr} \tag{3-13}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.2 U-tube형 태양열 집열기 시스템 모델링

3.2.1 U-tube형 태양열 집열기 모델링 및 열효율 분석

U-tube형 태양열 집열기는 진공 유리관 내에 U자형 관이 삽입된 태양열 집열기로 진공유리관 구조로 인해 평판형에 비해 외부 열손실이 적은 장점을 갖는다. U-tube형 태양열 집열기는 지중 진공관형 유리관, 흡수체가 코팅된 흡수튜브, U자관 구조의 구리 관으로 구성된다. 태양열 집열기의 흡수 튜브와 U자 관은 원형 팀 안쪽에서 접합되어 있다. Table 3.2에 U-tube형 태양열 집열기의 사양을 나타내었고 Fig. 3.2와 Fig. 3.3은 이중 진공관형 유리관의 광학손실과 U-tube 집열기의 단면도를 보여준다.

U-tube형 태양열 집열기에 들어오는 일사량은 진공관형 유리관을 통과한다. 이중 진공관 내는 진공상태이기 때문에 전도나 대류에 의한 열손실이 발생하지 않아 대다수 일사량은 흡수체로 전달된다. 흡수체에 흡수된 에너지는 구리 핀에 의해 U-tube로 전달되어 작동유체와 열교환한다. 그러므로 에너지 보존법칙에 의해 U-tube형 태양열 집열기가 얻는 유효에너지는 일사량과 태양열 집열기의 손실의 차로 표현할 수 있다. U-tube형 태양열 집열기가 얻는 유효에너지는 식 (3-14)로 표현할 수 있다.

$$Q_u = G(\tau\alpha) - Q_L \tag{3-14}$$

여기서 I는 흡수 튜브가 얻은 태양에너지 양, Q_u는 작동유체가 얻는 유효에너지이다.

U-tube형 태양열 집열기의 총괄 손실 열전달계수는 헤더튜브의 총괄열손실계수(U_{edge})와 흡수관에서 대기로의 열손실계수(U_t)의 합으로 식 (3-15)로 표현할 수 있다.

$$U_L = U_t + U_{edge} \tag{3-15}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

U_{each}는 헤더 튜브 모서리에서의 손실계수로 단열재 열전도율, 두께 그리고 헤더 튜브 표면적의 영향을 받으며 식 (3-16)으로 표현된다(Tian, 2006). U_{each}는 0.1687 W/m^2·K으로 정의하였다.

$$U_{edge} = \frac{(UA)_p}{A_s} \tag{3-16}$$

흡수관에서 대기로의 열손실계수(U_t)는 식 (3-17)으로 표현할 수 있다.

$$U_t = \frac{1}{\frac{1}{h_{ga}} + \frac{1}{h_{pg}}} \tag{3-17}$$

여기서 h_{ga}는 진공 유리관 외부와 대기의 대류열전달계수로 Tian(2006) 의 연구를 참조하여 12.7 W/m^2·K으로 정의하였다. h_{pg}는 흡수관과 유리관 사이의 전도와 복사 열손실계수의 합으로 표현된다.

흡수관과 유리관 사이의 전도에 의한 열손실계수(h_{pgc})는 0.2796 W/m^2·K로 가정하였으며(Tian, 2006) 흡수관과 유리관 사이의 복사에 의한 열손실계수(h_{pgd})는 식 (3-18)으로 표현할 수 있다.

$$h_{pgd} = \frac{\sigma \epsilon_c}{1 + \frac{\epsilon_c d}{\epsilon_g d_g (1 - \epsilon_c)}} (T_t^2 + T_g^2)(T_t + T_g) \tag{3-18}$$

여기서 ϵ_c는 흡수 코팅의 반사율, ϵ_g는 유리 진공관의 내부 표면에서 반사율, d_g는 유리 진공관의 직경, σ는 Stefan-Bolzmann 상수이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

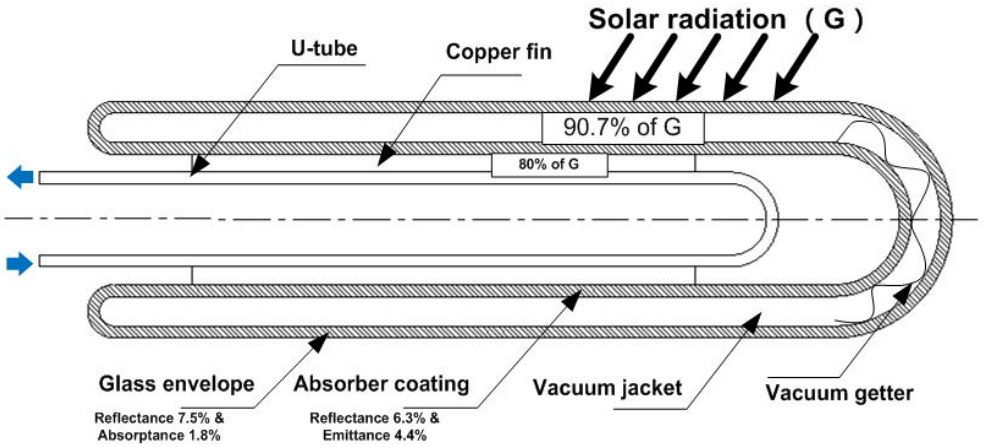


Fig. 3.2 Optical loss of glass evacuated tube

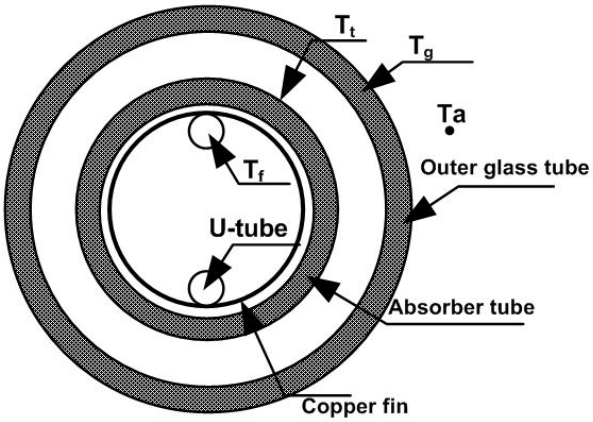


Fig. 3.3 Cross section of U-tube

Fig. 3.3에서 보여주듯이 U-tube에서 열유속 보존은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U_t(T_t - T_a) = h_{pgd}(T_t - T_g) + h_{pgc}(T_t - T_g) \tag{3-19}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

식 (3-17)부터 식 (3-19)의 식으로부터 외기온도 T_a, 흡수관의 온도 T_p의 조건이 주어지면 U_a와 T_g를 구할 수 있다. 계산의 단순화를 위해 아래와 가정을 적용하였다.

1) 흡수관과 구리핀과의 열전달은 평행함으로 평판형으로 간주할 수 있다.(Tian, 2007)

2) U-tube의 축방향 온도 구배는 무시한다.

3) 흡수관의 온도는 일정하다.

Fig. 3.4는 구리핀에 대한 축방향의 에너지 흐름을 보여주며 식 (3-20)과 (3-21)로 표현할 수 있다.

$$-k\delta\frac{dT}{dx}|_x-(-k\delta\frac{dT}{dx}|_{x+\triangle x})+Q_u\triangle x=0 \tag{3-20}$$

$$Q_u=\frac{T_t-T}{\frac{t_c}{k_c}+\frac{t_{air}}{k_{air}}}=C_s(T_t-T) \tag{3-21}$$

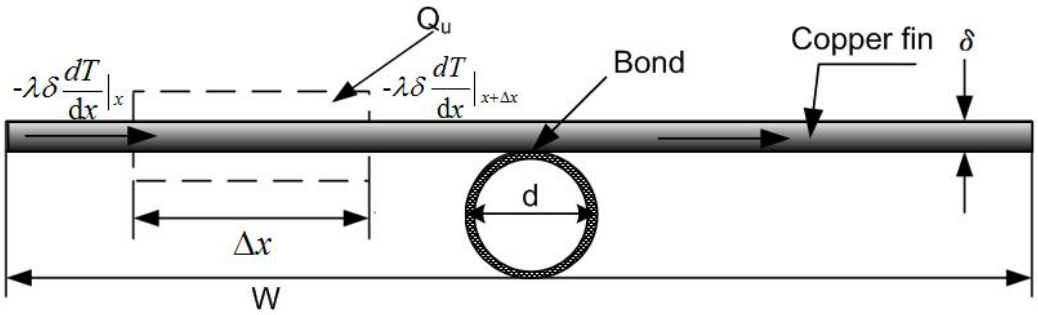


Fig. 3.4 Energy analyses on copper fin of U-tube Solar Collector

여기서 t_c, t_{air}, k_c 와 k_{air} 는 흡수관의 두께, 공극, 흡수관과 공극의 열전도율이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

C_s는 합성 전도도를 의미한다.

흡수관의 외부 표면온도는 식 (3-22)로부터 유도할 수 있으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_t = \frac{G(\tau\alpha) + U_L T_a + C_S T}{U_L + C_S} \tag{3-22}$$

식 (3-16)에 식 (3-21)과 (3-22)를 적용하면 다음과 같은 에너지 방정식이 유도할 수 있다.

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{-I + U_L(T - T_a)}{kt\left(1 + \frac{U_L}{C_b}\right)} \tag{3-23}$$

유도된 에너지 방정식과 식 (3-24)의 경계조건을 통해 온도분포는 식 (3-25)로 표현할 수 있다.

$$\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=0} = 0, \quad T|_{x=(W-d)/2} = T_b \tag{3-24}$$

$$T = \frac{\cos mx}{\cos\left(\frac{m(W-d)}{2}\right)}\left(T_b - T_a - \frac{1}{U_L}\right) + T_a + U_L \tag{3-25}$$

여기서 m은 식 (3-26)로 정의된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$m = \left[\frac{U_L}{kt\left(1 + \frac{U_L}{C_b}\right)} \right] \tag{3-26}$$

U-tube 집열기가 축방향으로 단위 길이당 얻는 유효에너지는 핀과 튜브에서 얻는 에너지들의 합과 동일하다. 또한 축방향으로 단위 길이당 얻은 유효에너지는 유체에 전달되기 때문에 식 (3-27)과 (3-28)로 표현할 수 있다.

$$q_u' = \frac{(W-d)(G(\tau\alpha) - U_L(T_b - T_a))F + d(I - U_L(T_b - T_a))}{1 + \frac{U_L}{C_S}} \tag{3-27}$$

$$q_u' = \frac{(T_b - T_f)}{\frac{1}{h_{fu}\pi d} + \frac{1}{C_S}} \tag{3-28}$$

여기서 h_{fu}는 U-tube의 표면과 유체간의 열전달계수이며 핀 효율 F는 식 (3-29)로 표현된다. U-tube의 두께가 매우 얇기 때문에 접촉저항인 C_S는 무시할 수 있다.

$$F = \frac{\tanh\left(\frac{m(W-d)}{2}\right)}{\frac{m(W-d)}{2}} \tag{3-29}$$

U-tube 집열기가 얻는 유효에너지는 식 (3-27)과 식 (3-29)를 통해 재정의할 수 있으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$q'_u = WF'(G(\tau\alpha) - U_L(T_f - T_a)) \tag{3-30}$$

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W(\frac{1+\frac{U_L}{C_S}}{U_L((W-d)F+d)} + \frac{1}{h_{fu}\pi d} + \frac{1}{C_b})} \tag{3-31}$$

여기서 F'는 집열기의 효율 인자이며 T_f는 U-tube 집열기 작동유체의 평균 온도이다. U-tube 집열기의 작동유체가 얻은 유효에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_{f,o} - T_{f,i}) \tag{3-32}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.3 히트파이프형 태양열 집열기 시스템 모델링

3.3.1 히트파이프형 태양열 집열기의 모델링 및 열효율 분석

히트파이프는 금속 밀폐용기 내부에 있는 증발성 유체가 상변화 구조를 이용해 증발부에서 얻은 에너지를 응축부로 열을 전달하는 열전달 매체로 작동에 필요한 동력이 필요가 없으며 높은 열전달률로 인해 다수의 열전달 분야에 널리 사용되고 있다. 히트파이프형 태양열 집열기는 흡수체에서 얻을 열을 히트파이프를 통해 작동유체에 전달하는 태양열 집열기이다. Fig. 3.5는 히트파이프형 태양열 집열기의 구조와 열 흐름 개략도를 보여준다.

히트파이프형 태양열 집열기는 진공유리관, 흡수체(흡수판 또는 흡수관), 히트파이프, 매니폴드로 이루어진다. 진공유리관을 통과한 일사량은 흡수체에 흡수된다. 흡수된 태양열 에너지는 히트파이프의 증발부에서 응축부로 전달되며 응축부에서는 매니폴드에 흐르는 작동유체와 열교환을 수행한다. 작동유체와 열교환이 이루어지는 매니폴드에는 다수의 히트파이프의 응축부가 설치되어 있다. 매니폴드는 작동유체가 히트파이프와 직교로 접할 수 있도록 구성되며, 작동유체는 매니폴드 입구에 있는 히트파이프부터 출구 쪽에 설치된 히트파이프 순차적으로 열 교환을 수행한다.

한 개의 히트파이프가 증발부에서 응축부로 전달하는 열전달은 식 (3-33)으로 표현된다.

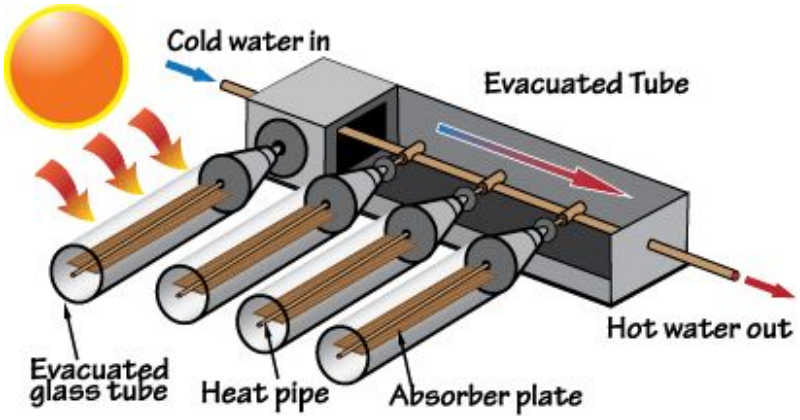
$$Q_{hp} = \frac{A_{hp}(T_{evap} - T_{con})}{\sum R_{hp}} \tag{3-33}$$

여기서 T_{evap}와 T_{con}은 증발부와 응축부의 온도, R_{hp}는 히트파이프의 총괄 열 저항으로 식 (3-34)로 표현할 수 있다.(Dunn, 1982)

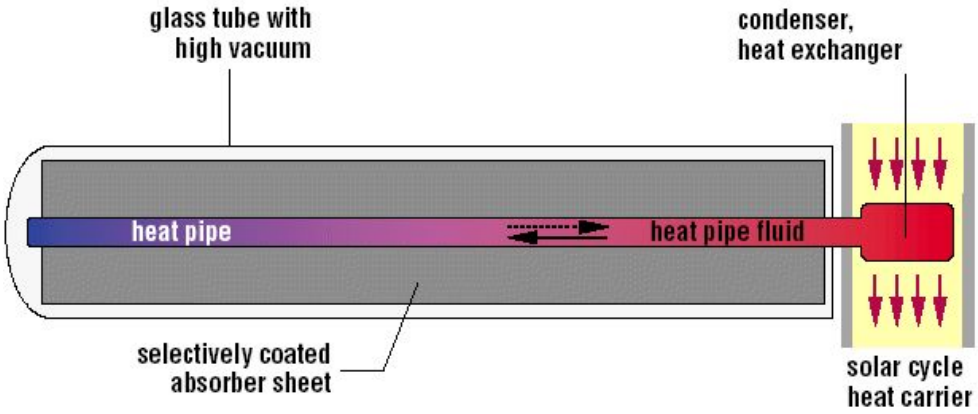
$$R_{hp} = \sum(R_{evap,p} + R_{evap,w} + R_v + R_{lv} + R_{con,p} + R_{con,i}) \tag{3-34}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Construction of heat pipe solar collector



(b) Schematic of energy flow about heat pipe solar collector

Fig. 3.5 Construction and schematic of energy flow about heat pipe solar collector

히트파이프의 총괄 열저항은 히트파이프 두께에 의한 저항, 증발부 윅구조에 대한 저항, 액체 및 증기계면의 저항, 응축과정에 대한 저항, 증발부에 응축부의 대류열 저항으로 이루어지며 각각의 열 저항은 다음과 같이 정의된다.

$$R_{evap,p} = \frac{\ln(\frac{r_{o,p}}{r_{i,p}})}{k_p 2\pi L_{evap}} \tag{3-35}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$R_{evap,w} = \frac{\ln(\frac{r_{o,w}}{r_{i,w}})}{k_w 2\pi L_{evap}} \tag{3-36}$$

$$R_{evap,lv} = \frac{2}{h_{evap}\pi D_{i,p} L_{evap}} \tag{3-37}$$

$$R_{con,p} = \frac{\ln(\frac{r_{o,p}}{r_{i,p}})}{k_p 2\pi L_{con}} \tag{3-38}$$

$$R_{evap,i} = \frac{1}{h_{evap}\pi D_{i,p} L_{evap}} \tag{3-39}$$

$$R_{con,i} = \frac{1}{h_{con}\pi D_{i,con} L_{con}} \tag{3-40}$$

한 개의 히트파이프와 매니폴드의 작동유체 간의 열전달은 식 (3-41)로 표현할 수 있다.

$$Q_{con} = U_{con} A_{con} (T_{con} - T_i) = Q_{hp} \tag{3-41}$$

식 (3-33)과 식 (3-41)을 통해 응축부 표면온도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{con} = T_i + \frac{T_{evap} A_{hp}}{U_{con} A_{con} \sum R_{hp}} \tag{3-42}$$

응축부에서의 총괄열전달계수는 식 (3-43)으로 표현된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$U_{con} = \frac{1}{\frac{t_{hp}}{k_{hp}} + \frac{1}{h_{con}}} \tag{3-43}$$

여기서 t_{hp}와 k_{hp}는 히트파이프의 두께와 열전도율이며 응축부에서의 열전달계수는 식 (3-44)에 의해 유도할 수 있다.(Azad, 2008)

$$h_{con} = \frac{Nuk}{D_{hy}} \tag{3-44}$$

단일 히트파이프가 얻는 유용에너지는 히트파이프의 길이방향으로 흡수체가 흡수한 태양에너지와 주변으로 열손실간의 차이다. 하나의 히트파이프의 유용에너지율은 Hottel-Willer(1955)의 모델을 통해 계산할 수 있다.

$$Q_u = A_c F_a [G(\tau\alpha)_e - U_L(T_{hp} - T_a)] \tag{3-45}$$

여기서 T_a는 대기온도, F_a는 집열기의 효율계수, U_L은 태양열 집열기의 열손실계수이다. 매니폴드에서 작동유체로 전달되는 유효에너지는 식 (3-46)으로 표현할 수 있다.

$$Q_u = C_p \dot{m}(T_{f,o} - T_{f,i}) \tag{3-46}$$

식 (3-45)와 식 (3-46)을 결합하면 히트파이프의 온도를 얻을 수 있다. 히트파이프의 온도는 식 (3-47)로 표현된다.

$$T_{hp} = T_a + \frac{G(\tau\alpha)}{U} - \frac{T_{f,o} - T_{f,i}}{NTU_{hp}} \tag{3-47}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

히트파이프의 응축부에서 매니폴드에서 직교류로 흐르기 때문에 유용도 NTU 법은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_n = 1 - e^{-(NTU)_{con}} \tag{3-48}$$

$$\epsilon_n = \frac{T_{f,o} - T_{f,i}}{T_{con} - T_{f,i}} \tag{3-49}$$

Fig. 3.6에서 보여주듯이 매니폴드에는 n개의 히트파이프가 설치되며 작동유체는 입구측에 설치된 히트파이프부터 출구 쪽에 있는 n번째 히트파이프까지 순차적으로 열교환을 수행한다.

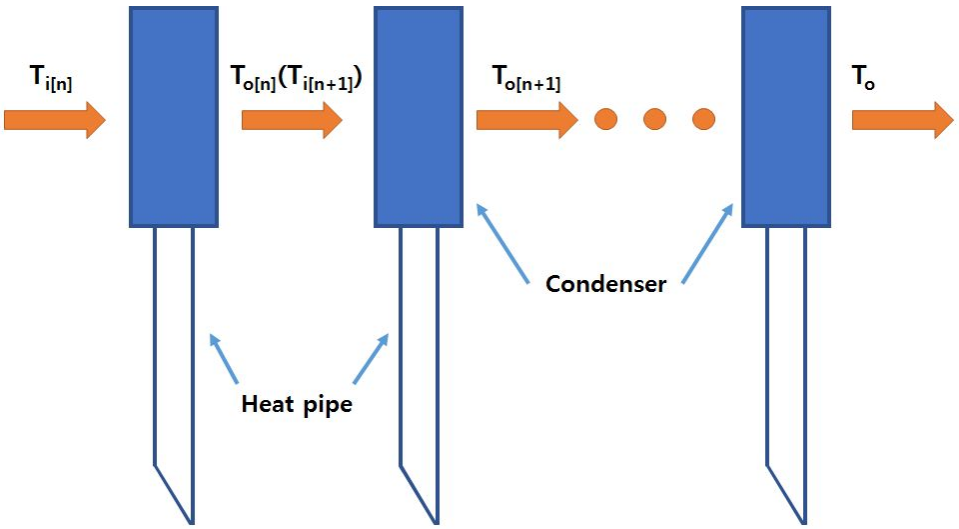


Fig. 3.6 System configuration of heat pipe solar collector

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그러므로 식 (3-48)과 식 (3-49), 식 (3-42)의 결합을 통해 n번째 히트파이프에 대한 집열기 출구의 온도를 식 (3-50)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{f,o} = T_{f,i} + \frac{\epsilon(T_{hp} - T_{f,i})A_{hp}}{U_{con}A_{con}R_{hp}}(1 + \frac{A_{hp}}{U_{con}A_{con}R_{hp}}) \quad (3\text{-}50)$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.4 태양열 집열기의 효율분석

본 해석연구에서 평판형, 히트파이프형, U-tube형 태양열 집열기의 열효율은 흡수체가 얻은 에너지와 집열기의 작동유체가 얻은 유효에너지를 통해 식 (3-51)과 식 (3-52)와 같이 계산할 수 있다.

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_{f,o} - T_{f,i})}{AG} \tag{3-51}$$

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{f,i} - T_{f,a})}{G} \tag{3-52}$$

여기서 $\dot{m}$과 C_p는 작동유체의 질량유량과 비열이고 $F_R(\tau\alpha)$과 $F_R U_L$은 열획득계수와 열손실계수이다.

종류별로 태양열 집열기의 성능과 광학적 특성을 비교하기 위해서는 집열기의 성능에 미치는 형상 요소를 동일하게 정의할 필요가 있다. Table 3.1은 본 해석연구에 사용된 평판형, U-tube형과 히트파이프형 태양열 집열기에 대한 상세사양을 보여준다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.1 Collectors specifications

Parameter	Flat-plate solar collector	U-tube solar collector	Heat pipe solar collector
Absorber area (m^2)	1.591	2	
Collector length (mm)	1000		
Collector length (mm)	1591		
Riser tube material	Copper		
Absorber plate thickness (m)	0.001		
Tube inner diameter (mm)	8		
Tube outer diameter (mm)	8.8		
Transmittance	0.81	0.81	0.81
Absorptivity of the absorber part	0.92	0.92	0.92
Emissivity of the absorber part	0.08	0.08	0.08
Heat pipe outer diameter (mm)		8	
Thickness of the heat pipe (mm)		1	
Conductivity of the heat pipe (W/m · ℃)		43	
Condensing part length (mm)		14	
Evaporating part length		1670	
Absorber tube outer diameter (mm)			37
Absorber tube thickness (mm)			2
Absorber are (m^2)			2
Copper fin thickness (mm)			0.6
Copper fin conductivity (W/m · ℃)			307
Air gap (mm)			1
Air gap conductivity (W/m · ℃)			0.03
U-tube diameter (mm)			8
U-tube thickness (mm)			1
Bond conductivity (W/m · ℃)			30

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.5 나노유체 모델링

나노유체는 나노입자 크기의 금속 및 비금속 입자를 안정적으로 분산시켜 물, 오일, 냉매 등의 기존유체의 열물성을 향상시킨 유체로 나노입자의 종류, 형상, 크기, 농도에 의해 나노유체의 열물성은 다르게 나타난다. 본 연구에서는 작동유체로 사용되는 크기가 다른 Al_2O_3 나노유체의 농도가 변함에 따라 평판형, U-tube형, 히트파이프형 태양열 집열기의 성능에 미치는 영향성을 평가하였다. 본 해석연구에 사용된 나노유체는 Al_2O_3 나노입자와 모유체인 물이 균일하게 혼합된 상태로 가정하였다. Table 4.1은 본 연구에 사용되는 나노입자와 작동유체의 열물성을 보여준다. 나노유체의 밀도와 비열은 식 (3-53)과 식 (3-54)로 나타난다.

$$\rho_{nf} = (1-\phi_v)\rho_{bf} + \phi_v \rho_{np} \tag{3-53}$$

$$Cp_{nf} = \frac{(1-\phi_v)\rho_{bf} Cp_{bf} + \phi_v Cp_{np}}{\rho_{nf}} \tag{3-54}$$

여기서 ρ_{bf}는 모유체의 밀도, ρ_{np}는 나노입자의 밀도, ϕ_v는 나노유체의 체적분률이다. 나노유체의 체적분률은 식 (3-55)를 통해 계산 할 수 있다.

$$\phi = \frac{1}{\left(\frac{1-\phi_w}{\phi_w}\right)\frac{\rho_{np}}{\rho_{bf}} + 1} \tag{3-55}$$

여기서 ϕ_w는 질량분률이며 ρ_{np}와 ρ_{bf}는 나노입자와 모유체의 밀도이다.

Khanafer과 Vafai는(2011) Al_2O_3 와 CuO 나노유체의 유효열전도율 측정에 대한 기존 문헌을 종합하여 입자의 크기와 농도를 고려한 열전도율 상관식을 개발하였으며 이는 식 (3-56)과 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + 1.0112\phi_v + 2.437\phi_v\left(\frac{47\times10^{-7}}{D_{np}}\right) - 0.0248\phi_v\left(\frac{k_{np}}{0.613}\right),\ R^2 = 96.5\% \quad (3\text{-}56)$$

Table 4.1 Properties of base fluid and nanoparticle

Properties	Value	Properties	Value
ρ_{bf}	959 kg/m^3	ρ_{np}	3970 kg/m^3
Cp_{bf}	4218 J/kg・K	Cp_{np}	765 J/kg・K
k_{bf}	0.681 W/m・K	k_{np}	36 W/m・K
μ_{bf}	1.68×10^{-5} m^2/s		

Corione(2010)은 Al_2O_3, Ti_2O, SiO_2, Cu 등 다양한 나노유체의 점성계수 측정에 대한 기존 문헌을 바탕으로 나노입자의 크기와 농도의 영향성을 고려한 점성계수 상관식을 개발하였으며 이는 식 (3-57)과 같다.

$$\mu = \frac{1}{\left[1 - 34.87\left(d_{np}/d_{bf}\right)^{-0.3}\phi_v^{1.03}\right]} \quad (3\text{-}57)$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4장 실험장치 및 방법

4.1 실험장치

본 연구에서 설계된 실험장치의 사진을 Fig. 4.1에 나타내었다. 동일한 운전조건에서 물과 Al_2O_3 나노유체를 적용한 집열기의 효율을 비교하기 위해 동일한 크기와 형태의 집열기를 사용하였다. Fig. 4.2는 실험장치의 계략도를 보여주고 있다. 작동유체인 Al_2O_3 나노유체와 물은 유량계에서 유량을 측정한 후 펌프를 통하여 집열기로 들어간다. 나노유체와 물을 적용한 태양열 집열 사이클은 집열기에서 나온 작동유체가 열교환기가 장착된 100 l 용량의 축열탱크로 들어가 차가운 물과 열교환을 하여 열부하를 전달하고 계속 순환하는 형태를 가진다. 태양열 집열기의 입구와 출구의 작동유체 온도와 외기온도를 측정하기 위해서 주요 부위에 T-type 열전대를 사용하였는데 이 열전대의 작동범위는 -200℃～300℃이다. 열전대는 물의 어는점과 끓는점에서 정밀온도계를 이용하여 보정하였으며, ±0.2℃ 오차 범위내의 값을 출력하는 것을 사용하였다.

Fig. 4.1 Photograph of the experimental apparatus

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

태양의 일사량은 QMS101 solar radiation sensor을 사용하여 측정하였으며 일사량계의 측정범위는 0-2000 W/m^{2}이며, 오차는 약 1.95%다. 태양열 시스템의 효율을 분석하기 위해 설치한 열전대, 유량계, 일사량계에 대한 데이터를 수집하기 위해 데이터 수집 장치인 데이터로거(Data logger-Yokogawa MX100)를 사용하였다. 또한, 실험 전에 모든 집열기와 파이프 안에 남아있을 나노입자 잔여물을 제거하기 위해 고압의 물과 아세톤을 사용하여 여러 번 깨끗이 세척한 후 추가 실험을 실시하였다.

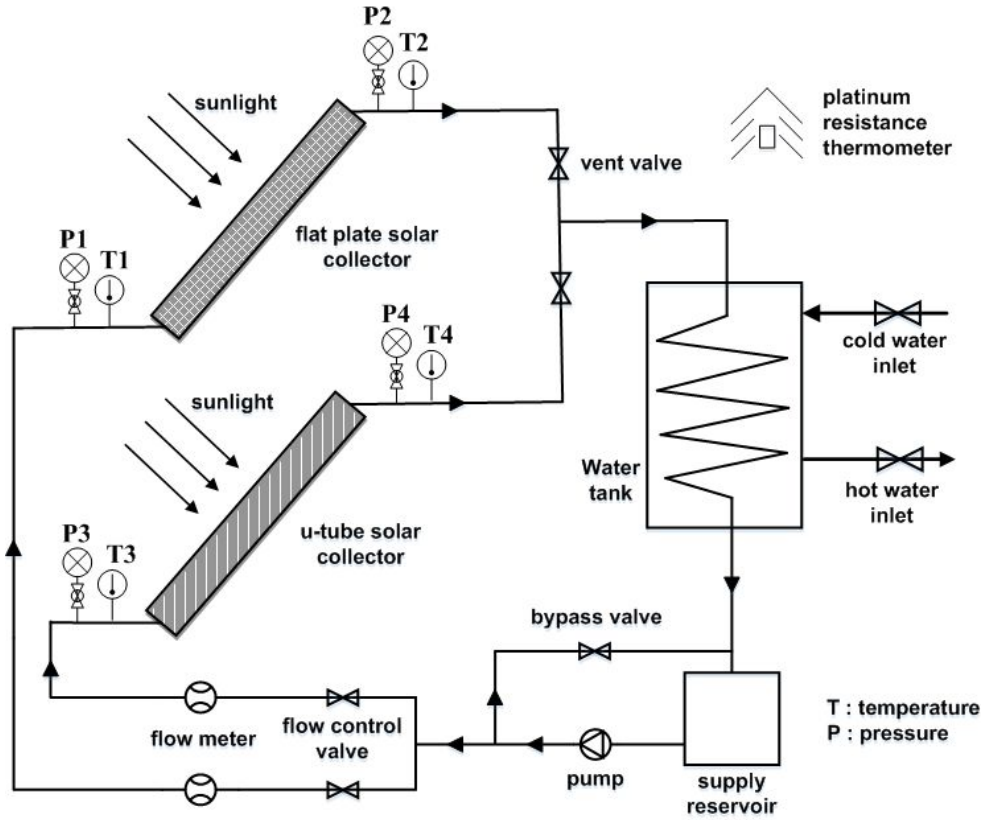


Fig. 4.2 Schematic diagram of solar collector test facility

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.1.1 온도측정

태양열 집열기 시스템 내 각 요소의 온도측정을 수행하기 위해 T-type 열전대를 각각의 집열기 입구와 출구에 설치하였다. 또한 외기온도를 측정하기 위하여 시스템 외부에 열전대를 설치하였다. T-type의 열전대의 온도범위는 -200℃ ~300℃ 이며 기전력의 직진성이 양호하고 내열, 내식성이 높은 장점이 있다. 그리고 열전대는 장치에 장착하기 전 오차를 수정하여 ±0.5℃ 내외로 보정하였다. Fig. 4.3과 Table. 4.2는 태양열 집열기 시스템에 설치된 T-type 열전대의 실물사진과 제원을 보여준다.

Fig. 4.3 Photograph of T-type thermocouple

Table 4.2 Specification of 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

4.1.2 일사량 측정

태양의 일사량은 QMS101 solar radiation sensor을 사용하여 측정하였으며 일사량계의 측정범위는 0-2000 W/m^{2}이며, 기기의 오차는 약 1.95% 이다. Fig. 4.4와 Table 4.3는 태양열 집열기 시스템에 설치된 일사량계의 실물사진과 제원을 보여준다.

Fig. 4.4 Photograph of pyranometer

Table 4.3 Specification of pyranometer

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

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.1.3 유량측정

사이클 내에 흐르는 작동유체의 질량유량 측정을 위해 정밀한 체적유량 측정 장치인 E-MAG-I의 체적유량계를 사용하였다. 체적유량계는 각각의 태양열 집열기 입구에 설치하였다. 본 연구에서 사용된 체적유량계는 Fig. 4.5와 같으며, 체적유량계의 시스템 사양을 Table 4.4에 나타내었다.

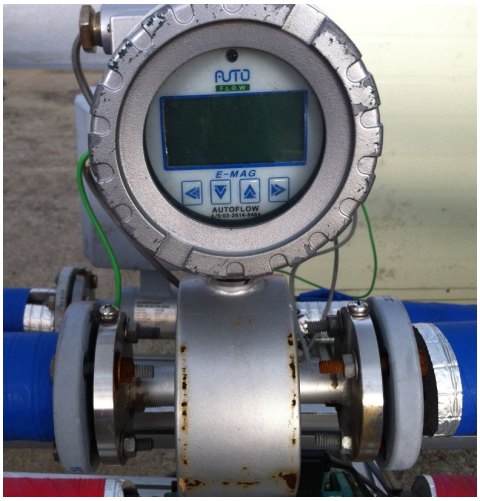


Fig. 4.5 Photograph of flow meter

Table 4.4 Specification of flow meter

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

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.1.4 축열탱크

본 연구에서 사용된 축열탱크는 본 실험을 위해 주문제작 하였다. 실험조건 및 용도를 고려하여 무가교 발포 단열처리를 하였으며 스테인리스 코일을 사용하여 제작하였다. 축열량은 최대 230 l 이고, 이와 관련된 상세 사양은 Table 4.5에 나타내었다. 그리고 Fig. 4.6은 축열탱크의 실물사진을 나타낸다.

Fig. 4.6 Photograph of storage tank

Table. 4.5 Specification of storage tank

Item	Specification
Model	EDS250
Storage of heat	230 l
Size(ϕ ×H)	570×1,300 mm
Hot water coil lengh	20 m
Pipe diameter	15 A

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.1.5 데이터 수집장치

데이터 수집장치로는 Yokogawa사의 MX 100 모듈을 사용하였다. 데이터 수집장치는 주요한 데이터를 수집 후 Ethernet 통신을 통해 PC에 수집한 데이터를 전송하며, 수집된 데이터는 Yokogawa사에서 제공된 MX100 standard 프로그램을 통해 모니터링을 할 수 있게 하며, 실험 종료 후 수집된 데이터를 엑셀 파일로 종합하여 제공해준다. Fig. 4.7과 Table 4.6는 데이터 수집장치의 실물과 제원을 보여준다.

Fig. 4.7 Photograph of data acquisition system

Table. 4.6 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

4.2 작동유체

4.2.1 산화알루미나(Al_2O_3) 나노유체

Al_2O_3는 나노유체로 가장 많이 사용되는 나노입자 중에 하나이며, 상대적으로 가격이 저렴한 나노입자이다. Al_2O_3 나노유체를 태양열 집열기에 적용하기 위해 Two-step 방법으로 제작하였다. 정량의 Al_2O_3 나노입자를 물과 약간의 분산안정제(Arabic gum)를 넣고 교반기에 30분 동안 혼합하였다. 혼합한 후 Ultrasonic homogenizer apparatus에 8시간 동안 혼합하였다. Fig. 4.8에 초음파 분산기의 실물사진과 Table 4.7에 초음파 분산기의 세부 규격을 나타내었다. 본 연구에서는 3가지의 나노입자가 사용되었는데 사용된 나노입자의 크기는 지름이 각각 25 nm, 50 nm 그리고 100 nm 이며, Fig. 4.9에 50 nm 나노유체의 SEM(scanning electron microscope) 측정 사진을 보여주고 있다. SEM 측정사진과 같이 산화 알루미나 나노입자의 모양은 구형 또는 거의 구형이고 구조는 육방밀집구조이며 전반적으로 잘 분산되어 있는 모습이다. 또한 나노유체 농도에 대한 영향성을 고려하기 위하여 나노유체의 농도를 0.5 vol%, 1.0 vol% 그리고 1.5 vol%로 변화시켰으며, 3가지 입자크기에 대하여 각각 서로 다른 세 가지 농도로 제작하였다. 제작된 나노유체를 3일 동안 눈으로 관찰한 결과 침전은 거의 발생하지 않았다.

산화알루미나는 알루미늄과 산소의 화합물이다. 공업적 표현으로 알루미나로 쓰며 분자량은 101.96 g/mol이다. 산화알루미나의 특징은 소결성을 들 수 있다. 알루미나의 소결은 그 입자크기가 작을수록 향상되며 입자크기가 작으면, 소결중 입자의 재배열이 일어나기 쉬워지고 또한 물질이동의 구동력이 되는 표면에너지가 커지기 때문이다. 여기서 소결이란, 분말에 열을 가해서 결정질로 만드는 것으로 즉, 고운 분말을 고온으로 가열하였을 때 녹는점 이하의 온도에서도 분말의 입자가 서로 부착하여 굳어지는 현상이며 분말 야금이나 요업의 기본이 되는 중요한 현상이며, 도자기나 각종 공업재료를 만드는 데 이용된다. 소결은 점성유동, 내부 확산, 표면 확산, 증발응착의 4가지 기구가 고려되며 고상소결과 액상소결로 나눌 수 있다. 고 순도 알루미나 분체

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

의 평균 입자크기 대부분이 1 ㎛ 이하이며 이론밀도에 가까운 소결체를 얻고자 할 경우, 알루미나 분체의 평균 입자 경을 작게 하는 것만으로는 충분하지 못하다. 소결속도는 입자크기에 의존하므로 입자크기에 큰 분포가 있을 경우 소결 시에 불균일한 입자성장이 일어나고, 비정상 성장입자(abnormal grain growth)가 생성됨으로써, 결정입자 내에 기공부분이 형성되어 충분한 소결밀도를 얻을 수 없다. 투광성이나 기계적 강도가 우수한 알루미나 세라믹스를 얻기 위해서는 원료 알루미나는 미립이며 분산성이 좋고, 가능한 입도 분포가 좁은 분체 입자경이 작은 알루미나가 저온 소결성이 우수함을 알 수 있다. 이와 같은 특성으로 인해 나노유체 연구 분야에서 많이 이용되고 있다.

Fig. 4.8 Photograph of Ultrasonic homogenizer

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 4.7 Specification of 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

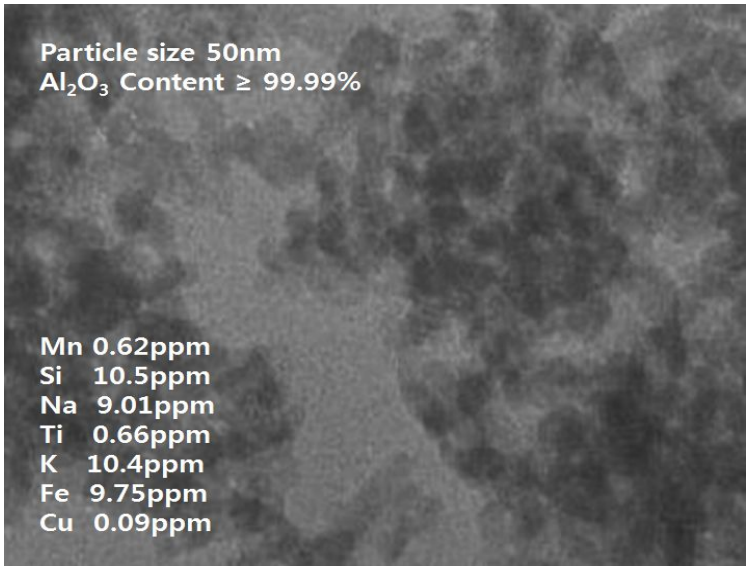


Fig. 4.9 Scanning Electron Microscope(SEM) of nanofluid

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나노유체는 모유체 평균입도 100 ㎚이하의 입자를 분산시킨 유체를 말한다. 열교환기용 열매체내에 열전도도가 우수한 입자를 주입함으로써 열매체의 열전도도를 증가시킬 수 있다. 나노유체 제조방법은 주입 입자를 수 ㎚ 혹은 수 ㎛ 크기의 금속입자를 첨가하는 방법이며 입자의 침전, 관내의 압력강하 증가, 막힘 현상, 큰 입자의 운동량에 의한 장치의 마모 등 많은 문제점을 야기하여 상용화 기술인 분산안정성이 높은 작동유체 개발 등에 많은 문제점이 아직 남아있는 실정이다. 나노기술의 발전과 더불어 나노입자의 크기의 제어가 가능하며 대량 제조할 수 있음에 따라 나노입자를 열매체에 주입하는 기술도 가능하다. ㎛ 단위의 입자는 입자 내부에 모든 원자가 존재하여 열전달에 참여하지 못하지만 나노입자는 표면에 원자가 20%이상 존재하며 이는 열전달에 직접 참여하여 열효율을 증가시킨다.

1995년 Choi(1995)는 최초로 열유체에 나노입자를 주입한 나노유체(nanofluid)의 개념을 제시하였다. 기존의 열매체용으로 사용되는 물, 에틸렌글리콜 등의 열매체에 열전도도가 탁월한 나노입자를 분산, 도입시킴으로써 기존 열매체와 비교할 때 현저한 열전달 특성을 구현할 수 있는 신개념의 소재이다. 따라서 나노입자는 상용화시 기존의 열전달 시스템인 열교환기 및 정밀 전자기기의 냉각매체로써의 활용과 이산화탄소 저감 및 열전달 효율 향상을 통한 막대한 환경적, 경제적 파급효과가 예상되는 신개념의 재료이다. 나노유체의 열전달 상승원인은 유체 내에서 입자의 브라운 운동, 입자와 유체 사이의 경계에 형성되는 분자 층의 효과, 나노 입자내의 특이한 열전도 특성, 나노 입자들 사이의 가상적 응집 등이다. 이러한 원인으로 인해 여러 연구결과에서 입자의 체적분율이 증가할수록 유효열전도도가 증가하며, 입자의 체적에 대한 표면 면적의 비가 증가할수록 또한 열전도도가 증가한다고 보고하고 있다.

나노유체는 AC&R(air conditioning and refrigeration)과 건물의 HVAC(heat, ventilation and air conditioning)시스템에 사용되는 비용으로 열효율을 25% 증가할 때 연간 200억 달러 이상의 비용절감과 나노유체 열교환기로 5%의 시장만 확보하더라도 연간 10억 달러의 시장성을 보유할 수 있다. 또한 산업용, 건물용, 수송용 등 산업 전 분야의 열교환 시스템에 적용할 수 있으며, 특히 가정용 냉장고, 냉장고 장치, 엔진냉

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

각기, 쿨러, 히터, 순간온수기, 공조 설비, 냉각탑 등이 있으며 산업장치는 발전설비, 에너지 산업, 석유화학, 화학공업, 제철산업 등 다양하게 사용 가능하다. 이론적으로 나노유체를 완벽하게 분석하기에는 아직 이른 실정이다. 따라서 나노유체의 중요한 요인만을 이용한 공식들이 제시되어 왔다. 나노유체의 열전도도, 입자의 부피분율, 표면적, 입자의 형태 등이다. 이를 바탕으로 해서 실험적으로 구해진 여러 가지 모델들이 제시되어 왔다. 대표적인 모델로 Maxwell Model이 있다. 이 모델은 두 가지 요소로 이루어진 유체에 적용할 수 있다. 그리고 입자가 상대적으로 크고 적은 입자의 농도를 가졌을 경우 신빙성이 높아진다. 이에 본 연구에서는 평판형과 U-tube형 태양열 집열기에 Al_2O_3 나노유체를 적용하여 입자의 크기와 나노유체의 농도에 따른 성능 특성을 실험적으로 고찰하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.3 실험방법 및 조건

4.3.1 실험방법

작동유체를 기본유체인 물과 Al_2O_3 나노유체를 적용하여 평판형 태양열 집열기와 U-tube형 태양열 집열기의 효율을 비교하기 위해 동일한 집열기를 사용하여 같은 장소와 외기조건에서 실험을 동시에 수행하였다. 실험은 2015년 11월부터 2016년 4월까지 수행하였고 세 가지 나노입자 크기의 Al_2O_3 나노유체를 각각 0.5 vol%, 1.0 vol%, 1.5 vol% 농도로 변화시켰으며, 이에 대하여 0.033 kg/s와 0.047 kg/s 두 가지의 작동유체의 질량유량으로 오전 10:00부터 오후 17:00까지 수행하였다.

본 실험에서는 작동유체로 일반 용액을 사용한 경우와 이성분 나노유체를 사용한 경우에 대한 열 및 물질전달 특성을 비교하였다. 이성분 나노유체의 입자농도는 분산안정성 실험의 선행 연구결과를 바탕으로 같은 조건하에서 Al_2O_3 나노입자를 크기에 따른 효율과 성능특성을 해석과 실험을 통해 고찰하였다.

태양열 집열기 시스템에 작동유체를 Al_2O_3 나노유체를 사용하였을 때의 성능 향상 정도를 분석하기 위해 나노입자 크기와 농도가 서로 다른 조건에서 각각 2번 이상 실험을 수행하여 평균적인 데이터를 분석하였다. Table 4.8에 본 연구에 설정된 실험조건을 정리하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.3.2 실험조건

평판형 태양열 집열기와 U-tube형 태양열 집열기에 동일한 유량에서 나노입자 크기 변화에 따른 Al_2O_3 나노유체와 기본유체인 물을 적용한 시스템의 열효율을 측정하기 위해 Table 4.8과 같은 조건에서 실험을 실시하였다. 본 연구에서는 분산안정성이 우수한 Al_2O_3 나노유체를 제조를 위해 분산안정제인 Arabic gum을 첨가하였다. Al_2O_3 나노유체를 만들기 위해 모유체인 물에 Al_2O_3 나노입자와 분산안정제인 Arabic gum 첨가 후 30분간 교반을 수행하였으며, 교반된 Al_2O_3-water를 8시간 동안 초음파 분산을 통해 Al_2O_3 나노유체를 제조하였다. 또한 실험 시 시스템에 흐르는 열매체 유속 0.033 kg/s와 0.047 kg/s로 고정시켰으며 나노유체의 농도는 0.5 vol%, 1.0 vol%, 1.5 vol%로 변화시켜 실험을 수행하였다. 평판형과 U-tube형 태양열 집열기의 설치각도는 남향에 45° 이며 광주광역시 동구 조선대학교에 위치(위도: 35° , 경도: 126°)해 있다. 평판형 태양열 집열기의 면적은 2 m^2이며 U-tube형 태양열 집열기의 면적은 2.37 m^2이며, 동일한 유량조건으로 오전 10:00부터 오후 17:00까지 실험을 수행하였다.

Table 4.8 Experiment at condition

Item		Specification
nanoparticle / Size (nm)		Al_2O_3 / 20, 50, 100
Concentration (vol%)		0.5, 1, 1.5
Stabilizer addition		Arabic gum
Experiment time(hr)		10:00～17:00
Solar radiation (W/m^2)		279～939
Collector	Inlet temp. (℃)	8～9.5
	Mass flow rate (kg/s)	0.033, 0.047

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

식 (4-1)과 (4-2)는 태양열 집열기의 순간적인 열효율을 구하는 식으로 집열기의 입 · 출구 온도, 유량, 태양 일사량을 측정하여 나노유체와 기본유체인 물을 적용한 집열기의 효율을 계산하였다.

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_{f,o} - T_{f,i})}{GA} \tag{4-1}$$

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{f,i} - T_{f,a})}{G} \tag{4-2}$$

여기서 G는 집열면 일사량, $F_R(\tau\alpha)$은 y축과의 교점, $F_R U_L$은 열손실계수로 곡선의 기울기(slope)를 나타내며, T_i는 집열기 입구의 집열 매체의 온도, T_a는 외기온도이다. $F_R(\tau\alpha)$은 집열기의 투과 흡수율에 의해서 결정되는 값이며, $F_R U_L$은 집열기의 열손실율 값이 된다. 따라서 집열기 성능은 $F_R(\tau\alpha)$값은 클수록, 그리고 기울기는 작을수록 성능이 좋은 집열기이다. 그러므로 집열기는 투과체와 흡수판의 흡수율 및 열손실율이 집열기의 성능에 절대적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

적용분야에 대한 집열기의 선정은 성능곡선으로부터 작동조건을 고려해서 가능한 효율이 높은 집열기를 선정하는 것이 좋다. 외기온도와 집열 매체의 온도차 (T_i-T_a)가 큰 분야에 적용되는 집열기는 $F_R(\tau\alpha)$값이 비슷하다면 곡선의 기울기인 $F_R U_L$값이 작은 집열기를 선정하는 것이 좋다. 집열기 효율의 불확실도는 Moffat(1985)에 의해 권고된 식으로 식(4-3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta\eta}{\eta} = \left[\left(\frac{\delta m}{m} \right)^2 + \left(\frac{\delta (T_o - T_i)}{T_o - T_i} \right)^2 + \left(\frac{\delta G}{G} \right)^2 \right]^{0.5} \tag{4-3}$$

위의 식으로부터 질량유량의 오차는 식 (4-4)와 같이 계산하였다.

$$\frac{\delta m}{m} \leq 0.5\% \tag{4-4}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

또한, 온도의 오차는 식 (4-5)와 같이 계산하였다.

$$\frac{\delta(T_o - T_i)}{T_o - T_i} \leq \left[\left(\frac{\delta T_o}{T_o}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_i}{T_i}\right)^2\right]^{0.5} \tag{4-5}$$

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

그리고, 일사량의 오차는 식 (4-6)와 같이 계산하였다.

$$\frac{\delta G}{G} \leq 1.95\% \tag{4-6}$$

따라서, 전체 효율의 오차는 식 (4-7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta \eta}{\eta} \leq 3.02\% \tag{4-7}$$

따라서 식 (4-4)~(4-7)에 의하여 본 실험에서의 태양열 집열기의 측정 효율에 대한 최대 불확실도는 약 3.02%로 계산되었다. 위와 같은 방법으로 계산한 결과 평판형 태양열 집열기에 기본유체인 물을 적용하였을 경우 불확실도는 1.41%로 계산되었고, 나노유체를 적용한 평판형 집열기의 불확실도는 1.43%로 계산되었다. 또한 U-tube형 태양열 집열기의 기본유체인 물을 적용하였을 경우 불확실도는 1.3%, 나노유체를 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 불확실도는 2.25%로 계산되었다.

Al_2O_3 나노유체의 체적농도의 증가는 작동유체의 밀도와 점도에 영향을 주기 때문에 태양열 집열기의 압력강하에 영향을 준다. 집열기에서 압력강하가 증가하면 유동에 필요한 동력이 증가하게 되기 때문에 나노유체를 적용하였을 때 열전달 증가에 따른 이득은 감소하게 된다. 따라서 시스템에서 작동유체의 압력손실은 중요한 항목 중 하나이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

실험결과, 본 연구에서는 나노유체의 농도가 증가함에 따라 압력강하는 증가하였지만 모유체인 물에 비해 큰 변화가 없어 시스템의 성능에 영향이 매우 작은 것으로 나타났다. 물을 작동유체로 사용한 경우 질량유량이 0.047 kg/s 인 경우 평판형 태양열 집열기의 압력강하는 2.142 kPa로 나타난 반면 U-tube형 태양열 집열기의 압력강하는 1.92 kPa로 나타났다. 이와 같이 평판형 태양열 집열기가 U-tube 형 태양열 집열기에 비해 큰 압력강하를 갖는 이유는 설계인자의 차이로 집열된 태양열을 작동유체로 원활히 전달하기 위해서 평판형 태양열 집열기의 경우 U-tube형 태양열 집열기에 비해 관의 직경이 작은 반면 관의 길이는 길어져야 하기 때문이다. 나노유체의 농도가 0.5 vol% 에서 1.5 vol% 까지 증가함에 따라 압력강하는 3.142 kPa에서 3.072 kPa로 감소한 반면 U-tube형 태양열 집열기의 경우 동일 농도변화에서 1.909 kPa에서 2.089 kPa로 증가하였다. 이는 동일한 질량유량의 나노유체가 흐를 때 나노유체의 농도의 증가는 밀도와 점도를 증가시키기 때문에 압력강하가 증가되나 본 연구에서 사용된 나노유체의 농도는 매우 작은 농도이기 때문에 압력강하에 미치는 영향이 작기 때문이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5장 태양열 집열기의 성능 해석결과 및 고찰

5.1 평판형 태양열 집열기의 성능 해석결과 및 고찰

5.1.1 성능해석 모델의 검증결과

Fig. 5.1은 평판형 태양열 집열기의 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s 조건에서 나노입자의 크기는 20 nm에서 나노유체의 농도에 따른 영향을 실험값과 비교하여 보여주고 있다. 모델링 결과 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 가장 높은 효율을 보였고 열손실이 없는 x축계수가 0인 경우 효율이 65.75%로 나타났다. 그리고 1.0 vol%와 0.5 vol%에서는 각각 65.24%, 63.85%로 나타났다. 동일 조건에서 물을 사용하였을 경우 효율은 53.37%를 나타내었다. 나노유체를 적용하여 가장 좋은 효율을 보였던 1.5 vol%의 효율은 실험결과 77.4%로 나타났고 1.0 vol%와 0.5 vol%에 비해 3.9%, 6.9% 향상된 결과를 보였다. 해석결과와 비교하였을 때 효율의 최대차는 약 11.65%를 보였고, 0.5 vol%의 농도에서 6.65%의 차이를 보였다. 기본유체인 물을 사용한 경우의 효율은 60.11%로 1.5 vol%의 나노유체를 적용한 효율과 최대 17.3% 차이를 나타내었다. 해석결과도 실험결과와 마찬가지로 1.5 vol%의 농도에서 기본유체인 물과 비교한 결과 약 12.4%의 차이를 보였다.

Table 5.1은 평판형 집열기의 나노유체의 농도에 따른 효율의 향상 정도를 해석과 실험결과의 비교를 통해 얻은 결과에서 특성 매개 변수를 갖는 선형방정식으로 계산하여 비교하여 나타내었다. 모델링을 통한 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 1.5 vol%에서 0.659로 최대값을 보였고 0.5 vol%에서 가장 낮게 나타났다. 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$가 최대일 때 열손실계수 F_RU_L값은 6.04로 나타났다. 실험을 통한 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 1.5 vol%에서 0.774로 최대값을 나타내었고 열손실계수 F_RU_L값은 20.309를 나타내었다. 또한, X, Y 상관계수의 제곱인 결정계수 R^2의 값은 해석결과 87%, 실험결과 98.7%를 나타내었다. 물을 사용한 경우 해석결과는 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$ 0.537, 실험결과 $F_R(\tau\alpha)$는 0.615로 가장 작게 나타났다. 해석결과와 실험결과 모두 나노유체를 적용하였을 때 물을 사용한 결과 값보다 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이 크게 나타났으며, 물을 적용한 집열기보다 나노유체를 적용한 태양열 집열기가 열적성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 또한 해석결과와 실험결과 모두 나노유체의 농도 1.5 vol%에서 가장 높은 효율을 나타내었다. 해석결과와 실험결과 값이 비교적 큰 차이를 나타내는 이유는 나노입자의 크기 20 nm, 0.033 kg/s의 유량조건에서 나노유체의 농도 1.0 vol%의 실험조건을 모델링의 조건으로 설정하여 해석을 진행하였기 때문에 실험결과의 조건보다 해석에서 많은 가정에 의하여 출구온도가 낮아져 나온 현상이라 판단된다.

기울기값을 나타내는 $F_R U_L$값이 크다는 것은 열손실율이 높다는 것을 의미하는데 평판형 집열기의 해석결과는 열손실계수 $F_R U_L$값이 평균 5.90을 나타내고 실험결과는 평균 약 20.32를 나타내었다. 이는 실험값이 해석값에 비해 열손실이 많았다는 것을 의미하고 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 순간적인 효율을 구할 때 주로 사용하는 인자로 높을수록 순간 효율이 좋다는 것을 의미한다. 평판형 태양열 집열기는 나노유체의 농도 1.5 vol%에서 가장 높은 효율을 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

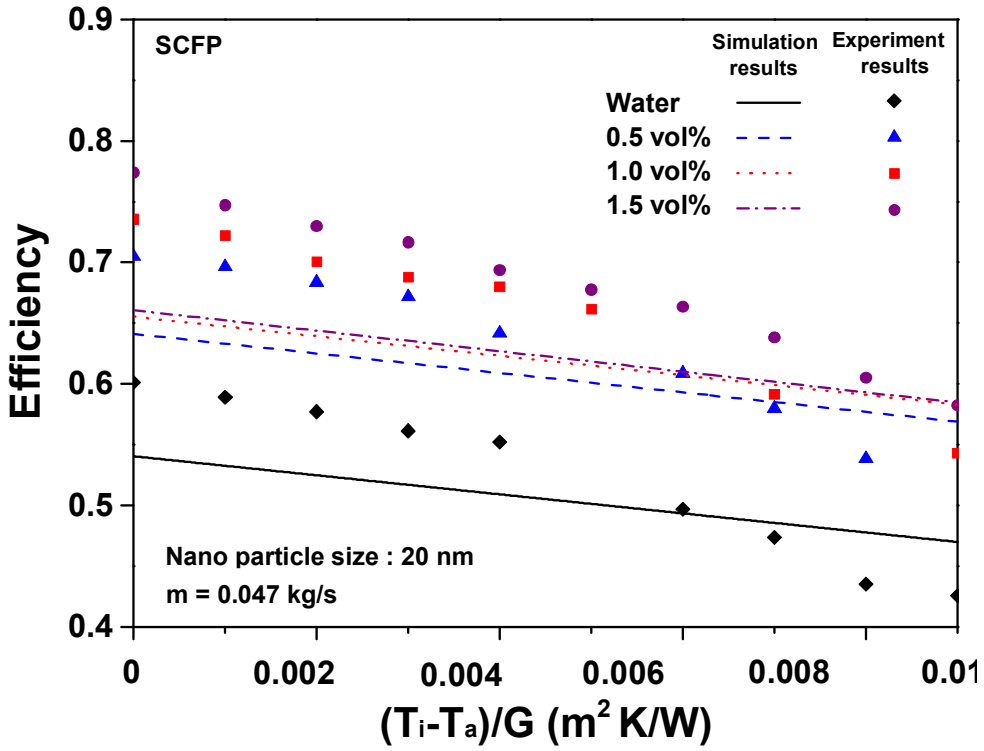


Fig. 5.1 Comparison of the variation of efficiency in the flat plate solar collector for different nanofluid concentration(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Table 5.1 Comparison on the Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for Al_2O_3 nanofluid and water(m=0.047 kg/s)

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$ Simulation/ Experimental	$F_R U_L$ Simulation/ Experimental	R^2 Simulation/ Experimental
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 0.5 vol%)	0.639 / 0.719	5.80 / 20.351	0.88 / 0.958
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0 vol%)	0.654 / 0.747	5.98 / 21.310	0.87 / 0.956
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.5 vol%)	0.659 / 0.774	6.04 / 20.309	0.87 / 0.987
Water	0.533 /0.615	4.48 / 20.660	0.91 / 0.960

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5.1.2 해석결과 및 고찰

Fig. 5.2는 나노유체의 농도에 따른 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 해석결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 68.68%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 나노유체의 농도 0.5 vol%에서는 평균 효율이 63.73%, 1.0 vol%에서는 63.73%나타났고 1.5 vol%에서는 63.69%로 나타났다. 따라서 나노유체의 농도변화에 따른 태양열 집열기의 효율의 변화는 다소 작은 것으로 나타났다. 또한 집열기의 효율은 약간의 시간차를 두고 태양열 복사열의 변화와 유사한 경향을 보이며 변화하였으나 그 변화폭은 다소 작은 것으로 나타났다.

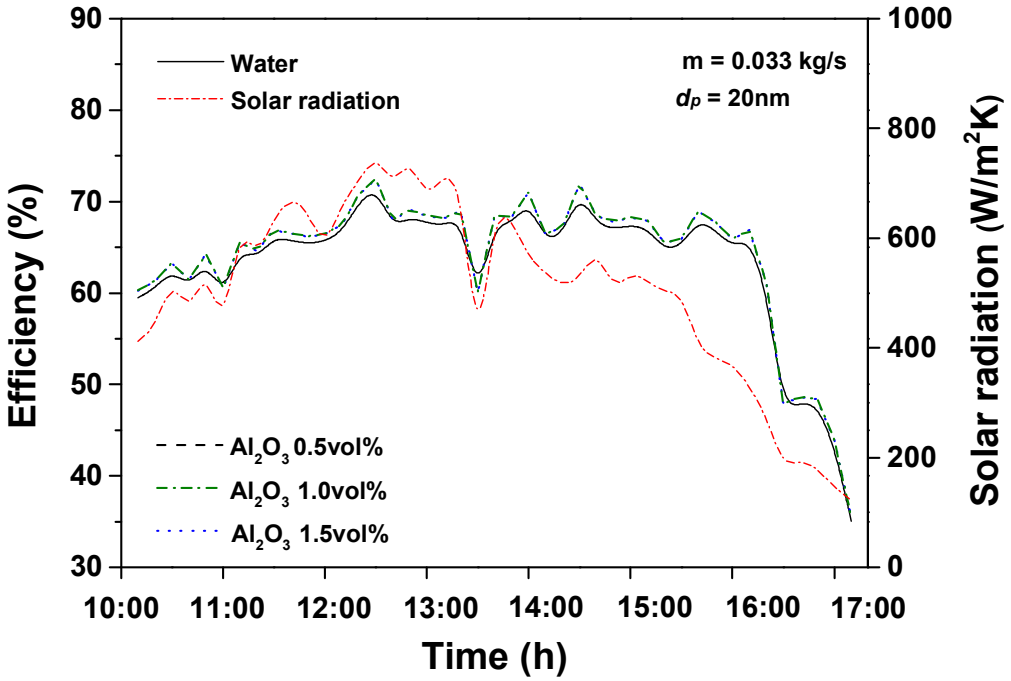


Fig. 5.2 Variation of efficiency in the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water according to concentration of nanofluid(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 5.3는 나노유체의 농도에 따른 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 해석결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 64.04%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 0.5 vol%에서는 평균 효율이 64.64%, 1.0 vol%에서는 64.64%나타났고 1.5 vol%에서는 64.62%가 나타났다. 질량유량이 0.033kg/s 일 때보다 약 0.9% 정도 높은 효율을 보였다. 해석결과 평판형 태양열 집열기의 모델은 일사량의 변화에 따른 효율변화를 잘 반영하는 것으로 확인되었다.

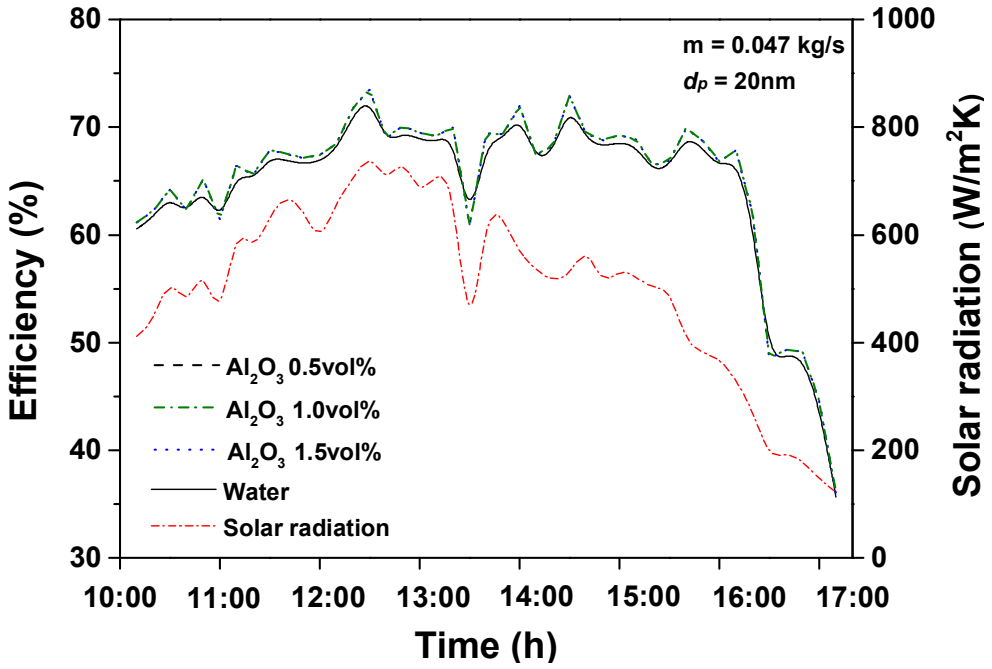


Fig. 5.3 Variation of efficiency in the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water according to concentration of nanofluid(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 5.4은 0.047 kg/s 유량조건에서 20 nm 크기를 가지는 Al_2O_3 나노유체의 농도에 따른 평판형 태양열 집열기의 효율을 다양한 조건에서 해석한 결과를 보여주고 있다. 일반적으로 집열기의 효율은 열손실변수 $(T_i-T_a)/G$의 변화에 큰 영향을 받기 때문에 이를 변수로 하여 집열기의 효율을 평가한다. 여기서 x축인 $(T_i-T_a)/G$는 순간적인 태양열 집열기의 효율을 결정하는 중요한 매개변수로 집열기의 형태가 정해지면 흡수관에서 흡수한 에너지와 외부로의 열손실은 크게 변화하지 않기 때문에 집열기의 효율곡선은 $(T_i-T_a)/G$에 의해 좌우된다. Fig. 5.4에서 보듯이, Al_2O_3 나노유체를 사용한 집열기의 효율이 물을 사용한 집열기보다 우수함을 알 수 있다. 여기서 $T_i=T_a$일 때 태양열 집열기의 효율은 최대값을 가진다. 이 때 농도가 1.5 vol%인 Al_2O_3 나노유체가 65.75%로 가장 높은 효율을 보이며 이는 물보다 약 12.38% 향상된 결과이다. 또한 1.0 vol%와 0.5 vol%에서의 효율은 각각 65.24%, 63.85%를 나타내었다.

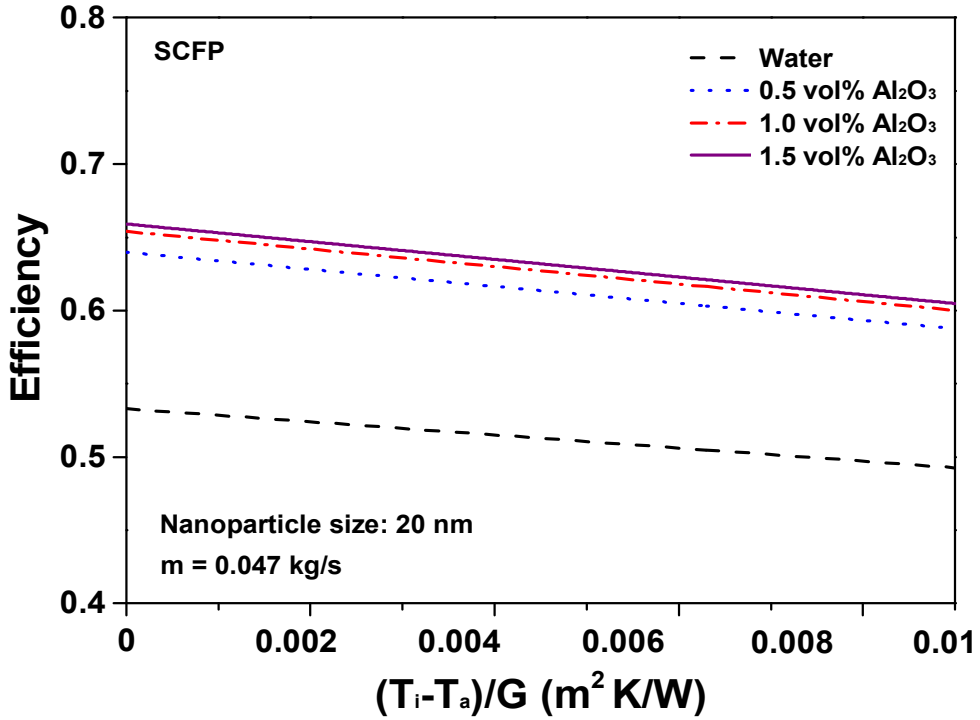


Fig. 5.4 Variation of efficiency in the flat plate solar collector for different nanofluid Concentration(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5.2 U-tube형 태양열 집열기의 성능 해석결과 및 고찰

5.2.1 성능해석 모델의 검증결과

Fig. 5.5는 U-tube형 태양열 집열기의 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s 조건에서 나노입자의 크기는 20 nm에서 나노유체의 농도에 따른 영향을 실험값과 비교하여 보여주고 있다. 모델링 결과 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 가장 높은 효율을 보였고 열손실이 없는 x축계수가 0인 경우 효율이 56.16%로 나타났다. 그리고 1.0 vol%와 0.5 vol%에서는 각각 55.92%, 55.46%로 나타났다. 물을 사용하였을 경우 효율은 53.37%를 나타내었다. 하지만 실험결과, 나노유체의 농도가 1.0 vol%에서 가장 높은 효율을 보였다. 열손실이 없는 x축계수가 0인 경우 효율이 72.40%로 나타났다. 그리고 1.5 vol%와 0.5 vol%에서는 각각 67.80%, 65.92%로 나타났으며, 기본유체인 물을 사용한 경우 효율은 58.36%를 나타내었다. 물을 사용한 경우 나노유체를 적용한 효율의 차이는 14.04%를 나타냈었다. 해석결과와 실험결과를 비교한 결과 평균적으로 약 12.8%의 차이를 보였다.

Table 5.2는 U-tube형 집열기의 나노유체의 농도에 따른 효율의 향상 정도를 해석과 실험결과의 비교를 통해 얻은 결과에서 특성 매개 변수를 갖는 선형방정식으로 계산한 후 비교하여 나타내었다. 해석결과, 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 1.5 vol%에서 0.565로 최대값을 보였고 0.5 vol%에서 가장 낮았다. 이때 열손실계수 $F_R U_L$값은 각각 4.83, 4.82로 나타났다. 실험을 통한 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 1.0 vol%에서 0.732로 최대값을 나타내었고 열손실계수 $F_R U_L$값은 17.69 이었다. 물을 사용한 경우 해석결과는 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$는 0.537로 가장 작게 나타났다. 실험결과는 효율이 가장 좋은 나노유체의 농도 1.0 vol%에서 축 계수가 0인 열손실이 없는 경우 열효율은 73.30%로 분석되었다. 또한, X, Y 상관계수의 제곱인 결정계수 R^2의 값은 해석결과 78%, 실험결과 93.7%를 나타내었다. 물을 사용한 경우 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.617로 가장 작게 나타났으며 열손실계수는 20.389로 가장 크게 나타났다. 해석결과와 비교하면 열손실계수 $F_R U_L$값은 물을 사용하였을 경우 가장 작게 나타났다. 이때 x축 계수가 0인 열손실이 없는 경우 열효율은 53.37%로 분석되었다.

기울기값을 나타내는 $F_R U_L$값이 크다는 것은 열손실율이 높다는 것을 의미하는

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

데 U-tube형 집열기의 해석결과는 열손실계수 $F_R U_L$값이 평균 4.830을 나타내고 실험결과는 평균 약 18.05을 나타내었다. 이는 실험값이 해석값에 비해 열손실이 많았다는 것을 의미하고 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 순간적인 효율을 구할 때 주로 사용하는 인자로 높을수록 순간 효율이 좋다는 것을 의미한다. U-tube형 태양열 집열기는 나노유체의 농도 1.0 vol%에서 가장 높은 효율을 나타내었다. 해석결과 평판평 태양열 집열기와 U-tube형 집열기 모두 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 가장 좋은 성능을 나타내었다. 하지만 실험결과 평판형 태양열 집열기는 나노유체의 농도가 1.5 vol%, U-tube형 태양열 집열기는 1.0 vol%에서 가장 좋은 성능을 나타내었다. 그리고 U-tube형 태양열 집열기를 평판형 집열기와 비교하였을 경우 가장 높은 효율을 보인 1.0 vol%에서 최대 7.16% 향상된 결과를 보였다. 해석결과와 실험결과 값이 비교적 큰 차이를 나타내는 이유는 나노입자의 크기 20 nm, 0.033 kg/s의 유량조건에서 나노유체의 농도 1.0 vol%의 실험조건을 모델링의 조건으로 설정하여 해석을 진행하였기 때문이며 실험결과의 조건보다 낮은 일사량의 값을 적용하였기에 출구온도가 낮아져 나온 현상이라 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

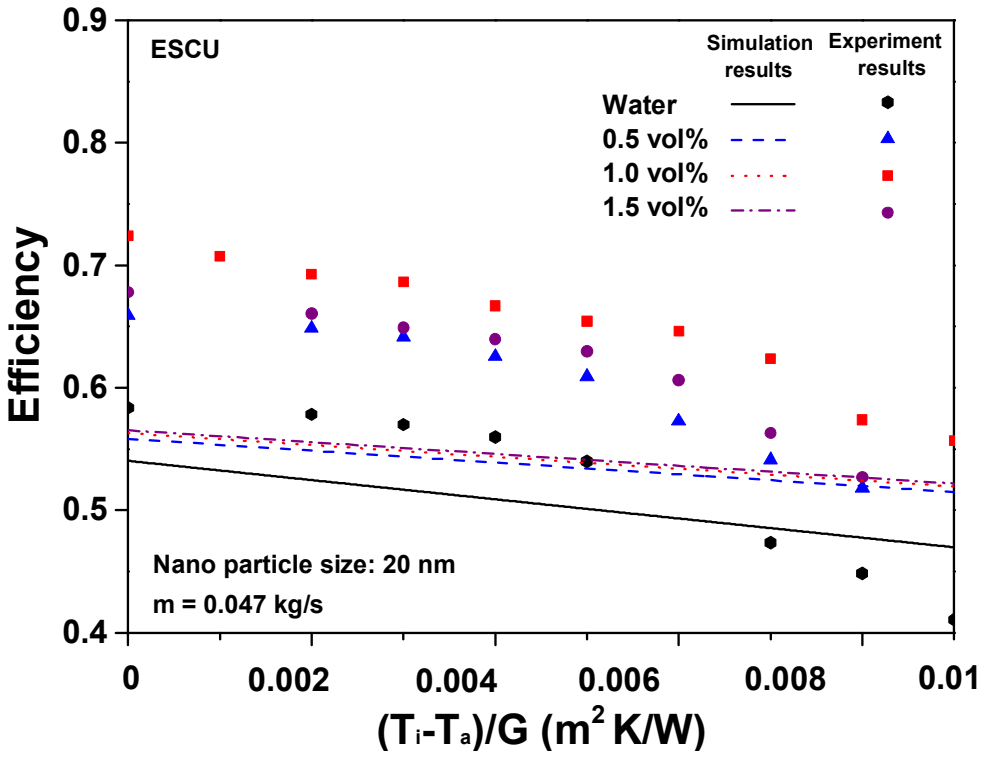


Fig. 5.5 Comparison of the variation of efficiency in the U-tube solar collector for different nanofluid concentrations(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Table 5.2 Comparison on the Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for Al_2O_3 nanofluid and water(m=0.047 kg/s)

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$ Simulation/ Experimental	$F_R U_L$ Simulation/ Experimental	R^2 Simulation/ Experimental
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 0.5 vol%)	0.558 / 0.684	4.82 / 18.67	0.78 / 0.889
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0 vol%)	0.563 / 0.733	4.83 / 17.69	0.78 / 0.938
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.5 vol%)	0.565 / 0.698	4.83 / 18.05	0.78 / 0.863
Water	0.537 / 0.617	4.68 / 20.38	0.78 / 0.884

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5.2.2 해석결과 및 고찰

Fig. 5.6은 나노유체의 농도에 따른 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 하루 동안에 시간에 따른 효율과 일사량의 변화를 해석적으로 나타낸 그래프이다. 해석결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 53.6%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 0.5 vol%에서는 평균 효율이 53.15%, 1.0 vol%에서는 53.66%로 나타났고 1.5 vol%에서는 53.93%가 나타났다. 작동유체와 시스템의 열용량 때문에 큰 일사량 변화에도 불구하고 열효율은 응답성이 늦게 나타나며 응답의 크기도 작은 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5.7은 나노유체의 농도에 따른 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 해석결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 53.86%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 0.5 vol%에서는 평균 효율이 53.48%, 1.0 vol%에서는 53.94%나타났고 1.5 vol%에서는 54.18%가 나타났다. 평균적으로 질량유량이 0.033kg/s 일 때보다 약 0.3% 높은 효율을 보였다. 해석결과는 나노유체의 농도에 따른 효율차이가 크게 나타나지 않았다.

Fig. 5.8은 모델링을 통한 결과로 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s 유량조건에서 20 nm 크기를 가지는 Al_2O_3 나노유체의 농도에 따른 U-tube형 태양열 집열기의 효율의 변화를 $(T_i-T_a)/G$의 변화에 따른 결과를 보여주고 있다. 이때 y축 절편 값은 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$이고 기울기가 F_RU_L값이며, $F_R(\tau\alpha)$값은 클수록 열손실계수인 F_RU_L값은 작을수록 우수한 집열기라 일컫는다. Fig. 5.8에서 보듯이, Al_2O_3 나노유체를 사용한 집열기의 효율이 물을 사용한 집열기보다 우수함을 알 수 있다. 여기서 T_i=T_a일 때 태양열 집열기의 효율은 최대값을 가진다. 이 때 농도가 1.5 vol%인 Al_2O_3 나노유체가 53%로 가장 높은 효율을 보이며 이는 물보다 약 3% 향상되었다. 또한 T_i가 T_a에 가까워지면 효율의 차이도 감소하는 것으로 나타났다. 평판형 태양열 집열기와 비교 결과 평균적으로 약 8.5% 성능 차이를 보였다. 또한, 특성매개변수를 갖는 선형방정식으로 계산하여 고찰한 결과 U-tube형 태양열 집열기의 경우 나노입자의 사이즈 20nm, 나노유체의 농도 0.5 vol%에서 x축에 대한 열손실계

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수 $F_R U_L$값은 4.82, 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.55로 나타났으며, x축 계수가 0인 열손실이 없는 경우 열효율은 55.45%로 분석되었고, 나노유체의 농도 1.0 vol%에서 x축에 대한 열손실계수 $F_R U_L$는 4.83, 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$는 0.56로 나타났다. 또한 나노유체의 농도 1.5 vol%에서 x축에 대한 열손실계수 $F_R U_L$는 4.83, 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$는 0.57으로 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

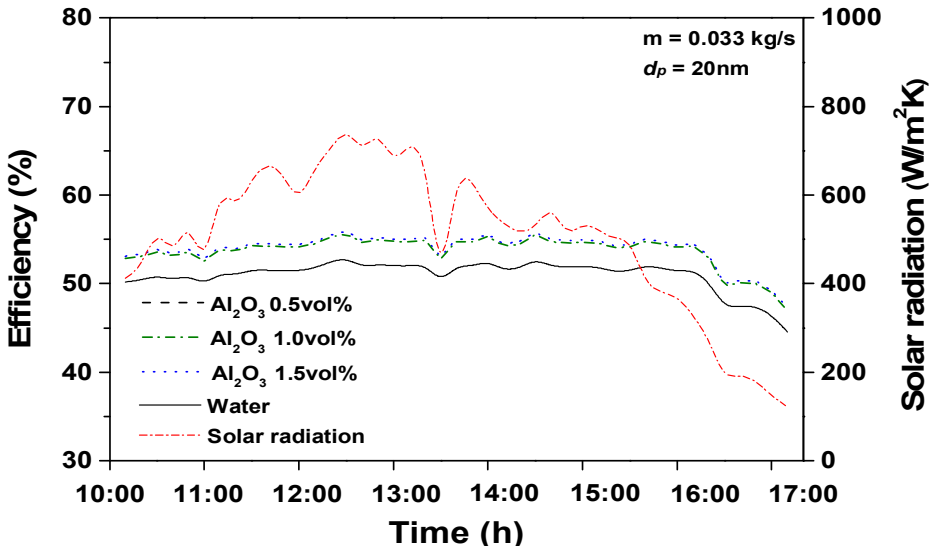


Fig. 5.6 Variation of efficiency in the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water according to concentration of nanofluid(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

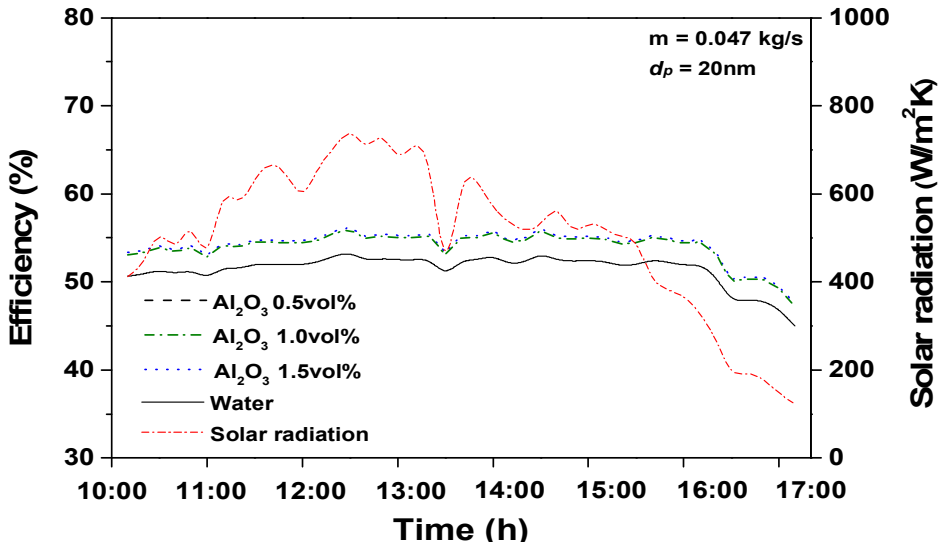


Fig. 5.7 Variation of efficiency in the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water according to concentration of nanofluid(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

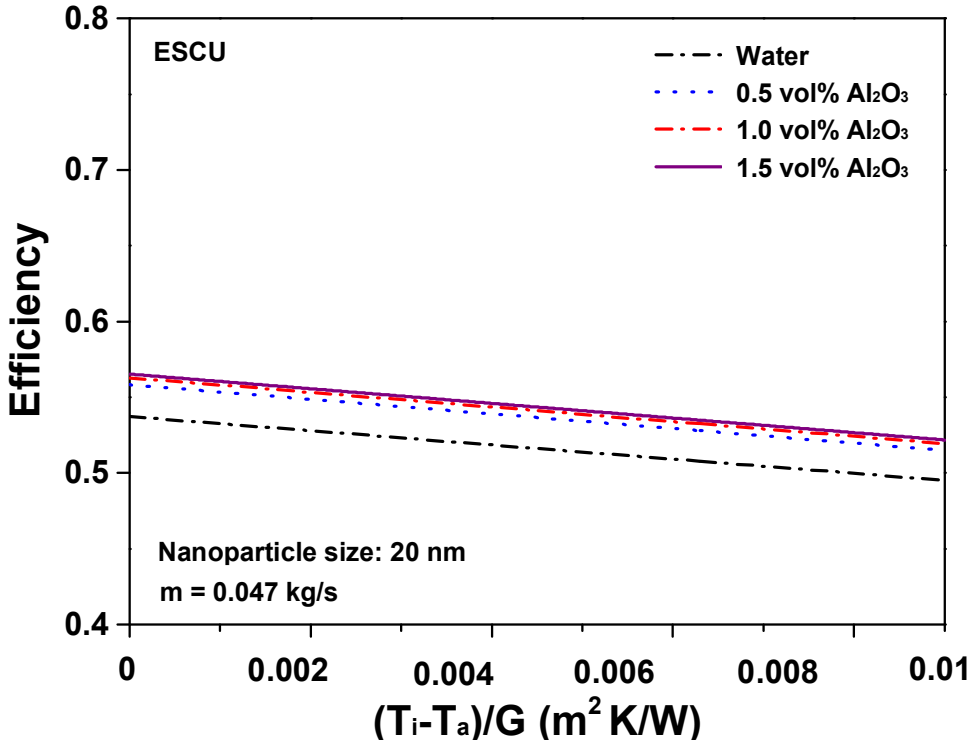


Fig. 5.8 Variation of efficiency in the U-tube solar collector for different nanofluid concentration(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5.3 히트파이프형 태양열 집열기의 성능 해석결과 및 고찰

Fig. 5.9는 나노유체의 농도에 따른 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 히트파이프형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 모델링 해석결과 나노유체를 적용했을 경우 1.5 vol%에서는 가장 좋은 효율을 나타내었고 열손실이 없는 x축계수가 0인 경우 최대효율은 76.54%로 나타났다. 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 50.67%로 나타났다.

Fig. 5.10은 나노유체의 농도에 따른 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 히트파이프형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 해석결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 61.3%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 0.5 vol%에서는 평균 효율이 62.04%, 1.0 vol%에서는 62.75%나타났고 1.5 vol%에서는 63.45%가 나타났다. 기본유체인 물을 적용하였을 때는 나노유체를 적용한 집열기의 효율보다 평균적으로 약 0.7% 높게 나타났다. 또한 질량유량이 0.047 kg/s에서는 질량유량이 0.033 kg/s 일 때보다 약 10.5% 높은 효율을 보였다. 이는 밀도와 끓는점 및 점성이 높아 히트파이프 내에서 증발된 기체가 응축되어 다시 증발부로 되돌아가는 상변화 과정이 유량이 작을수록 원활하지 못하기 때문에 질량유량의 증가에 따른 집열기 효율변화가 매우 뚜렷하게 나타난 것으로 판단된다. Fig. 5.9와 Fig. 5.10에서 12:30분경에 모든 조건에서 효율이 급격이 떨어지는 이유는 일사량의 영향으로 인하여 열손실이 발생해 나온 현상이다.

Fig. 5.11은 0.047 kg/s 유량조건에서 20 nm 크기를 가지는 Al_2O_3 나노유체의 농도에 따른 히트파이프형 태양열 집열기의 해석결과를 보여주고 있다. 나노유체의 농도가 0.5 vol%에서는 x축에 대한 열손실계수 F_RU_L는 27.41, 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$는 0.778로 나타났다. 나노유체의 농도 1.0 vol%에서는 F_RU_L값은 26.90, $F_R(\tau\alpha)$값은 0.782로 나타났다. 마지막으로 가장 좋은 효율을 보였던 나노유체의 농도 1.5 vol%에서의 F_RU_L값은 26.40, $F_R(\tau\alpha)$값은 0.786으로 나타났다.

결과적으로 기울기값을 나타내는 F_RU_L값은 히트파이프형이 가장 크고 평판형, U-tube형 집열기 순으로 나타났다. 집열기의 성능은 평판형 집열기와 동일하게 표

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

시되는데 히트파이프형 태양열 집열기가 집열온도가 제일 높지만 기울기($F_R U_L$값)가 가장 커서 열손실율이 가장 높음을 알 수 있다. 뿐만 아니라 순간 효율을 나타내는 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값도 히트파이프형이 가장 크게 나타났다. 히트파이프형 집열기는 평판형이나 U-tube형 집열기에 비해 고온에 사용되는 집열기이기 때문에 높은 온도를 발생하기 위해서는 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값이 높아야 한다. 그리고 히트파이프형 집열기는 비교적 적은 온도차에서도 열 수송능력과 열응답성이 빠른 고효율 전열소자가 사용되기 때문에 응답성이 크고 순간 열전달량이 크게 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

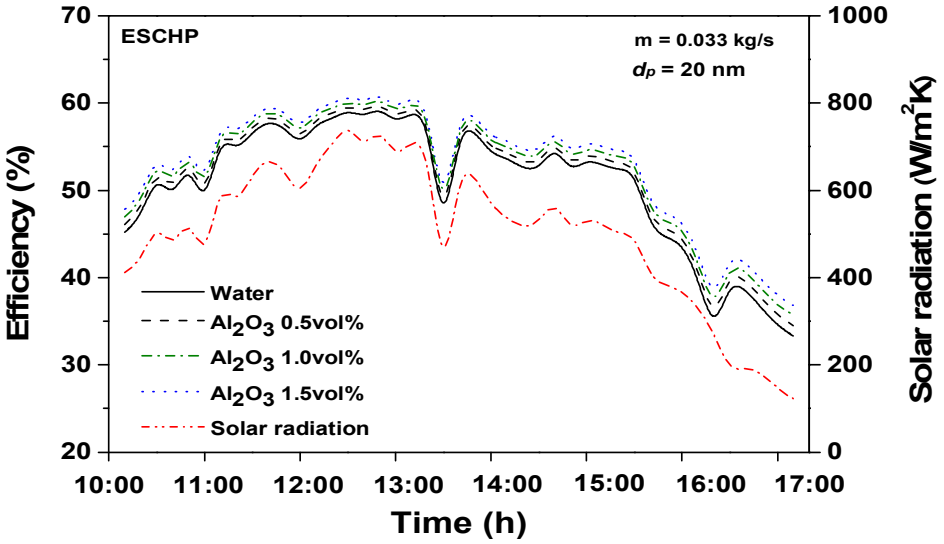


Fig. 5.9 Variation of efficiency in the heat pipe solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water according to concentration of nanofluid(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

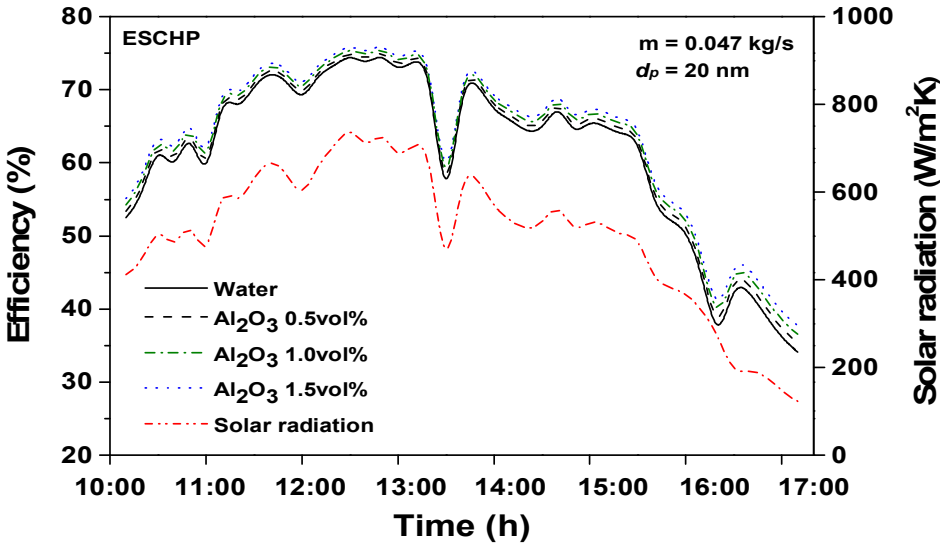


Fig. 5.10 Variation of efficiency in the heat pipe solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water according to concentration of nanofluid(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

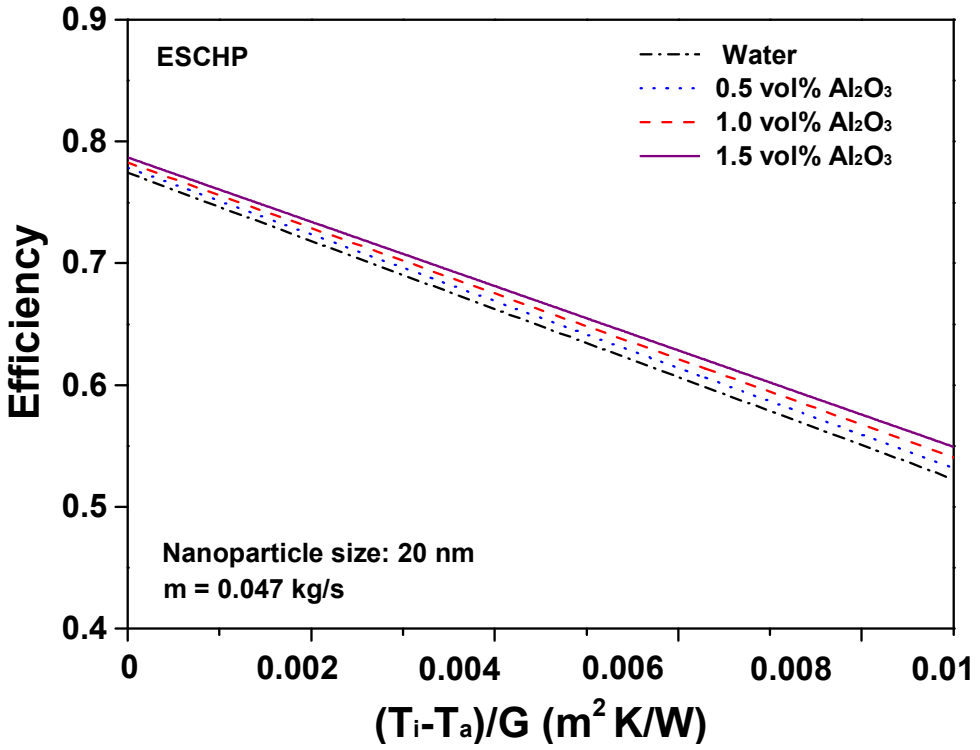


Fig. 5.11 Variation of efficiency in the heat pipe solar collector for different nanofluid concentration(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5.4 평판형, U-tube형 그리고 허트파이프형 태양열 집열기의 성능 해석결과의 비교

집열기의 열성능은 일반적으로 ASHRAE기준이나 ISO의 태양열 집열기 열성능 관련 기준에 명시된 바에 의해 실험적으로 구해진다. 열성능은 Fig. 5.12와 같이 나타내었고 식 (5-1)과 (5-2)로 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{AG} \tag{5-1}$$

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{G} \tag{5-2}$$

집열기 성능 시험은 투과면적의 크기에 따라 결정되는 유량으로 고정한 상태에서 작동됨으로 집열기 입구에서의 유체 온도에 따라 얻어진 열량과 그 순간의 태양열 일사량에 의한 최대 가능 열전달량의 비로서 나타나게 된다. 이렇게 얻어진 입구온도에 따른 효율결과를 그래프상에 표시하고, 표시된 결과를 이용하여 수식화하여 식 (5-2)의 형태로 나타나게 된다.

해석결과 U-tube형 태양열 집열기가 평판형 태양열 집열기에 비해 약 8.5% 높은 성능을 보였다. 여기서 G는 집열면 일사량, $F_R(\tau\alpha)$은 열획득계수로 y축과의 교점, $F_R U_L$은 열손실계수로 곡선의 기울기(slope), T_i는 집열기 입구의 집열매체의 온도, T_a는 외기온도이다. 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$는 집열기의 투과 흡수율에 의해서 결정되는 값이며, 열손실계수 $F_R U_L$은 집열기의 열손실율 값이 된다. 따라서 집열기 성능은 $F_R(\tau\alpha)$값은 클수록, 그리고 기울기는 작을수록 성능이 좋은 집열기이다. 그러므로 집열기는 투과체와 흡수판의 흡수율 및 열손실율이 집열기의 성능에 절대적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

서로 다른 나노유체의 농도에 따른 효율의 향상에 관한 효과를 비교하기 위해서 얻어진 결과를 특성 매개 변수를 갖는 선형 방정식을 이용하여 Tables 5.3~5.5와 같이 나타낼 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

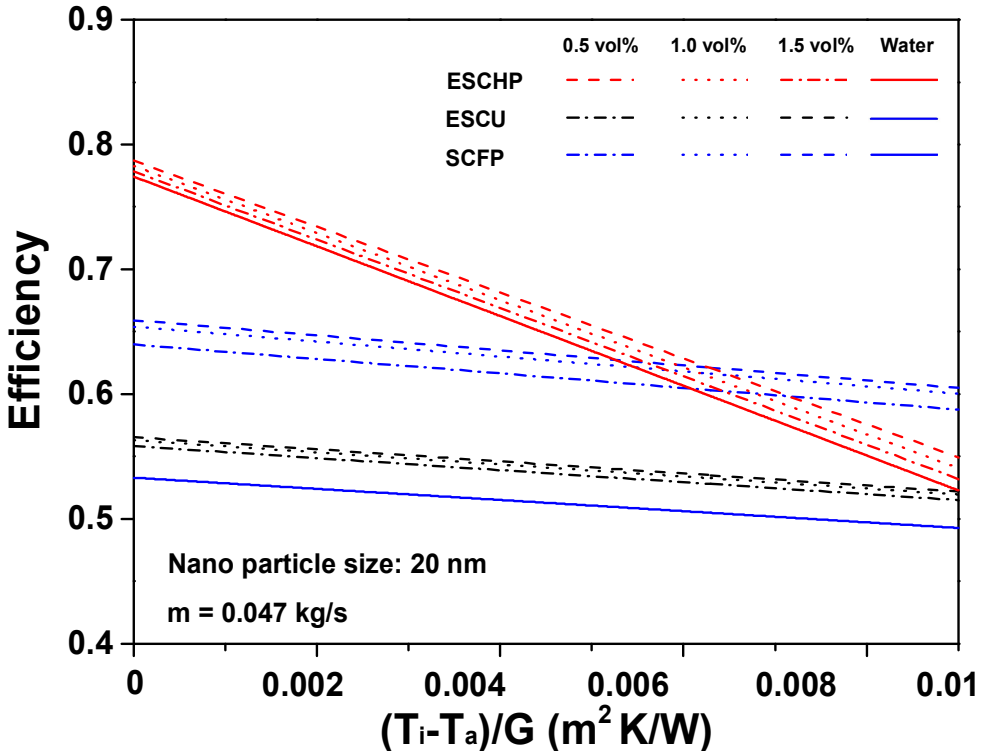


Fig. 5.12 Variation of efficiency in the flat solar collector and U-tube solar collect and heat pipe solar collector for different nanofluid Concentrations(nanoparticle size: 20nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Table 5.3에 나타낸 것과 같이 U-tube형 태양열 집열기의 경우 20 nm, 0.5 vol% 에서 x축에 대한 열손실계수 $F_R U_L$값은 4.82, 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.55로 나타났으며, x축 계수가 0인 열손실이 없는 경우 열효율은 55.45%로 분석되었고, Table 5.1과 같이 평판형 태양열 집열기의 경우 20 nm, 0.5 vol%에서는 x축에 대한 열손실계수 $F_R U_L$는 5.80, 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.639로 나타났으며, x축 계수가 0인 열손실이 없는 경우 열효율은 63.85%로 분석되었다. 히트파이프형 집열기는 Table 5.3에서 나타낸 바와 같이 0.5 vol%에서는 x축에 대한 열손실계수 $F_R U_L$값은 27.41, 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.778로 나타났다. 또한 U-tube형 집열기 20 nm, 1.0 vol% 에서 x축에 대한 $F_R U_L$값은 4.83, 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.56로 나타났다. 평판형 태양열 집열기의 경우 20 nm, 1.0 vol%에서는 x축에 대한 $F_R U_L$값은 5.9, $F_R(\tau\alpha)$값

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

은 0.65로 나타났으며, x축 계수가 0인 열손실이 없는 경우 열효율은 65.24%로 분석되었다. 히트파이프형 집열기의 경우 동일 크기와 농도에서 F_RU_L값은 26.9, $F_R(\tau\alpha)$값은 0.782로 나타났다.

마지막으로, U-tube형 태양열 집열기 20 nm, 1.5 vol%에서 x축에 대한 F_RU_L값은 4.83, $F_R(\tau\alpha)$값은 0.57로 나타났다. 평판형 태양열 집열기는 F_RU_L값은 6.0, $F_R(\tau\alpha)$값은 0.66로 나타났으며, x축 계수가 0인 열손실이 없는 경우 열효율은 65.75%로 분석되었고 히트파이프형 집열기는 F_RU_L값은 26.4, $F_R(\tau\alpha)$값은 0.786으로 나타났다. 위의 결과로부터 평판평, U-tube형 그리고 히트파이프형 태양열 집열기 모두 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 가장 좋은 성능을 나타냄을 확인하였다.

또한, 평판형 태양열 집열기의 모델링 해석결과 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 가장 높은 효율을 보였고 열손실이 없는 x축계수가 0인 경우 최대 효율이 65.7%로 나타났다. 그리고 1.0 vol%와 0.5 vol%에서는 각각 65.2%, 63.8%로 나타났다. U-tube형 태양열 집열기의 모델링 해석결과 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 가장 높은 효율을 보였고 열손실이 없는 x축계수가 0인 경우 최대 효율이 56.1%로 나타났다. 그리고 1.0 vol%와 0.5 vol%에서는 각각 55.9%, 55.4%로 나타났다. 물을 사용하였을 경우 해석결과 최대 효율은 53.3%를 나타내었다. 히트파이프형 태양열 집열기의 모델링 해석결과 나노유체를 적용했을 경우 1.5 vol%에서 76.5%로 가장 좋은 효율을 나타내었고 평균값은 63.4%이였다. 기본유체인 물과 비교한 결과 약 2.1% 향상된 결과를 예측하였다.

모델링 결과 열손실계수 (F_RU_L)는 히트파이프형이 가장 크고 다음으로 평판형, U-tube형 집열기 순으로 나타났다. 집열기의 성능은 평판형 집열기와 동일하게 표시되는데 히트파이프형 태양열 집열기가 집열온도가 제일 높지만 열손실에 대한 기울기(F_RU_L)가 가장 커서 열손실율이 가장 높음을 알 수 있다. 뿐만 아니라 순간 효율을 나타내는 열획득계수($F_R(\tau\alpha)$)는 히트파이프형이 가장 크게 나타났다. 히트파이프형 집열기는 평판형이나 U-tube형 집열기에 비해 고온에 사용되는 집열기이기 때문에 높은 온도를 발생하기 위해서는 열획득계수가 다른 집열기에 비하여 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

위의 결과로부터 각각의 집열기의 가장 성능이 높은 집열기의 성능곡선을 다음과 같이 효율 식으로 표시할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

● Flat plate solar collector $\eta = 0.65 - 6.03\frac{(T_i - T_a)}{G}$ (5-3)

(단, Al_2O_3 particle size: 20 nm, concentration: 1.5 vol%)

● U-tube solar collector $\eta = 0.56 - 4.83\frac{(T_i - T_a)}{G}$ (5-4)

(단, Al_2O_3 particle size: 20 nm, concentration: 1.5 vol%)

● Heat pipe solar collector $\eta = 0.78 - 26.4\frac{(T_i - T_a)}{G}$ (5-5)

(단, Al_2O_3 particle size: 20 nm, concentration: 1.5 vol%)

결과적으로 위 식 (5-3), (5-4), (5-5)처럼 기울기값을 나타내는 $F_R U_L$값은 히트파이프형이 가장 크고 평판형, U-tube형 집열기 순으로 나타났다. 집열기의 성능은 평판형 집열기와 동일하게 표시되는데 히트파이프형 태양열 집열기가 집열온도가 제일 높지만 기울기($F_R U_L$값)가 가장 커서 열손실율이 가장 높음을 알 수 있다. U-tube형 태양열 집열기의 경우도 히트파이프형과 마찬가지로 평판형 집열기에 비해 y축과의 교점은 낮으나 열손실율이 적어 기울기가 작으며 평판형보다는 높은 온도(x축의 값이 클수록 집열온도가 높은 경우임)를 얻는데 효과적임을 해석적으로 확인할 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 5.3 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for different concentration(m= 0.047 kg/s)

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 0.5 vol%)	0.639	5.802	0.880
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0 vol%)	0.654	5.978	0.872
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.5 vol%)	0.659	6.038	0.870
Water	0.533	4.478	0.914

Table 5.4 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for different concentration(m= 0.047 kg/s)

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 0.5 vol%)	0.558	4.821	0.787
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0 vol%)	0.563	4.831	0.787
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.5 vol%)	0.565	4.831	0.787
Water	0.537	4.681	0.787

Table 5.5 Parameters of efficiency in the heat pipe solar collector for different concentration(m= 0.047 kg/s)

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 0.5 vol%)	0.778	27.415	0.942
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0 vol%)	0.782	26.901	0.942
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.5 vol%)	0.786	26.404	0.943
Water	0.774	27.944	0.942

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 6장 태양열 집열기의 성능 실험결과 및 고찰

6.1 평판형 태양열 집열기의 성능평가 결과

6.1.1 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Fig. 6.1은 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 0.5 vol%의 Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 효율을 하루동안에 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 20분 후부터 3시간 40분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 827 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 54.8%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 59.7%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 효율은 11시 30분부터 13시 40분까지였으며 이때 물을 적용했을 때 61.3%이고 나노유체를 적용하였을 경우 67.3%로 약 6%의 차이를 보였다.

Fig. 6.2은 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.0 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 2시간 후부터 3시까지였으며 이때 태양 일사량은 약 712 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 54.9%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 62.7%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 효율은 12시 30분부터 13시 10분까지였으며 이때 물을 적용했을 때 62.9%이고 나노유체를 적용하였을 경우 71.8%로 약 9%의 차이를 보였다. 실험시작 3시간 30분경 모든 데이터가 급격이 저하되는데 이는 구름과 바람의 영향으로 열손실이 많아 발생된 현상으로 판단된다.

Fig. 6.3은 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

간은 실험시작 1시간 40분부터 4시간 40분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 856.9 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 60.8%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 68%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 효율은 11시 40분부터 14시 40분까지였으며 이때 물을 적용했을 때 63.6%이고 나노유체를 적용하였을 경우 71.5%로 약 7.9%의 차이를 보였다.

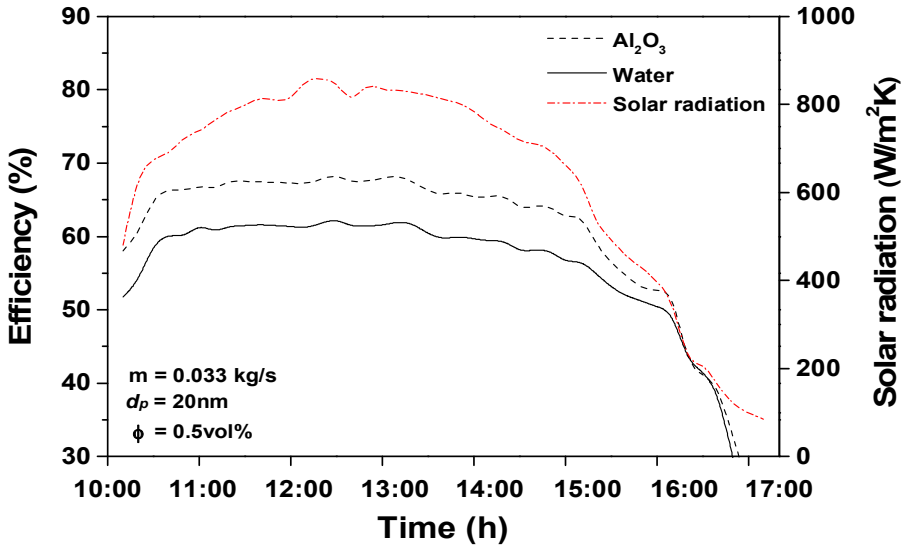


Fig. 6.1 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and wate during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

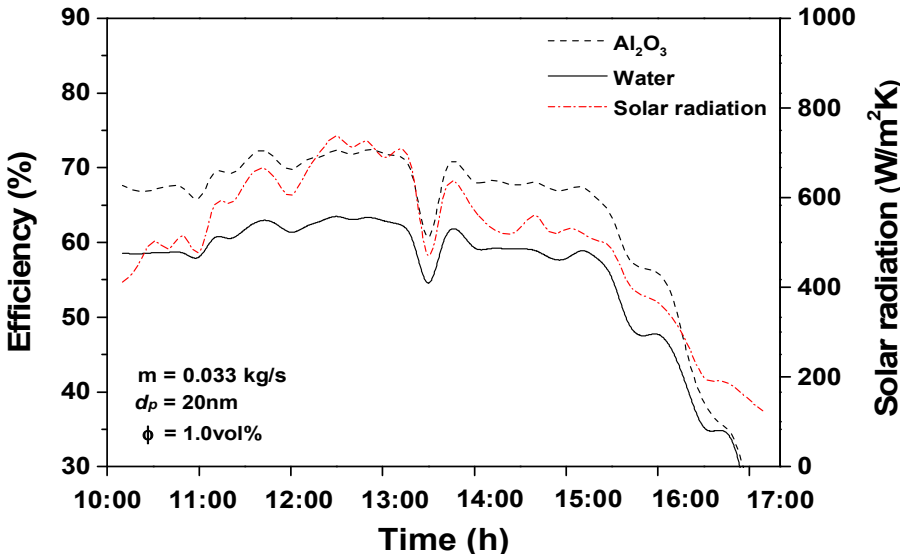


Fig. 6.2 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

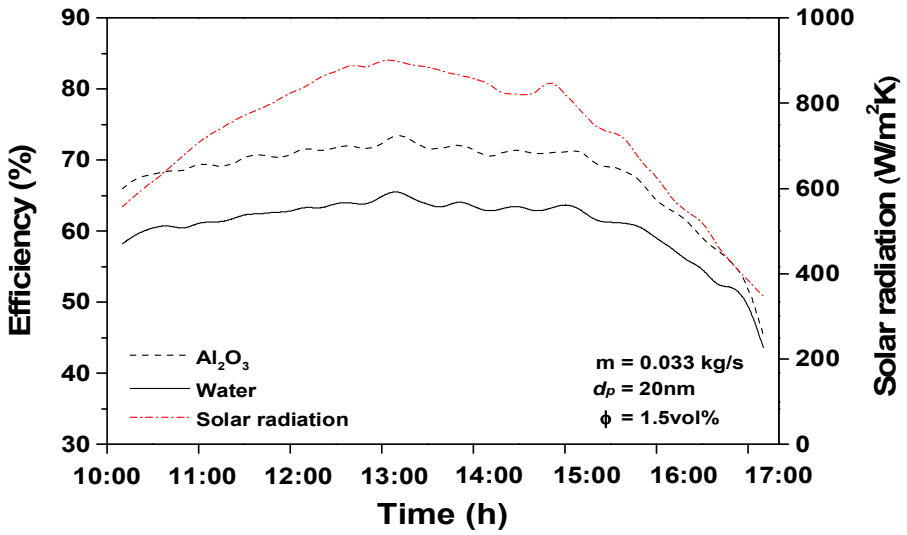


Fig. 6.3 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6.1.2 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Fig. 6.4는 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 0.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 30분 후부터 3시간 40분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 667 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 56.9%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 60.7%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 57.2%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 63.5%로 약 6.3%의 차이를 보였다. 10:30분부터 15:00까지의 효율곡선이 증가와 감소를 반복하는 이유는 바람의 영향으로 열손실이 크게 발생하였기 때문이다.

Fig. 6.5는 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.0 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 45.5%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 53.3%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 효율은 물을 적용했을 때 56.4%이고 나노유체를 적용하였을 경우 65.5%로 약 9.1%의 차이를 보였다.

Fig. 6.6은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 30분 후부터 2시간 40분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 789.9 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 53.3%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 67.9%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 58.2%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 72.8%로 약 14.6%의 차이를 보였다. 구름과 바람이 많은 날에는 효율차이가 더 크게 나타남을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 나노입자의 크기가 20 nm이고 질량유량이 0.047 kg/s의 효

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

율 평가 결과 나노유체의 농도가 1.5 vol%일 때 가장 높게 나타났다.

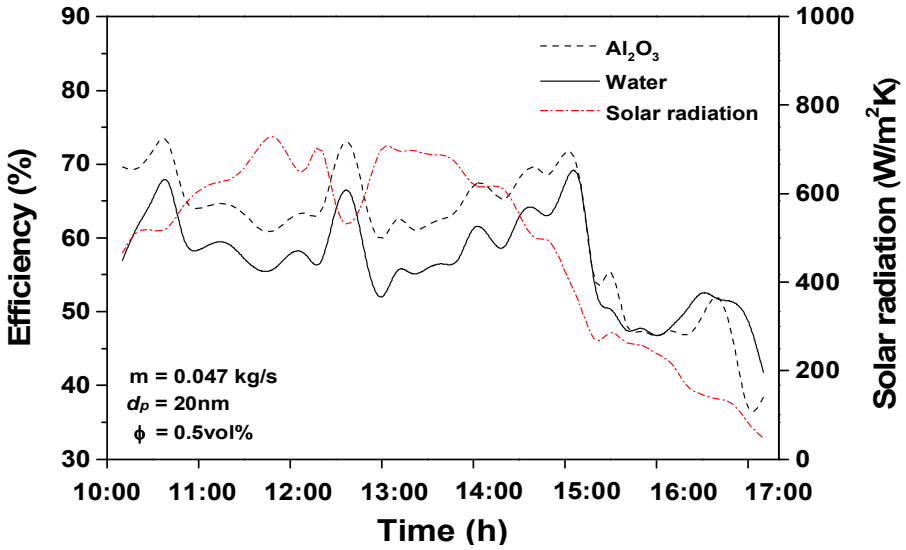


Fig. 6.4 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

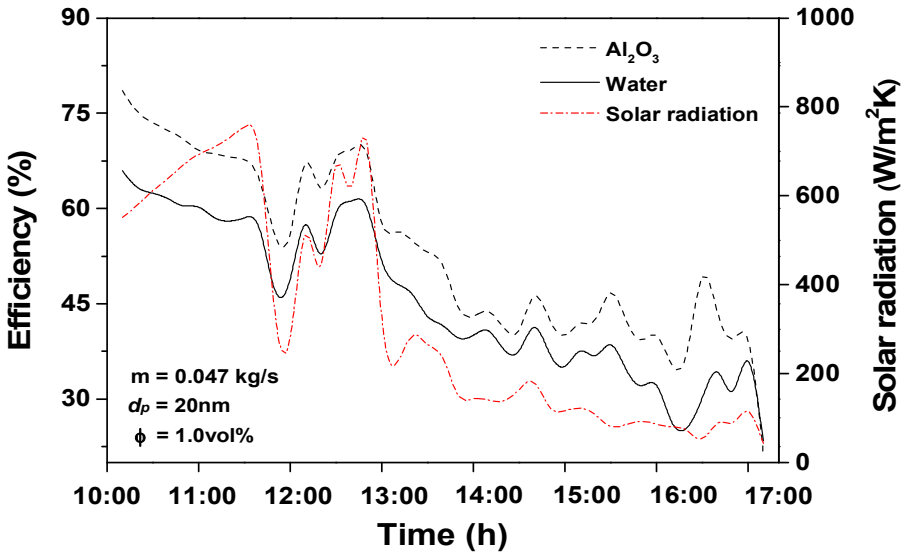


Fig. 6.5 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

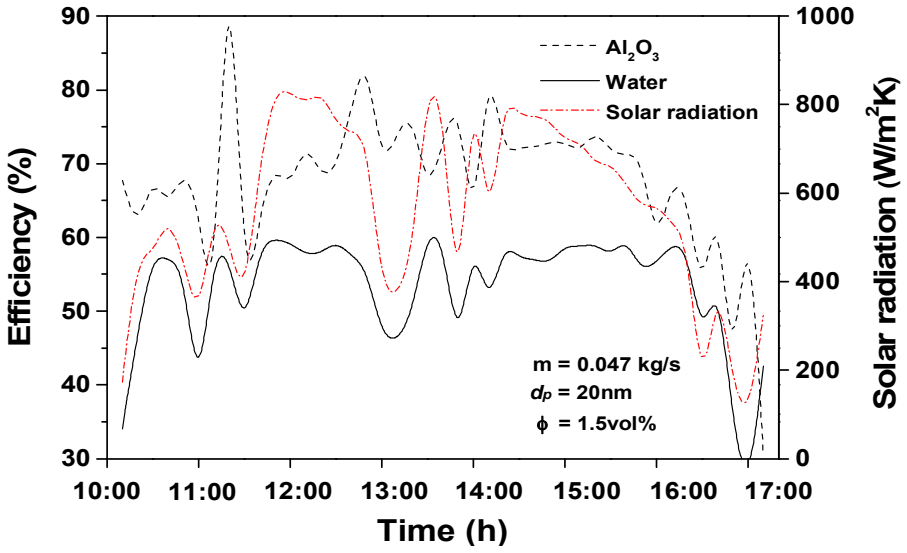


Fig. 6.6 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6.1.3 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Fig. 6.7은 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 50 nm 나노입자의 크기를 가지는 0.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 30분 후부터 4시간까지였으며 이때 태양 일사량은 약 862 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 60.6%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 64.4%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 65.7%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 70.3%로 나타났다.

Fig. 6.8은 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 50 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.0 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그림이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 2시간 후부터 3시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 712.7 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 54.9%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 62.7%로 나타났다. 집열판의 온도 상승이 최고치를 나타내는 구간에서 효율은 물을 적용했을 경우 62.9%, 나노유체를 적용했을 경우 71.8%로 나타났다. 그림에서 13:30분경에 효율과 일사량이 급격히 떨어지는 것은 구름의 영향으로 인한 열손실이 발생하여 생긴 현상이다.

Fig. 6.9는 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 50 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 40분 후부터 4시간까지였으며 이때 태양 일사량은 약 856.9 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 60.8%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 67.9%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 63.6%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 71.5%로 약 7.9%의 차이를 보였다. 나노입자의 크기가 50 nm이고 질량유량이 0.033 kg/s의 효율 평가 결과 나

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

노유체의 농도가 1.5 vol%일 때 가장 높게 나타났다.

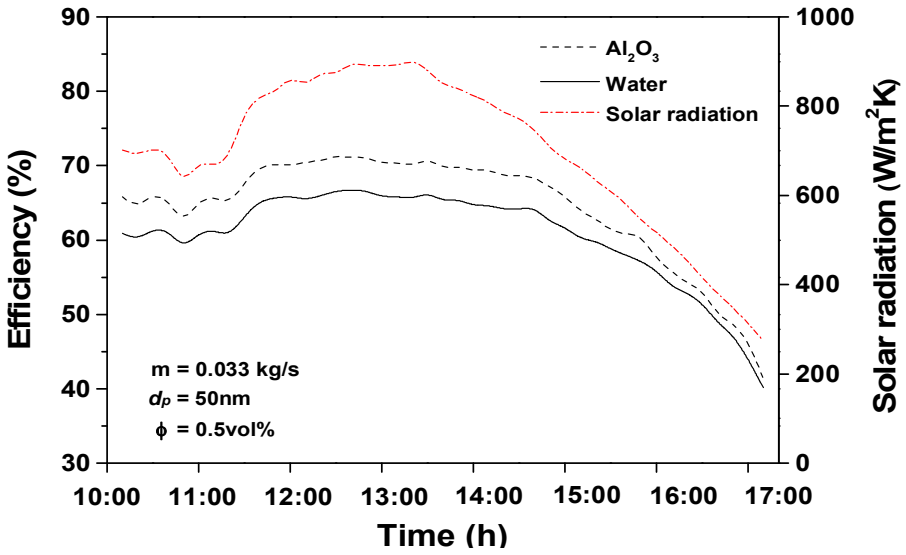


Fig. 6.7 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

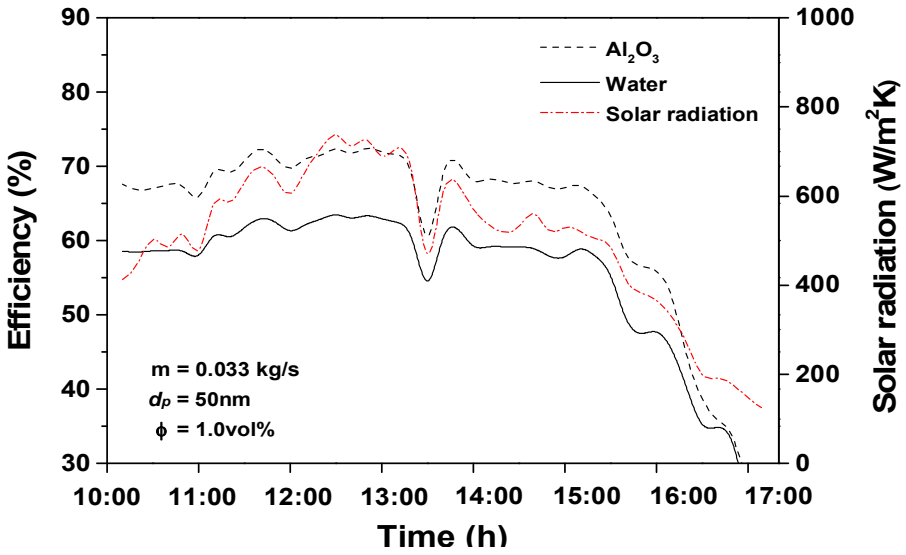


Fig. 6.8 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

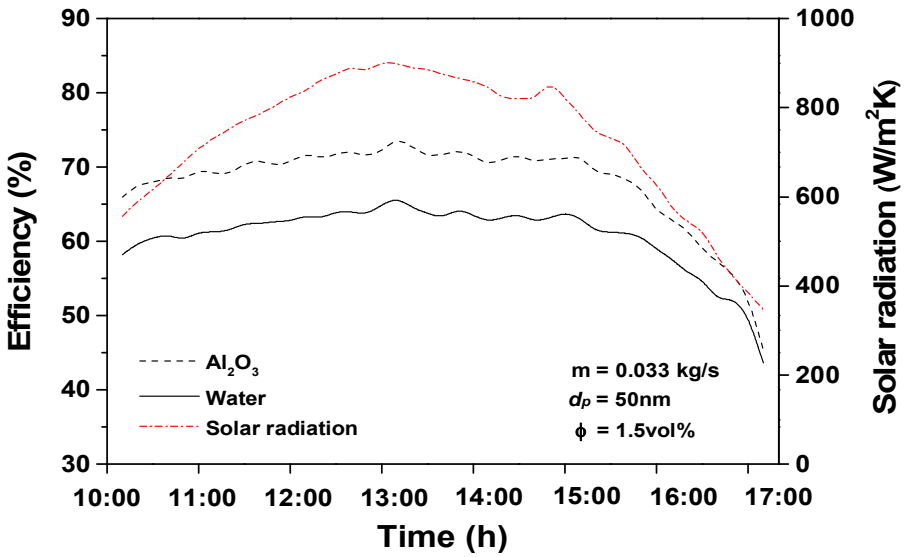


Fig. 6.9 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6.1.4 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 50nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Fig. 6.10은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 50 nm 나노입자의 크기를 가지는 0.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 30분 후부터 4시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 876.9 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 58.5%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 63.5%로 나타났다. 집열판의 온도 상승이 최고치를 나타내는 구간에서 효율은 물을 적용했을 경우 60.7%, 나노유체를 적용했을 경우 66.1%로 나타났다.

Fig. 6.11은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 50 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.0 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 2시간 후부터 3시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 814 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 56.9%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 64.7%로 나타났다. 집열판의 온도 상승이 최고치를 나타내는 구간에서 효율은 물을 적용했을 경우 61.1%, 나노유체를 적용했을 경우 69.8%로 나타났다.

Fig. 6.12는 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 50 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 50분 후부터 3시간까지였으며 이때 태양 일사량은 약 855.8 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 53.9%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 58.3%로 나타났다. 집열판의 온도 상승이 최고치를 나타내는 구간에서 효율은 물을 적용했을 경우 56.8%, 나노유체를 적용했을 경우 63.5%로 나타났다.

나노입자의 크기가 50 nm이고 질량유량이 0.047 kg/s의 효율 평가 결과 나노유체의 농도가 1.0 vol%일 때 가장 높게 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

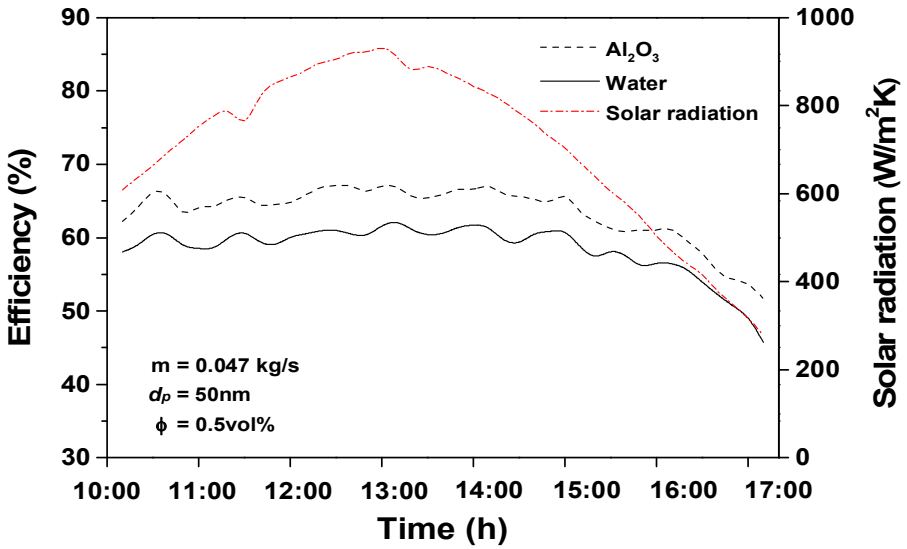


Fig. 6.10 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

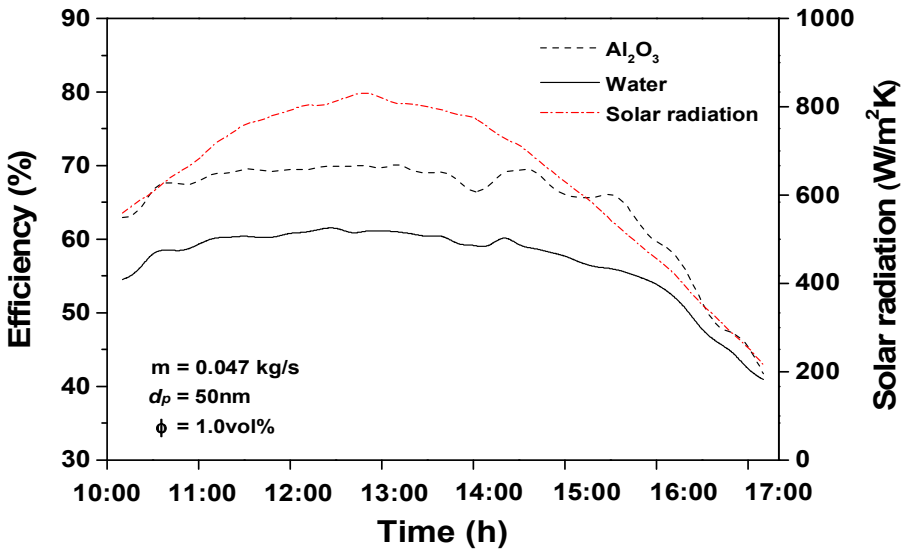


Fig. 6.11 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

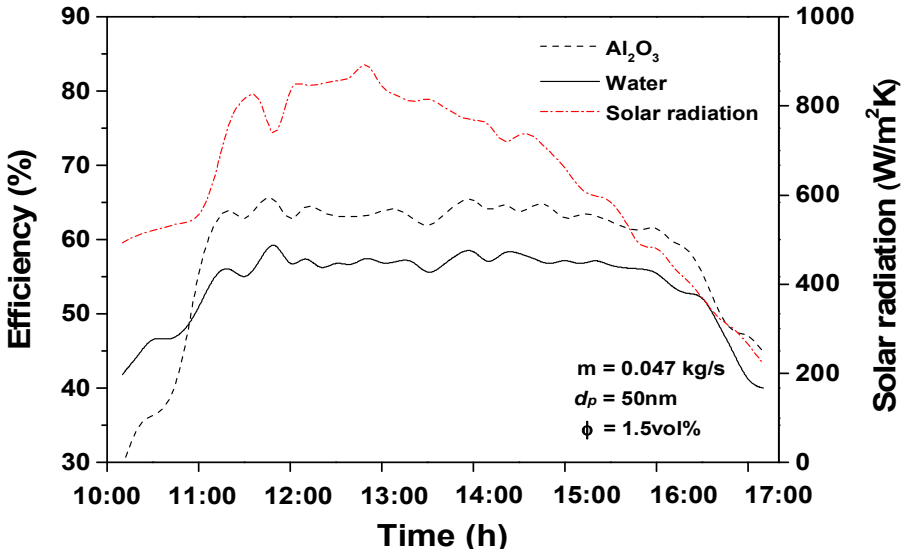


Fig. 6.12 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6.1.5 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 100 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Fig. 6.13은 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 100 nm 나노입자의 크기를 가지는 0.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 10분 후부터 4시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 920 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 60.9%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 63.5%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 67.9%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 71%로 나타났다. 그림에서 10시부터 14시까지 일사량이 증가하다가 14:30분경 급격히 감소하고 15:30분경 다시 감소한 이유는 구름에 의한 열손실 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6.14는 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 100 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.0 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 후부터 4시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 949.9 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 57.9%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 62.8%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 66.6%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 72.6%로 나타났다.

Fig. 6.15는 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 100 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 20분 후부터 3시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 829.5 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 53.9%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 56.9%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 69.1%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 73.5%로 나타났다. 나노입자의 크기가 100 nm이고 질량유량이 0.033 kg/s의 효율 평가 결과 나노유체의

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

농도가 0.5 vol%일 때 가장 높게 나타났으며 일사량이 가장 좋은 구간에서는 나노유체의 농도가 1.5 vol%일 때 가장 높게 나타났다.

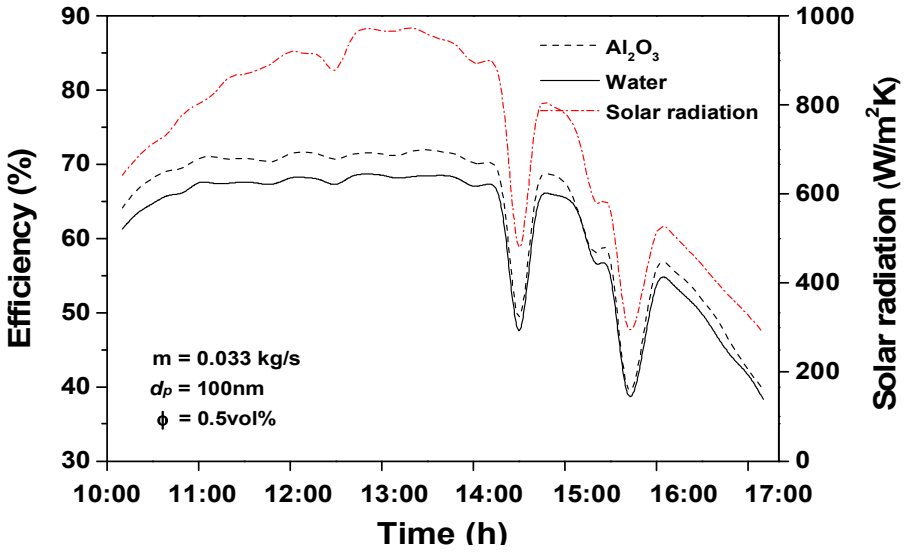


Fig. 6.13 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

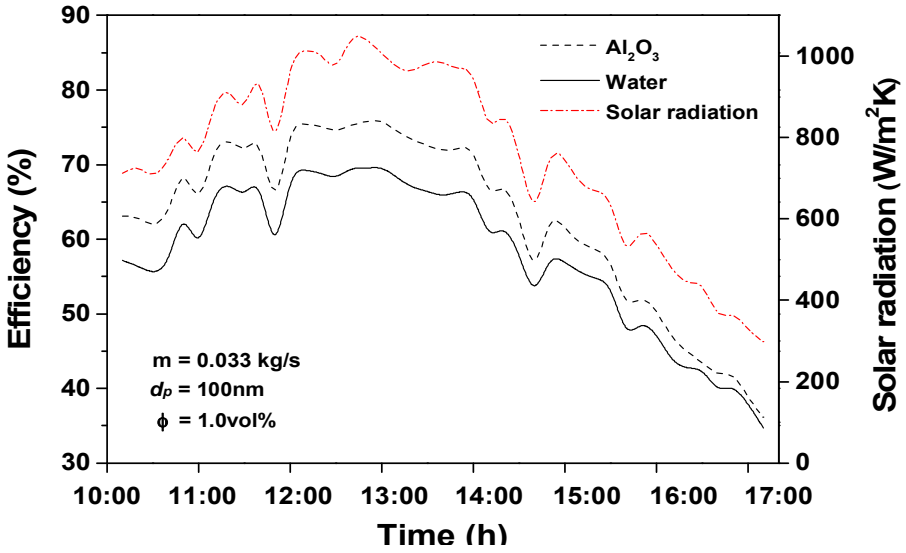


Fig. 6.14 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

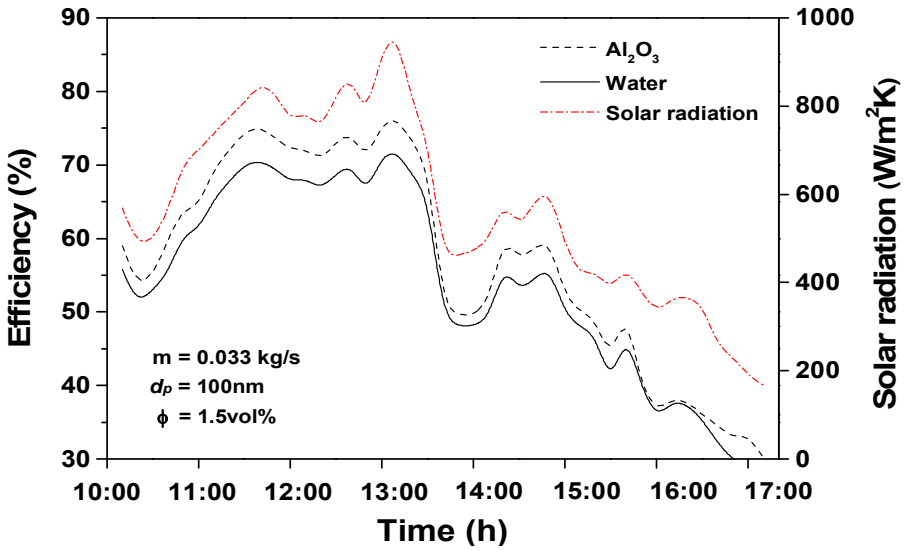


Fig. 6.15 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6.1.6 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Fig. 6.16은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 100 nm 나노입자의 크기를 가지는 0.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 50분 후부터 3시간 50분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 921.6 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 54.8%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 57.5%로 나타났다. 집열판의 온도 상승이 최고치를 나타내는 구간에서 효율은 물을 적용했을 경우 61.7%, 나노유체를 적용했을 경우 65.8%로 나타났다. 그림에서 14시부터 16시까지 일사량이 증가와 감소를 반복하는 이유는 바람과 구름에 의한 열손실 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6.17은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 100 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.0 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 40분 후부터 4시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 921.9 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 57.9%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 63.8%로 나타났다. 집열판의 온도 상승이 최고치를 나타내는 구간에서 효율은 물을 적용했을 경우 62.8%, 나노유체를 적용했을 경우 69.6%로 나타났다.

Fig. 6.18은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 100 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 평판형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 50분 후부터 4시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 914 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 56.9%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 60.9%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 61.9%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 66.3%로 나타났다. 나노입자의 크기가 100 nm이고 질량유량이 0.047 kg/s의 효율 평가 결과 나노유체의 농도가

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.0 vol%일 때 가장 높게 나타났으며 일사량이 가장 좋은 구간에서도 나노유체의 농도가 1.0 vol%일 때 가장 높게 나타났다.

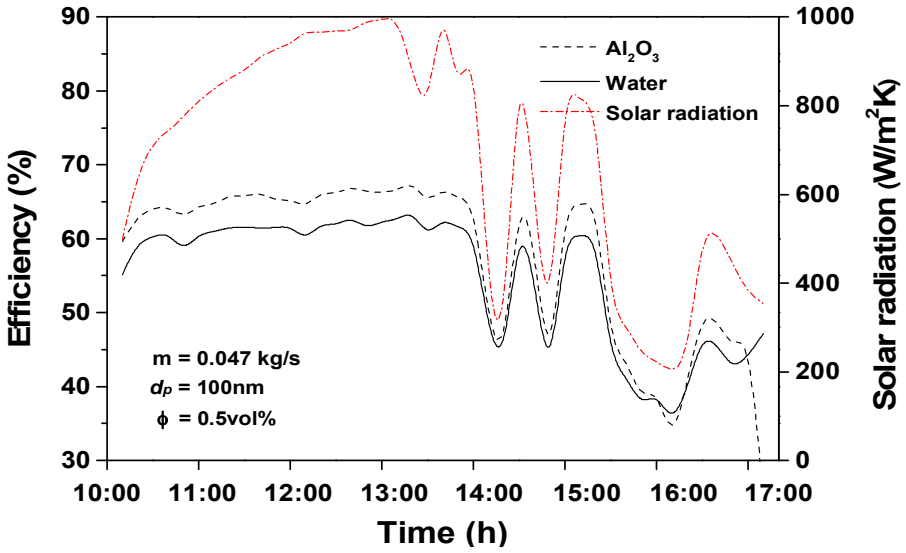


Fig. 6.16 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

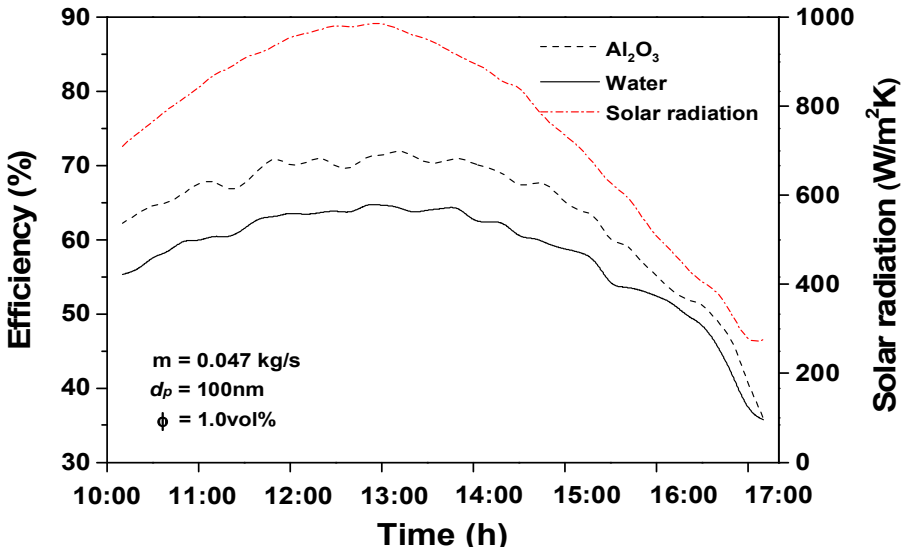


Fig. 6.17 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

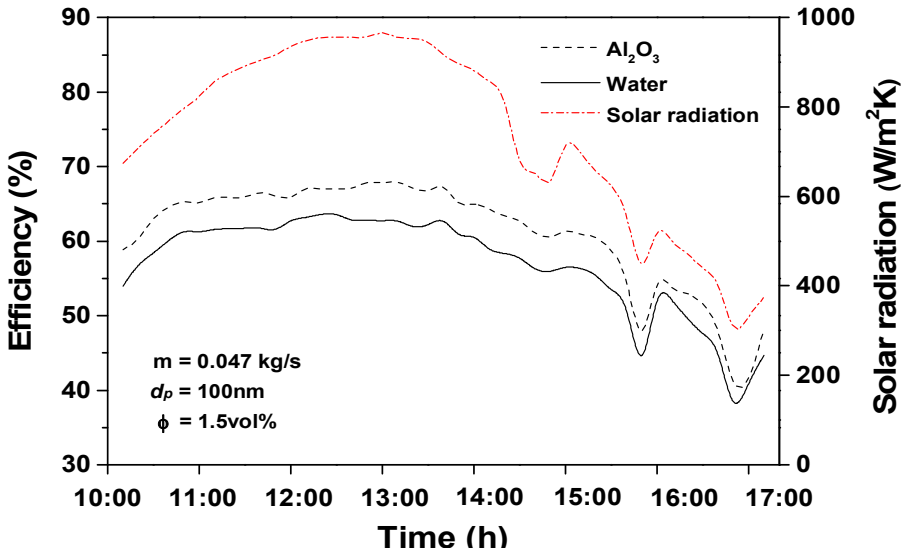


Fig. 6.18 Variation of efficiency of the flat plate solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6.1.7 나노유체 농도, 입자의 크기, 질량유량 변화에 따른 효율 고찰

Fig. 6.19는 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 Al_2O_3 나노유체의 농도 변화에 따른 평판형 태양열 집열기의 효율 변화를 비교하여 보여주고 있다.

Al_2O_3 나노유체를 사용한 집열기의 효율이 물을 사용한 집열기 보다 다양한 운전조건에서 우수함을 알 수 있다. 여기서 $T_i=T_a$일 때 태양열 집열기의 효율은 최대값을 가지며 $(T_i-T_a)/G$가 증가할수록 효율이 감소함을 확인할 수 있다. 평판형 태양열 집열기의 효율은 $T_i=T_a$일 때 나노유체의 농도가 1.5 vol%인 집열기의 효율은 77.3%로 가장 높은 효율을 보였으며 이는 물을 사용했을 경우의 효율보다 약 28.7% 향상된 결과를 보였다. 또한 나노유체의 농도가 1.0 vol%와 0.5 vol%인 평판형 집열기의 효율보다 각각 3.8%, 6.9% 향상되었다. $(T_i-T_a)/G$값의 변화에 따른 평판형 집열기의 효율 변화는 거의 일정한 형태를 가짐을 확인할 수 있었다. 전체 평균값은 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 67.94%로 가장 높은 성능특성을 보였으며 또한 나노유체의 농도가 1.0 vol%와 0.5 vol%인 경우 53.3%, 60.69%로 나타났다. 기본유체인 물을 적용하였을 경우 평균 효율은 56.85%로 나타났으며 나노유체를 적용한 집열 효율의 평균값보다 약 11% 낮은 결과를 보였다.

서로 다른 나노유체의 농도에 따른 효율의 향상에 관한 효과를 비교하기 위해서 얻어진 결과를 특성 매개 변수를 갖는 선형 방정식을 이용하여 Table 6.1과 같이 나타낼 수 있다. 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.774로 최대값을 보이고 이때 열손실계수 F_RU_L값은 20.309이다. 반면에 나노유체의 농도가 1.0 vol% 에서는 F_RU_L값이 21.31이다. $F_R(\tau\alpha)$값은 클수록 F_RU_L값은 작을수록 집열성능이 우수하다. 즉, 나노유체의 농도가 0.5 vol%일 때 열에너지 전달 및 흡수력이 감소하며 외부로의 열손실이 더 생긴다는 것을 간접적으로 확인하였고 물을 사용한 경우 $F_R(\tau\alpha)$값은 가장 작게 나타났으며 F_RU_L는 가장 크게 나타났다. 그러므로 일반유체인 물을 적용한 집열기보다 나노유체를 적용한 태양열 집열기가 작동유체로서 열적성능이 우수함을 알 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

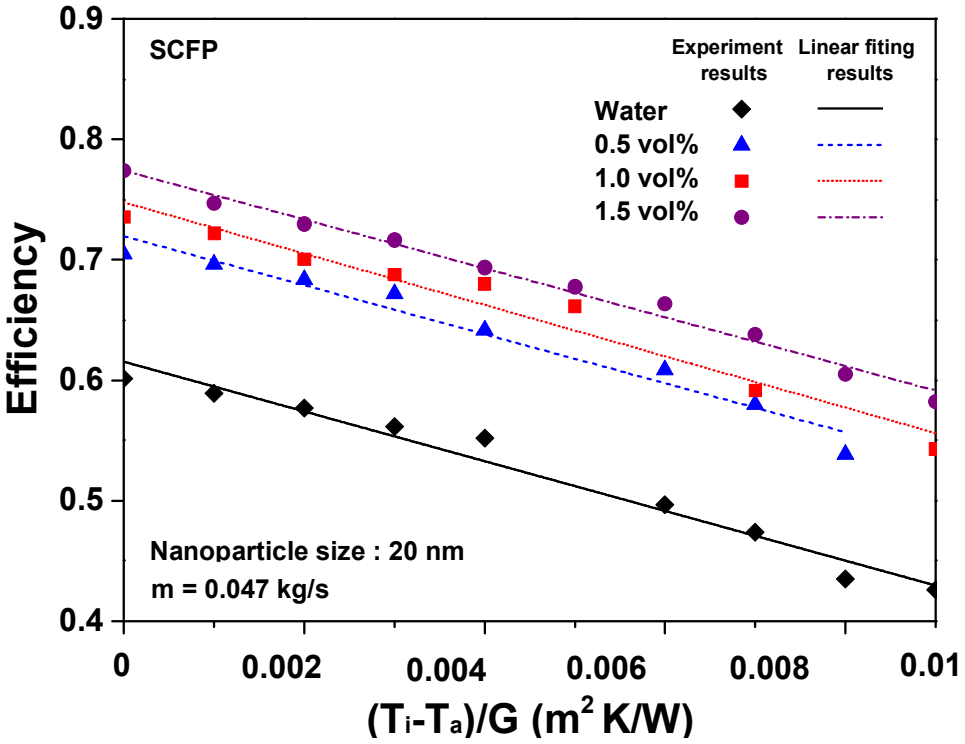


Fig. 6.19 Variation of efficiency in the flat plate solar collector for different nanofluid concentration(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Table 6.1 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for Al2O3 nano fluid and water

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 0.5 vol%)	0.719	20.351	0.958
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0 vol%)	0.747	21.31	0.956
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.5 vol%)	0.774	20.309	0.987
Water	0.615	20.660	0.960

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 6.20은 동일한 나노유체 농도가 1.0 vol%에서 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s으로 동일할 때 나노입자의 크기에 따른 평판형 태양열 집열기의 효율 변화를 보여주고 있다. 나노입자의 크기는 열전도도의 중요한 영향을 주기 때문에 나노입자의 크기에 따라 평판형 태양열 집열기의 효율에 대한 분석을 진행하였다. 실험결과 모든 운전조건에서 나노입자의 크기가 가장 작은 20 nm로 제작된 나노유체를 사용하였을 때 가장 높은 집열기 효율을 나타냈다. 나노입자의 크기가 20 nm인 나노유체의 최대 효율은 73.5%로 가장 낮은 효율을 보였던 100nm의 효율에 비해 3.83% 높은 결과를 보였다. 즉, 입자의 크기가 상대적으로 작은 나노유체는 열전도도가 우수하여 더 빠른 열전도를 발생시켜 태양열 집열기의 효율에 주요한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 또한 20 nm, 50 nm, 100 nm인 각각의 나노유체를 작동유체로 사용한 태양열 집열기의 최대효율은 물을 작동유체로 사용한 태양열 집열기의 최대 효율보다 각각 13.4%, 10.4%, 9.6% 향상됨을 확인할 수 있다. Table 6.2에 세 가지 나노입자의 크기에 따른 특성 매개 변수의 값을 제시하였다.

나노입자의 크기가 각각 20, 50, 100 nm일 때 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.747, 0.718, 0.698로 나타났으며 열손실계수 $F_R U_L$값은 21.31, 22.38, 21.87로 각각 나타났다. 선형방식을 이용하여 나타낸 결과 역시 나노유체의 크기가 20 nm일 때 성능이 가장 좋음을 확인할 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

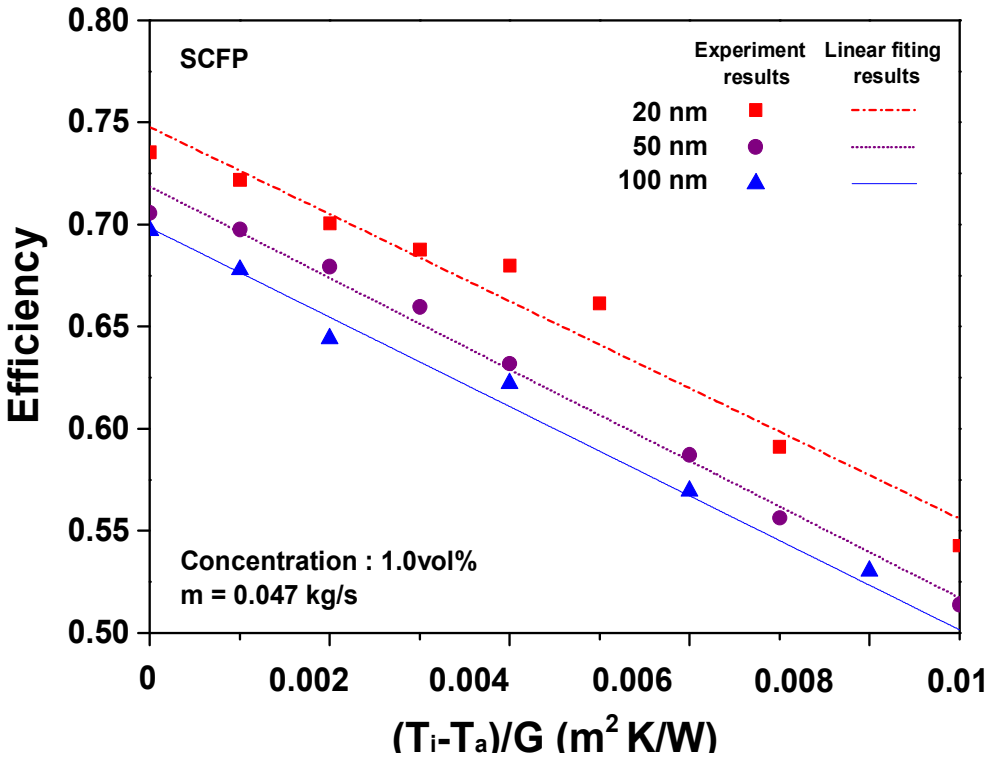


Fig. 6.20 Variation of efficiency in the flat plate solar collector for different nanoparticle sizes(concentration: 1.0 vol%, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Table 6.2 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector according to nano particle size

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0 vol%)	0.747	21.31	0.96
Al_2O_3 nanofluid (50 nm, 1.0 vol%)	0.718	22.38	0.98
Al_2O_3 nanofluid (100 nm, 1.0 vol%)	0.698	21.87	0.98

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 6.21은 나노입자의 크기가 20 nm, 나노유체의 농도는 1.0 vol%의 Al_2O_3 나노유체의 유량조건에 따른 평판형 태양열 집열기의 효율 변화를 보여주고 있다. 평판형 태양열 집열기의 효율은 작동유체의 유량이 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 증가함에 따라 증가한다. 이는 효율의 정의인 식 (5-1)을 기초로 하여, 상대적으로 높은 유량이 효율을 향상시킨다. 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s 유량에서는 집열기에서 유체가 머무는 시간이 상대적으로 길어 입출구 온도차는 증가한다. 이러한 입출구 온도차의 증가는 더 많은 열손실을 일으켜 낮은 효율을 보인다. 하지만 0.047 kg/s 유량에서는 집열기에서 유체가 머무는 시간이 짧아져 에너지 흡수량이 감소되어 태양열 집열기의 입출구 온도차는 감소하나 태양열 집열판과 작동유체와의 온도차가 증가하여 열손실은 0.033 kg/s보다 작아 결과적으로 집열기의 효율이 향상된다. 따라서 태양열 집열기의 효율은 유량과 집열기의 입출구 온도차에 의해 결정된다. 작동유체의 유량이 0.033 kg/s 와 0.047 kg/s 일 때 순간 최대 효율은 72.78%와 73.54%로 나타났으며 평균효율은 62.68%와 53.34%로 나타났다. 다양한 운전조건에서 그 변화의 형태는 일정함을 확인할 수 있었다.

Table 6.3에 나노입자의 크기가 20 nm, 나노유체의 농도는 1.0 vol%의 Al_2O_3 나노유체의 유량조건에 따른 특성 매개 변수의 값을 제시하였다. 질량유량이 0.033 kg/s에서의 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.738로 나타났으며 열손실계수 F_RU_L값은 21.87로 나타났다. 질량유량이 0.047 kg/s에서 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.747로 나타났으며 열손실계수 F_RU_L값은 21.31로 나타났다. 위의 결과에 따라 평판형 집열기에서는 $F_R(\tau\alpha)$값이 높고 F_RU_L값이 낮은 질량유량이 0.047 kg/s에서의 집열성능이 더 우수함을 확인할 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

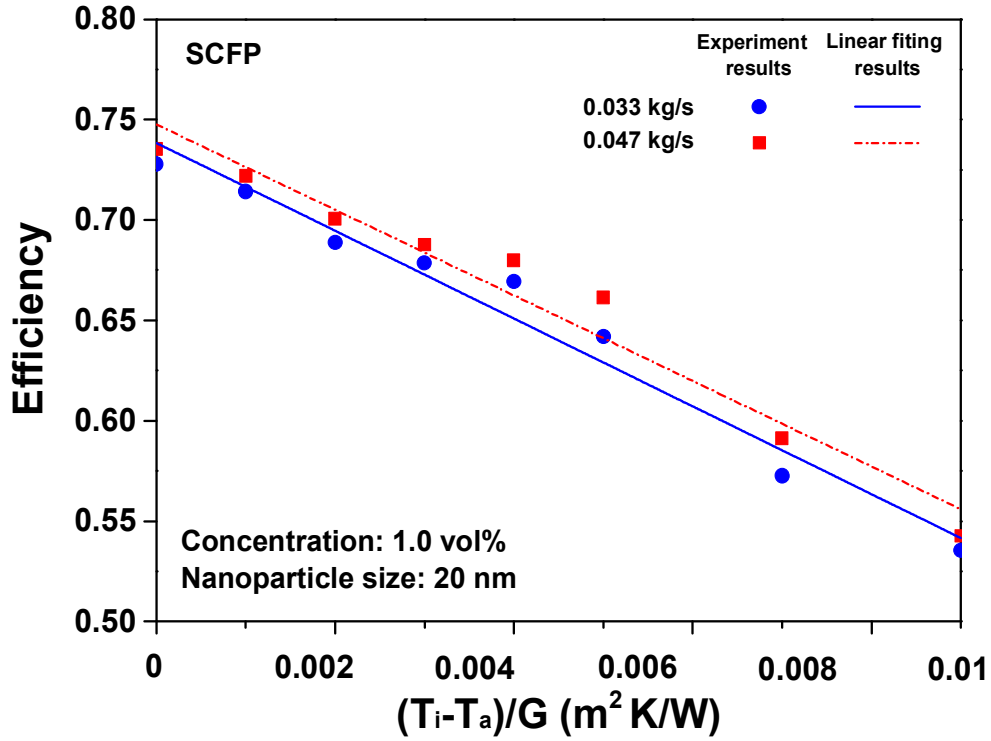


Fig. 6.21 Variation of efficiency in the flat plate solar collector for different mass flow rates(nano particle size: 20 nm, concentration: 1.0 vol%)

Table 6.3 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for different mass flow rates(nano particle size: 20 nm, concentration: 1.0 vol%)

Mass flow rate (kg/s)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
0.033	0.738	21.87	0.967
0.047	0.747	21.31	0.956

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6.2 U-tube형 태양열 집열기의 성능평가 결과

6.2.1 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Fig. 6.22는 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 0.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 20분 후부터 3시간 40분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 827 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 53.1%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 58.2%로 나타났다. 집열판의 온도 상승이 최고치를 나타내는 구간에서 효율은 물을 적용했을 경우 61.3%, 나노유체를 적용했을 경우 67.3%로 나타났다.

Fig. 6.23은 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.0 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 2시간 후부터 3시간 까지였으며 이때 태양 일사량은 약 712 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 53.2%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 60.7%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 59.6%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 68.8%로 나타났다. 그림에서 13:30분경에 효율과 일사량이 감소하는데 구름의 영향으로 인한 열손실이 발생된 현상이라 판단된다.

Fig. 6.24는 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 30분 후부터 4시간 40분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 856.9 W/m^2로 나타났다. 오전 10시부터 오후 5시까지 기본유체인 물을 적용하여 실험한 결과, 평균 효율은 58.2%로 나타났으며 나노유체를 적용하였을 경우 평균 효

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

율은 65.4%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 60.8%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 68.8%로 나타났다.

나노입자의 크기가 20 nm이고 질량유량이 0.033 kg/s의 효율 평가 결과 나노유체의 농도가 1.5 vol%일 때 가장 높게 나타났으며 일사량이 가장 좋은 구간에서는 나노유체의 농도가 1.0 vol%일 때 가장 높게 나타났다.

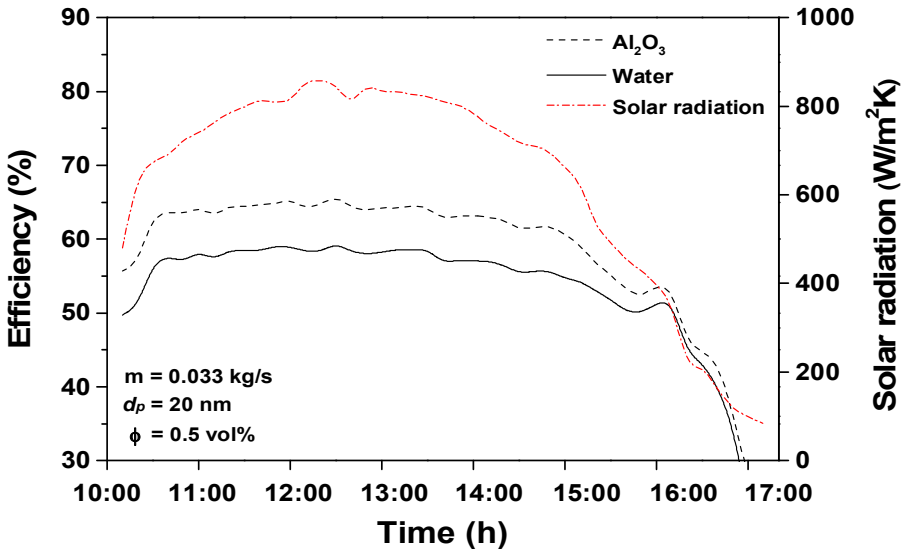


Fig. 6.22 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

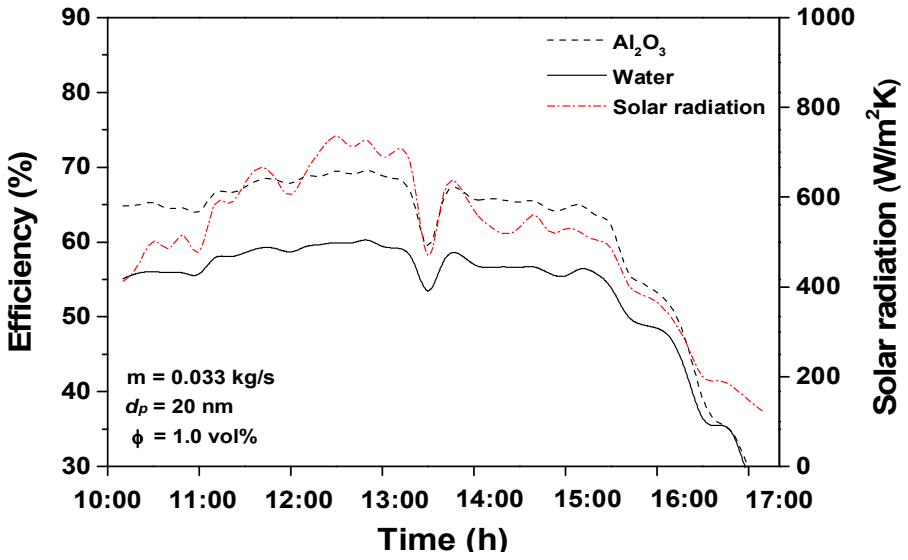


Fig. 6.23 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

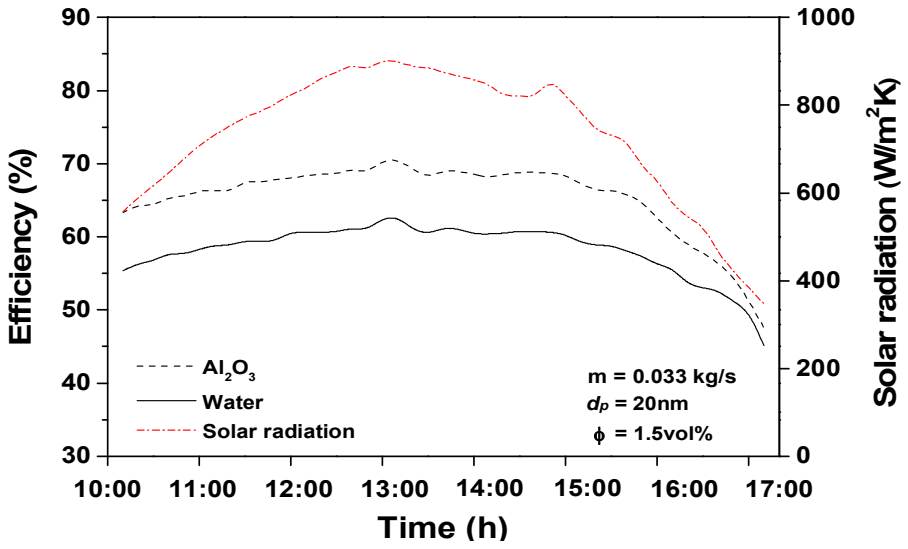


Fig. 6.24 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size 20 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6.2.2 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Fig. 6.25는 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 0.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 30분 후부터 3시간 40분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 667 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 52.6%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 58.3%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 53.8%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 60.3%로 나타났다.

Fig. 6.26은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.0 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 40.9%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 47.3%로 나타났다. 집열판의 온도 상승이 최고치를 나타내는 구간에서 효율은 물을 적용했을 경우 54.1%, 나노유체를 적용했을 경우 63.3%로 나타났다.

Fig. 6.27은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 30분 후부터 2시간 40분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 789.9 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 51.6%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 59.1%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 55.9%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 63.8%로 나타났다.

나노입자의 크기가 20 nm이고 질량유량이 0.047 kg/s의 효율 평가 결과 나노유체의 농도가 1.5 vol%일 때 가장 높게 나타났다. 모든 농도에서 시간에 따른 효율과 일사량 그래프가 증가와 감소를 반복하는 이유는 구름과 바람의 영향을 많이 받아 열손실이 많기 때문이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

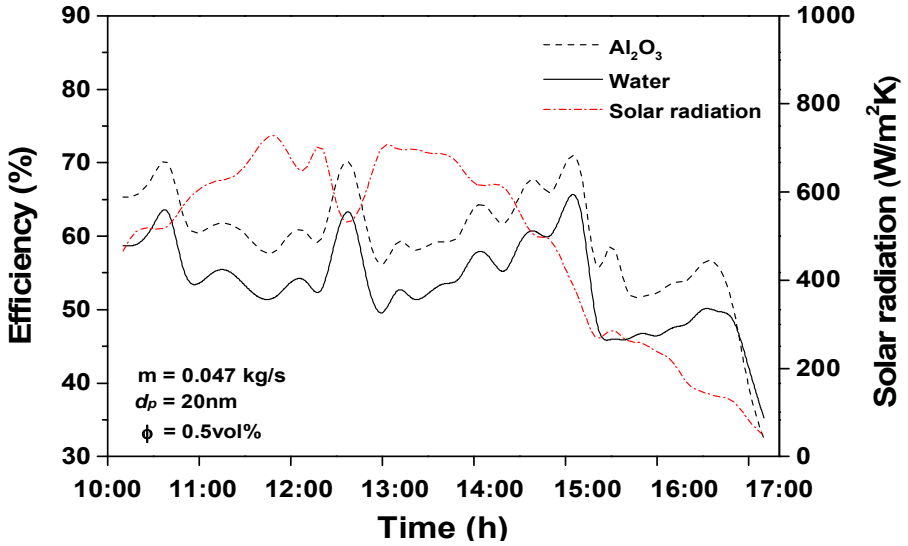


Fig. 6.25 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

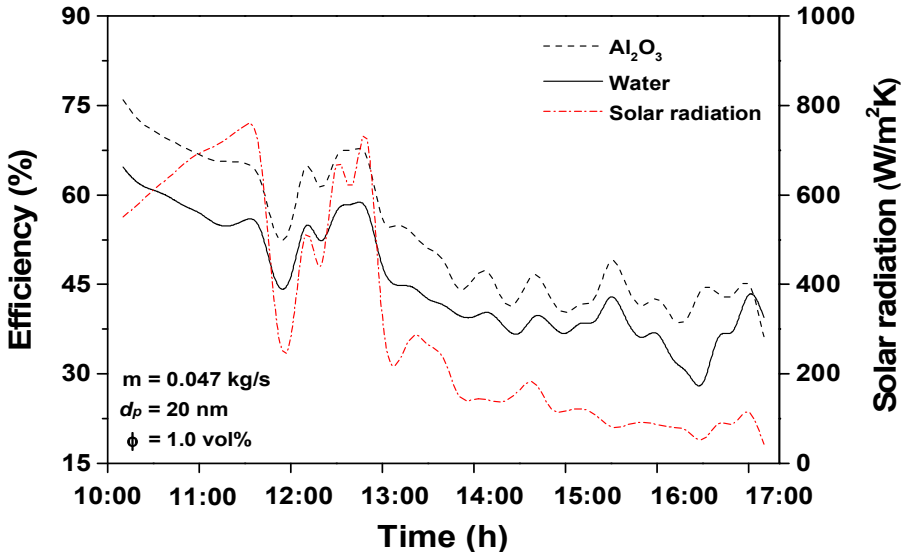


Fig. 6.26 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

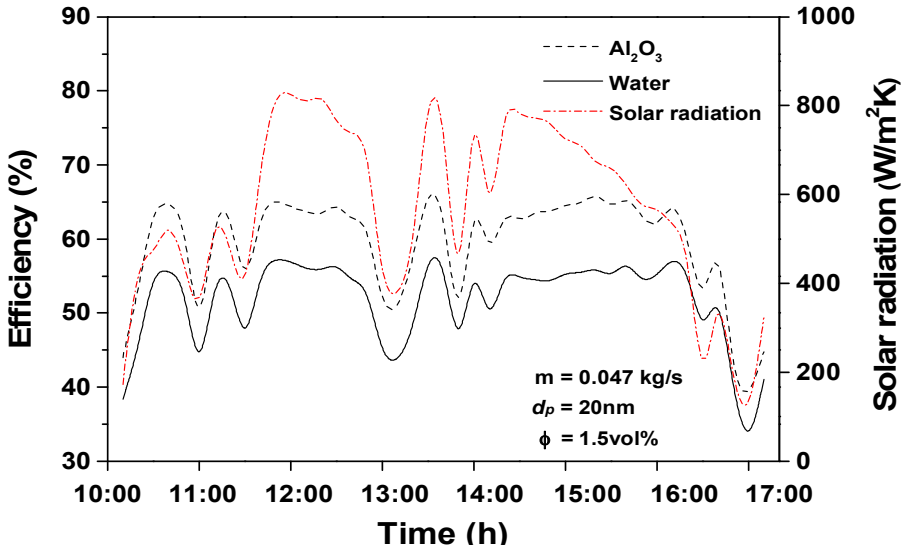


Fig. 6.27 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6.2.3 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Fig. 6.28은 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 50 nm 나노입자의 크기를 가지는 0.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 30분 후부터 4시간까지였으며 이때 태양 일사량은 약 862 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 57.9%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 61.9%로 나타났다. 11시경에 구름의 영향으로 인해 약간의 열손실이 발생하여 효율의 감소가 발생하였다. 집열판의 온도 상승이 최고치를 나타내는 구간에서 효율은 물을 적용했을 경우 62.6%, 나노유체를 적용했을 경우 67.2%로 나타났다.

Fig. 6.29는 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 50 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.0 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 2시간 후부터 3시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 712.7 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 53.2%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 65.3%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 59.6%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 73.5%로 나타났다. 하루 그래프를 보면 일사량이 증가와 감소를 반복하는데 이는 구름의 영향으로 그에 따른 열손실이 발생하여 집열기의 효율에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

Fig. 6.30은 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 50 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 40분 후부터 4시간까지였으며 이때 태양 일사량은 약 856.9 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 51.6%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 56.3%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

효율은 57.9%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 63.5%로 나타났다. 그림을 보면 10:30부터 15:00까지 일사량은 꾸준히 증가하지만 효율이 증감을 계속하는 이유는 바람의 영향으로 집열기의 열손실을 일으킨 것으로 판단된다. 나노입자의 크기가 50 nm이고 질량유량이 0.033 kg/s의 효율 평가 결과 나노유체의 농도가 1.0 vol%일 때 가장 높게 나타났다.

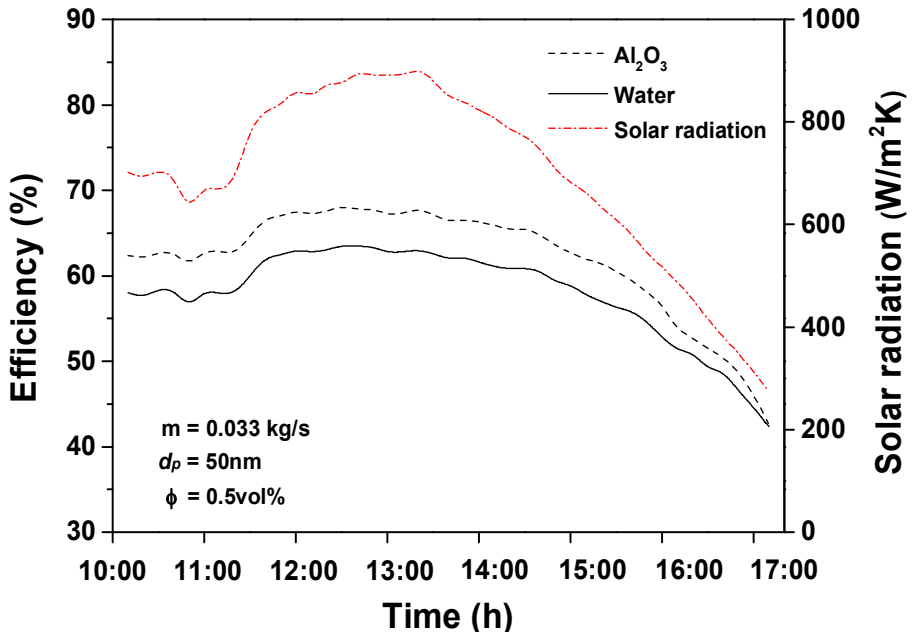


Fig. 6.28 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

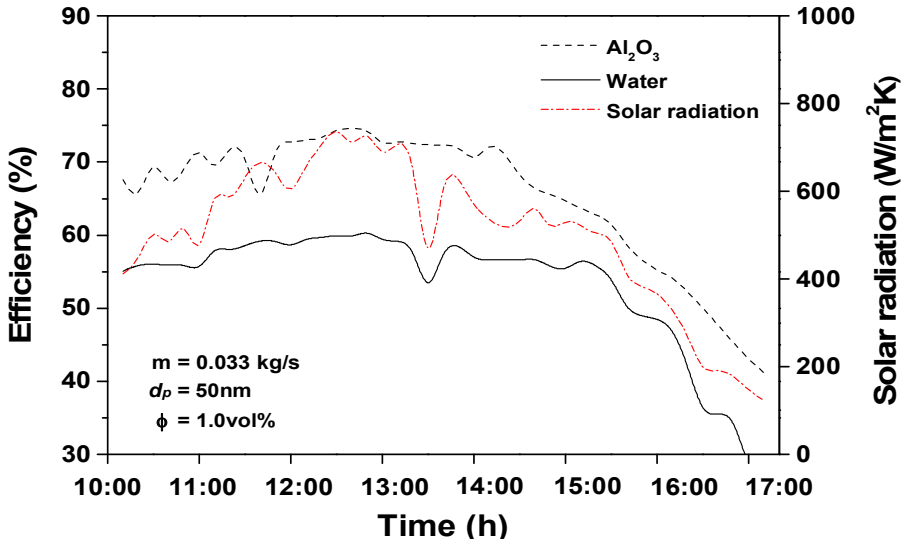


Fig. 6.29 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

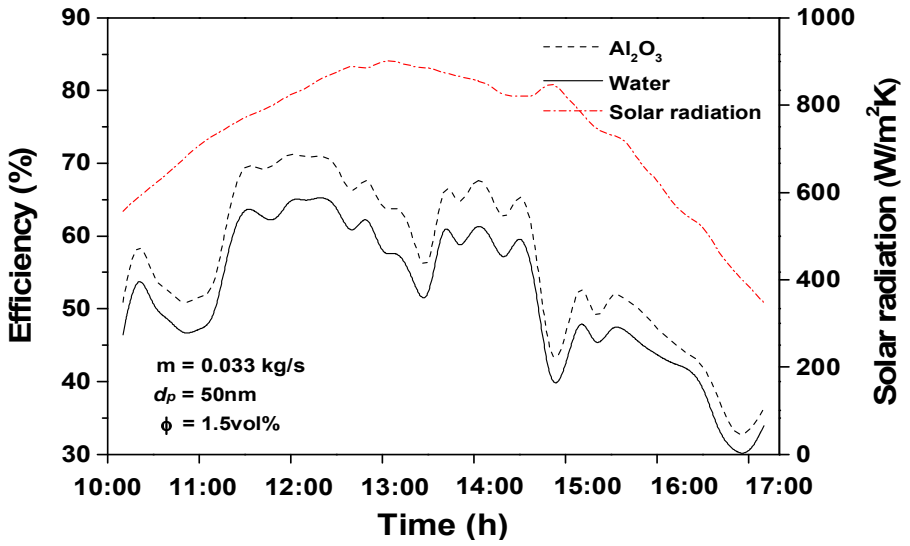


Fig. 6.30 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6.2.4 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 50 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Fig. 6.31은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 50 nm 나노입자의 크기를 가지는 0.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 30분 후부터 4시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 876.9 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 55.6%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 57.8%로 나타났다. 집열판의 온도 상승이 최고치를 나타내는 구간에서 효율은 물을 적용했을 경우 57.8%, 나노유체를 적용했을 경우 60.2%로 나타났다.

Fig. 6.32는 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 50 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.0 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 2시간 후부터 3시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 814 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 54.3%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 57.2%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 58%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 61.7%로 나타났다.

Fig. 6.33은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 50 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 50분 후부터 3시간까지였으며 이때 태양 일사량은 약 855.8 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 50.3%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 53.8%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 53.9%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 55.75%로 나타났다. 모든 나노유체의 농도조건에서 일사량의 증가에도 불구하고 효율의 증가가 크지 않았다. 이는 나노유체의 농도가 증가함에 따라 열전도도는 비선형적으로 증가하지만, 농도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가 높을수록 나노입자들의 분산안정성이 낮아지기 때문에 입자 사이의 열에너지 전달 및 흡수력이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 나노입자의 크기가 50 nm이고 질량유량이 0.047 kg/s의 효율 평가 결과 나노유체의 농도가 0.5 vol%일 때 가장 높게 나타났고 일사량이 가장 좋은 구간에서는 나노유체의 농도가 1.0 vol%에서 가장 높게 나타났다.

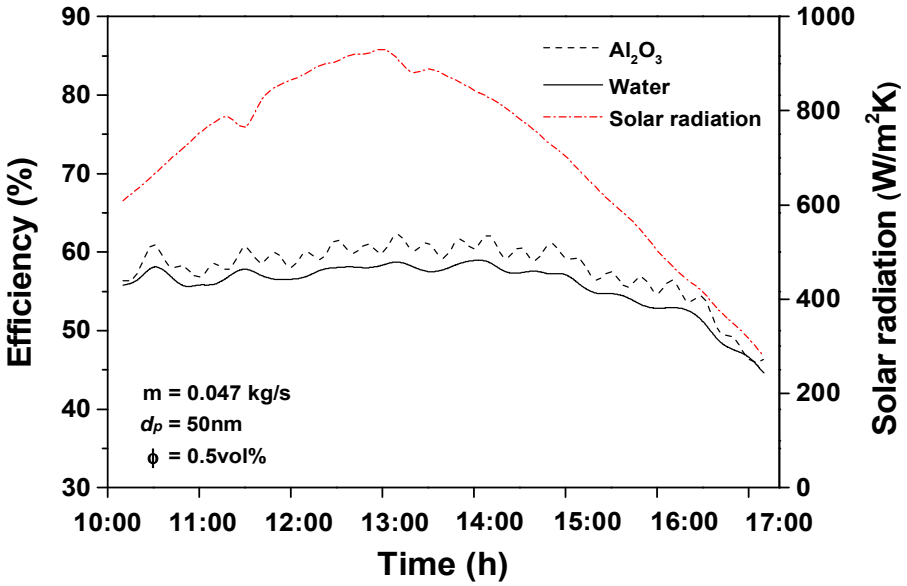


Fig. 6.31 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

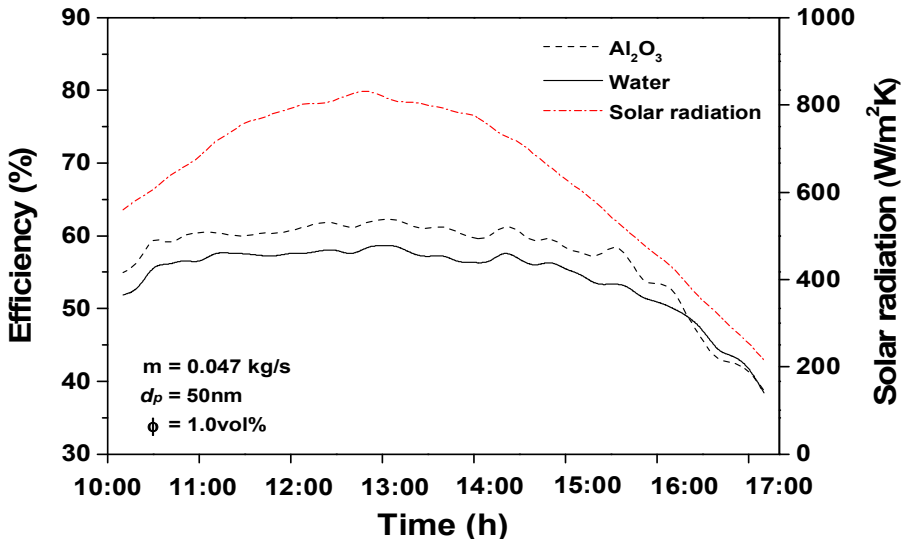


Fig. 6.32 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

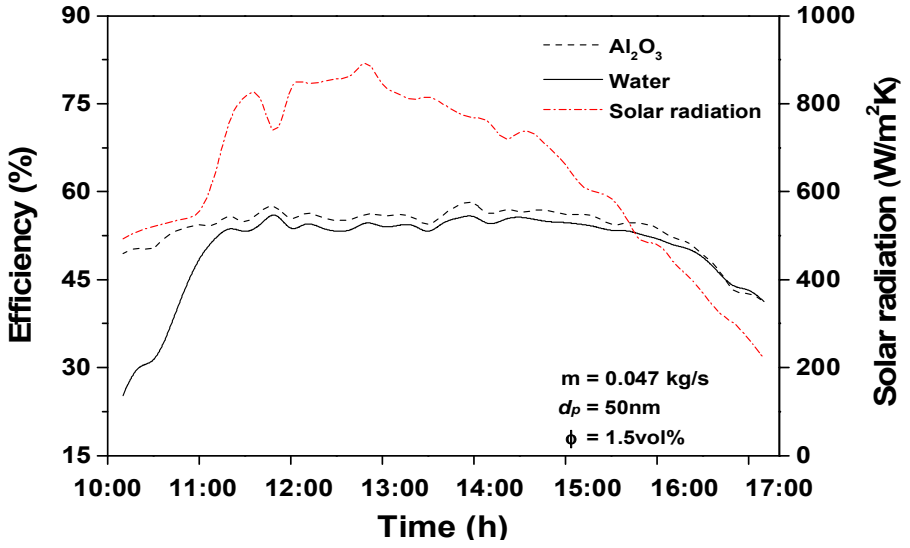


Fig. 6.33 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 50 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6.2.5 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 100 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Fig. 6.34는 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 100 nm 나노입자의 크기를 가지는 0.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 10분 후부터 4시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 920 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 58.6%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 61.6%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 64.7%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 68.2%로 나타났다. 14:30분경과 15:50분경에 효율과 일사량이 급격히 감소하는데 이는 구름의 영향으로 열손실이 발생해 나온 현상이다.

Fig. 6.35는 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 100 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.0 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 후부터 4시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 949.9 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 55.5%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 60.4%로 나타났다. 집열판의 온도 상승이 최고치를 나타내는 구간에서 효율은 물을 적용했을 경우 63.3%, 나노유체를 적용했을 경우 69.4%로 나타났다.

Fig. 6.36은 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 100 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 1시간 20분 후부터 3시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 829.5 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 52.4%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 55.7%로 나타났다. 집열판의 온도 상승이 최고치를 나타내는 구간에서 효율은 물을 적용했을 경우 65.9%, 나노유체를 적용했을 경우 70.2%로 나타

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

났다. 나노입자의 크기가 100 nm이고 질량유량이 0.033 kg/s의 효율 평가 결과 나노유체의 농도가 0.5 vol%일 때 가장 높게 나타났고 일사량이 가장 좋은 구간에서는 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 가장 높게 나타났다.

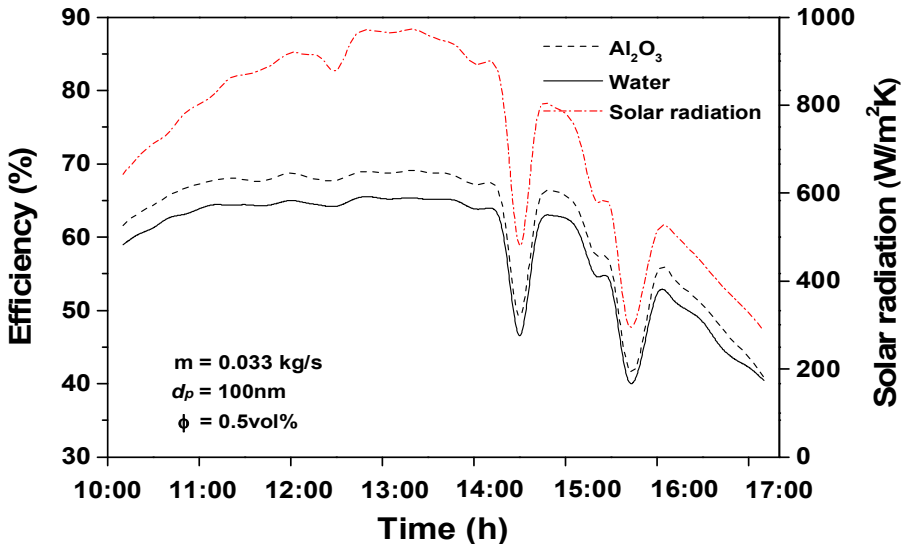


Fig. 6.34 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

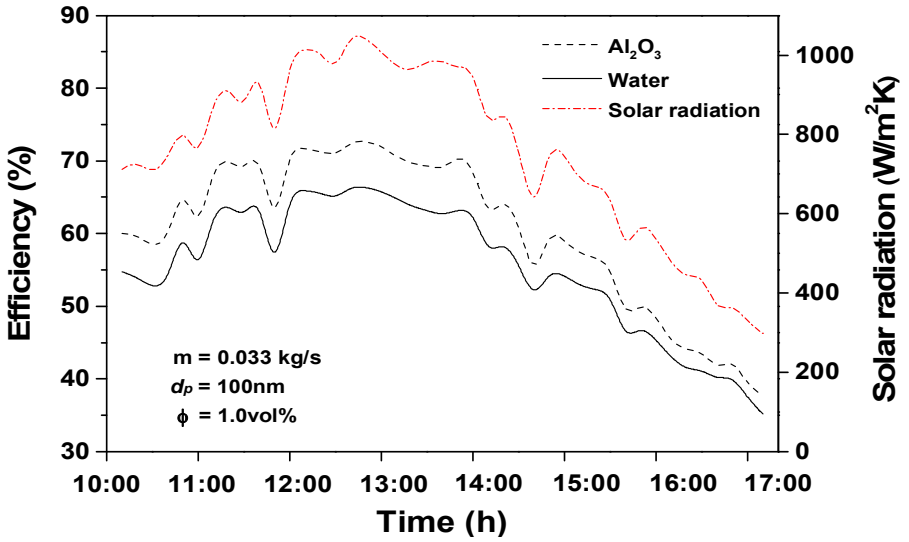


Fig. 6.35 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

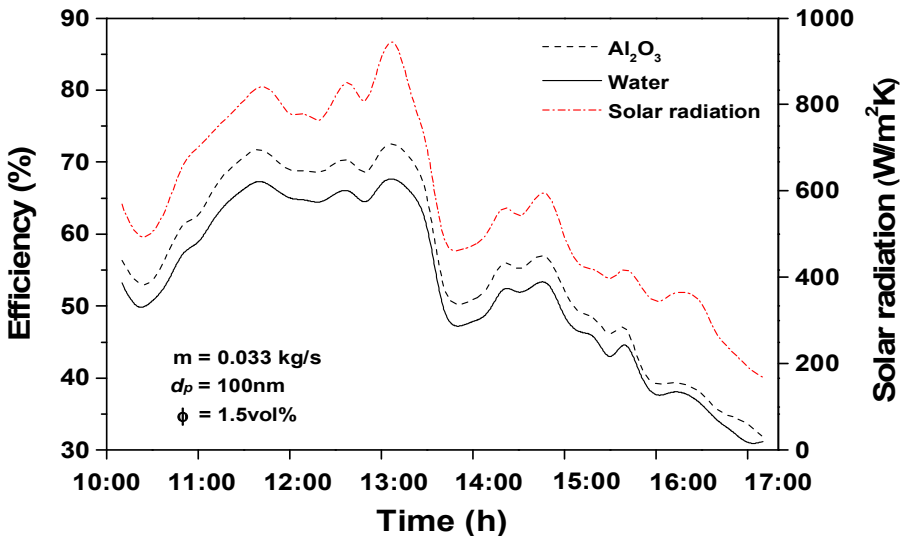


Fig. 6.36 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.033 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6.2.6 효율 평가 결과(Al_2O_3 particle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Fig. 6.37은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 100 nm 나노입자의 크기를 가지는 0.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 50분 후부터 3시간 50분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 921.6 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 52.9%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 51.7%로 나타났다. 집열판의 온도 상승이 최고치를 나타내는 구간에서 효율은 물을 적용했을 경우 58.8%, 나노유체를 적용했을 경우 57.2%로 나타났다. 나노유체를 적용했을 때의 집열효율이 기본유체인 물을 적용했을 때의 효율보다 낮게 나타났는데 이는 비교적 큰 나노입자의 분산이 효과적으로 이루어지지 않아 입자사이의 열에너지 전달 및 흡수력이 감소하고, 또한 14시 이후에 구름과 바람의 영향으로 열손실이 발생된 현상으로 판단된다.

Fig. 6.38은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 100 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.0 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 40분 후부터 4시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 921.9 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 55.4%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 61.1%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기의 효율은 59.7%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 66.3%로 나타났다.

Fig. 6.39는 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 100 nm 나노입자의 크기를 가지는 1.5 vol% Al_2O_3 나노유체와 물을 적용한 U-tube형 태양열 집열기의 시간에 따른 효율과 일사량을 나타내는 그래프이다. 집열판의 온도상승이 최고치를 나타내는 구간은 실험시작 50분 후부터 4시간 10분까지였으며 이때 태양 일사량은 약 914 W/m^2 로 나타내고 있다. 오전 10시부터 오후 5시까지 실험한 결과, 기본유체인 물을 적용했을 경우 평균 효율은 54.7%로 나타났으며 나노유체를 적용했을 경우 평균 효율은 58.5%로 나타났다. 일사량이 가장 좋은 구간에서 물을 적용한 집열기

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

의 효율은 59%이고 나노유체를 적용하였을 때의 효율은 63.2%로 나타났다. 나노입자의 크기가 100 nm이고 질량유량이 0.047 kg/s의 효율 평가 결과 나노유체의 농도가 1.0 vol%일 때 가장 높게 나타났고 일사량이 가장 좋은 구간에서도 나노유체의 농도가 1.0 vol%에서 가장 높게 나타났다.

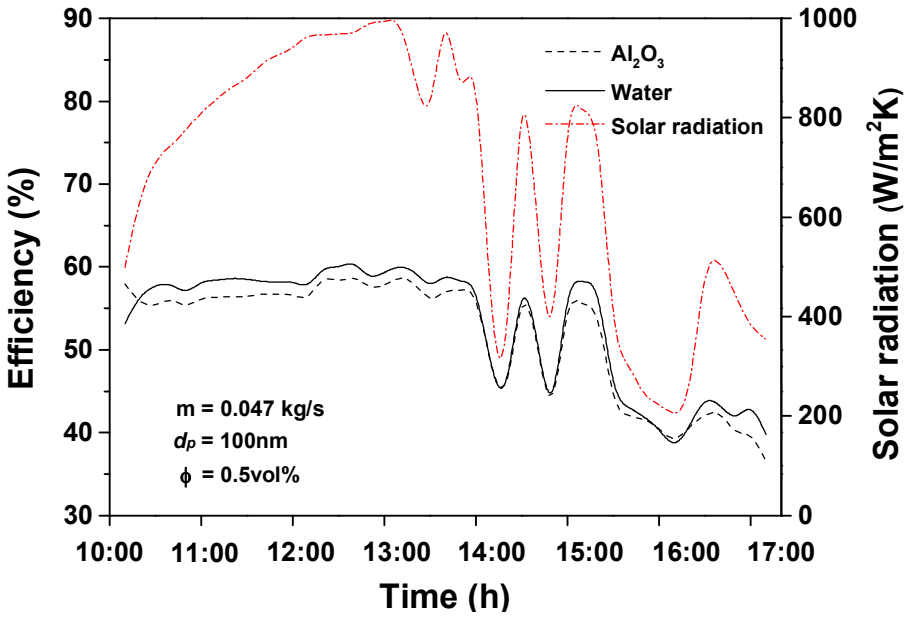


Fig. 6.37 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 0.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

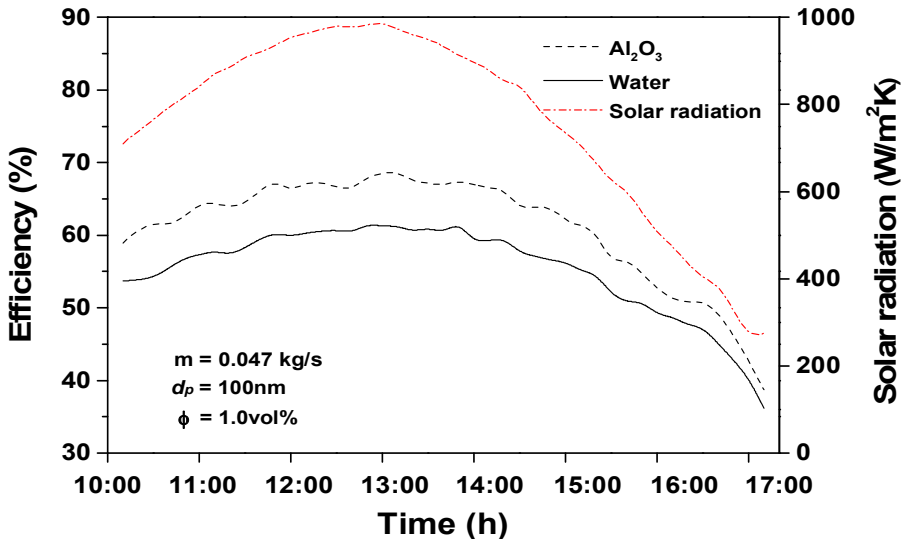


Fig. 6.38 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.0 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

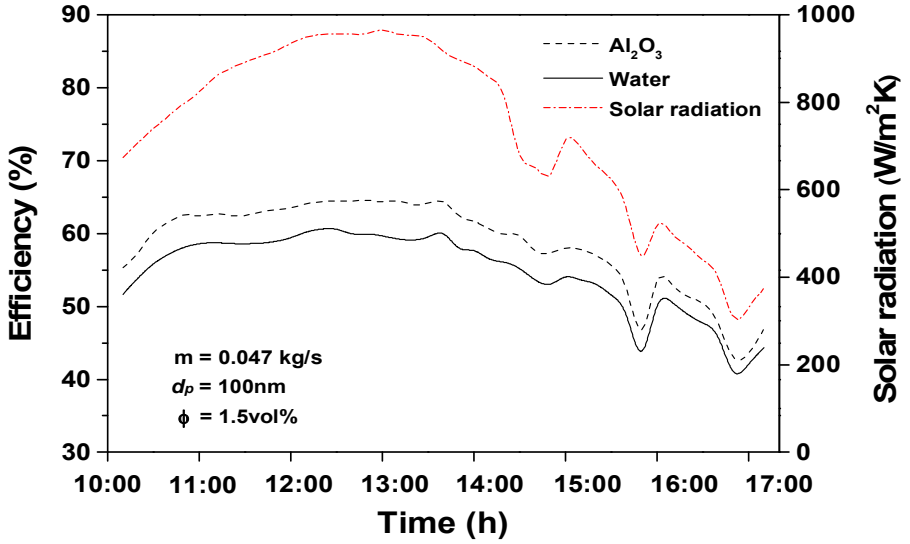


Fig. 6.39 Variation of efficiency of the U-tube solar collector with Al_2O_3 nanofluid and water during 1 day(concentration: 1.5 vol%, nanoparticle size: 100 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6.2.7 나노유체 농도, 입자의 크기, 질량유량 변화에 따른 효율 고찰

Fig. 6.40은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 Al_2O_3 나노유체의 농도 변화에 따른 U-tube형 태양열 집열기 효율의 변화를 보여주고 있다. Al_2O_3 나노유체를 사용한 집열기의 효율이 물을 사용한 집열기 보다 다양한 운전조건에서 우수함을 알 수 있다. 여기서 T_i=T_a일 때 태양열 집열기의 효율은 최대값을 가지며 (T_i-T_a)/G가 증가할수록 효율이 감소함을 확인할 수 있다. U-tube형 태양열 집열기의 효율은 T_i=T_a일 때 나노유체의 농도가 1.0 vol%일 경우 72.4%로 가장 높은 효율을 보였다. 이는 기본유체인 물을 사용하였을 때의 효율보다 약 14.1% 향상된 결과이다. 또한 나노유체의 농도가 1.5 vol%과 0.5 vol%일 때 효율보다 각각 4.6%, 6.5% 향상된 결과이다. (T_i-T_a)/G값의 변화에 따른 평판형 집열기의 효율 변화는 거의 일정한 형태를 가짐을 확인할 수 있었다. 전체 평균값은 나노유체의 농도가 1.0 vol%에서 65.3%로 가장 높은 성능특성을 보였으며 또한 나노유체의 농도가 1.5 vol%과 0.5 vol%인 경우 61.9%, 60.2%로 나타났다. 기본유체인 물을 적용하였을 경우 평균 효율은 52.05%로 나타났고 나노유체를 적용한 집열 효율의 평균값보다 약 13% 낮은 결과를 보였다.

Fig. 6.40에서 볼 수 있듯이, T_i=T_a일 때 나노유체의 농도가 1.0 vol%인 U-tube형 집열기의 효율은 72.4%로 가장 높은 효율을 보였으며 이는 물을 사용했을 경우의 효율보다 약 24.1% 향상되었다. 또한 나노유체의 농도가 1.5 vol%와 0.5 vol%인 U-tube형 집열기의 효율보다 각각 6.79%, 9.82% 향상되었다. 본 연구에서 U-tube형 집열기의 효율은 나노유체의 농도가 1.0 vol%일 때 가장 높은 효율을 보였으며 특히, 나노유체의 농도가 1.5 vol%인 집열기의 효율보다 높았다. 그 이유는 나노유체의 열전도도는 농도가 증가함에 따라 증가하기 때문에 나노유체의 농도가 1.5 vol%일 때 열전도도는 나노유체의 농도 1.0 vol%일 때보다 더 크지만 나노유체가 고농도로 갈수록 나노입자들의 분산안정성이 낮아짐으로 입자 사이에 열에너지 전달 및 흡수력이 감소한다. 또한 농도가 증가할수록 점성도 증가하여 경계층 두께의 증가로 열전도율은 감소하게 되기 때문이다.

서로 다른 나노유체의 농도에 따른 효율의 향상에 관한 효과를 비교하기 위해서 얻어진 결과를 특성 매개 변수를 갖는 선형 방정식을 이용하여 Table 6.4와 같이

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나타낼 수 있다. 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 나노유체의 농도가 1.0 vol%에서 0.733으로 최대값을 보이고 이때 열손실계수 $F_R U_L$값은 17.69이다. 반면에 나노유체의 농도가 1.5 vol% 에서는 $F_R U_L$값이 18.05이다. $F_R(\tau\alpha)$값은 클수록 $F_R U_L$값은 작을수록 집열성능이 우수하다. 즉, 나노유체의 농도가 1.5 vol%일 때 열에너지 전달 및 흡수력이 감소하며 외부로의 열손실이 더 생긴다는 것을 간접적으로 확인하였고 물을 사용한 경우 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.617로 가장 작게 나타났으며 $F_R U_L$값은 20.38로 가장 크게 나타났다. 그러므로 일반유체인 물을 적용한 집열기보다 나노유체를 적용한 태양열 집열기가 작동유체로서 열적성능이 우수함을 알 수 있다.

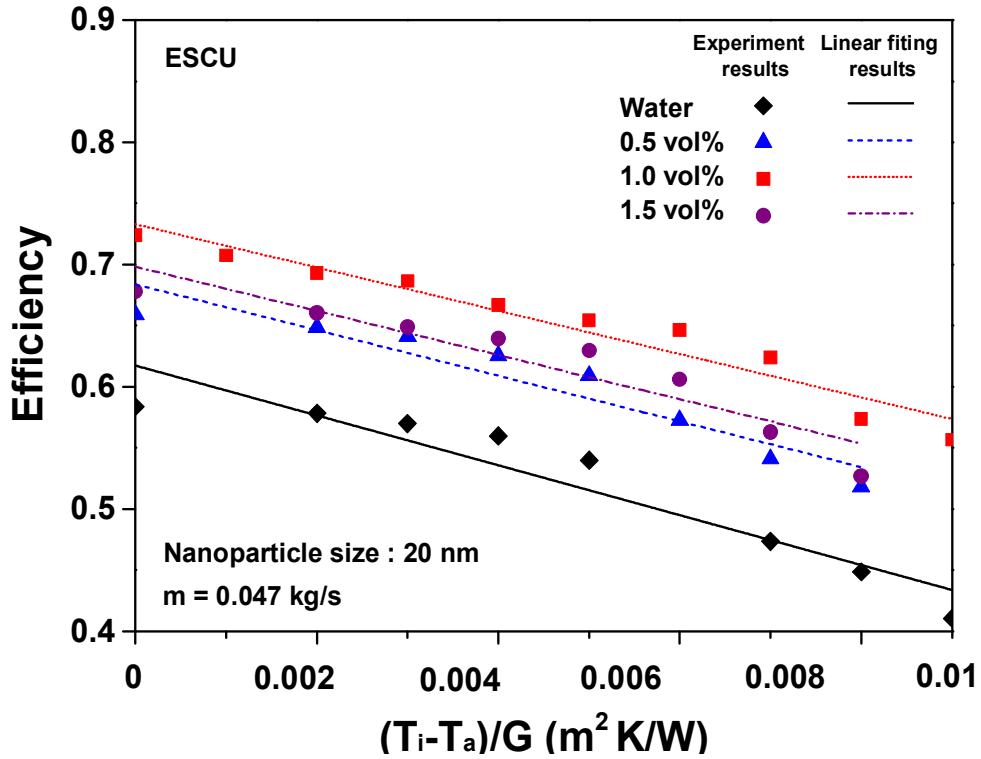


Fig. 6.40 Variation of efficiency in the U-tube solar collector for different nanofluid concentration(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 6.4 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for 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, 0.5 vol%)	0.684	18.67	0.889
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0 vol%)	0.733	17.69	0.938
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.5 vol%)	0.698	18.05	0.863
Water	0.617	20.38	0.884

Fig. 6.41은 동일한 나노유체 농도가 1.0 vol%에서 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 나노입자의 크기에 따른 U-tube형 태양열 집열기의 효율 변화를 보여주고 있다. 나노입자의 크기는 열전도도의 중요한 영향을 주기 때문에 나노입자의 크기에 따라 U-tube형 태양열 집열기의 효율에 대한 분석을 진행하였다. 모든 운전조건에서 나노입자의 크기가 가장 작은 20 nm로 제작된 나노유체를 사용하였을 때 가장 높은 집열기 효율을 나타냈다.

나노입자의 크기가 20 nm인 나노유체의 최대 효율은 72.4%로 50 nm와 100 nm을 사용한 집열기의 효율보다 각각 2.2%와 3.6% 향상됨을 보였다. 즉, 입자의 크기가 상대적으로 작은 나노유체는 열전도도가 우수하여 더 빠른 열전도를 발생시켜 태양열 집열기의 효율에 주요한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 또한 20 nm, 50 nm, 100 nm인 각각의 나노유체를 작동유체로 사용한 태양열 집열기의 최대효율은 물을 작동유체로 사용한 태양열 집열기의 최대 효율보다 각각 14.1%, 10.4%, 7.8% 향상됨을 확인할 수 있다.

Table 6.5에 세 가지 나노입자의 크기에 따른 특성 매개 변수의 값을 제시하였다. 나노입자의 크기가 각각 20 nm, 50 nm, 100 nm일 때 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.733, 0.709, 0.688로 나타났으며 열손실계수 $F_R U_L$값은 17.69, 17.16, 16.49로 각각 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

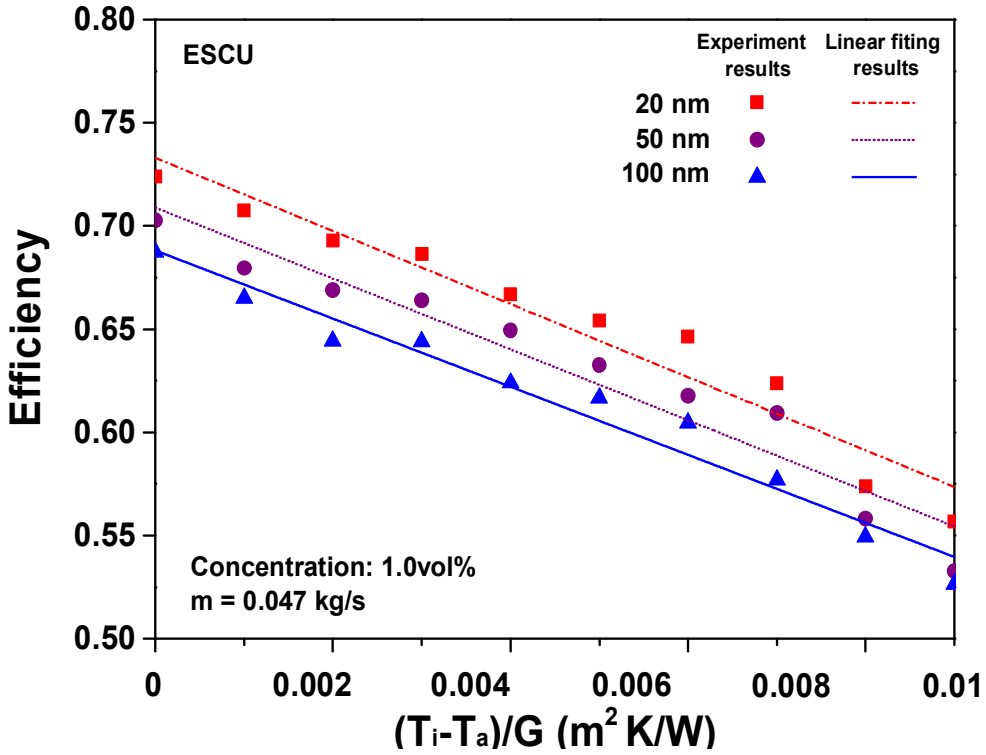


Fig. 6.41 Variation of efficiency in the U-tube solar collector for different nanoparticle sizes(concentration: 1.0 vol%, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Table 6.5 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to nano particle size

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0 vol%)	0.733	17.698	0.938
Al_2O_3 nanofluid (50 nm, 1.0 vol%)	0.709	17.165	0.929
Al_2O_3 nanofluid (100 nm, 1.0 vol%)	0.688	16.496	0.961

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 6.42는 나노입자의 크기가 20 nm일 때 1.0 vol% Al_2O_3 나노유체의 유량조건에 따른 U-tube형 태양열 집열기의 순간적인 효율 변화를 보여주고 있다. 태양열 집열기의 효율은 작동유체의 유량이 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 증가함에 따라 증가한다. 이는 효율의 정의인 식 (5-1)을 기초로 하여, 상대적으로 높은 유량은 효율을 향상시킨다.

작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s 유량에서는 집열기에서 유체가 머무는 시간이 상대적으로 길어 입출구 온도차는 증가한다. 이러한 입출구 온도차의 증가는 더 많은 열손실을 일으켜 낮은 효율을 보인다. 하지만 0.047kg/s 유량에서는 집열기에서 유체가 머무는 시간이 짧아져 에너지 흡수량이 감소되어 태양열 집열기의 입출구 온도차는 감소하나 열 손실은 0.033 kg/s보다 작아 결과적으로 집열기의 효율이 향상된다. 따라서 태양열 집열기의 효율은 유량과 집열기의 입출구 온도차에 의해 결정된다. 작동유체의 유량이 0.033 kg/s 와 0.047 kg/s 일 때 순간 최대 효율은 69.99%과 72.4%로 나타났으며 평균효율은 60.66%와 63.3%로 나타났다. 다양한 운전조건에서 그 변화의 형태는 일정함을 확인할 수 있었다.

Table 6.6에 20 nm 1.0 vol% Al_2O_3 나노유체의 유량조건에 따른 특성 매개 변수의 값을 제시하였다. 질량유량이 0.033 kg/s에서의 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.713으로 나타났으며 열손실계수 $F_R U_L$값은 18.31로 나타났다. 질량유량이 0.047 kg/s에서 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.733으로 나타났으며 열손실계수 $F_R U_L$값은 17.69로 나타났다. 위의 결과에 따라 평판형 집열기에서는 $F_R(\tau\alpha)$값이 높고 $F_R U_L$값이 낮은 질량유량이 0.047 kg/s에서의 집열성능이 더 우수함을 확인할 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

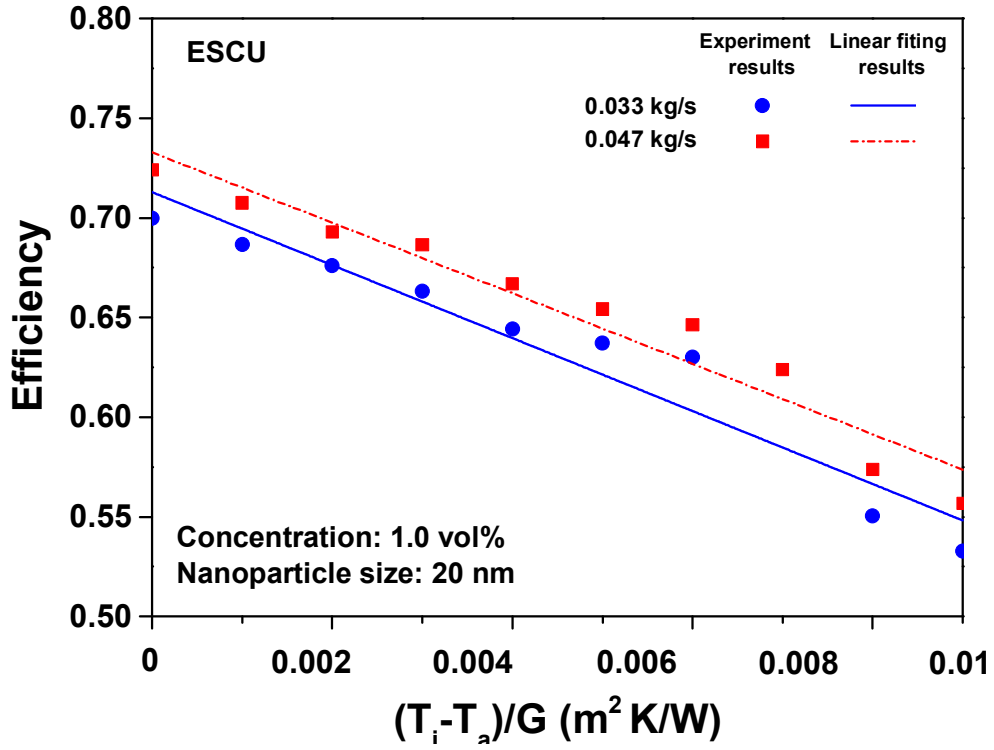


Fig. 6.42 Variation of efficiency in the U-tube solar collector for different mass flow rates(nanoparticle size: 20 nm, concentration: 1.0 vol%)

Table 6.6 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for different mass flow rates(nanoparticle size: 20 nm, concentration: 1.0 vol%)

Mass flow rate (kg/s)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
0.033	0.713	18.31	0.926
0.047	0.733	17.69	0.938

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6.3 평판형 태양열 집열기와 U-tube형 태양열 집열기의 성능 비교

열전도도는 작동유체의 열의 흡수와 배출에서 효율에 미치는 영향이 가장 중요한 요소 중에 하나이다. 따라서 태양열 집열기에 적용되는 나노유체의 농도와 입자크기에 따른 열성능 변화를 조사하기 위해 각각의 열전도도를 나노유체의 농도에 따라 구하였다. Fig. 6.37은 20 nm의 나노 입자크기를 가지는 Al_2O_3 나노유체의 농도에 따른 열전도비를 각각의 온도에 따라 나타내었다. 여기서 k_{nf}와 k_{bf}는 각각 나노유체와 물의 열전도도이다. 열전도비는 나노유체의 농도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 열전도비의 증가율은 농도가 증가함에 따라 점점 줄어드는데 나노유체의 온도가 20℃일 때 1.0 vol%와 1.5 vol% 나노유체의 열전도도 증가율은 각각 3.7%와 4.8%이며, 30℃일 때 각각 5.3%와 6.9%로 나타났다.

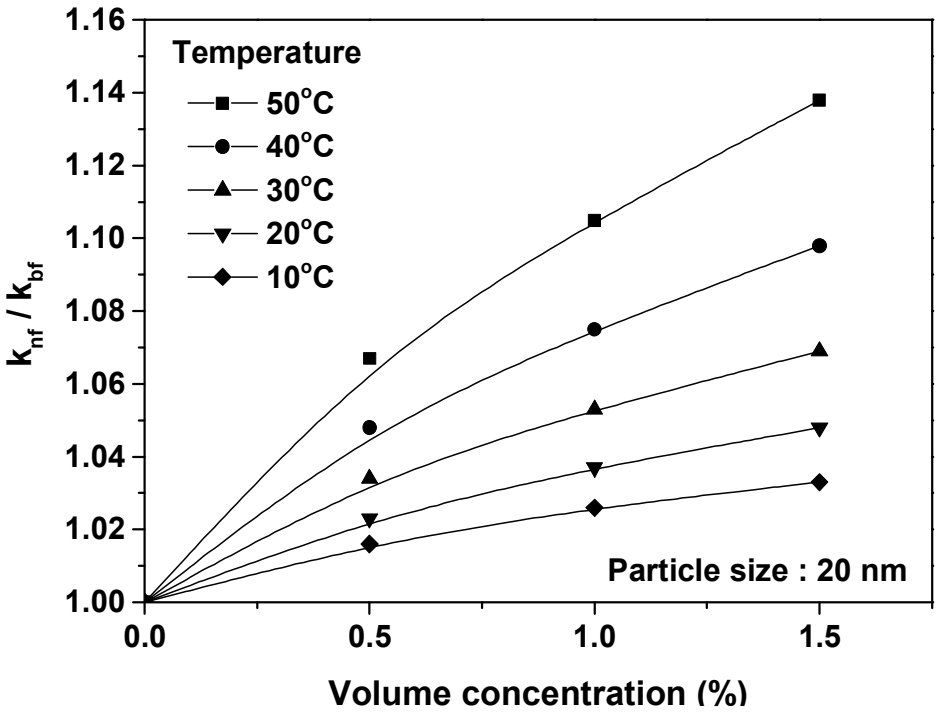


Fig. 6.43 Thermal conductivity ratio as a function of temperature at different volume concentrations(nanoparticle size: 20 nm)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Lee et al.(2008)의 연구에서는 Al_2O_3 나노유체에 대한 열전도도와 체적농도 사이에는 선형적인 관계가 있음을 실험적으로 검증하였으며, 나노입자가 30 nm보다 작은 크기에 대해 유체의 온도 21℃에서 체적농도가 0.01~0.3 vol%인 Al_2O_3 나노유체의 열전도도가 최대 1.44% 향상됨을 보였다. Fig. 6.43에서 볼 수 있듯이 나노유체의 농도는 나노유체의 열전도도에 영향을 미치는 가장 중요한 변수 중에 하나임을 알 수 있다.

Fig. 6.44에 동일한 나노유체의 농도에서 나노입자의 크기에 따른 열전도비를 다양한 온도에서 보여주고 있다. Fig. 6.44에서 보듯이 나노입자의 크기가 작을수록 높은 열전도도를 나타내었다. 유체의 온도가 30℃에서 20 nm의 열전도비의 향상율은 나노입자의 크기가 50 nm와 100 nm인 경우에 비하여 각각 1.54%와 2.43% 더 큰 것으로 확인되었다.

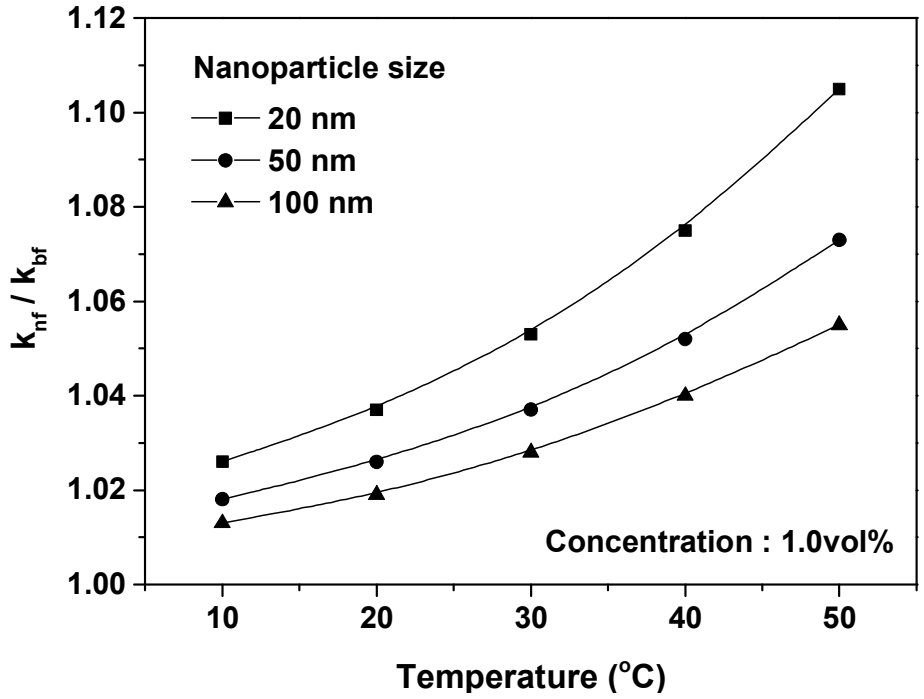


Fig. 6.44 Thermal conductivity ratio as a function of nanoparticle size at different temperatures(concentration: 1.0 vol%)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이는 동일한 농도를 제작할 때, 상대적으로 작은 입자의 양이 큰 입자의 양보다 더 많기 때문에 더 많은 수의 나노입자가 들어간 나노유체가 물과 입자들 사이의 열전달이 커져 열전도도가 증가하기 때문이다. 또한 나노입자의 미세운동과 관련하여 입자의 크기가 작은 나노유체는 입자가 큰 나노유체보다 입자와 물 사이의 미세운동의 강도가 증가하여 열전달을 촉진시기 때문이다. 즉, 동일한 농도에서 작은 나노입자로 구성된 나노유체가 더 높은 열전도도를 가진다. 선행연구에 따르면 (Jang, 2007) 입자 크기가 감소함에 따라 나노입자의 브라운 운동이 커지고 나노유체의 입자들 사이에 대류가 활발해진다. 브라운 운동이란 액체나 기체 속에서 미소입자들이 불규칙하게 운동하는 현상을 의미한다. 결과적으로 입자 크기가 작은 나노유체의 열전도도는 커지게 된다. 또한 온도가 증가함에 따라 기본유체의 동점도가 감소하게 되고 나노입자의 브라운 운동이 증가된다. 이러한 영향은 나노유체의 대류 현상을 현저하게 증가시켜 주기 때문에 유체의 온도가 증가함에 따라 나노유체 열전도도가 증가하게 된다. 본 연구에서 평판형과 U-tube형 태양열 집열기에서 작동유체를 Al_2O_3 나노유체를 사용하였을 때의 성능향상 정도를 분석하기 위해 나노입자 크기와 농도가 서로 다른 조건에서 각각 여러 번의 실험을 수행하였으며 이들의 평균적인 데이터를 분석하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 6.45와 Fig. 6.46은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 나노입자의 크기가 20 nm, 농도가 0.5 vol%의 나노유체와 기본유체인 물을 적용하여 실험을 수행하였을 때 하루 동안에 대한 집열기의 입출구 온도, 외기온도, 일사량의 변화를 보여주고 있다. 두 집열기에 대하여 입구온도는 동일하며, 외기 조건에 따라 효율차이에 의하여 출구온도가 변하는 것을 확인할 수 있다.

실험결과, 20 nm 크기의 0.5 vol% Al_2O_3 나노유체를 적용한 평판형 태양열 집열기의 출구온도는 물을 사용하였을 때보다 평균적으로 0.54℃ 상승하였으며 최대 1.0℃ 상승하였다. 또한 동일 조건에서 U-tube형 태양열 집열기의 출구온도는 물을 사용하였을 때보다 평균적으로 0.7℃ 상승하였으며 최대 1.1℃ 상승하였다. 입구온도와 출구온도의 차는 전체적으로 평판형 태양열 집열기는 2.86~3.4℃ 상승하는 결과를 보인반면 U-tube형 집열기는 3.2~3.9℃ 상승하는 결과를 가져왔다. 이는 U-tube형 태양열 집열기가 평판형 태양열 집열기보다 뛰어난 응답성을 보인 결과라 판단된다. 특히, 일사량이 높은 조건에서는 나노유체의 출구온도가 물보다 크게 향상됨을 확인할 수 있으며 반면에 일사량이 낮은 조건에서는 나노유체를 사용하는 경우와 물을 사용하는 경우의 출구온도 차는 점점 줄어듦을 알 수 있다. 이는 일사량이 높은 조건일 때에 나노유체가 물보다 상대적으로 태양열 에너지 흡수력이 우수하며 열용량이 크고 반면 열손실이 작기 때문이다. 하지만 일사량이 낮을 때는 나노유체의 열손실이 물보다 큼을 확인할 수 있다. 또한 나노유체의 비열이 물의 비열보다 작기 때문에 낮은 일사량에서는 출구 온도의 감소 정도가 더 급격함을 알 수 있다. 따라서 일사량이 점점 감소함에 따라 태양열 집열기에서 나노유체의 출구온도는 물의 출구온도와 거의 동일하게 됨을 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

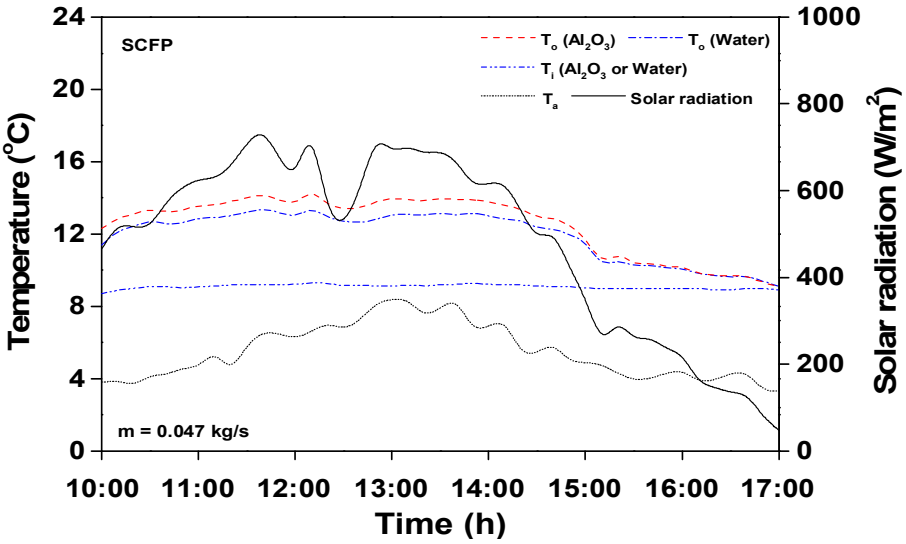


Fig. 6.45 Variations of temperature and solar radiation in the flat plate solar collector for 1 day(nanoparticle size: 20 nm, concentration: 0.5 vol%)

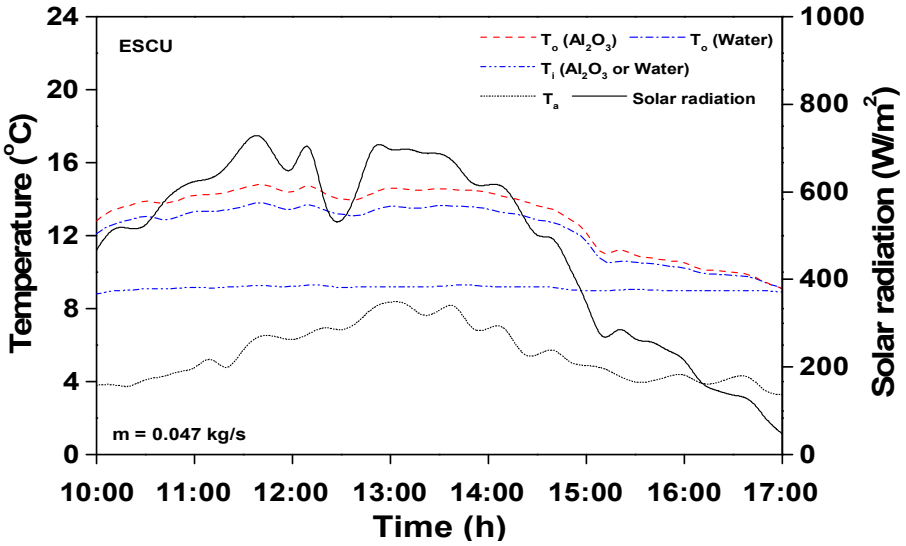


Fig. 6.46 Variations of temperature and solar radiation in the U-tube solar collector for 1 day(nanoparticle size: 20 nm, concentration: 0.5 vol%)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 6.47은 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 20 nm 나노입자의 크기를 가지는 Al_2O_3 나노유체의 농도 변화에 따른 평판형 태양열 집열기와 U-tube형 태양열 집열기 효율의 변화를 보여주고 있다. Al_2O_3 나노유체를 사용한 집열기의 효율이 물을 사용한 집열기보다 우수함을 알 수 있다. 여기서 T_i=T_a일 때 태양열 집열기의 효율은 최대값을 가지며 (T_i-T_a)/G가 증가할수록 효율이 감소함을 확인할 수 있다. 실험결과 Al_2O_3 나노유체를 적용한 태양열 집열기의 효율이 물을 적용한 태양열 집열기의 효율에 비하여 모든 조건에서 크게 향상됨을 확인하였다. 평판형 태양열 집열기의 효율은 T_i=T_a일 때 나노유체의 농도가 1.5 vol%인 집열기의 효율은 77.3%로 가장 높은 효율을 보였으며 U-tube형 태양열 집열기는 1.0 vol%에서 72.4%로 가장 높은 효율을 보였다. 두 집열기의 집열효율은 평판형 태양열 집열기가 4.9% 높은 결과를 보였다. 가장 낮은 효율을 보인 조건은 T_i=T_a일 때 평판형, U-tube형 집열기는 모두 나노유체의 농도 0.5 vol%에서 각각 70.5%, 65.9%로 나타났다.

U-tube형 태양열 집열기는 평판형 집열기와 달리 나노유체의 농도가 1.0 vol%에서 가장 좋은 집열효율을 보였다. 이는 나노유체의 열전도도는 농도가 증가함에 따라 증가하기 때문에 나노유체의 농도가 1.5 vol%일 때 열전도도는 나노유체의 농도 1.0 vol%일 때보다 더 크지만 나노유체가 고농도로 갈수록 나노입자들의 분산안정성이 낮아짐으로 입자 사이에 열에너지 전달 및 흡수력이 감소하고 농도가 증가할수록 점성도 증가하여 경계층 두께의 증가로 열전도율은 감소하게 되기 때문이다. 또한, 평판형 집열기가 U-tube형 집열기에 비하여 물 대비 나노유체를 적용했을 때의 효율 상승률은 평균적으로 약 4.6% 더 높게 나타났다.

서로 다른 나노유체의 농도에 따른 효율의 향상에 관한 효과를 비교하기 위해서 얻어진 결과를 특성 매개 변수를 갖는 선형 방정식을 이용하여 Table 6.5와 같이 나타낼 수 있다. 평판형 집열기의 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 최대값 0.774를 나타내었고 이때 열손실계수 $F_R U_L$값은 20.309이다. U-tube형 태양열 집열기도 $F_R(\tau\alpha)$값은 나노유체의 농도가 1.0 vol%에서 0.733으로 최대값을 보였고 $F_R U_L$값은 17.69를 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

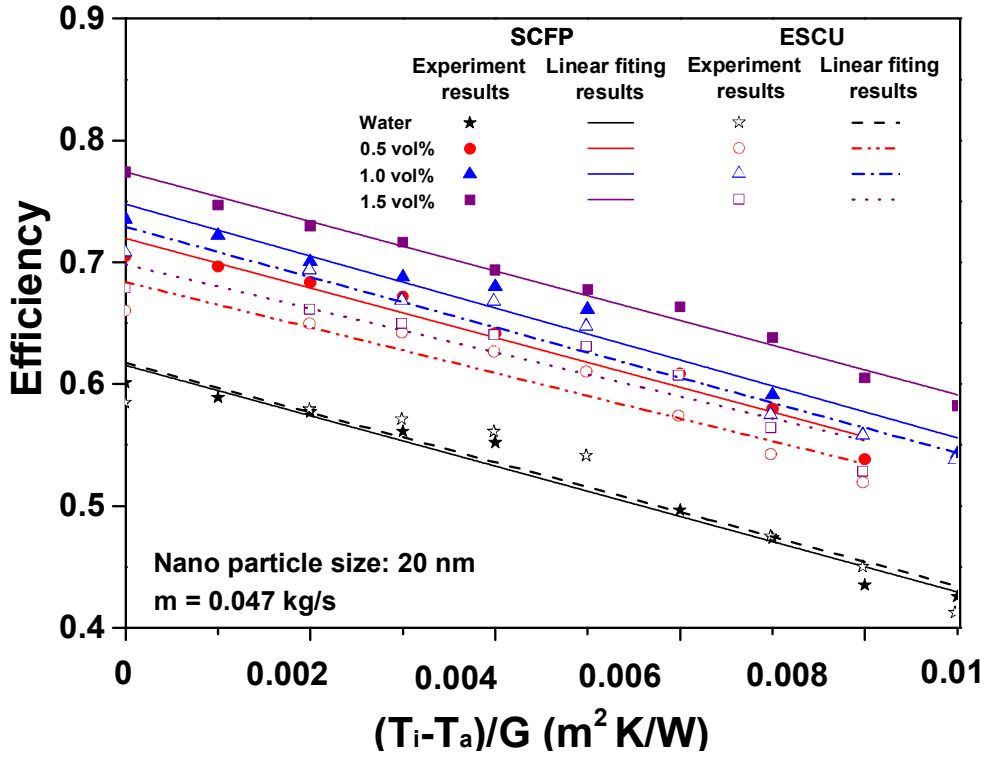


Fig. 6.47 Variation of efficiency in the flat plate solar collector and U-tube solar collector for different nanofluid concentration(nanoparticle size: 20 nm, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 6.48은 동일한 나노유체 농도가 1.0 vol%에서 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 나노입자의 크기에 따른 태양열 집열기의 효율 변화를 보여주고 있다. 나노입자의 크기는 열전도도의 중요한 영향을 주기 때문에 나노입자의 크기에 따라 평판형 태양열 집열기와 U-tube형 태양열 집열기의 효율에 대한 분석을 진행하였다. 모든 운전조건에서 나노입자의 크기가 가장 작은 20 nm로 제작된 나노유체를 사용하였을 때 가장 높은 집열기 효율을 나타냈다. 나노입자의 크기가 20 nm인 나노유체의 최대 효율은 평판형 태양열 집열기에서는 73.54%로 가장 낮은 효율을 보였던 100 nm의 효율에 비해 3.8% 높은 결과를 보였다. U-tube형 태양열 집열기에서의 최대 효율은 72.4%로 50 nm와 100 nm을 사용한 집열기의 효율보다 각각 3.05%와 5.32% 향상됨을 보였다. 즉, 입자의 크기가 상대적으로 작은 나노유체는 열전도도가 우수하여 더 빠른 열전도를 발생시켜 태양열 집열기의 효율에 주요한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 또한 20 nm, 50 nm, 100 nm인 각각의 나노유체를 작동유체로 사용한 태양열 집열기의 최대효율은 물을 작동유체로 사용한 태양열 집열기의 최대 효율보다 각각 24.1%, 20.4%, 17.8% 향상됨을 확인할 수 있다.

Table 6.4에 세 가지 나노입자의 크기에 따른 특성 매개 변수의 값을 제시하였다. 평판형 집열기의 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 나노입자의 크기가 20 nm일 때 최대값 0.747을 나타내었고 이때 열손실계수 $F_R U_L$값은 21.31을 나타내었다. 50 nm와 100 nm의 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.718, 0.698로 나타났으며 $F_R U_L$값은 22.38, 21.87로 나타났다. U-tube형 태양열 집열기도 마찬가지로 $F_R(\tau\alpha)$값은 나노입자의 크기가 20 nm일 때 0.733으로 최대값을 보였고 $F_R U_L$값은 17.69를 나타내었다. 50 nm와 100 nm의 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.709, 0.688로 나타났으며 $F_R U_L$값은 17.16, 16.49로 나타났다. 열획득계수는 평판형 집열기가 약간 높았지만 열손실계수는 U-tube형 집열기가 좋은 결과를 나타냈다. 이는 모든 실험조건의 나노입자의 크기에서 U-tube형 집열기가 평판형 집열기보다 열손실이 적게 발생함을 확인하는 결과이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

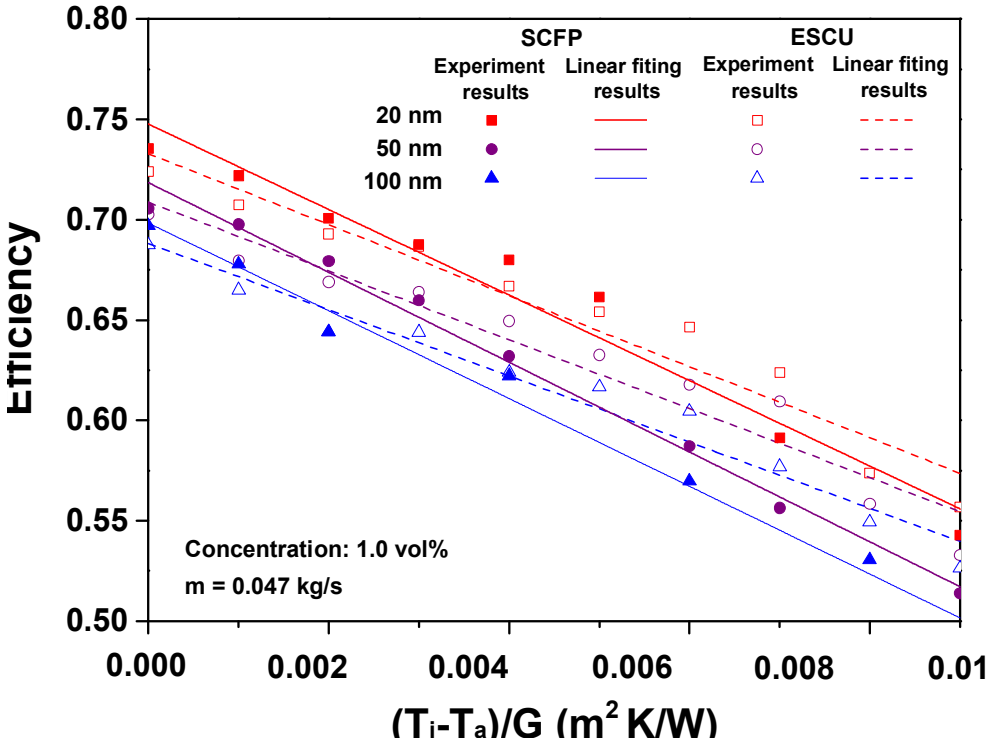


Fig. 6.48 Variation of efficiency in the flat plate solar collector and U-tube solar collector for different nanoparticle sizes(concentration: 1.0 vol%, mass flow rate: 0.047 kg/s)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 6.49는 나노입자의 크기가 20 nm이고 나노유체의 농도가 1.0 vol%인 Al_2O_3 나노유체의 유량조건에 따른 평판형과 U-tube형 태양열 집열기의 순간적인 효율 변화를 보여주는 그림이다. 평판형 집열기의 순간적인 효율은 작동유체의 유량이 0.047 kg/s에서 73.54%로 최대값을 나타내었고 이때 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.747, 열손실계수 $F_R U_L$값은 21.31을 나타내었다. 반면 유량이 0.033 kg/s의 순간적인 효율은 72.78%로 유량이 0.047 kg/s보다 1.9% 감소하는 결과를 나타내었다. U-tube형 집열기의 순간적인 효율은 작동유체의 유량이 0.047 kg/s에서 72.4%로 최대값을 나타내었고 이때 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.733, 열손실계수 $F_R U_L$값은 17.69을 나타내었다. 반면 유량이 0.033 kg/s의 순간적인 효율은 69.9%로 유량이 0.047 kg/s보다 2.5% 감소하는 결과를 나타내었다. 집열기의 순간적인 효율은 작동유량이 0.047 kg/s에서 평판형과 U-tube형 집열기 모두 가장 높은 효율을 보였고 평판형 집열기가 U-tube형 집열기에 비해서 1.14% 더 높은 효율을 나타내었다.

태양열 집열기의 효율은 작동유체의 유량이 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 증가함에 따라 증가한다. 이는 효율의 정의인 식 (5-1)을 기초로 하여, 상대적으로 높은 유량은 효율을 향상시킨다. 0.033 kg/s 유량에서는 집열기에서 유체가 머무는 시간이 상대적으로 길어 입출구 온도차는 증가하였고, 이러한 입출구 온도차의 증가는 더 많은 열손실을 일으켜 낮은 효율을 보였다. 하지만 0.047 kg/s 유량에서는 집열기에서 유체가 머무는 시간이 짧아져 에너지 흡수량이 감소되어 태양열 집열기의 입출구 온도차는 감소하나 열손실은 0.033 kg/s보다 작아 결과적으로 집열기의 효율이 향상된다. 따라서 태양열 집열기의 효율은 유량과 집열기의 입출구 온도차에 의해 결정된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

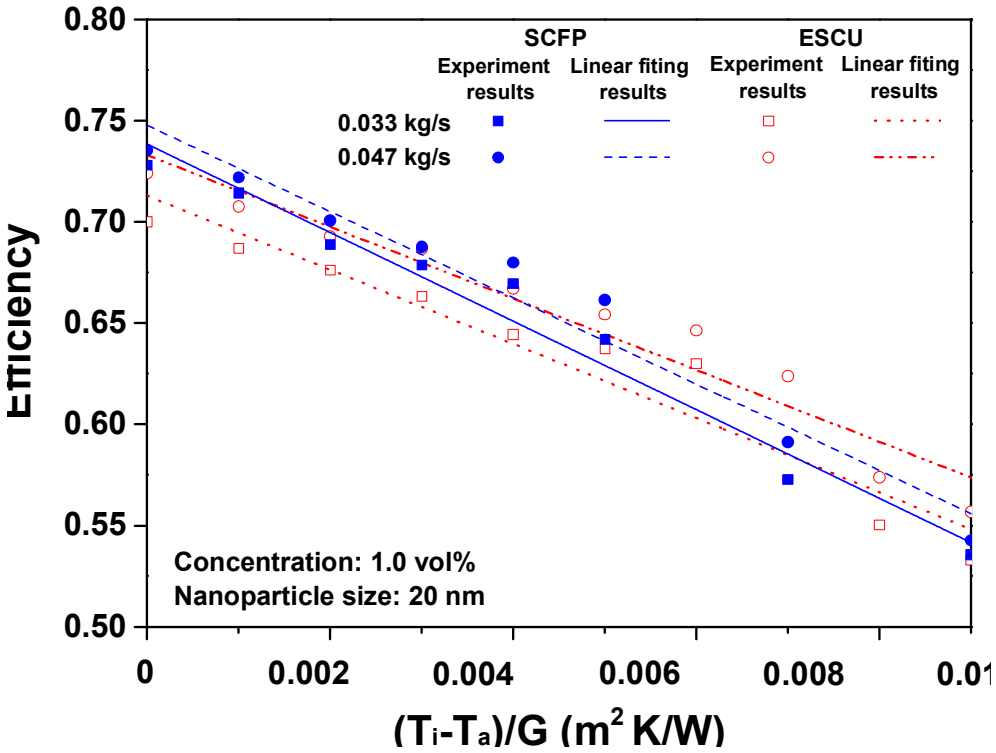


Fig. 6.49 Variation of efficiency in the flat plate solar collector and U-tube solar collector for different mass flow rates(nanoparticle size: 20 nm, Concentration: 1.0 vol%)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5장에서 설명했듯이 태양열 집열기의 효율 특성은 구성 재료나 형태에 따라 많은 변수가 작용한다. 따라서 태양열 집열기의 집열 효율을 측정하기 위해서는 주로 열손실변수 $(T_i-T_a)/G$에 대한 집열기의 집열효율의 관계를 변수로 하여 평가한다.

Table 6.7은 평판형 태양열 집열기의 나노유체의 농도에 따른 효율의 향상에 관한 효과를 비교하기 위해 실험을 통해 얻은 결과를 특성 매개 변수를 갖는 선형방정식으로 계산하여 나타내었다. 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.774로 최대값을 보이고 이때 열손실계수 F_RU_L값은 20.309이다. 반면에 나노유체의 농도가 1.0 vol%에서는 F_RU_L값이 21.31이다. $F_R(\tau\alpha)$값은 클수록 F_RU_L값은 작을수록 집열성능이 우수하다. 즉, 나노유체의 농도가 0.5 vol%와 1.0 vol%일 때 열에너지 전달 및 흡수력이 감소하며 외부로의 열손실이 더 생긴다는 것을 간접적으로 확인하였고 물을 사용한 경우 $F_R(\tau\alpha)$값은 가장 작게 나타났으며 F_RU_L는 가장 크게 나타났다. 그러므로 일반유체인 물을 적용한 집열기보다 나노유체를 적용한 태양열 집열기가 작동유체로서 열적성능이 우수함을 알 수 있다.

Table 6.8은 나노입자의 크기(20 nm, 50 nm, 100 nm)에 따른 효율과 관련된 특성 매개변수의 값을 나타내었다. 20 nm의 크기를 갖는 나노유체의 경우 $F_R(\tau\alpha)$값은 7.32로 가장 높은 값을 보였으며 100 nm의 입자크기를 갖는 나노유체가 0.688로 가장 낮은 값을 보였다. 하지만 F_RU_L값은 나노입자의 크기가 20 nm일 때 17.69이였고, 100 nm의 나노입자의 크기에서는 16.49를 나타내었다. 이는 집열기의 입구온도와 외기온도의 차이가 작을 때 입자크기가 20 nm인 나노유체를 적용한 집열기의 효율과 100 nm 나노유체를 적용한 집열기의 효율차가 가장 크다. 하지만 집열기 입구온도와 외기온도의 온도차가 클수록 열손실이 커져 입자크기가 20 nm 나노유체를 적용한 집열기의 효율과 100 nm를 적용한 나노유체의 집열기 효율의 차이가 조금씩 감소한다는 것을 의미한다.

Table 6.9는 나노유체의 질량유량에 따른 특성 매개변수의 값을 제시하였다. $F_R(\tau\alpha)$값은 나노유체의 질량유량이 0.047 kg/s에서 0.747로 최대값을 보였으며 F_RU_L값은 21.31을 나타내었다. 반면에 질량유량이 0.033 kg/s인 경우에 $F_R(\tau\alpha)$은 0.738이고 F_RU_L는 21.87을 나타냈다. 따라서 평판형 태양열 집열기의 효율은 작동유체의 질량유량이 증가함에 따라 증가함을 확인할 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 6.7 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for Al_2O_3 nano fluid and water

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 0.5 vol%)	0.719	20.351	0.958
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0 vol%)	0.747	21.31	0.956
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.5 vol%)	0.774	20.309	0.987
Water	0.615	20.660	0.96

Table 6.8 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector according to nano particle size

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0 vol%)	0.732	17.69	0.937
Al_2O_3 nanofluid (50 nm, 1.0 vol%)	0.708	17.16	0.928
Al_2O_3 nanofluid (100 nm, 1.0 vol%)	0.688	16.49	0.961

Table 6.9 Parameters of efficiency in the flat plate solar collector for different mass flow rates(nanoparticle size: 20 nm, concentration: 1.0 vol%)

Mass flow rate (kg/s)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
0.033	0.738	21.87	0.967
0.047	0.747	21.31	0.956

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

U-tube형 태양열 집열기에 다양한 나노유체의 농도에 따른 효율의 향상에 관한 효과를 비교하기 위해 실험을 통해 얻은 결과를 특성 매개 변수를 갖는 선형방정식으로 Table 6.10과 같이 나타낼 수 있다. 열획득계수 $F_R(\tau\alpha)$값은 나노유체의 농도가 1.0 vol%에서 최대값을 보이고 이때 열손실계수 F_RU_L값은 17.69이다. 반면에 나노유체의 농도가 1.5 vol% 에서는 F_RU_L값은 18.051이다. $F_R(\tau\alpha)$값은 클수록 F_RU_L값은 작을수록 집열 성능이 우수하다. 즉, 나노유체의 농도가 1.5 vol%일 때 열에너지 전달 및 흡수력이 감소하며 외부로의 열손실이 더 생긴다는 것을 간접적으로 확인하였고 물을 사용한 경우 $F_R(\tau\alpha)$값이 가장 작게 나타났으며 F_RU_L값은 가장 크게 나타났다. 그러므로 일반유체인 물을 적용한 집열기보다 나노유체를 적용한 태양열 집열기가 작동유체로서 열적성능이 우수함을 알 수 있다.

Table 6.11은 세 가지 나노입자의 크기에 따른 효율과 관련된 특성 매개변수의 값을 나타내었다. 20 nm의 크기를 갖는 나노유체의 경우 $F_R(\tau\alpha)$값이 7.33으로 가장 높은 값을 보였으며 100 nm의 입자크기를 갖는 나노유체가 0.688로 가장 낮은 값을 보였다. 하지만 F_RU_L값은 나노입자의 크기가 20 nm일 때 17.698이였고, 100 nm의 나노입자의 크기에서는 16.496를 나타내었다. 이는 집열기의 입구온도와 외기온도의 차이가 작을 때 입자크기가 20 nm인 나노유체를 적용한 집열기의 효율과 100 nm 나노유체를 적용한 집열기의 효율차가 가장 크다. 하지만 집열기 입구온도와 외기온도의 온도차가 클수록 열손실이 커져 입자크기가 20 nm 나노유체를 적용한 집열기의 효율과 100 nm를 적용한 나노유체의 집열기 효율의 차이가 조금씩 감소한다는 것을 의미한다.

Table 6.12는 나노유체의 질량유량에 따른 특성 매개변수의 값을 제시하였다. $F_R(\tau\alpha)$값은 나노유체의 질량유량이 0.047 kg/s에서 0.733으로 최대값을 보였으며 F_RU_L값은 17.698이다. 반면에 질량유량이 0.033 kg/s인 경우에 $F_R(\tau\alpha)$값은 0.713이고 F_RU_L값은 18.312를 나타냈다. 따라서 태양열 집열기의 효율은 작동유체의 질량유량의 증감에 따라 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있었다. 본 실험값에서는 작동유체의 질량유량이 증가함에 따라 집열기의 효율특성이 증가함을 나타냈다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 6.10 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for Al_2O_3 nano fluid and water

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 0.5 vol%)	0.684	18.67	0.889
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0 vol%)	0.733	17.69	0.938
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.5 vol%)	0.698	18.05	0.863
Water	0.617	20.38	0.884

Table 6.11 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector according to nano particle size

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Al_2O_3 nanofluid (20 nm, 1.0 vol%)	0.733	17.698	0.938
Al_2O_3 nanofluid (50 nm, 1.0 vol%)	0.709	17.165	0.929
Al_2O_3 nanofluid (100 nm, 1.0 vol%)	0.688	16.496	0.961

Table 6.12 Parameters of efficiency in the U-tube solar collector for different mass flow rates(nanoparticle size: 20 nm, concentration: 1.0 vol%)

Mass flow rate (kg/s)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
0.033	0.713	18.31	0.926
0.047	0.733	17.69	0.938

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 7장 결 론

본 연구에서는 산화알루미나(Al_2O_3)의 나노입자 크기와 Al_2O_3 나노유체의 농도에 따라 평판형, U-tube형, 그리고 히트파이프 집열기의 성능을 해석적으로 비교 분석하였으며 실험을 통하여 기존 평판형 태양열 집열기와 U-tube형 태양열 집열기의 성능을 고찰하였다. 실험 시 두 가지 형태의 태양열 집열기에 사용된 열매체 유속은 0.033 kg/s와 0.047 kg/s로 고정시켰으며 나노유체의 농도를 0.5 vol%, 1.0 vol%, 1.5 vol%로 변화시켜 가면서 성능특성을 실험적으로 고찰하였다. 평판형 태양열 집열기의 면적은 2 m^2 이고 U-tube형 태양열 집열기의 면적은 2.37 m^2이며, 오전 10:00부터 오후 17:00까지 실험을 수행하였다. 또한 태양열 집열기 시스템에 작동유체를 Al_2O_3 나노유체를 사용하였을 때의 성능 향상 정도를 분석하기 위해 나노입자 크기와 농도가 서로 다른 조건에서 실험을 수행하였으며 평균적인 데이터를 분석하였다.

평판형 태양열 집열기의 모델링 해석결과 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 가장 높은 효율을 보였고 열손실이 없는 x축계수가 0인 경우 최대 효율이 65.7%로 나타났다. 그리고 1.0 vol%와 0.5 vol%에서는 각각 65.2%, 63.8%로 나타났다. 실험결과, 나노유체를 적용하여 가장 높은 효율을 보였던 1.5 vol%의 경우 평판형 집열기의 효율은 77.4%로 나타났고 1.0 vol%와 0.5 vol%에 비해 3.9%, 6.9% 향상된 결과를 보였다. 해석결과와 비교하였을 때 효율의 최대 차이는 약 11.6%의 상승된 결과를 보였다. 기본유체인 물을 사용한 경우 나노유체를 적용한 효율의 차이는 최대 17.3%였다. 해석결과는 실험결과와 마찬가지로 1.5 vol%의 농도에서 기본유체인 물과 비교한 결과 12.4%의 차이를 보였다.

U-tube형 태양열 집열기의 모델링 해석결과 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 가장 높은 효율을 보였고 열손실이 없는 x축계수가 0인 경우 최대 효율이 56.1%로 나타났다. 그리고 1.0 vol%와 0.5 vol%에서는 각각 55.9%, 55.4%로 나타났다. 물을 사용하였을 경우 해석결과 최대 효율은 53.3%를 나타내었다. 하지만 실험결과, 나노유체의 농도가 1.0 vol%에서 가장 높은 효율을 보였다. 열손실이 없는 경우 U-tube형 집열기의 최대 효율이 72.4%로 나타났다. 그리고 1.5 vol%와 0.5 vol%에

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

서는 각각 67.8%, 65.9%로 나타났다. 해석결과와 실험결과를 비교한 결과 평균적으로 약 12.8%의 차이를 보였다.

히트파이프형 태양열 집열기의 모델링 해석결과 나노유체를 적용했을 경우 1.5 vol%에서 76.5%로 가장 좋은 효율을 나타내었고 평균값은 63.4%이였다. 기본유체인 물과 비교한 결과 약 2.1% 향상된 결과를 예측하였다. 모델링 결과 열손실계수(F_RU_L)는 히트파이프형이 가장 크고 다음으로 평판형, U-tube형 집열기 순으로 나타났다. 집열기의 성능은 평판형 집열기와 동일하게 표시되는데 히트파이프형 태양열 집열기가 집열온도가 제일 높지만 열손실에 대한 기울기(F_RU_L값)가 가장 커서 열손실율이 가장 높음을 알 수 있다. 뿐만 아니라 순간 효율을 나타내는 열획득계수($F_R(\tau\alpha)$)는 히트파이프형이 가장 크게 나타났다. 히트파이프형 집열기는 평판형이나 U-tube형 집열기에 비해 고온에 사용되는 집열기이기 때문에 높은 온도를 발생하기 위해서는 열획득계수가 크게 나타났다.

실험결과, 평판형 태양열 집열기의 열획득계수는 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 최대값인 0.774를 나타내었고 이때 열손실계수는 20.31로 나타났다. 또한 U-tube형 태양열 집열기의 열획득계수는 나노유체의 농도가 1.0 vol%에서 0.733으로 최대값을 보였고 열손실계수는 17.69를 나타냈다. 기울기를 나타내는 F_RU_L값이 크다는 것은 열손실율이 높다는 것을 의미하는데 평판형 집열기의 해석결과는 열손실계수 F_RU_L값이 평균 5.90을 나타내고 실험결과는 평균 약 20.32를 나타내었다. U-tube형 집열기의 해석결과는 열손실계수 F_RU_L값이 평균 4.83을 나타내고 실험결과는 평균 약 18.05를 나타내었다. 이는 실험값이 해석값에 비해 열손실이 많았다는 것을 의미한다.

평판형 태양열 집열기의 해석결과와 실험결과 모두 나노유체를 적용하였을 때 물을 사용한 결과 값보다 열획득계수가 크게 나타났으며, 물을 적용한 집열기보다 나노유체를 적용한 태양열 집열기가 열적성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 해석결과에서 평판평 태양열 집열기와 U-tube형 집열기 모두 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 가장 좋은 성능을 나타내었다. 하지만 실험결과 평판형 집열기는 나노유체의 농도가 1.5 vol%에서 가장 좋은 성능을 나타내었고, U-tube형 집열기는 1.0 vol%에서 가장 좋은 성능을 나타내었다.

해석 값과 실험값을 비교한 결과 U-tube형 태양열 집열기에 비해 평판형 태양열

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

집열기가 더 좋은 성능을 나타냄을 확인하였다. 평판형 태양열 집열기와 U-tube형 태양열 집열기에 Al_2O_3 나노유체와 물에 대한 각각의 효율을 비교한 결과 나노유체를 적용하였을 때 기본유체인 물을 적용하였을 때보다 효율이 크게 향상됨을 확인하였다. 이러한 결과로부터 나노입자를 이용한 태양열 집열기의 적용은 태양열 집열기를 이용한 시스템 성능에 큰 영향을 미치는 요인으로 집열기의 성능을 향상시킬 수 있으며 이는 집열기의 작동유체로 나노유체를 사용한 경우 시스템의 효율도 향상됨을 의미한다. 따라서 태양열 집열기 시스템에서 작동유체로 이성분 나노유체를 사용한다면 시스템의 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

전 세계적인 추세를 가만하여 볼 때 태양에너지 사용의 증가로 인하여 화석연료의 사용의 저감과 탄소에너지 저감이 기대되며 태양 에너지의 고효율화를 위한 다양한 태양열 집열기 개발이 기대된다. 또한, 태양열 집열기의 작동유체를 다양한 나노유체로 적용함으로써 신재생에너지 분야 이외에도 건축 등 다양한 분야까지 넓어질 것으로 기대된다. 신재생에너지와 에너지 효율에 대한 문제들의 관심이 높아지고 있는 가운데 나노유체를 적용하여 태양열 집열기의 성능 향상정도를 고찰하고 개발된 해석 모델을 검증하기 위해 실험을 통한 연구는 추후 고효율 태양열 집열기의 개발에 필요한 기초데이터를 제공하고 시스템의 최적설계에 이바지할 것이라 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

REFERENCES

J. A. Duffie, W. A. Beckman, Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons, 2013.

S. Klein, Calculation of flat-plate collector loss coefficients, Sol Energy. 17 (1975) 79-80.

Y. Cengel, Heat transfer; a practical approach. Columbus, OH, McGraw Hill, 2003.

P. D. Dunn, D. A. Reay, Heat Pipe, third ed., Pergamon Press, New York, 1982.

E. Azad, Theoretical and experimental investigation of heat pipe solar collector, Experimental Thermal and Fluid Science. 32 (2008) 1666-1672.

H. C. Dunn, P. W. Hottel, A. Willier, Evaluation of flat plate solar collector performance. Solar Energy. 2 (1955) 74-104.

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

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

K. Khanafer, K. Vafai, A critical synthesis of thermophysical characterisitcs of

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

nanofluids and surface modification. J. Heat Mass Transfer. 54 (2011) 4410-4428.

M. Corcione, Heat transfer features of buoyancy-driven nanofluids inside rectangular enclusurs differentially heated at the sidewalls, Int. J. Therm. Sci. 49 (2010) 1536-1546.

H. Wang, Y. J. Yang, Study on Performance Evaluation and Thermal Efficiency of Solar Collector, KSMPE. (2014) 132.

J. H. Lee, S. H. Lee, C. J. Choi, S. P. Jang, S. U. S. Choi, A Review of Thermal Conductivity Data, Mechanisms and Models for Nanofluids, Int. J. Micro-Nano Scale Transport. 1 (2010) 269-322.

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.

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

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

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(2010) 33-102.

U. S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Development and Applications of Non-Newtonian Flows, ed. by Singer, D. A. and Wang, H.P., ASME New York, FFD-Vol. 231, MD-Vol. 66. (1995) 474-480.

X. Wang, X. Xu, S. U. S. Choi, Thermal conductivity of nanoparticle - fluid mixture, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 4 (13) (1999) 474-480.

D. Wen, Y. Ding, Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, International Journal of Heat and Mass Transfer. 24 (47) (2004) 51-81.

S. Zeinali Heris, M. Nasr Esfahany, S.Gh. Etemad, Experimental investigation of convective heat transfer of Al_2O_3/water nanofluid in circular tube, International Journal of Heat and Fluid Flow. (2006).

K. I. Kang, An Experimental Study on Heat and Mass Transfer Inhancement for Binary Nanofluids(H_2O/LiBr+Nanoparticles). M. D. Thesis. (2008).

D. E. Kim, A Study on Performance Characteristics of the Solar Heating system by Using Heat Pipe. M. D. Thesis. (2010).

Y. Kim, T. B. Seo, E. Y. Choi, H. D. Kang, Thermal Performance Comparisons of Glass Evacuated Solar Collectors Using Different Absorbing Tubes, The Korean Solar Energy Society. 5 (2004) 79-84.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Y. H. Kang, The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, 33 (10) (2004) 34-44.

H. J. Joo, H. Y. Kwak, J. B. Kim, Thermal Performance Study of Heat Pipe for Evacuated Tubular Solar Collector, The Korean Solar Energy Society. (2007) 16-22.

S. J. Oh, A Study on the Development of Non-glass Solar Vacuum Tube Collector. M. D. Thesis. (2008).

T. B. Seo, H. D. Kang, Y. Kim, Absorbing Rate of Solar Irradiation on Glass Evacuated Tube Collectors Depending on the Absorbing Tube Shape, SOLAR ENERGY. 25 (1) (2005) 35-44.

E. Y. Choi, Y. Kim, T. B. Seo, Effects of Absorber Tube Shape and Operating Conditions on Thermal Performance of All-Glass Evacuated Tube Solar Collectors, SOLAR ENERGY 25 (1) (2005) 19-25.

T. P. Otanicar, P. E. Phelan, R. S. Prasher, G. Rosengarten and R. A. Taylor, Nanofluid-based direct absorption solar collector, J. Renew. Sust. Energy. 2 (2010) 33-102.

T. Yousefi, E. Shojaeizadeh, F. Veysi, S. Zinadini, An experimental investigation on the effect of pH variation of MWCNT - H_2O nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector, Sol. Energy. 86 (2012) 771-779.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

T. Yousefi, F. Veisy, E. Shojaeizadeh, S. Zinadini, An experimental investigation on the effect of MWCNT-H2O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors, Exp. Thermal Fluid Sci. 39 (2012) 207-212.

A. J. Moghadam, M. Farzane-Gord, M. Sajadi, M. Hoseyn-Zadeh, Effects of CuO/water nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector, Exp. Thermal Fluid Sci. 58 (2014) 9-14.

S. Polvongsri, T. Kiatsiriroat, Enhancement of Flat Plate Solar Collector Thermal Performance with Silver Nano-fluid, The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering, 10 (2011) 19-21.

M. Faizal, R. Saidur, S. Mekhilef, A. Hepbasli, I. M. Mahbubul, Energy, economic, and environmental analysis of a flat-plate solar collector operated with SiO_2 nanofluid, Clean Techn. Environ. Policy 17 (2015) 1457-1473.

M. K. Ji, Y. H. Lee, J. H. Shin, H. M. Jeong, H. S. Chung, Study on the Performance of Evacuated Glass Tubes Solar collector with Heat Pipe, The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea. 6 (2002) 58-63.

E. Y. Choi, Y. Kim, T. B. Seo, Effects of Absorber Tube Shape and Operating Conditions on Thermal Performance of All-Glass Evacuated Tube Solar Collectors, The Korean Solar Energy Society. 3 (2005) 19-25.

J. H. Hyun, W. G. Chun, A Comparative Analysis on the Thermal Performance

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

of Solar Vacuum Collector Tubes, The Korean Solar Energy Society. 9 (2003) 15-22.

T. P. Otanica, P. E. Phelan, R. S. Prasher, G. Rosengarten, R. A, Taylor, Nanofluid-Based Direct Absorption Solar Collector, J. Renewable Sustainable Energy. 2 (2010) 33-102.

J. E. Minardi, H. N. Chuang, Performance of a 'Black' Liquid Flat-plate Solar Collector, Sol. Energy. 17 (1975) 179-183.

R. Bertocchi, J. Karni, A. Kribus, Experimental Evaluation of a Non-isothermal High Temperature Solar Particle Receiver, Energy. 29 (2004) 687-700.

E. Sani, S. Barison, C. Pagura, L. Mercatelli, P. Sansoni, D. Fontani, D. Jafrancesco, F. Francini, Carbon Nanohorn-based Nanofluids as Direct Sunlight Absorbers," Opt. Express. 18 (2010) 5179-5187.

S. H. Lee, S. P. Jang, Study on Efficiency of flat-plate Solar Collector Using Nanofluids, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B. 37 (9) (2013) 799-805.

J. S. Kim, Y. H. Kang, J. G. Kim, Economic Assessment of Solar Thermal Power System, The Korean Solar Energy Society. 11 (2008) 25-29.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Recommendation for future work

태양열 집열기에 나노유체를 적용한 연구는 꾸준히 지속되고 있지만 상용화까지는 에너지 절약의 측면뿐만 아니라 산업 현장에서의 경제적, 환경적인 문제를 야기하므로 상당히 중요하고 가치가 있다고 사료되며 이를 모델링을 하고 성능실험을 통하여 에너지 절약적인 측면을 규명하였으나 경향성은 실험값과 상당한 차이를 보여 이에 대한 추가적인 연구가 필요함을 알 수 있었다. 다음과 같은 것들이 충분히 보완된다고 볼 때 다양한 나노유체를 적용한 태양열 집열기 시스템은 향후 에너지 절약에 크게 기여하리라 판단된다.

1. 다양한 나노유체를 적용한 집열기 특성 연구

Al_2O_3 이외의 MWCNT, Cu, Au, Fe, Ag, TiO_2, CuO, SiC, ZnO, Graphite 등의 다양한 나노유체를 적용하여 각각의 나노유체별 성능특성에 대한 연구가 필요하다. 태양열 집열기 시스템에 활용될 수 있는 유동성이 매우 뛰어난 나노유체 개발을 통하여 태양열 집열기의 성능향상을 기대할 수 있다.

2. 나노유체의 성능특성을 이용한 집접 흡수식 태양열 집열기의 성능 특성 연구

다른 형태의 집열기인 직접 흡수식 태양열 집열기(Direct Absorption Solar Collector) 등 새로운 형태의 집열기 개발을 통하여 가성비가 좋고 경제적인 열교환 매체 개발과 높은 흡수율을 가지는 집열기를 개발하고 나노유체를 적용하였을 경우 집열기의 수명과 성능에 손상을 적은 집열기에 대한 연구를 통하여 태양에너지 산업 분야의 활성화에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

3. 경제성 분석을 통한 에너지 저감율 연구

일반적으로 석탄이 1 kg이 완전히 연소할 때 29,306 kJ의 에너지가 발생한다. 석탄이 연소하는 과정 동안에 CO_2와 SiO_2등 여러 종류의 온실가스가 대기로 방출되며 대기로 방출된 가스는 지구 온난화에 큰 영향을 미친다. 하지만 태양열 집열기를 설치

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

함으로써 절약된 에너지만큼 석탄 사용량을 줄일 수 있어 온실가스의 발생을 절감할 수 있다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과를 Al_2O_3 나노유체를 적용한 태양열 집열기를 사용하였을 때 절감되는 석탄 사용량과 그에 따른 CO_2와 SiO_2 발생 감소량의 분석에 대한 연구가 추가로 필요할 것으로 판단되며, 이를 1년의 전체 사용량으로 변환하여 전 세계에서의 전기요금 감소율에 대한 연구의 진행이 추후 필요할 것으로 기대된다.

Collection @ chosun