



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](#)

2019년 2월
석사학위 논문

MWCNT와 Fe_3O_4 이성분 나노유체 적용 태양열 집열기의 성능 분석

조선대학교 대학원

기계공학과

강우빈

MWCNT와 Fe_3O_4 이성분 나노유체 적용 태양열 집열기의 성능 분석

Performance analysis of solar collector using MWCNT and
 Fe_3O_4 binary nanofluid

2019년 02월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

강우빈

MWCNT와 Fe_3O_4 이성분 나노유체 적용 태양열 집열기의 성능 분석

지도교수 : 조 홍 현

이 논문을 공학석사 학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

강 우 빈

강우빈의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 오 동 욱 (인)

위 원 조선대학교 교수 박 정 수 (인)

위 원 조선대학교 교수 조 흥 현 (인)

2018년 11월

조선대학교 대학원

Contents

Contents	v
Nomenclatures	ix
List of Figures	xi
List of Tables	xiii
Abstract	xv
제 1 장 서론	1
제1절 연구 배경	1
제2절 기존 연구	3
제3절 연구 목적	9
제 2 장 태양열 시스템 및 집열기	10
제1절 태양열 시스템	10
제2절 평판형 태양열 집열기	12
제3절 진공관형 태양열 집열기	14
제 3 장 실험장치 및 방법	16
제1절 실험 장치	16

1. 온도 측정	18
2. 일사량 측정	19
3. 유량 측정	20
4. 축열탱크	21
5. 데이터 수집장치	22
제2절 나노유체 제작	23
1. 나노유체 제조 방법	23
2. MWCNT 나노유체	25
3. Fe ₃ O ₄ 나노유체	27
4. MWCNT-Fe ₃ O ₄ 이성분 나노유체	29
제3절 실험방법 및 효율 계산	30
1. 실험방법 및 조건	30
2. 태양열 집열기의 효율 및 불확실도 계산	33

제 4 장 태양열 집열기의 성능 실험 결과 및 고찰

36

제1절 MWCNT 나노유체 적용 태양열 집열기의 성능 실험 결과	36
1. MWCNT 나노유체 농도 변화에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰	36

2. MWCNT 나노입자 크기에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰	41
3. MWCNT 나노유체 질량유량 변화에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰	45
제2절 Fe ₃ O ₄ 나노유체 적용 태양열 집열기의 성능 실험 결과	49
1. Fe ₃ O ₄ 나노유체 농도 변화에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰	49
2. Fe ₃ O ₄ 나노유체 질량유량 변화에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰	53
제3절 MWCNT-Fe ₃ O ₄ 이성분 나노유체 적용 태양열 집열기의 성능 실험 결과	57
1. MWCNT-Fe ₃ O ₄ 이성분 나노유체 농도 변화에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰	57
2. MWCNT-Fe ₃ O ₄ 이성분 나노유체 질량유량 변화에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰	61
3. MWCNT와 Fe ₃ O ₄ 나노유체, MWCNT-Fe ₃ O ₄ 이성분 나노유체 적용에 따른 태양열 집열기의 성능 비교 분석	65

제 5 장 다양한 나노유체 적용 태양열 집열기의 운전변수에 따른 성능 민감도 고찰	71
제1절 다양한 나노유체를 적용한 태양열 집열기의 운전변수 변화에 따른 성능 민감도 고찰	71
제 6 장 결 론	80
References	83

Nomenclatures

A_c	: surface area of solar collector (m^2)
C	: conductance ($W/K \cdot m$)
c_p	: specific heat ($J/kg \cdot K$)
F_R	: heat removal factor (-)
G	: solar radiation (W/m^2)
MWCNT	: multi-walled carbon nanotube
m	: mass flow rate (kg/s)
Q_u	: useful heat gain (W)
T	: temperature (K)
U	: overall heat transfer coefficient (W/m^2K)

Greeks

η	: efficiency (-)
ε	: emissivity (-)
μ	: viscosity (-)
τ α	: transmission absorbance coefficient (-)
ϕ	: nanoparticles volume concentration (-)
ρ	: density (-)

Subscripts

a	: ambient (-)
bf	: base fluid (-)
i	: inlet (-)
l	: loss (-)
nf	: nanofluid (-)
np	: nanoparticle (-)

o : outlet (-)

u : useful (-)

List of Figures

Fig. 2.1 Schematics of the solar collector system	10
Fig. 2.2 Structure photograph of a flat plate solar collector	13
Fig. 2.3 Structure photograph of an evacuated tube solar collector	15
Fig. 3.1 Photograph of the solar collector	17
Fig. 3.2 Schematics of the solar collector system	17
Fig. 3.3 Photograph of T-type thermocouple	18
Fig. 3.4 Photograph of solar radiation meter	19
Fig. 3.5 Photograph of flow meter	20
Fig. 3.6 Photograph of the storage tank	21
Fig. 3.7 Photograph of data acquisition system	22
Fig. 3.8 Photograph of the Ultrasonic homogenizer	24
Fig. 3.9 TEM image of MWCNT nanoparticles (a) 20 nm, (b) 50 nm, (c) 80 nm	25
Fig. 3.10 Photograph of MWCNT nanofluid concentration	25
Fig. 3.11 TEM image of a Fe ₃ O ₄ nanoparticle (a) 30 nm	27
Fig. 3.12 Photograph of Fe ₃ O ₄ nanofluid concentration	27
Fig. 3.13 TEM image of a MWCNT-Fe ₃ O ₄ nanoparticle (MWCNT nanoparticle size: 20 nm, Fe ₃ O ₄ nanoparticle size: 30 nm)	29
Fig. 3.14 Photograph of MWCNT-Fe ₃ O ₄ binary nanofluid concentration	29
Fig. 4.1 Efficiency of the solar collector depending on the concentration of the MWCNT nanofluid (MWCNT nanoparticle size: 20 nm, $\dot{m}=0.047$ kg/s)	39
Fig. 4.2 Variation of thermal efficiency in the solar collector for various MWCNT nanoparticle sizes (Concentration: 0.005vol%, $\dot{m}=0.047$ kg/s)	43
Fig. 4.3 Variation of thermal efficiency in the solar collector as a function of mass flow rate of working fluid (MWCNT particle size: 20 nm, Concentration: 0.005vol%)	47
Fig. 4.4 Efficiency of solar collector depending on the concentration of the Fe ₃ O ₄ nanofluid concentration (Fe ₃ O ₄ nanoparticle size: 30 nm, $\dot{m}=0.047$ kg/s)	51
Fig. 4.5 Variation of thermal efficiency in the solar collector as a function of mass flow rate of working fluid (Fe ₃ O ₄ particle size: 30 nm, Concentraion: 0.015vol%)	55
Fig. 4.6 Efficiency of the solar collector depending on the concentration of the	

MWCNT-Fe ₃ O ₄ binary nanofluid and water ($\dot{m}=0.047$ kg/s)	59
Fig. 4.7 Variation of thermal efficiency in the solar collector as a function of mass flow rate of working fluid (MWCNT&Fe ₃ O ₄ particle size: 20 nm&30 nm, Concentraion: 0.005vol%&0.015vol%)	63
Fig. 4.8 Efficiency comparison for the flat plate solar collector using MWCNT, Fe ₃ O ₄ nanofluid and MWCNT-Fe ₃ O ₄ binary nanofluid	68
Fig. 4.9 Efficiency comparison for the evacuated tube solar collector using MWCNT, Fe ₃ O ₄ nanofluid and MWCNT-Fe ₃ O ₄ binary nanofluid	70
Fig. 5.1 Efficiency reduction ratio according to the deviation from optimal concentration	73
Fig. 5.2 Efficiency reduction ratio according to the deviation from optimal solar radiation	75
Fig. 5.3 Efficiency reduction ratio according to the deviation from optimal temperature parameter	77
Fig. 5.4 Efficiency improvement ratio according to the increase of mass flow rate in working fluid ($\dot{m}=0.047$ kg/s)	79

List of Tables

Table 2.1	Type of the solar collector according using temperature range	11
Table 3.1	Specification of T-type thermocouple	18
Table 3.2	Specification of solar radiation meter	19
Table 3.3	Specification of flow meter	20
Table 3.4	Specification of the storage tank	21
Table 3.5	Specification of data acquisition system	22
Table 3.6	Specification of the Ultrasonic homogenizer	24
Table 3.7	Specification of MWCNT nanoparticle	26
Table 3.8	Specification of a Fe_3O_4 nanoparticle	28
Table 3.9	Experimental conditions of solar collector system	31
Table 3.10	Specifications of the flat palte and evacuated tube solar collector	32
Table 4.1	Efficiency parameters in the flat plate solar collector using MWCNT nanofluid and water	40
Table 4.2	Efficiency parameters in the evacuated tube solar collector using MWCNT nanofluid and water	40
Table 4.3	Efficiency parameters in the flat plate solar collector according to MWCNT nanoparticle sizes	44
Table 4.4	Efficiency parameters in the evacuated tube solar collector according to MWCNT nanoparticle sizes	44
Table 4.5	Efficiency parameters in the flat plate solar collector for different mass flow rates (MWCNT nanoparticle size: 20 nm, Concentration: 0.005vol%)	48
Table 4.6	Efficiency parameters in the evacuated tube solar collector for different mass flow rates (MWCNT nanoparticle size: 20 nm, Concentration: 0.005vol%)	48
Table 4.7	Efficiency parameters in the flat plate solar collector using Fe_3O_4 nanofluid and water	52
Table 4.8	Efficiency parameters in the evacuated tube solar collector using Fe_3O_4 nanofluid and water	52
Table 4.9	Efficiency parameters in the flat plate solar collector for different mass flow rates (Fe_3O_4 particle size: 30 nm, Concentration: 0.015vol%)	56

Table 4.10 Efficiency parameters in the evacuated tube solar collector for different mass flow rates (Fe_3O_4 particle size: 30 nm, Concentration: 0.015vol%) 56

Table 4.11 Efficiency parameters in the flat plate solar collector using the MWCNT- Fe_3O_4 binary nanofluid and water 60

Table 4.12 Efficiency parameters in the evacuated tube solar collector using the MWCNT- Fe_3O_4 binary nanofluid and water 60

Table 4.13 Efficiency parameters in the flat plate solar collector for different mass flow rates (Case3: 0.005vol%-MWCNT & 0.015vol%- Fe_3O_4) 64

Table 4.14 Efficiency parameters in the evacuated tube solar collector for different mass flow rates (Case3: 0.005vol%-MWCNT & 0.015vol%- Fe_3O_4) 64

Abstract

Performance analysis of solar collector using MWCNT and Fe_3O_4 binary nanofluid

Woo-bin Kang

Advisor : Prof. Cho, Hong-hyun

Department of Mechanical Engineering,
Chosun University

In this paper, when the MWCNT, Fe_3O_4 , MWCNT- Fe_3O_4 binary nanofluids were applied into the flat plate and evacuated tube solar collectors as working fluid, the performance of solar collector was investigated experimentally. The experiment was conducted with a variation of the concentration of nanofluid, size of nanoparticle, and the mass flow rate of working fluid. In addition, Based on the performance of solar collector using MWCNT and Fe_3O_4 nanofluid, the MWCNT- Fe_3O_4 binary nanofluid was fabricated and its performance was analyzed with operating conditions.

When MWCNT nanofluid was used as a working fluid in flat plate and evacuated tube solar collector, the maximum efficiency was 87.5% at the mass flow rate of 0.047 kg/s. At this case, the MWCNT nanoparticle size and nanofluid concentration was 20 nm and 0.005vol%. In case of evacuated tube solar collector, the maximum efficiency was 75.6% when 20 nm-0.005 vol% MWCNT

nanofluid was used. When MWCNT nanofluid was applied into the flat plate and evacuated tube solar collector, the maximum efficiency was improved by 39.6% and 37.7%, respectively, compared to that when the water was used.

The maximum efficiency was 71.6% and 69.8% in the flat plate and evacuated tube solar collector, respectively, when the Fe_3O_4 nanofluid was used. At this case, the Fe_3O_4 nanoparticle size and nanofluid concentration was 30 nm and 0.015vol%. Besides, when 0.015vol% $\text{-Fe}_3\text{O}_4$ nanofluid was used in the flat plate and evacuated tube solar collector, it was confirmed that the maximum efficiency was improved by 14.2% and 27.1%, respectively, compared to that when the water was used.

MWCNT- Fe_3O_4 binary nanofluid was also used as a working fluid in flat plate and evacuated tube solar collector. When Case 3 (0.005vol%-MWCNT & 0.01vol% $\text{-Fe}_3\text{O}_4$) binary nanofluid was applied into the flat plate solar collector, the highest efficiency was 80.3% which was about 28.1% higher than that using water. When Case 3 (0.005vol%-MWCNT & 0.01vol% $\text{-Fe}_3\text{O}_4$) binary nanofluid was applied into the evacuated tube solar collector, the highest efficiency was 79.8% which was about 45.4% higher than that using water. Form the experimental result, the maximum efficiency using Case 3 (0.005vol%-MWCNT & 0.01vol% $\text{-Fe}_3\text{O}_4$) was higher than Case 4(0.005vol%-MWCNT & 0.015vol% $\text{-Fe}_3\text{O}_4$) which was made by mixing of optimum concentration for MWCNT and Fe_3O_4 nanofluid, respectively.

The performance sensitivity of flat plate and evacuated tube solar collector with operating parameters was analyzed when water, Al_2O_3 , CuO, MWCNT, Fe_3O_4 , and MWCNT- Fe_3O_4 binary nanofluid were used. The operating parameters used in the performance sensitivity analysis were the concentration of nanofluid, solar radiation, temperature parameter and mass flow rate of working fluid. When the MWCNT nanofluid was used in the flat plate and evacuated tube solar collector, the performance of solar collector was the most sensitive to the concentration of

nanofluid, solar radiation, temperature parameter and mass flow rate of working fluid. In order to overcome this problem, it was confirmed that the performance sensitivity of solar collector using MWCNT-Fe₃O₄ binary nanofluid was reduced with operating conditions. By using this study, it is possible to provide the optimal design data for the high efficiency solar collector according to the type of nanofluid.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

최근 많은 국가에서 산업의 개발과 활성화를 위하여 많은 양의 화석연료 사용으로 인하여 CO₂, SO₂ 등의 환경오염 물질의 배출이 이루어지고 이는 기후변화에 영향을 미쳐 지구온난화가 가속화되는 등 다양한 문제를 일으키고 있다. 이러한 무분별한 에너지 사용과 관련하여 2015년 타결된 파리 협약을 계기로 세계의 에너지 시장은 큰 변화를 맞이하고 있다. 주요 내용으로는 온실가스 배출량을 줄이고 에너지 효율성을 높이는 것이며 이는 모든 국가의 공통 관심사가 되었다. 이를 위해 각 나라에서는 신재생에너지의 활용 확대와 각종 에너지 기기의 효율 향상을 위해 많은 노력을 진행 중에 있다. 이러한 노력을 바탕으로 2017년 보고서 [1]에 따르면 세계적으로 2017년 에너지 수요량은 2.1% 증가하였으며 이는 2016년의 0.9%에 비해 크게 증가한 수치이다. 하지만 이산화탄소 배출량은 1.4%가 증가한 32.5 Gt를 나타냈는데 이는 에너지 수요량의 증가 대비 이산화탄소 배출량의 증가폭이 현저히 작아짐을 의미한다. 이처럼 에너지 수요 증가량에 비해 이산화탄소 배출량이 적어진 이유는 세계적으로 신재생에너지의 이용이 빠르게 확대되고 있다는 것을 나타낸다.

이에 따라 많은 국가에서 신재생에너지의 개발과 활용을 위한 다양한 노력을 기울이고 있다. 그중에서 태양에너지는 친환경적이며 전 세계적으로 고르게 분포하고 무한한 에너지를 가지고 있는 장점이 있다. 하지만 지금 사용되고 있는 에너지 기기에 직접 사용하기에는 에너지 밀도가 낮고 연속성이 보장된 안정된 에너지 공급이 어렵다는 단점이 존재한다. 특히, 열에너지를 많이 사용하는 계절인 겨울엔 태양에너지의 효율이 낮고, 태양에너지의 효율이 높은 여름엔 열에너지의 활용이 적어 효율적인 에너지 사용이 힘들다는 단점도 가지고 있다. 일반적으로 태양열 집열기는 건물에 난방 및 온수를 공급하는 역할을 하고 있기 때문에 태양열 집열기를 설치함으로써 화석연료를 사용한 건물의 에너지 소비를 줄일 수 있다. 또한 수영장 및 대단위

열을 필요로 하는 상업 및 산업단지에 적용이 가능하다.

태양열 에너지를 사용하는 가장 보편적인 방법은 태양열 집열기를 사용하는 방법이다. 태양열 집열기는 평판형, 진공관형, 집광형 집열기로 나누어지며 온도에 따라 저온용, 중온용, 고온용으로 나뉜다. 이 중 평판형과 진공관형 형태의 집열기가 전 세계적으로 가장 널리 사용되고 있다. 평판형 집열기는 주거용 온수와 공간 난방용으로 설치되는 가장 일반적인 집열기로 조립 및 설치 관리에 소요되는 비용이 저렴한 장점을 가지고 있다. 평판형 집열기는 유리 또는 플라스틱 덮개로 되어 있으며, 짙은색 흡수판으로 구성되어 있다. 진공관형 집열기는 진공을 이용하여 대류와 전도에 의한 열손실을 줄일 수 있어서 중온 및 고온 상태뿐만 아니라 추운 조건에서도 사용이 가능하다. 진공관형 태양열 집열기는 진공유리관을 사용하여 대류에 의한 열손실을 최소화 시켰다. 또한 경량이며 설치면적이 30%정도 절감되어 설치가 용이하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 태양열 집열기는 넓은 설치 면적과 비용이 필요하고 이에 따른 에너지 변환 효율이 좋지 않기 때문에 효율을 높이기 위해 많은 연구가 진행되고 있다.

이러한 문제를 극복하기 위한 방법으로는 주로 작동유체의 변경과 태양열 집열기의 구조변경에 따른 성능 향상에 대한 연구가 대부분 진행되었다. 이중 작동유체를 변경하는 방법은 일반적으로 열용량 및 열전달 성능이 우수한 유체를 태양열 집열기의 작동유체로 사용하는 것인데 최근에 기존의 일반 작동유체에 나노입자를 첨가하여 열전달 및 열흡수 성능을 향상시키는 방법이 활발히 연구되고 있다. 기존의 작동유체에 나노크기의 다양한 입자를 분산시킨 유체를 나노유체라고 하는데 나노유체는 나노입자의 크기가 1-100 nm인 금속 및 비금속 고체를 주로 분산시켜 사용한다. 하지만 태양열 집열기에 작동유체로 나노유체를 적용하였을 때 나노유체 종류에 따라 분산안정성의 한계와 최대효율을 보이는 농도가 나노유체별로 각각 다르다는 문제점을 가지고 있다. 이에 많은 연구자들에 의하여 다양한 나노유체의 분산안정성과 집열기의 적용 특성에 대한 연구가 진행되고 있다.

제 2 절 기존 연구

기존의 나노유체에 대한 연구를 살펴보면, Chiam et al. [2]은 Al_2O_3 나노유체의 농도와 온도 증가에 따른 열전도도와 점성의 변화에 대한 연구를 진행하였으며 농도가 증가할수록 열전도도와 점도는 증가하였고, 온도가 증가하였을 때에는 열전도도는 증가하였지만 점도는 감소함을 보였다. 또한 Al_2O_3 나노유체 최대 열전도도 향상은 1.0 vol% 40:60(W:EG)에서 12.8%로 나타났다. Sundar et al. [3]는 Al_2O_3 와 CuO 나노유체의 열전도도에 대한 실험을 진행하였으며, 두 가지 나노유체에서 농도와 온도가 증가할 때 열전도도가 증가함을 확인하였다. 또한 동일한 농도에서 CuO 나노유체에서 Al_2O_3 나노유체보다 열전도성이 더 우수한 것을 확인하였다. 이와 동시에 다양한 연구자들에 의하여 나노유체 열전도도에 관한 연구에서 온도와 농도가 증가함에 따라, 열전도도가 증가하는 것을 확인할 수 있다 [4, 5]. 그리고 MWCNT 와 Fe_3O_4 나노유체의 열전도도에 관한 연구를 진행한 결과 열전도도가 크게 향상되는 것을 확인하였다 [6, 7]. 따라서 나노유체를 활용하여 태양열 집열기의 효율을 향상시키는 방법에 대한 연구가 다수 진행되었다.

우선 평판형 태양열 집열기의 구조를 변경을 통하여 성능향상을 연구한 기존의 연구를 살펴보면, Jouybari et al. [8]은 SiO_2 /water 나노유체로 채워진 다공성 채널을 적용하였을 때 평판형 태양열 집열기의 성능을 실험적으로 평가하였는데 체적농도를 0.6% 증가함으로써 열효율이 6%~8% 정도 효율이 향상되었고 나노유체와 다공성 매체의 동시 사용으로 인하여 더 나은 성능을 보이는 것 확인하였다. Azad [9]는 다양한 수의 히트 파이프를 가진 평판형 태양열 집열기의 열 성능을 실험적으로 조사하였고 히트 파이프의 수를 늘림으로써 평판형 태양열 집열기의 효율을 높일 수 있고, 콘덴서 열 교환기의 면적을 줄이고 유체 흡수체 면적을 증가시킴으로써 유입에너지를 증가시킬 수 있음을 보였다. Jiandong et al. [10]은 평판형 태양열 집열기의 성능을 CFD를 이용하여 해석적으로 고찰하였으며 흡수체 플레이트 두께와 태양열 집열기의 튜브 직경을 증가시키면 평판형 태양열 집열기의 순간효율이 상승하는 것을 확인하였다. Saedodin et al. [11]은 충전된 평판형 태양열 집열기의 다공성 채널의 구리

금속 폼이 열성능 및 압력강하에 미치는 영향을 실험과 수치적으로 연구하였으며 다공성 매체를 사용할 때 흡수된 에너지 매개변수는 최대 18.5% 향상되었다. 또한 Gunjo et al. [12]은 새로운 튜브형 태양열 집열기를 사용하여 엑서지 및 에너지 분석을 실험과 해석을 진행하였으며 개발된 시뮬레이션 모델은 출구온도, 흡수관 온도, 에너지 효율 및 최대 열손실계수의 최대 오차를 9%로 예측하였고 제작된 튜브형 태양열 집열기는 열효율이 71%로 나타났다. Nikolić and Lukić [13]은 이중 노출된 평판형 태양열 집열기의 열성능을 실험과 해석적으로 연구를 진행하였으며 이중 노출된 평판형 태양열 집열기의 유용한 열이 평판형 태양열 집열기보다 41%~44% 높게 나타났다. Abuşka and Şevik et al. [14]는 알루미늄과 구리 기반의 평판형 태양열 집열기 및 V-groove 태양열 집열기에 대한 에너지, 엑서지, 경제성 분석을 진행하였으며 실험결과 평균 열효율은 평판형 태양열 집열기를 사용하였을 때보다 V-groove 태양열 집열기를 사용하였을 때 6% 향상됨을 보고하였다. 또한 평판형 태양열 집열기의 평균 엑서지 효율은 6%~12%로 나타났으며 연간 연료 소비 절감액은 59.4~76.1 \$/year 이고, 평균 회수 가치는 4.3~4.6년으로 보고하였다.

또한 평판형 태양열 집열기에 작동유체로 다양한 나노유체를 적용하여 성능 향상을 고찰한 많은 연구들이 진행되었다. Said et al. [15]은 평판형 태양열 집열기에 Al_2O_3 나노유체를 사용하였을 때 크기에 따른 열성능을 실험적으로 진행하였는데 0.1vol% 농도의 $Al_2O_3-H_2O$ (13 nm)를 사용하였을 때 열효율은 73.7%였으며, 0.1vol% 농도의 $Al_2O_3-H_2O$ (20 nm)를 사용하였을 때 열효율은 70.7%, 열역학 제 2법칙 효율은 20.3%로 나타났다. Noghrehabadi et al. [16]은 SiO_2 /water 나노유체를 평판형 집열기에 적용시킨 결과, 물을 작동유체로 사용한 평판형 태양열 집열기보다 효율이 약 3.8% 향상됨을 보고하였다. He et al. [17]은 Cu/water 나노유체를 평판형 태양열 집열기에 적용시켜 실험한 결과, Cu/water (Cu:25 nm, 0.1wt%)를 사용하였을 때 물을 사용하였을 때보다 23.8% 상승된 효율을 보였으며, 0.2wt%에서는 0.1wt%보다 낮은 효율을 보였다. 또한, Moghadam et al. [18]에서는 CuO 나노유체를 평판형 집열기에 작동유체로 적용하였으며 CuO 나노입자의 크기가 40 nm, CuO 나노유체의 농도가

0.4vol%일 때 물과 비교하였을 때 집열기의 효율이 16.7% 향상됨을 보였다. Kang et al. [19]은 Al_2O_3 나노입자의 크기와 농도를 다르게 하여 평판형 집열기와 U-tube형 집열기에 적용하여 성능을 비교 하였다. 나노유체의 농도가 증가할수록 성능이 향상을 확인하였는데 1.0vol%에서 가장 높은 성능을 가지는 것으로 확인되었다. 20 nm-0.1vol% Al_2O_3 나노유체를 사용한 평판형 집열기에서 $(T_1-T_2)/G=0$ 일 때 74.87%로 가장 높은 효율을 보였으며, U-tube 집열기에서도 72.4%로 가장 높은 효율을 보였다. 평판형 집열기의 경우 기본유체 물 대비 14.76% 효율이 향상되었고, U-tube 집열기의 경우 10.74% 향상됨을 확인하였다. Said et al. [20]는 TiO_2 나노유체를 평판형 집열기에 적용하였으며 작동유체의 질량유량이 0.5 kg/min이고 TiO_2 나노유체의 농도가 0.1vol%일 때 에너지와 엑서지의 효율은 물과 비교하였을 때 각각 76.6%와 16.9% 향상됨을 보였다. Yousefi et al. [21]는 MWCNT 나노유체의 pH변화에 따른 평판형 태양열 집열기의 효율을 조사하였으며 실험결과 pH가 가장 높은 9.5일 때 높은 효율을 보였으며 이는 물과 비교하였을 때 61.6% 향상된다고 보고하였다. Faizal et al. [22]에서는 평판형 집열기에 금속 산화물 나노유체를 작동유체로 적용하였을 때 에너지, 경제 및 환경을 분석을 하였으며 SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , CuO 나노유체를 비교하였을 때, CuO 나노유체를 사용할 때 가장 높은 열효율을 가졌다. 또한 금속 산화물 나노유체를 적용할 경우 태양열 집열기의 면적을 축소하여 제작할 수 있다고 보고하였다. Kiliç et al. [23]은 평판형 태양열 집열기에 TiO_2 나노유체를 적용하였는데 TiO_2 나노유체를 적용하였을 때 최대효율은 48.67%로 나타났으며 이는 물과 비교하였을 때 34.43% 향상됨을 보였는데 그 주요한 원인으로 TiO_2 의 비열이 상대적으로 크기 때문이라고 언급하였다. Mirzaei et al. [24]은 평판형 태양열 집열기의 최적의 작동유체로 Al_2O_3 나노유체를 적용하였는데 2 L/min 질량유량에서 Al_2O_3 나노유체를 사용하였을 때 물과 비교하여 효율이 23.6% 향상됨을 보고하였다. Michael and Iniyani [25]은 평판형 태양열 집열기에 CuO 나노유체를 적용하여 실험을 진행하였다. 그결과 0.05vol%-CuO 나노유체를 사용하였을 때 효율이 6.3% 향상되었다고 보고하였다. Sharafeldin and Gróf [26], Sharafeldin et al. [27]는 평판형 태양열 집열기에

CeO₂/water와 WO₃/water 나노유체를 적용하여 실험적으로 조사하였다. CeO₂/water와 WO₃/water 나노유체 모두 0.019 kg/s · m²의 질량유량에서 가장 높은 효율을 보였으며 CeO₂/water 나노유체의 최대효율은 0.0666vol%에서 70.13%로 나타났으며 WO₃/water 나노유체의 최대효율은 0.0666vol%에서 71.87%로 가장 높음을 확인하였다. Vincely and Natarajan [28]은 평판형 태양열 집열기에 작동유체인 산화 그래핀의 강제순환하에서 성능을 실험적으로 연구하였으며 질량유량이 0.0167 kg/s이고 GO 나노유체의 농도가 0.02vol%일때 최대 효율은 62.6%이며 물과 비교하였을 때 7.3% 향상됨을 보였다.

그리고 다양한 나노유체의 적용에 따른 비교 연구도 진행되었는데 Verma et al. [29, 30]은 SiO₂/water, TiO₂/water, Al₂O₃/water, MWCNT/water, graphene/water와 MgO/water 나노유체 농도와 질량유량 변화에 따른 평판형 태양열 집열기의 효율을 실험적으로 조사하였다. 그 결과 MgO/water 나노유체(0.75vol%, 1.5 l/m)를 사용하였을 때 물과 비교하여 열효율이 9.34% 증가되었고 MWCNT/water 나노유체를 사용하였을 때 물을 사용하였을 때보다 열효율이 29.32% 향상되었으며, 이는 나노유체들 중에서 가장 높은 것으로 보고하였다. Meibodi et al. [31]은 SiO₂/EG-water 나노유체를 사용하였을 때 평판형 태양열 집열기의 효율을 측정하기 위한 실험이 진행되었는데 SiO₂ 나노입자의 낮은 열전도도에도 불구하고 SiO₂/EG-water 나노유체를 적용하였을 때 효율이 향상하는 것을 확인하였다. Mahian et al. [32]는 Al₂O₃/water 나노유체를 평판형 태양열 집열기에 적용하였을 때 관의 거칠기, 나노입자의 크기가 엔트로피 발생에 미치는 영향을 모델링 하였는데 나노입자의 부피 분율이 증가함에 따라 엔트로피 생성이 감소하고 출구온도가 상승하였으며, 질량유량이 증가함에 따라 관 거칠기가 미치는 영향이 증가하였다. Genc et al. [33]은 평판형 태양열 집열기에 Al₂O₃/water 나노유체를 적용하였을 때 열성능을 수치적으로 연구하였는데 나노유체의 열물성에 따라 열성능을 향상시키는 특정 유속 범위가 있음을 확인하였고 작동유체의 출구온도는 질량유량이 감소하고 나노입자의 농도가 증가함에 따라 증가함을 확인하였다. 이외에도 많은 연구들이 평판형 집열기에 다양한 나노유체를 적용하였

을 때 효율을 해석 및 실험적으로 분석하였다 [34-41].

다른 형태의 태양열 집열기인 진공관형 태양열 집열기에 나노유체를 적용한 연구들을 살펴보면, Rybar [42]은 기존 태양열 집열기와 진공관형 태양열 집열기의 Thermal power를 측정하였으며 기존 태양열 집열기에 비해 진공관형 태양열 집열기에서 Thermal power와 성능이 향상되었다고 보고하였다. Tong et al. [43]은 진공관형 태양열 집열기에 MWCNT 나노유체를 적용하였을 때 성능을 이론적으로 연구하였다. 연구 결과에 따르면 0.24vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 가장 높은 열전달계수가 나타났으며 물을 사용하였을 때보다 약 8% 향상됨을 보고하였다. 또한, 50개의 진공관형 태양열 집열기에 MWCNT 나노유체를 적용하였을 때 매년 약 615 kg의 석탄을 절약 할 수 있으며, 1600 kg의 CO₂와 5.3 kg의 SO₂를 절감할 수 있을 것으로 보고하였다. Ghaderian and Sidik [44]은 진공관형 태양열 집열기에 작동유체의 질량유량이 60 l/h일 때 작동유체가 물일 경우 22.9% 효율이 나타났으며 Al₂O₃/증류수를 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 사용하였을 때 0.06vol% Al₂O₃ 나노유체의 효율은 58.7%로 나타났다. Mahendran et al. [45]에서는 진공관형 집열기에 TiO₂ 나노유체를 사용한 시스템에서 집열기의 최대 효율은 73%이고, 증류수를 사용한 집열기의 최대 효율은 53%로 약 20% 정도 효율이 증가하는 것으로 보고하였으며 또한 Sabiha et al. [46]에서는 진공관형 집열기에 SWCNT 나노유체를 적용한 결과 작동유체의 질량유량이 0.025 kg/s일 때 0.2vol% 농도에서 태양열 집열기의 효율이 93.4%까지 상승하였으며, 이는 물에 비하여 71.84% 향상된다고 보고하였다. 또한 Kim et al. [47]은 Al₂O₃ 나노유체를 진공관형 태양열 집열기에 적용하여 실험한 결과 Al₂O₃ 나노입자의 크기가 작고 Al₂O₃ 나노유체의 농도가 증가할수록 진공관형 태양열 집열기의 효율이 증가함을 보였다. Kim et al. [48]은 진공관형 태양열 집열기에 다양한 나노유체를 적용하였을 때 열성능을 수치적으로 분석하였다. 나노유체의 열전도도는 온도와 체적 농도가 증가함에 따라 증가하였다. 0.2vol%-MWCNT 나노유체의 열전도도는 0.588 W/(mK)로 20%-PG/water를 사용하였을 때보다 10% 향상되었다. 태양열 집열기 효율은 MWCNT, CuO, Al₂O₃, TiO₂ 및 SiO₂ 나노유체 순서로 효율이

향상됨을 확인하였다. Ersoz [49]은 진공관형 태양열 집열기에 다양한 작동유체를 적용하여 에너지와 엑서지 효율을 측정한 결과 클로로포름 및 아세톤에서 가장 좋은 효율을 보이는 것을 확인하였다. Delfani et al. [50]은 내부방사율, 유량, MWCNT 나노입자의 농도가 직접흡수식 태양열 집열기 효율에 미치는 영향을 연구하였으며 그 결과 나노유체의 농도와 유량을 증가시킬수록 집열기 효율이 증가됨을 확인하였다. 또한 100 ppm 농도에서 가장 높은 효율을 보였으며, 기본유체 대비 29% 향상됨을 보고하였다.

직접흡수식 태양열 집열기에 나노유체를 적용하는 연구도 진행되었는데 Menbari et al. [51]은 CuO 나노유체를 직접흡수식 태양열 집열기에 적용한 결과 CuO 나노유체의 농도가 0.002%에서 0.008%로 증가하였을 때 열효율이 18%에서 52%로 증가한다고 보고하였다. Karami et al. [52]은 직접흡수식 태양열 집열기에 CuO 나노유체의 농도와 유량을 증가시킴으로써 효율이 증가한다는 것을 실험적으로 확인하였으며, 작동유체의 질량유량이 90 l/h, CuO 나노유체의 농도가 100 ppm일 때 최대 효율을 가지며 이는 물을 사용하였을 때보다 약 17% 향상됨을 보고하였다. 이외에도 직접흡수식 태양열 집열기에 나노유체를 작동유체로 사용하여 직접흡수식 태양열 집열기의 효율을 측정한 다양한 연구들이 진행되었다 [53-56].

제 3 절 연구 목적

태양열을 효과적으로 이용하기 위해서는 태양열 집열기의 효율 향상이 가장 중요하며 이를 위해서는 다양한 운전조건에 따른 태양열 집열기의 효율 특성에 대한 분석과 효율 향상에 관한 연구가 절대적으로 필요하다. 또한 태양열 집열기의 효율에 대한 실험적 연구는 시간이 많이 소요되고 날씨의 제한이 있어 실험을 통하여 집열기의 특성을 파악하고 고찰하는 것은 매우 어렵다. 따라서 기존 연구들을 살펴보면 태양열 집열기의 성능을 향상시키기 위하여 작동유체의 변경이나 태양열 집열기의 구조변경에 관한 연구들이 진행되었다. 하지만 평판형 태양열 집열기와 진공관형 태양열 집열기에 이성분 나노유체를 적용하여 실험을 통한 태양열 집열기의 성능을 분석한 연구는 제한적이었다. 또한 나노입자의 크기, 나노유체의 농도, 질량유량 변화와 같이 다양한 운전조건에서 평판형 태양열 집열기와 진공관형 태양열 집열기의 성능을 분석한 연구는 거의 찾아볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 평판형 태양열 집열기와 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 물, MWCNT 나노유체와 Fe_3O_4 나노유체, MWCNT- Fe_3O_4 이성분 나노유체를 적용하였을 때 집열기의 성능을 비교 분석하였다. 이때 평판형과 진공관형 태양열 집열기의 작동유체의 나노입자 크기, 나노유체 농도, 질량유량에 변화를 주어 실험을 진행하였을 때 성능을 비교 분석하였다. 물, MWCNT 나노유체와 Fe_3O_4 나노유체, MWCNT- Fe_3O_4 이성분 나노유체를 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 적용하였을 때 운전조건 변화에 따른 성능을 물을 사용하였을 때와 비교하였다. 단일 나노유체의 적용에 따른 태양열 집열기의 성능 특성을 분석한 후 MWCNT- Fe_3O_4 이성분 나노유체를 적용한 태양열 집열기의 성능을 단일 나노유체인 MWCNT와 Fe_3O_4 나노유체를 적용한 집열기의 성능을 작동 조건별로 비교하였다. 그리고 다양한 운전조건 변화에 따른 태양열 집열기의 성능 민감도를 비교 분석하였다. 결론적으로 본 연구에서 실험을 통하여 다양한 작동조건에서 평판형 태양열 집열기와 진공관형 태양열 집열기에 작동유체 변경에 따른 성능을 비교 고찰하였으며 최적의 작동조건을 찾아 태양열 집열기 설계에 필요한 데이터를 제공하고자 한다.

제 2장 태양열 시스템 및 집열기

제 1 절 태양열 시스템

태양열 시스템은 태양열의 흡수·저장·열변환을 통하여 건물의 냉난방 및 급탕에 활용되는 기술을 말한다. Fig. 2.1은 태양열 집열기 시스템의 개략도이다. 이때 태양열 집열기 시스템의 구성은 집열부, 축열부, 이용부, 제어장치로 나뉜다. 집열부는 태양열 집열이 이루어지는 곳이며 집열온도는 집열기의 열손실율과 집광장치에 따라 결정된다. 축열부는 태양열 에너지를 받아 열교환되어 사용될 작동유체를 저장하는 곳이다. 이용부는 축열조에 저장된 작동유체를 효과적으로 공급하고 부족할 경우 보조열원에 공급하는 역할을 한다. 제어장치는 태양열 시스템을 효과적으로 집열 및 축열하고 공급해주는 역할을 하며 태양열 시스템의 성능 및 신뢰성을 결정하는데 중요한 역할을 한다.

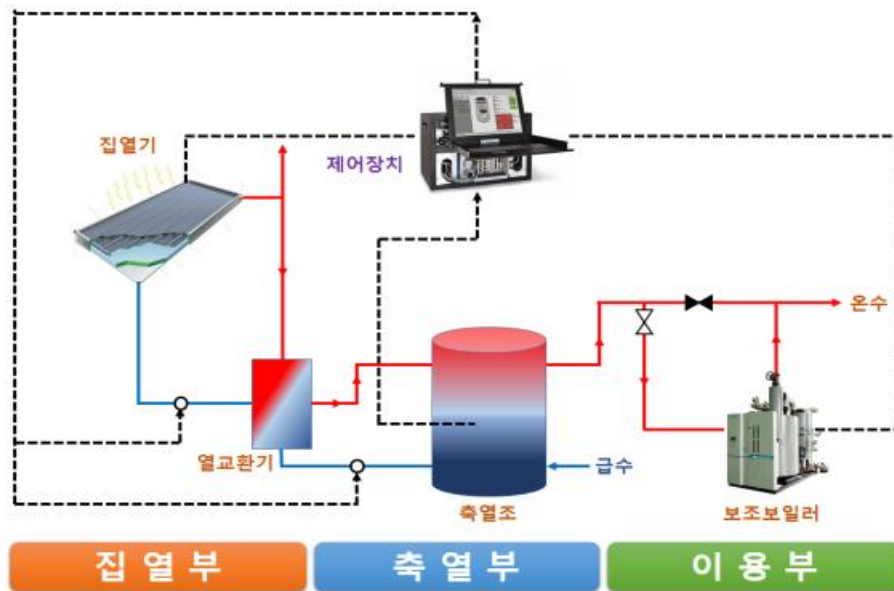


Fig. 2.1 Schematics of the solar collector system

Table 2.1 Type of the solar collector according using temperature range

Specify	Low-temperature	Middle-temperature	High-temperature
Using temperature	Below 100°C	Below 300°C	above 300°C
Solar collector	Flat plate solar collector	Evacuated tube solar collector, PTC or CPC type solar collector	Dish type solar collector, Power tower
Field of usage	air conditioning and heating, Service hot water	Building and agriculture and fisheries sector, air conditioning and heating, Desalination, Thermal power generation	Thermal power generation, Photocatalyst wastewater treatment, photochemistry, Manufacture of new material

태양열 집열기는 사용온도에 따라 저온용, 중온용과 고온용으로 나뉘며 Table 2.1에 나타내었다. 100°C 이하의 저온에서는 평판형 태양열 집열기가 주로 사용되며 주로 냉난방·급탕을 하는데 사용된다. 300°C 이하의 중온에서는 진공관형 태양열 집열기, PTC(Parabolic trough concentrator)와 CPC(Compound parabolic concentrator)가 사용되며 건물 및 농수산 분야, 냉난방, 담수화, 열발전등에 사용된다. 300°C 이상의 고온에서 Dish type 태양열 집열기는 태양열을 한곳에 모을 수 있도록 접시 모양의 반사판이 설치되어있는 집광형 집열기로서 300°C 이상의 온도를 집열할 수 있다. Power tower는 주변에 반사장치를 배열하여 발전소 꼭대기에 있는 반사체 가운데에 빛을 집결시킨다. 이와 같이 고온용 태양열 집열기는 산업공정열, 열발전, 광촉매 폐수처리, 광화학등에 사용된다.

제 2 절 평판형 태양열 집열기

평판형 태양열 집열기는 100°C 이하의 저온에서 효율을 유지할 수 있고 낮은 비용으로 인하여 전 세계에서 가장 많이 사용되고 있다. 평판형 태양열 집열기로 얻어진 열원은 난방 및 급탕에 사용된다. 하지만 평판형 태양열 집열기는 흡수체에서 외부로의 열손실로 인하여 100°C 이상의 열원을 얻기 어렵다는 단점을 가지고 있다.

Fig. 2.2는 평판형 태양열 집열기의 구조를 보여준다. 평판형 태양열 집열기는 프레임, 강화유리, 동관, 집열판, 단열재, 케이스로 구성되어 있다. 평판형 집열기는 상단부, 중단부, 하단부로 나뉘어져 있으며, 상단부에서는 태양 일사광선을 투과시키고 열에너지 손실을 방지할 수 있는 강화유리로 구성되며, 중단부에는 투과된 일사광선을 열에너지로 흡수할 수 있는 집열판으로 구성되었으며, 마지막 하단부에는 흡수된 열에너지의 손실을 막기 위하여 단열재로 구성되었다. 현재 시중에 판매되는 평판형 태양열 집열기는 프레임의 경우 알루미늄 재질로 제작되어 장기간 사용에 따른 부식 방지가 가능하며, 강화유리의 경우 저철분으로 제작되어 빛 에너지의 투과율을 우수하게 설계 하였으며, 동관의 경우 열전달이 우수한 구리와 알루미늄이 사용되고 있다. 집열판의 경우 티타늄 코팅으로 집열 효율을 향상시킬 수 있도록 제작된다.

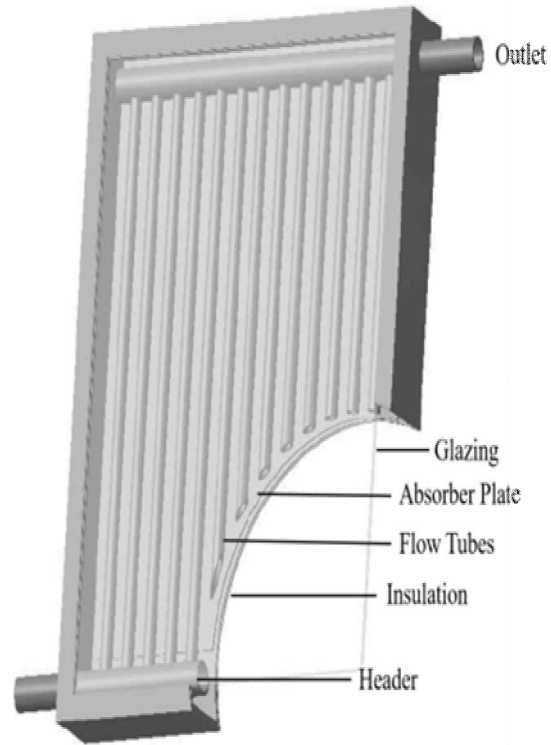


Fig. 2.2 Structure photograph of a flat plate solar collector

제 3 절 진공관형 태양열 집열기

진공관형 태양열 집열기는 100°C~300°C 사이의 중온에서 사용되며 평판형 태양열 집열기와 달리 흡수관이 진공 유리관 내부에 위치하여 대류 또는 복사에 의한 열손실을 크게 줄일 수 있어 평판형 태양열 집열기보다 작동유체의 온도를 높일 수 있다. 또한 진공관형 태양열 집열기는 경량이며, 설치면적이 30% 정도 절감되어 설치가 용이한 장점을 가지고 있다. 진공관형 태양열 집열기의 유리튜브와 흡수체는 원통형으로 되어있기 때문에 항상 햇빛의 각도가 직각을 이루기 때문에 구름이 많거나 추운 지역에서도 사용이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

Fig. 2.3은 진공관형 태양열 집열기의 구조를 나타낸다. 진공관형 태양열 집열기의 구조는 내부·외부 유리, 진공층, 흡수관, 코팅층 등으로 구성된다. 작동유체가 관을 통하여 이동하면서 열전달이 발생하여 온도가 상승하는 구조를 가지며 외부 및 내부 유리관 사이는 진공으로 되어 있어 열손실을 최소화할 수 있다. 그렇기 때문에 추운 환경에서도 집열이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

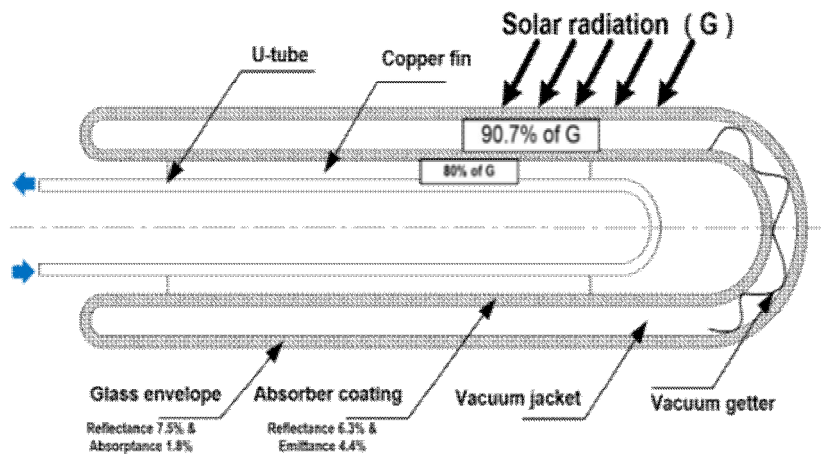


Fig. 2.3 Structure photograph of an evacuated tube solar collector

제 3장 실험장치 및 방법

제 1 절 실험 장치

Fig. 3.1은 실험에 사용된 평판형 태양열 집열기와 진공관형 태양열 집열기의 사진을 보여주고 있다. 또한 Table 3.1과 Table 3.2는 실험에 사용된 평판형 태양열 집열기와 진공관형 태양열 집열기의 사양을 나타내었다. 실험은 대한민국 광주광역시(위도: 35, 경도: 126)에서 진행되었으며, 오전 10:00부터 오후 5:00까지 진행되었다. 본 연구에서는 평판형 태양열 집열기와 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 물, MWCNT나노유체, Fe_3O_4 나노유체, MWCNT- Fe_3O_4 이성분 나노유체를 적용하여 태양열 집열기의 성능을 분석하였다.

Fig. 3.2는 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 나노유체는 펌프를 통하여 태양열 집열기 입구로 들어가고 태양열 집열기를 순환하고 나오게 된다. 이후 100 l 용량의 탱크로 들어가 열교환을 하게 되고 다시 순환하는 형태를 가진다. 평판형 태양열 집열기의 입구와 출구 온도를 측정하기 위하여 T-type 열전대를 설치하였으며, 작동유체의 질량유량을 측정하기 위한 질량유량계, 그리고 태양열 일사량을 측정하기 위한 일사량계를 주요 지점에 설치하였다. 그리고 실험을 통하여 얻어진 모든 성능 데이터는 정보수집기(data logger)를 사용하여 수집하였다.



Fig. 3.1 Photograph of the solar collector

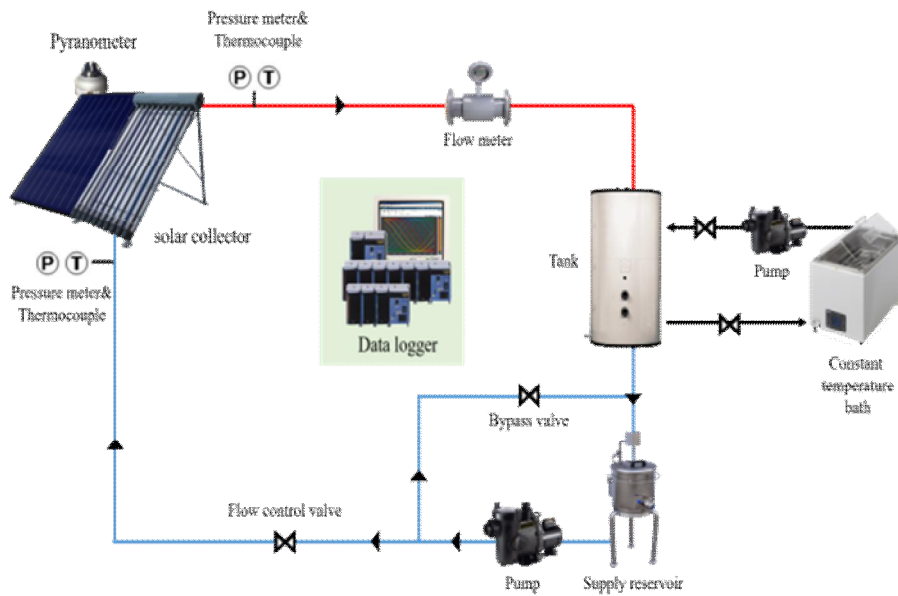


Fig. 3.2 Schematics of the solar collector system

1. 온도 측정

태양열 집열기의 입구와 출구측 온도를 측정하기 위하여 T-type 열전대를 설치하였다. 또한 외기온도를 측정하기 위하여 외부에 T-type 열전대를 설치하였다. 실험에 사용된 열전대는 얼음물과 끓는물을 이용하여 보정하였다. T-type 열전대의 온도 범위는 $-200^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$ 이며 정확도는 $\pm 0.75\%$ 이다. Fig. 3.3과 Table 3.1은 T-type 열전대의 사진과 상세제원을 보여준다.



Fig. 3.3 Photograph of T-type thermocouple

Table 3.1 Specification of T-type thermocouple

Item	Specification
Type	T-type
Range	$-200^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$
Ansi standard limits of error	0.75%
Ansi special limits of error	0.40%

2. 일사량 측정

태양열 시스템의 성능을 계산하기 위하여 필요한 일사량은 일사량계(Solar radiation transmitter, CR100)를 사용하여 측정하였다. 일사량계의 측정범위는 0~1500 W/m²이며 정확도는 5%이다. Fig. 3.4와 Table 3.2는 일사량계의 사진과 상세제원을 보여준다.



Fig. 3.4 Photograph of solar radiation meter

Table 3.2 Specification of solar radiation meter

Item	Specification
Type	CR-110
Storage environment temperature	From -10°C to 70°C
Range	0~1500 W/m ²
Accuracy	5%

3. 유량 측정

태양열 시스템의 성능을 계산하기 위하여 필요한 작동유체의 유량은 체적유량계를 사용하여 측정하였다. 태양열 시스템을 순환하는 작동유체의 유량 측정을 위하여 체적유량계(E-MAG-I)를 사용하였다. 체적유량계는 평판형과 진공관형 태양열 집열기의 출구측에 설치하였다. 본 연구에서 사용된 체적유량계의 실제사진은 Fig. 3.5와 같으며, 체적유량계의 상세사양은 Table 3.3에 나타내었다.



Fig. 3.5 Photograph of flow meter

Table 3.3 Specification of flow meter

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

4. 축열탱크

본 연구에서 사용된 축열탱크는 태양열 시스템 용량을 고려하여 설치하였다. 축열탱크 내부에는 열교환기가 설치되어 있어 작동유체의 열부하를 냉각수에 전달하여 다시 태양열 집열기의 입구로 들어간다. 축열탱크의 용량은 100 l 이다. Fig. 3.6과 Table 3.4 는 본 연구에서 사용된 축열탱크의 사진과 상세제원을 나타낸다.



Fig. 3.6 Photograph of the storage tank

Table. 3.4 Specification of the storage tank

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

5. 데이터 수집장치

태양열 시스템의 성능을 측정하기 위하여 설치된 T-type 열전대, 일사량계, 체적유량계의 데이터는 데이터 수집장치(Data logger)를 사용하여 수집하였다. 데이터 수집 장치는 Yokogawa 사의 MX 100를 사용하였다. 데이터 수집 장치에서 수집한 데이터는 PC로 전송되며, 수집된 데이터는 Yokogawa사에서 제공된 MX100 standard 프로그램을 통해 모니터링을 할 수 있다. Fig. 3.7과 Table 3.5는 데이터 수집장치의 사진과 상세제원을 나타낸다.



Fig. 3.7 Photograph of data acquisition system

Table. 3.5 Specification of data acquisition system

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

제 2 절 나노유체 제작

1. 나노유체 제조 방법

나노유체 제조 방법으로는 One-step 방법과 Two step 방법으로 나뉜다. One-step 방법은 기본 유체 내에서 나노입자를 만들고 분산시키기 때문에 나노입자의 건조, 저장, 운반 및 분산 과정을 피하게 된다. 그러므로 나노입자의 응집을 최소화시킬 수 있고 나노유체의 안정성이 증가하게 된다. Two-step 방법은 생산된 나노입자를 유체 내에 충분히 분산시킨 후 초음파 분산기를 사용하여 분산시키는 방법이다. One-step 방법은 나노유체를 대량 생산하기 어렵다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서 태양열 집열기 시스템에 사용되는 나노유체는 20 l정도가 필요하기 때문에 대용량 생산이 가능한 Two-step 방법을 사용하여 나노유체를 제작하였다. 먼저 기본유체인 물에 준비된 나노입자와 분산안정제를 넣어 20분 동안 교반하였다. 그 다음 충분히 분산된 나노유체를 연속 순환식 초음파 분산기를 사용하여 4시간 동안 초음파 분산시켰다. 본 연구에서 사용된 Fig. 3.8과 Table 3.6은 초음파 분산기의 사진과 상세제원을 나타내었다.

태양열 집열기에 나노유체를 적용하기 위해서는 분산안정성이 확보되어야 한다. 본 연구에서 제작된 나노유체의 분산안정성은 가시적 확인과 제타포텐셜(Zeta potential) 장치를 사용하여 확인하였다. 나노유체를 제타포텐셜 장치를 사용하여 측정하였을 때 결과의 절댓값이 30이상이면 안정된 나노유체로 판단할 수 있다. 우선 가시적 검사를 위하여 제작된 Fe_3O_4 와 MWCNT 나노유체는 2주 동안 관찰하였으며 모든 나노유체에 대한 관찰결과 가시적으로 침전되지 않음을 확인하였다. 그리고 제타포텐셜 장치를 사용하여 측정한 Fe_3O_4 와 MWCNT 나노유체의 제타포텐셜 값은 -34 to -47 mV와 -32 to -56 mV로 안정된 상태를 확인하였다.



Fig. 3.8 Photograph of the Ultrasonic homogenizer

Table 3.6 Specification of the Ultrasonic homogenizer

Item	Specification
Model	HUH-2000
Output Power	2000 W
Frequency	20 kHz \pm 100 Hz
Converter	PZT, BLT Type
Horn	Ti type (ϕ 20, ϕ 30)

2. MWCNT 나노유체

본 연구에서 사용된 MWCNT 나노유체는 AVENTION에서 MWCNT 나노입자를 구입하여 제작하였다. Fig. 3.9는 MWCNT 나노입자의 TEM(Transmission Electron Microscope) 사진을 보여주며 Fig. 3.10은 실험에 사용된 농도 변화에 따른 나노유체 사진이다. 또한 Table 3.7은 MWCNT 나노입자의 상세제원을 보여준다. 본 연구에서 사용된 MWCNT 나노유체의 농도는 0.001, 0.003, 0.005와 0.007vol%를 제조하여 실험을 진행하였다.

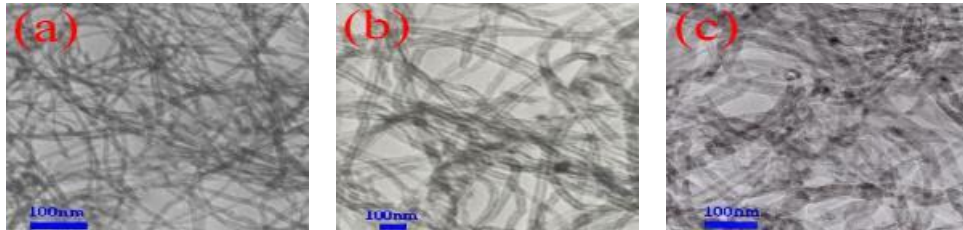


Fig. 3.9 TEM image of MWCNT nanoparticles (a) 20 nm, (b) 50 nm, (c) 80 nm

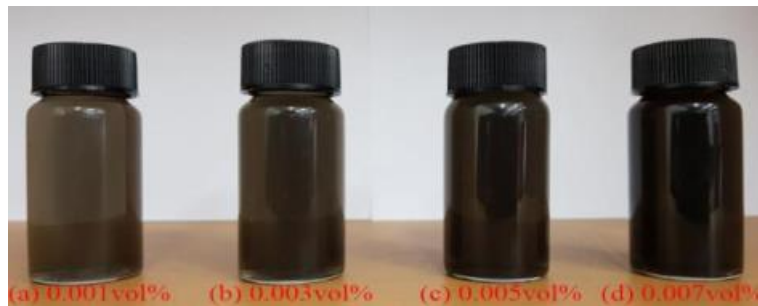


Fig. 3.10 Photograph of MWCNT nanofluid concentration

Table 3.7 Specification of MWCNT nanoparticle

Item	Specification
Nanoparticle	MWCNT (Multi Walled carbon nanotube)
Purity	90%
Size	20, 50, 80 nm
Density	1350 kg/m ³
Thermal conductivity	3000 W/m · K
Specific heat	650 J/kg · K
Manufacturer	AVENTION

3. Fe₃O₄ 나노유체

본 연구에서 사용된 Fe₃O₄ 나노유체는 AVENTION에서 Fe₃O₄ 나노입자를 구입하여 제작하였다. Fig. 3.11는 Fe₃O₄ 나노입자의 TEM(Transmission Electron Microscope) 사진을 보여주며 Fig. 3.12는 실험에 사용된 농도 변화에 따른 나노유체 사진이다. Table 3.8은 Fe₃O₄ 나노입자의 상세제원을 보여준다. 본 연구에서 사용된 Fe₃O₄ 나노유체의 농도는 0.005, 0.01, 0.015와 0.02vol%를 제조하여 실험을 진행하였다.

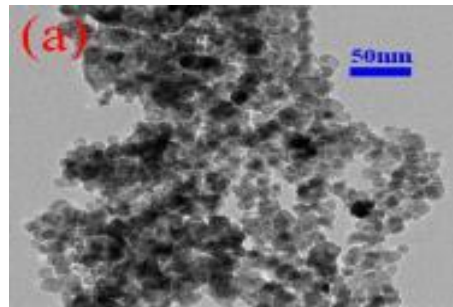


Fig. 3.11 TEM image of a Fe₃O₄ nanoparticle (a) 30 nm

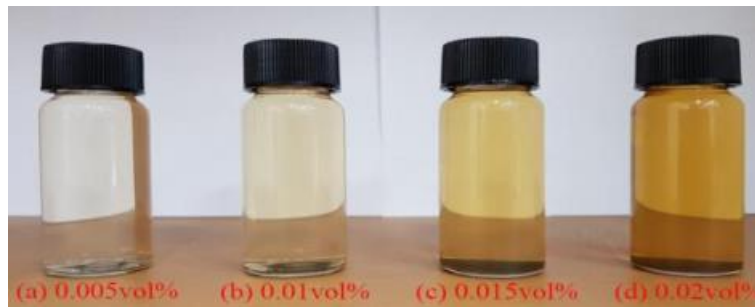


Fig. 3.12 Photograph of Fe₃O₄ nanofluid concentration

Table 3.8 Specification of a Fe₃O₄ nanoparticle

Item	Specification
Nanoparticle	Fe ₃ O ₄
Purity	99.9%
Size	30 nm
Density	4950 kg/m ³
Thermal conductivity	6 W/m · K
Specific heat	670 J/kg · K
Manufactor	AVENTION

4. MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체

본 연구에서 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체는 기본유체에 MWCNT와 Fe₃O₄ 나노입자를 일정한 비율로 첨가하여 제작하였다. Fig. 3.13은 실험에 사용된 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체의 농도 변화에 따른 사진이다. 실험에 사용된 농도는 Case1 (0.003vol%-MWCNT & 0.01vol%-Fe₃O₄), Case2 (0.003vol%-MWCNT & 0.015vol%-Fe₃O₄), Case3 (0.005vol%-MWCNT & 0.01vol%-Fe₃O₄), Case4 (0.005vol%-MWCNT & 0.015vol%-Fe₃O₄)를 제조하여 실험을 진행하였다.

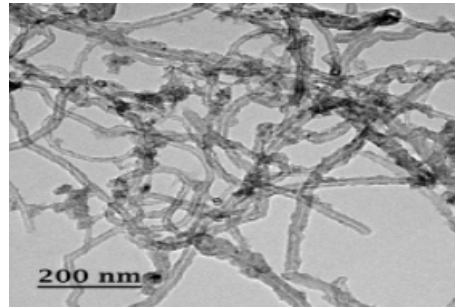


Fig. 3.13 TEM image of a MWCNT-Fe₃O₄ nanoparticle (MWCNT nanoparticle size: 20 nm, Fe₃O₄ nanoparticle size: 30 nm)



Fig. 3.14 Photograph of MWCNT-Fe₃O₄ binary nanofluid concentration

제 3 절 실험방법 및 효율 계산

1. 실험방법 및 조건

본 연구에서는 평판형 태양열 집열기와 진공관형 태양열 집열기에 다양한 작동유체를 적용하여 농도 변화에 따른 성능 실험을 진행하였다. 태양열 집열기에 사용된 작동유체는 Water, MWCNT 나노유체, Fe_3O_4 나노유체, MWCNT- Fe_3O_4 이성분 나노유체가 사용되었으며 나노유체 농도 변화에 따른 효율을 측정하였다. 이때 기본유체인 물을 사용하였을 때 태양열 집열기의 효율을 나노유체의 효율과 비교분석하였다. Table 3.9는 본 연구에서 사용된 태양열 시스템의 실험조건을 나타내고 있다. Table 3.10은 평판형 태양열 집열기와 진공관형 태양열 집열기의 상세사양을 나타낸다.

Table 3.9 Experimental conditions of solar collector system

Item		Specification
Type of working fluid		Water, MWCNT, Fe ₃ O ₄ , MWCNT-Fe ₃ O ₄
MWCNT nanofluid		0.001, 0.003, 0.005, 0.007
Fe ₃ O ₄ nanofluid		0.005, 0.01, 0.015, 0.02
Concentration of nanofluid (vol%)	MWCNT-Fe ₃ O ₄ nanofluid	Case1 (0.003vol% MWCNT nanofluid+0.01vol% Fe ₃ O ₄ nanofluid)
		Case2 (0.003vol% MWCNT nanofluid+0.015vol% Fe ₃ O ₄ nanofluid)
		Case3 (0.005vol% MWCNT nanofluid+0.01vol% Fe ₃ O ₄ nanofluid)
		Case4 (0.005vol% MWCNT nanofluid+0.015vol% Fe ₃ O ₄ nanofluid)
Experiment time (hr)		10:00~17:00
Solar radiation (W/m ²)		100-800
Solar collector	Inlet temp. (°C)	10-12
	Mass flow rate (kg/s)	0.033, 0.047

Table 3.10 Specifications of the flat plate and evacuated tube solar collector

Parameter	Flat plate solar collector	Evacuated tube solar collector
Collector length (mm)	2,000	1,445
Collector width (mm)	1,000	1,640
Gross area (m ²)	2.00	2.37
Weight (kg)	36	51.5
Riser tube material	Copper	Copper
Inner diameter of pipes (mm)	8	10
Outer diameter of pipes (mm)	8.8	15
Absorptivity of absorber coating	0.95	0.95

2. 태양열 집열기의 효율 및 불확실도 계산

평판형과 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 기본유체인 물과 나노유체를 적용하여 효율을 비교·분석하기 위해 실험을 진행하였다. 이때 태양열 집열기에서 작동유체의 유용열은 흡수체에 의해 흡수된 열에너지와 같으며 식 (3-1)과 같이 표현된다.

$$Q_u = \dot{m}c_p(T_o - T_i) \quad (3-1)$$

여기서 \dot{m} 은 작동유체의 질량유량이며, c_p 는 작동유체의 비열, T_o 은 태양열 집열기 출구 온도, T_i 은 태양열 집열기의 입구 온도를 나타낸다.

본 연구에서 사용된 MWCNT와 Fe_3O_4 나노유체의 밀도와 비열은 식 (3-2)과 식 (3-3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

$$c_p = \frac{(1 - \phi)\rho_{bf}c_{p,bf} + \phi\rho_n c_{p,n}}{(1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_n} \quad (3-3)$$

이때 ρ 는 작동유체의 밀도, ϕ 는 작동유체의 부피분율을 나타낸다.

그리고 MWCNT- Fe_3O_4 이성분 나노유체의 부피분율, 비열과 밀도는 식 (3-4), 식 (3-5)와 식 (3-6)과 같이 계산할 수 있다.

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (3-4)$$

$$\rho_{np} = \frac{\phi_1\rho_{np-1} + \phi_2\rho_{np-2}}{\phi} \quad (3-5)$$

$$c_{p,np} = \frac{\phi_1\rho_{np-1}c_{p,np-1} + \phi_2\rho_{np-2}c_{p,np-2}}{\rho_{np}\phi} \quad (3-6)$$

태양열 집열기의 효율은 식 (3-7)을 사용하여 계산할 수 있다.

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_o - T_i)}{GA_c} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_o)}{G} \quad (3-7)$$

이때 $F_R(\tau\alpha)$ 는 집열기의 열획득계수를 $F_R U_L$ 은 열손실계수를 나타낸다. 본 연구에서 태양열 집열기 효율의 불확실도는 유량계, 온도계, 일사량계, 나노유체 비열의 특정오차에 의해 결정된다. 집열기 효율의 불확실도는 Moffat [57]에 의해 제시된 식이며 식(3-8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta\eta}{\eta} = \left[\left(\frac{\delta m}{m} \right)^2 + \left(\frac{\delta(T_o - T_i)}{T_o - T_i} \right)^2 + \left(\frac{\delta c_p}{c_p} \right)^2 + \left(\frac{\delta G}{G} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (3-8)$$

위의 식으로부터 질량유량의 최대오차는 식 (3-9)와 같이 계산하였다.

$$\frac{\delta m}{m} \leq 0.5\% \quad (3-9)$$

또한, 온도의 최대오차는 식 (3-10)와 같이 계산하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\delta(T_o - T_i)}{T_o - T_i} &\leq \left[\left(\frac{\delta T_o}{T_o} \right)^2 + \left(\frac{\delta T_i}{T_i} \right)^2 \right]^{0.5} \\ &= \left[\left(\frac{0.2}{18} \right)^2 + \left(\frac{0.2}{12} \right)^2 \right]^{0.5} = 2\% \end{aligned} \quad (3-10)$$

그리고 일사량과 나노유체 비열의 최대오차는 식 (3-11)과 (3-12)와 같이 계산하였다.

$$\frac{\delta G}{G} \leq 5\% \quad (3-11)$$

$$\frac{\delta c_p}{c_p} \leq 1.22\% \quad (3-12)$$

따라서 본 연구에서 사용된 태양열 집열기 효율의 최대오차는 식 (3-13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta \eta}{\eta} \leq 5.54\% \quad (3-13)$$

유량계, 온도계, 일사량계, 나노유체의 비열의 특정오차는 각각 0.5%, 2%, 5%, 1.22%로 나타났으며 태양열 집열기 효율에 대한 불확실도는 5.54%로 계산되었다.

제 4장 태양열 집열기의 성능 실험 결과 및 고찰

제 1 절 MWCNT 나노유체 적용 태양열 집열기의 성능 실험 결과

1. MWCNT 나노유체 농도 변화에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰

본 연구에서는 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 MWCNT 나노유체를 적용하여 실험을 진행하였다. 우선 작동유체인 MWCNT 나노유체의 농도 변화에 따른 태양열 집열기의 성능을 분석하였다. 또한 태양열 집열기에 물과 MWCNT 나노유체를 적용하였을 때 집열기의 효율을 비교 분석하였다. Fig. 4.1은 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 물과 나노입자의 크기가 20 nm인 MWCNT 나노유체의 농도 변화에 따른 성능을 보여준다. 이때 작동유체의 질량유량은 0.047 kg/s를 사용하여 실험을 진행하였다. Fig 4.1(a)은 평판형 태양열 집열기에 MWCNT 나노유체의 농도를 변화시켰을 때 집열기의 성능을 보여준다. 평판형 태양열 집열기에 작동유체로 MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 물을 사용하였을 때보다 효율이 전반적으로 크게 향상됨을 확인하였다. 물을 사용하였을 때 평판형 태양열 집열기의 최대효율은 62.7%로 나타났다. 또한 평판형 태양열 집열기에 작동유체로 농도가 각각 0.001vol%-, 0.003vol%-, 0.005vol%-, 0.007vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 최대효율은 각각 78.8%, 82.5%, 87.5%, 84.9%로 나타났으며 0.005vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 가장 높은 효율을 보였다. 평판형 태양열 집열기에 0.005vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 경우 물을 사용하였을 때보다 효율이 약 39.6% 향상됨을 확인하였다. 그리고 0.001vol%-, 0.003vol%-, 0.007vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 경우 물을 사용하였을 때보다 효율이 각각 25.7%, 31.6%, 35.4% 향상되었다. MWCNT 나노유체의 농도가 증가함에 따라 집열기의 효율이 증가함을 보였지만 MWCNT 나노유체의 농도가

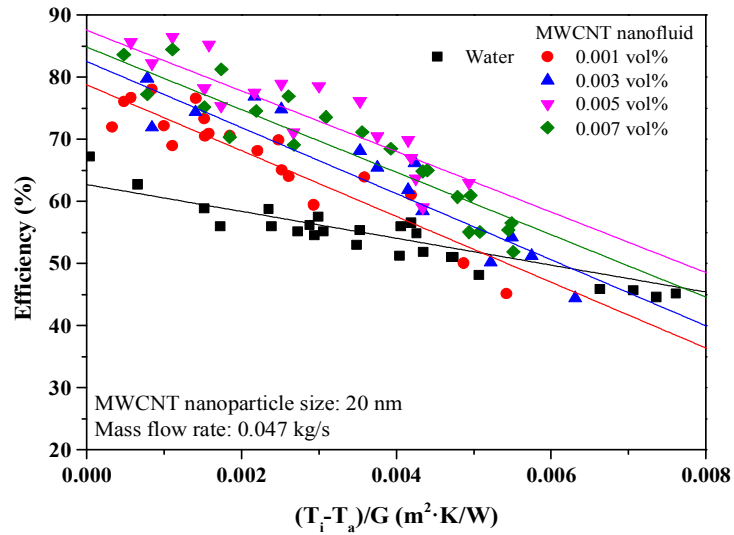
0.005vol%에서 0.007vol%로 증가할 때 효율은 더 이상 증가하지 않음을 확인하였다. 이는 나노유체의 농도가 증가할수록 열전도도는 증가하게 되지만 나노유체의 분산안정성이 낮아지게 되고 이에 나노입자들의 뭉침 현상이 발생하여 나노유체의 열전달 및 흡수력이 감소하기 때문이다.

Fig. 4.1(b)은 진공관형 태양열 집열기에 MWCNT 나노유체의 농도를 변화시켰을 때 효율을 보여준다. 진공관형 태양열 집열기에서도 물을 사용하였을 때보다 MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 효율이 증가함을 확인하였다. 진공관형 태양열 집열기에 물을 사용하였을 때 최대효율은 54.9%로 나타났으며 0.001vol%-, 0.003vol%-, 0.005vol%-, 0.007vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 최대효율은 각각 62.9%, 67.5%, 75.6%, 73.4%로 나타났다. 0.005vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 가장 높은 효율을 보였으며 이는 물을 사용하였을 때보다 효율이 약 37.7% 향상됨을 확인하였다. 그리고 0.001vol%-, 0.003vol%-, 0.007vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 경우 물을 사용하였을 때보다 집열기의 효율이 각각 14.6%, 22.9%, 33.7% 향상됨을 확인하였다. 진공관형 태양열 집열기에서도 0.005vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 가장 높은 75.6%의 효율을 보였으며 0.007vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 효율이 감소하는 것을 확인하였다.

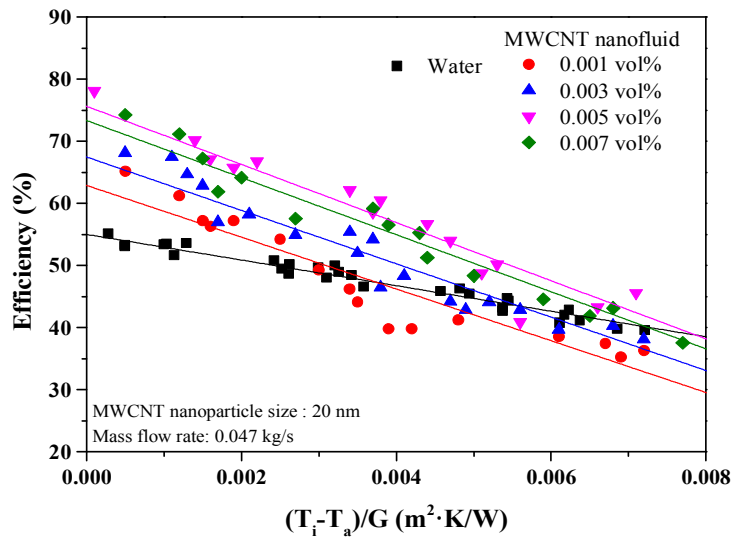
Table 4.1은 평판형 태양열 집열기 물과 MWCNT 나노유체의 농도 변화에 따른 효율과 관련된 매개변수를 보여준다. 이때 열획득계수, ($F_R(\tau\alpha)$)가 클수록 태양열 집열기에서 열에너지 전달 및 흡수력이 우수한 것을 나타내며, 열손실계수, ($F_R U_L$)가 작을수록 외부로의 열손실이 적음을 나타낸다. 평판형 태양열 집열기의 열획득계수인 $F_R(\tau\alpha)$ 는 0.005vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 0.875로 가장 높았으며 열손실계수인 $F_R U_L$ 은 50.24로 나타났다. 반면 평판형 태양열 집열기에 물을 사용하였을 때 열획득계수인 $F_R(\tau\alpha)$ 은 0.627로 가장 작게 나타났으며 열손실계수인 $F_R U_L$ 은 21.64로 가장 작게 나타남을 확인하였다. 즉, 평판형 태양열 집열기에 0.005vol%-MWCNT 나노유체를 사용하게 되면 고온 영역에서 높은 효율을 얻을 수 있지만 저온 영역에서 열손실이 크다는 것을 확인할 수 있다. 물의 경우 고온 영역에서는 낮은 효율을 보이지만 저온 영역에서는 열손실이 작기 때문에 상대적으로 높은 효율을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 평판형 태양열 집열기에 물과

MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 온도 범위에 따라 더 높은 효율의 작동유체를 선택할 수 있게 됨으로써 태양열 집열기 시스템을 경제적으로 작동시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4.2는 진공관형 태양열 집열기 물과 MWCNT 나노유체의 농도 변화에 따른 효율과 관련된 매개변수를 보여준다. 0.005vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 열획득계수인 $F_R(\tau\alpha)$ 는 0.756으로 가장 높았으며 열손실계수인 $F_R U_L$ 는 41.83으로 나타났다. 물을 사용하였을 때 열획득계수인 $F_R(\tau\alpha)$ 는 0.549이며 열손실계수인 $F_R U_L$ 는 20.61로 가장 낮게 나타남을 확인하였다. 진공관형 태양열 집열기에서 작동유체로 물과 MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 성능 특성의 경향은 평관형 태양열 집열기와 비슷하게 나타나는 것을 확인하였다.



(a) Flat plate solar collector



(b) Evacuated tube solar collector

Fig. 4.1 Efficiency of the solar collector depending on the concentration of the MWCNT nanofluid (MWCNT nanoparticle size: 20 nm, $\dot{m}=0.047$ kg/s)

Table 4.1 Efficiency parameters in the flat plate solar collector using MWCNT nanofluid and water

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
MWCNT nanofluid (20 nm, 0.001vol%)	0.788	52.99	0.92
MWCNT nanofluid (20 nm, 0.003vol%)	0.825	53.23	0.89
MWCNT nanofluid (20 nm, 0.005vol%)	0.875	50.24	0.86
MWCNT nanofluid (20 nm, 0.007vol%)	0.849	52.05	0.91
Water	0.627	21.64	0.88

Table 4.2 Efficiency parameters in the evacuated tube solar collector using MWCNT nanofluid

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
MWCNT nanofluid (20 nm, 0.001vol%)	0.629	43.35	0.91
MWCNT nanofluid (20 nm, 0.003vol%)	0.675	42.99	0.93
MWCNT nanofluid (20 nm, 0.005vol%)	0.756	41.83	0.93
MWCNT nanofluid (20 nm, 0.007vol%)	0.734	43.98	0.96
Water	0.549	20.61	0.98

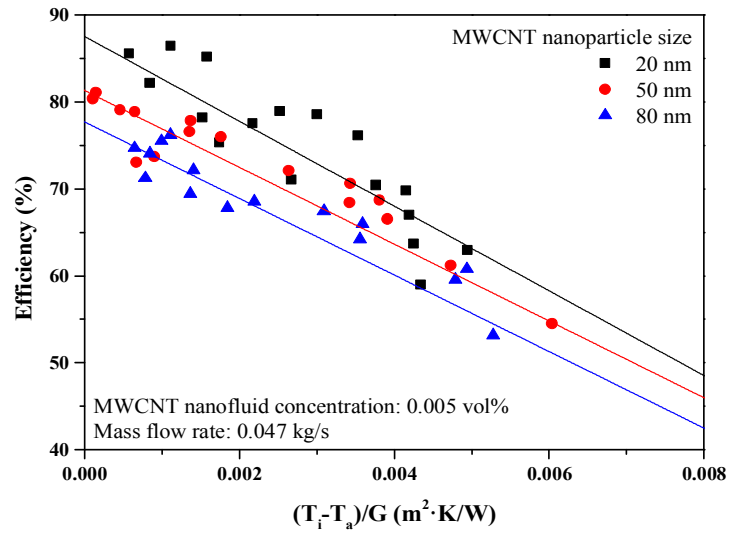
2. MWCNT 나노입자 크기에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰

Fig. 4.2는 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 나노입자 크기 변화에 따른 성능을 보여준다. 이때 MWCNT 나노유체의 농도는 0.005vol%를 사용하였으며 작동유체의 질량유량은 0.047 kg/s를 사용하여 실험을 진행하였다. Fig. 4.2(a)는 평판형 태양열 집열기에 작동유체로 MWCNT 나노입자의 크기가 20 nm, 50 nm, 80 nm인 0.005vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 집열기의 성능을 보여주고 있다. 평판형 태양열 집열기에 작동유체로 크기가 각각 20 nm, 50 nm, 80 nm인 0.005vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율은 각각 87.5%, 81.3%, 77.7%로 나타났다. 20 nm 크기의 MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 가장 효율이 높았으며 이는 50 nm와 80 nm 크기의 MWCNT 나노유체를 사용하였을 때보다 효율이 각각 7.6%와 12.6% 향상됨을 확인하였다. 일반적으로 나노입자의 크기가 작을수록 나노유체의 열전도도가 증가하게 되고, 나노유체 내의 브라운 운동이 활발해져 열전달 성능이 증가하게 되어 태양열 집열기의 성능이 향상되는 것으로 판단된다. 따라서 크기가 가장 작은 20 nm-0.005vol% MWCNT 나노유체에서 가장 높은 효율을 보인 것을 확인할 수 있다.

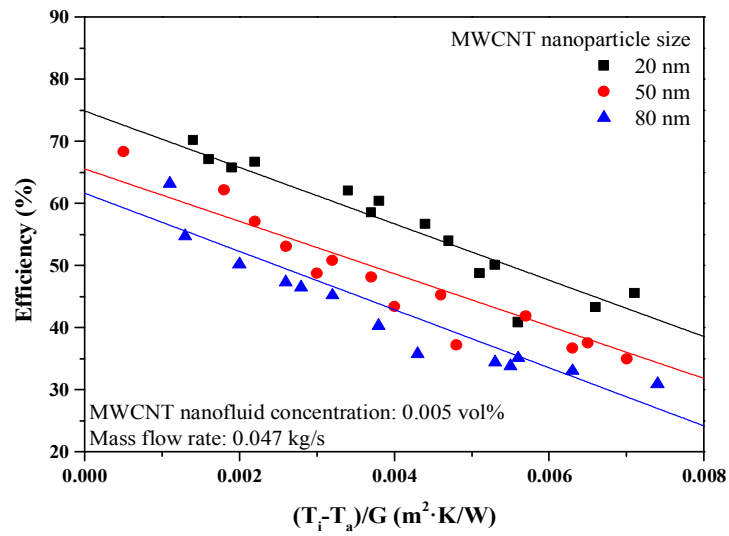
Fig. 4.2(b)는 진공관 태양열 집열기에 작동유체로 MWCNT 나노입자의 크기 변화에 따른 성능을 보여주고 있다. 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 크기가 각각 20 nm, 50 nm, 80 nm인 0.005vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율은 각각 75.6%, 65.6%, 61.6%로 나타났다. 진공관형 태양열 집열기에 20 nm 크기의 MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 효율이 가장 높았으며 50 nm와 80 nm 크기의 MWCNT 나노유체를 사용하였을 때보다 효율이 각각 15.2%와 22.7% 향상됨을 확인하였다.

Table 4.3과 Table 4.4는 평판형과 진공관형 태양열 집열기의 MWCNT 나노입자 크기 변화에 따른 효율과 관련된 매개변수를 보여준다. 평판형 태양열 집열기의 경우 20 nm 크기의 MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 열획득계수인 $F_R(\tau\alpha)$ 가 0.875로 가장 높았으며 80 nm 크기의 MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 열획득

계수가 0.777로 가장 낮음을 확인하였다. 열손실계수인 $F_R U_L$ 는 80 nm-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 44.03으로 가장 낮았으며 20 nm-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 50.24로 가장 높은 것을 확인하였다. 진공관형 태양열 집열기에서도 평판형 태양열 집열기와 비슷한 경향을 보인 것을 확인하였으며 열획득계수는 20 nm-MWCNT 나노유체를 사용할 때 0.756으로 가장 높았으며 80 nm-MWCNT 나노유체를 사용할 때 0.616으로 가장 낮은 값을 가지는 것을 확인하였다.



(a) Flat plate solar collector



(b) Evacuated tube solar collector

Fig. 4.2 Variation of thermal efficiency in the solar collector for various MWCNT nanoparticle sizes (Concentration: 0.005vol%, $\dot{m} = 0.047$ kg/s)

Table 4.3 Efficiency parameters in the flat plate solar collector according to MWCNT nanoparticle sizes

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
MWCNT nanofluid (20 nm, 0.005vol%)	0.875	50.24	0.86
MWCNT nanofluid (50 nm, 0.005vol%)	0.813	44.18	0.89
MWCNT nanofluid (80 nm, 0.005vol%)	0.777	44.03	0.88

Table 4.4 Efficiency parameters in the evacuated tube solar collector according to MWCNT nanoparticle sizes

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
MWCNT nanofluid (20 nm, 0.005vol%)	0.756	41.83	0.93
MWCNT nanofluid (50 nm, 0.005vol%)	0.656	42.18	0.86
MWCNT nanofluid (80 nm, 0.005vol%)	0.616	46.85	0.90

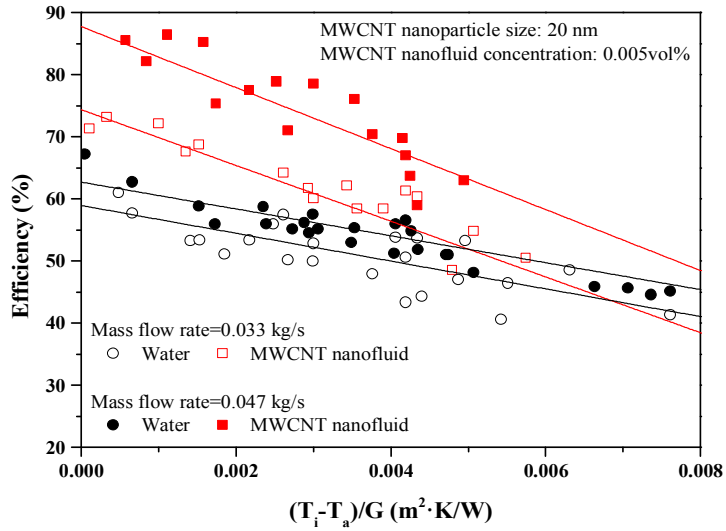
3. MWCNT 나노유체의 질량유량 변화에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰

Fig. 4.3은 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 물과 20 nm-0.005vol% MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 작동유체의 질량유량 변화에 따른 집열기의 성능을 보여주고 있다. Fig. 4.3(a)은 평판형 태양열 집열기에 물과 MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 작동유체의 질량유량 변화에 따른 성능을 보여준다. 이때 작동유체의 질량유량은 0.033 kg/s와 0.047 kg/s를 사용하였으며, MWCNT 나노입자의 크기는 20 nm이고 농도는 0.005vol%를 사용하여 실험을 진행하였다. 평판형 태양열 집열기의 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 물과 MWCNT 나노유체의 최대 효율은 각각 62.7%와 87.5%로 나타났다. 그리고 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 물과 MWCNT 나노유체의 최대 효율은 각각 58.9%와 74.3%로 나타났다. 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 증가함에 따라 물과 MWCNT 나노유체의 효율은 각각 6.5%와 17.7% 향상됨을 확인하였다. 작동유체의 질량유량이 증가하였을 때 평판형 태양열 집열기의 성능도 증가함을 보였다. 이는 작동유체의 질량유량이 증가함에 따라 평판형 태양열 집열기의 입구와 출구에서 작동유체의 온도 차이가 감소하지만, 집열기 전체에서 작동유체와 집열관의 온도 차이가 증가하게 되고 이에 따라 작동유체로의 열전달량이 증가하게 되어 많은 열량이 효과적으로 전달되기 때문에 성능이 향상된 것으로 판단된다. 반면 평판형 태양열 집열기의 작동유체의 질량유량 증가는 집열기 출구에서 작동유체의 온도를 감소시킴으로써 작동유체의 출구측 태양열 집열기의 엑서지 및 유용도는 다소 감소하게 된다.

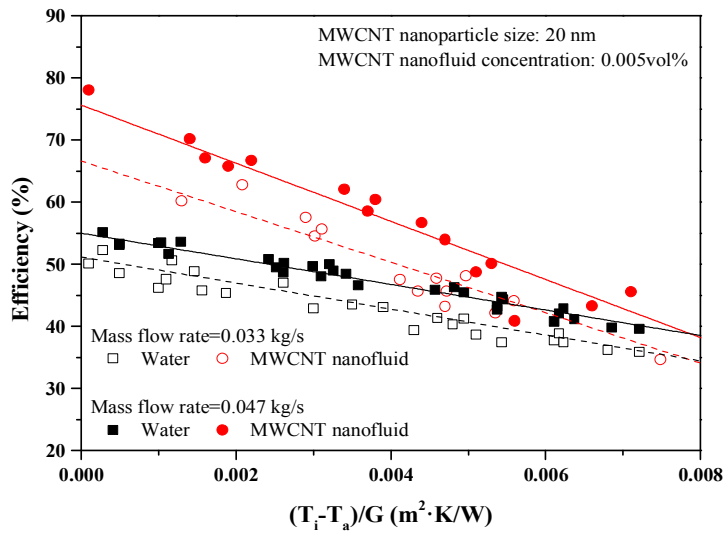
Fig. 4.3(b)은 진공관형 태양열 집열기에 물과 MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 작동유체의 질량유량 변화에 따른 성능을 보여준다. 이때 작동유체의 질량유량은 0.033 kg/s와 0.047 kg/s를 사용하였으며, MWCNT 나노입자의 크기는 20 nm이고 농도는 0.005vol%를 사용하여 실험을 진행하였다. 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 물과 MWCNT 나노유체의 최대 효율은 각각 54.9%와 75.6%이며, 질량유량이 0.033 kg/s일 때 물과 MWCNT 나노유체의 최대 효율은 각각 51.2%와 66.6%

로 나타났다. 진공관형 태양열 집열기에서 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 증가함에 따라 물과 MWCNT 나노유체의 효율은 각각 7.2%와 13.5% 향상됨을 확인하였다.

Table 4.5와 Table 4.6은 평판형과 진공관형 태양열 집열기의 작동유체의 질량유량 변화에 따른 효율과 관련된 매개변수를 보여준다. 평판형 태양열 집열기의 경우 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 물과 MWCNT 나노유체의 열획득계수인 $F_R(\tau\alpha)$ 가 각각 0.627와 0.875이며, 열손실계수인 $F_R U_L$ 은 각각 21.64와 50.24로 나타났다. 반면에 질량유량이 0.033 kg/s일 때 물과 MWCNT 나노유체의 열획득계수인 $F_R(\tau\alpha)$ 은 각각 0.589와 0.743이며, 열손실변수인 $F_R U_L$ 은 22.36와 44.91로 나타났다. 물과 MWCNT 나노유체의 열획득계수는 질량유량이 0.033 kg/s를 사용하였을 때보다 0.047 kg/s를 사용하였을 때 더 큰 것을 확인하였다. 진공관형 태양열 집열기의 경우 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 물과 MWCNT 나노유체의 열획득계수인 $F_R(\tau\alpha)$ 가 각각 0.549와 0.756이며, 열손실변수인 $F_R U_L$ 은 각각 20.61와 41.83으로 나타났다. 반면에 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 물과 MWCNT 나노유체의 열획득계수인 $F_R(\tau\alpha)$ 은 각각 0.512와 0.666이며, 열손실 변수인 $F_R U_L$ 은 20.93와 40.71로 나타났다.



(a) Flat plate solar collector



(b) Evacuated tube solar collector

Fig. 4.3 Variation of thermal efficiency in the solar collector as a function of mass flow rate of working fluid
 (MWCNT particle size: 20 nm, Concentration: 0.005vol%)

Table 4.5 Efficiency parameters in the flat plate solar collector for different mass flow rates (MWCNT nanoparticle size: 20 nm, Concentration: 0.005vol%)

Mass flow rate (kg/s)	Working fluid	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
0.033	MWCNT nanofluid	0.743	44.91	0.87
	Water	0.589	22.36	0.86
0.047	MWCNT nanofluid	0.875	50.24	0.86
	Water	0.627	21.64	0.88

Table 4.6 Efficiency parameters in the evacuated tube solar collector for different mass flow rates (MWCNT nanoparticle size: 20 nm, Concentration: 0.005vol%)

Mass flow rate (kg/s)	Working fluid	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
0.033	MWCNT nanofluid	0.666	40.71	0.91
	Water	0.512	20.93	0.89
0.047	MWCNT nanofluid	0.756	41.83	0.93
	Water	0.549	20.61	0.98

제 2 절 Fe₃O₄ 나노유체 적용 태양열 집열기의 성능 실험 결과

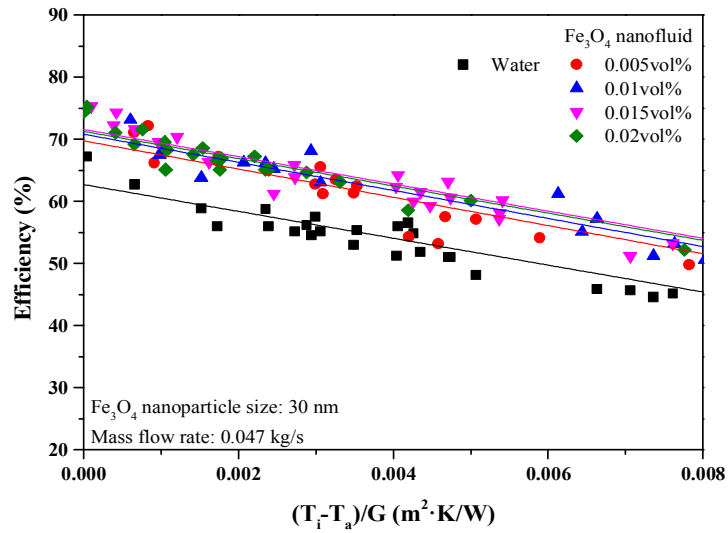
1. Fe₃O₄ 나노유체 농도 변화에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰

본 연구에서는 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 물과 Fe₃O₄ 나노유체를 적용하여 실험을 진행하였다. 작동유체인 Fe₃O₄ 나노유체의 경우 농도 변화에 따른 태양열 집열기의 성능을 분석하였다. 이때 사용된 Fe₃O₄ 나노입자의 크기는 30 nm이며, 작동유체의 질량유량은 0.047 kg/s를 사용하여 실험을 진행하였다. 그리고 태양열 집열기에 작동유체로 사용된 Fe₃O₄ 나노유체의 효율을 기본유체인 물과 비교 분석하였다. Fig. 4.4는 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 물과 Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 성능을 보여준다. Fig. 4.4(a)는 평판형 태양열 집열기의 성능을 나타낸다. 평판형 태양열 집열기에 Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 물을 사용하였을 때보다 효율이 전반적으로 향상되는 것을 확인하였다. 물을 사용하였을 때 최대 효율은 62.7%로 나타났으며 0.015vol%-Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율은 71.6%로 가장 높게 나타났다. 0.005vol%-, 0.01vol%-, 0.02vol%-Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율은 각각 69.7%, 70.8%, 71.2%로 나타났다. 0.015vol%-Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 물을 사용하였을 때보다 효율이 약 14.2% 향상됨을 확인하였다. 0.005vol%-, 0.01vol%-, 0.02vol%-Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 물을 사용하였을 때보다 효율이 각각 11.2%, 12.9%, 13.6% 향상됨을 확인하였다.

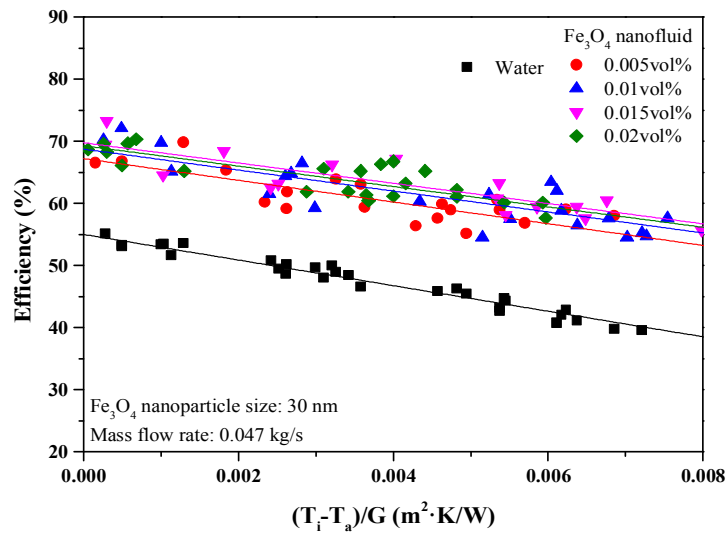
Fig. 4.4(b)는 진공관형 태양열 집열기에 물과 Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 성능을 보여준다. 진공관형 태양열 집열기에 물을 사용하였을 때 최대 효율은 54.9%이며 0.015vol%-Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율은 69.8%로 가장 높게 나타났다. 0.005vol%-, 0.01vol%-, 0.02vol%-Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율은 각각 67.2%, 68.7%, 69.2%로 나타났다. 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 0.015vol%-Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 물을 사용하였을 때보다 효

율이 약 27.1% 향상됨을 확인하였다. 0.005vol%-, 0.01vol%-, 0.02vol%-Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 물을 사용하였을 때보다 효율이 각각 22.4%, 25.1%, 26.1% 향상됨을 확인하였다. Fe₃O₄ 나노유체를 적용하는 경우 진공관형 태양열 집열기에서 물 대비 효율 향상 정도가 상대적으로 더 큰 것으로 나타났다.

Table 4.7과 Table 4.8은 평판형과 진공관형 태양열 집열기의 물과 Fe₃O₄ 나노유체 농도 변화에 따른 효율과 관련된 매개변수를 보여준다. 평판형 태양열 집열기에 0.015vol%-Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 0.716으로 가장 높은 열획득계수를 보였으며 물을 사용하였을 때 열획득계수가 0.627로 가장 낮게 나타났다. 물과 Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 열손실계수의 범위는 21~22로 나타나는 것을 확인하였다. 진공관형 태양열 집열기에서도 0.015vol%-Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 열획득계수가 0.698로 가장 높게 나타났으며 물을 사용하였을 때 열획득계수가 0.549로 가장 낮게 나타남을 확인하였다. 진공관 태양열 집열기에 물과 Fe₃O₄ 나노유체를 적용하였을 때 열손실계수의 범위는 16~20로 다양하게 나타남을 확인하였다. Fe₃O₄ 나노유체를 태양열 집열기에 적용하는 경우 평판형 태양열 집열기의 열손실계수가 진공관형 태양열 집열기에 비하여 크게 나타나 전반적으로 효율의 감소 폭이 큼을 확인할 수 있다.



(a) Flat plate solar collector



(b) Evacuated tube solar collector

Fig. 4.4 Efficiency of solar collector depending on the concentration of the Fe₃O₄ nanofluid concentration (Fe₃O₄ nanoparticle size: 30 nm, $\dot{m}=0.047$ kg/s)

Table 4.7 Efficiency parameters in the flat plate solar collector using Fe₃O₄ nanofluid and water

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Fe ₃ O ₄ nanofluid (30 nm, 0.005vol%)	0.697	22.75	0.89
Fe ₃ O ₄ nanofluid (30 nm, 0.01vol%)	0.708	22.61	0.90
Fe ₃ O ₄ nanofluid (30 nm, 0.015vol%)	0.716	21.92	0.89
Fe ₃ O ₄ nanofluid (30 nm, 0.02vol%)	0.712	21.93	0.90
Water	0.627	21.64	0.88

Table 4.8 Efficiency parameters in the evacuated tube solar collector using Fe₃O₄ nanofluid and water

Working fluid (particle size, concentration)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Fe ₃ O ₄ nanofluid (30 nm, 0.005vol%)	0.672	17.46	0.93
Fe ₃ O ₄ nanofluid (30 nm, 0.01vol%)	0.687	16.86	0.89
Fe ₃ O ₄ nanofluid (30 nm, 0.015vol%)	0.698	16.33	0.92
Fe ₃ O ₄ nanofluid (30 nm, 0.02vol%)	0.692	16.42	0.93
Water	0.549	20.61	0.98

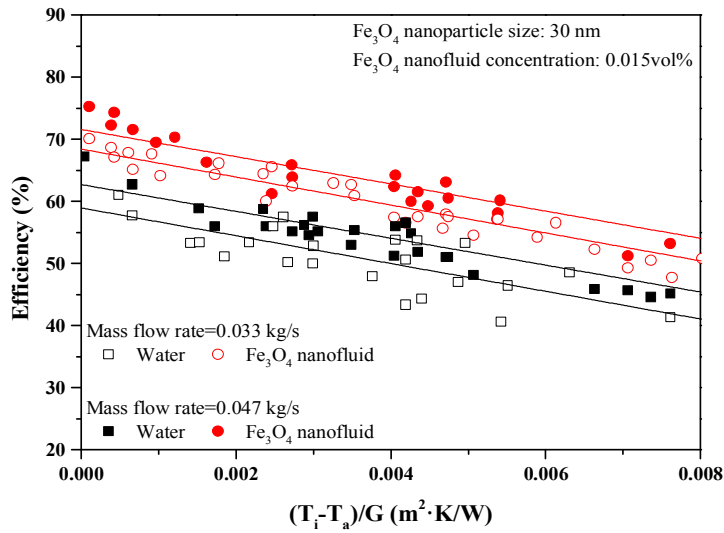
2. Fe₃O₄ 나노유체 질량유량 변화에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰

Fig. 4.5는 평판형과 진공관형 태양열 집열기의 물과 Fe₃O₄ 나노유체를 작동유체로 사용하였을 때 질량유량 변화에 따른 성능을 보여준다. Fig. 4.5(a)는 평판형 태양열 집열기에 물과 Fe₃O₄ 나노유체를 적용하였을 때 질량유량 변화에 따른 성능을 보여준다. 이때 작동유체의 질량유량은 0.033 kg/s와 0.047 kg/s를 사용하였으며 Fe₃O₄ 나노유체의 농도는 0.015vol%를 사용하여 실험을 진행하였다. 평판형 태양열 집열기에 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 물과 Fe₃O₄ 나노유체의 최대 효율은 각각 58.9%와 68.4%로 나타났다. 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s로 증가하였을 때 물과 Fe₃O₄ 나노유체의 최대 효율은 62.7%와 71.6%로 증가함을 확인하였다. 평판형 태양열 집열기의 물과 Fe₃O₄ 나노유체의 질량유량이 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 증가함에 따라 효율은 각각 4.7%와 6.5% 향상됨을 확인하였다.

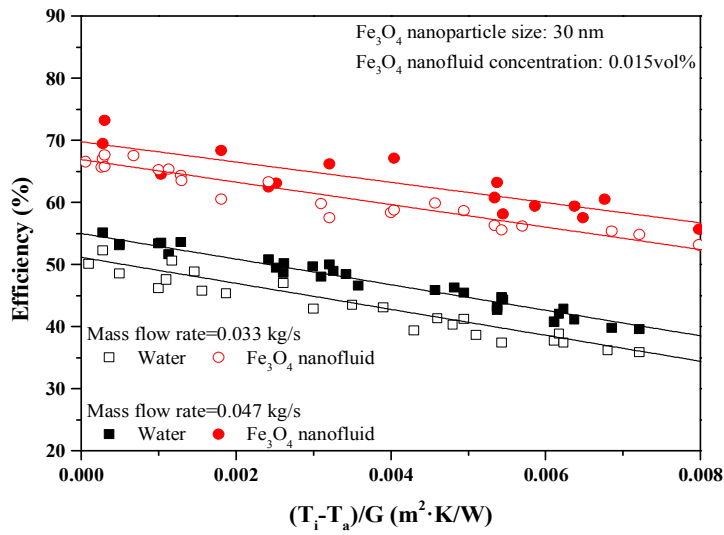
Fig. 4.5(b)는 진공관형 태양열 집열기의 물과 Fe₃O₄ 나노유체를 적용하였을 때 질량유량 변화에 따른 성능을 보여준다. 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 물과 Fe₃O₄ 나노유체의 최대 효율은 각각 51.1%와 66.9%로 나타났다. 질량유량이 0.047 kg/s일 때 물과 Fe₃O₄ 나노유체의 최대 효율은 각각 54.9%와 69.8%로 나타났다. 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 증가함에 따라 물과 Fe₃O₄ 나노유체의 효율은 각각 7.4%와 4.3% 향상되는 것을 확인하였다.

Table 4.9와 Table 4.10은 평판형과 진공관형 태양열 집열기의 물과 Fe₃O₄ 나노유체 질량유량 변화에 따른 집열기의 효율과 관련된 매개변수를 보여준다. 평판형 태양열 집열기의 경우 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 물과 Fe₃O₄ 나노유체의 열획득계수는 0.716와 0.627로 나타났으며 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 물과 Fe₃O₄ 나노유체의 열획득계수는 0.589와 0.684로 나타났다. 평판형 태양열 집열기의 물과 Fe₃O₄ 나노유체의 열손실계수 범위는 16~20으로 나타났다. 진공관형 태양열 집열기의 경우 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 물과 Fe₃O₄ 나노유체의 열획득계수는 0.549와 0.698로 나타났으며 0.033 kg/s일 때 물과 Fe₃O₄ 나노유체의 열획득계수는 0.511와 0.669로 나타났다. 그리고 진공관형 태양열 집열

기의 열손실계수의 범위는 16~20으로 나타났다.



(a) Flat plate solar collector



(b) Evacuated tube solar collector

Fig. 4.5 Variation of thermal efficiency in the solar collector as a function of mass flow rate of working fluid (Fe_3O_4 particle size: 30 nm, Concentraion: 0.015vol%)

Table 4.9 Efficiency parameters in the flat plate solar collector for different mass flow rates (Fe_3O_4 particle size: 30 nm, Concentration: 0.015vol%)

Mass flow rate (kg/s)	Working fluid	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
0.033	Fe_3O_4 nanofluid	0.684	22.51	0.92
	Water	0.589	22.36	0.88
0.047	Fe_3O_4 nanofluid	0.716	21.92	0.89
	Water	0.627	21.64	0.88

Table 4.10 Efficiency parameters in the evacuated tube solar collector for different mass flow rates (Fe_3O_4 particle size: 30 nm, Concentration: 0.015vol%)

Mass flow rate (kg/s)	Working fluid	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
0.033	Fe_3O_4 nanofluid	0.669	18.11	0.96
	Water	0.511	20.93	0.89
0.047	Fe_3O_4 nanofluid	0.698	16.33	0.92
	Water	0.549	20.61	0.98

제 3 절 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체 적용 태양열 집열기의 성능 실험 결과

1. MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체 농도 변화에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰

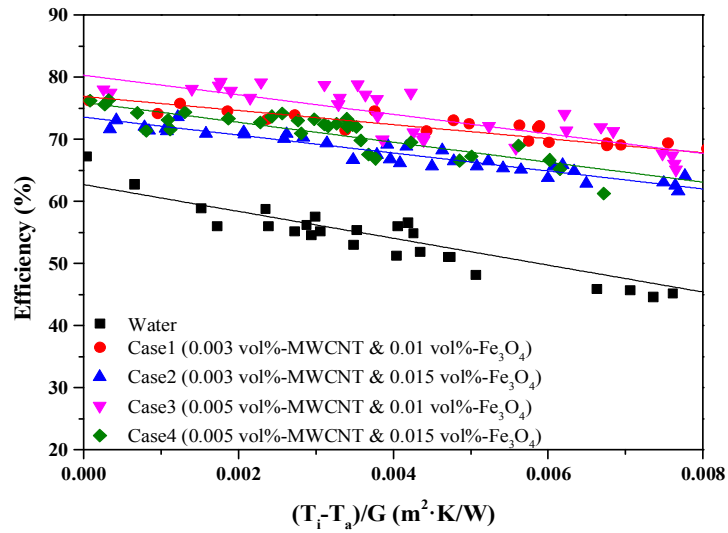
본 연구에서는 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 적용하여 실험을 진행하였으며 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체는 4가지 Case로 제작하여 실험을 진행하였다. 이때 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체 제작에 사용된 MWCNT와 Fe₃O₄ 나노유체의 농도는 각각 최대 효율을 보인 농도(0.005vol%-MWCNT, 0.015vol%-Fe₃O₄)와 분산안정성을 고려하여 최대 효율을 보인 농도보다 한 단계 낮은 농도(0.003vol%-MWCNT, 0.01vol%-Fe₃O₄)를 사용하였다. 사용된 4가지 Case는 다음과 같이 Case1 (0.003vol%-MWCNT & 0.01vol%-Fe₃O₄), Case2 (0.003vol%-MWCNT & 0.015vol%-Fe₃O₄), Case3 (0.005vol%-MWCNT & 0.01vol%-Fe₃O₄), Case4 (0.005vol%-MWCNT & 0.015vol%-Fe₃O₄)를 사용하였다. 사용된 MWCNT와 Fe₃O₄ 나노입자의 크기는 각각 20 nm와 30 nm를 사용하였다.

Fig. 4.6은 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 적용하였을 때 성능 변화를 보여준다. Fig. 4.6(a)은 평판형 태양열 집열기에 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 적용하였을 때 집열기의 성능을 보여준다. 물을 사용하였을 때보다 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 적용하였을 때 집열기의 효율이 크게 향상됨을 확인하였다. Case3을 평판형 태양열 집열기에 적용하였을 때 80.3%로 가장 높은 최대 효율이 나타났으며 물을 적용하였을 때보다 효율이 약 28.1% 향상됨을 확인하였다. Case1, Case2, Case4를 적용하였을 때 최대 효율은 각각 76.9%, 73.5%, 75.9%로 나타났으며 물을 적용하였을 때보다 집열기의 효율이 각각 22.6%, 17.2%, 21.1%씩 향상됨을 확인하였다. 그리고 각각의 나노유체별 최적의 농도인 0.005vol%-MWCNT와 0.015vol%-Fe₃O₄ 나노유체를 혼합한 Case4보다 Case3을 사용할 때 효율이 증가함을 확인하였다. 이는 Fe₃O₄ 나노유체의 농도가

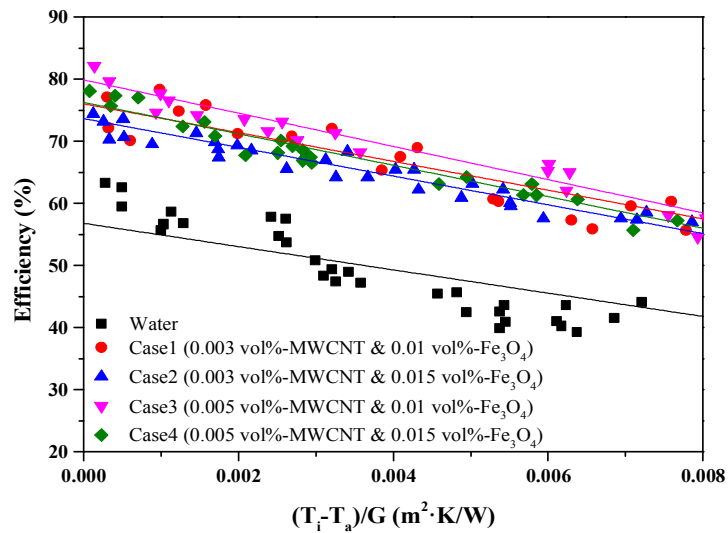
높아짐에 따라 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체의 분산안정성이 감소되고 이에 열 전달 및 흡수력이 감소하기 때문에 집열기의 효율이 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 4.6(b)은 진공관형 태양열 집열기에 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 적용하였을 때 성능을 보여준다. 진공관형 태양열 집열기는 평판형 태양열 집열기의 성능과 경향이 비슷한 것을 확인하였다. 진공관형 태양열 집열기에 Case3을 적용하였을 때 79.8%로 가장 높은 효율을 보였으며 이는 물을 적용하였을 때보다 45.4% 향상됨을 확인하였다. 그리고 Case1, Case2, Case4를 진공관형 태양열 집열기에 적용하였을 때 효율은 각각 76.1%, 73.6%, 76.2%로 나타났으며 물을 사용하였을 때보다 효율이 각각 38.6%, 34.1%, 38.8% 향상됨을 확인하였다. 또한 진공관형 태양열 집열기에 Case3을 사용하였을 경우 Case4를 사용하였을 때보다 집열기의 효율이 약 4.7% 향상됨을 확인하였다.

Table 4.11과 Table 4.12는 평판형과 진공관형 태양열 집열기의 물과 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체의 효율과 관련된 매개변수를 보여준다. 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 Case3을 사용하였을 때 열획득계수가 각각 0.803와 0.798로 가장 높게 나타났으며 열손실계수는 각각 15.74와 26.77로 나타났다. 그리고 평판형 태양열 집열기에 Case1, Case2, Case4를 사용하였을 때 열획득계수는 각각 0.769, 0.735, 0.759로 나타났으며 열손실계수는 각각 11.35, 14.45, 16.08로 나타났다. 진공관형 태양열 집열기에 Case1, Case2, Case4를 사용하였을 때 열획득계수는 각각 0.761, 0.736, 0.762로 나타났으며 열손실계수는 각각 23.16, 23.14, 25.34로 나타났다.



(a) Flat plate solar collector



(b) Evacuated tube solar collector

Fig. 4.6 Efficiency of the solar collector depending on the concentration of the MWCNT-Fe₃O₄ binary nanofluid and water ($\dot{m}=0.047$ kg/s)

Table 4.11 Efficiency parameters in the flat plate solar collector using the MWCNT-Fe₃O₄ binary nanofluid and water

Working fluid	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Case 1 (0.003vol%-MWCNT & 0.01vol% Fe ₃ O ₄)	0.769	11.35	0.92
Case 2 (0.003vol%-MWCNT & 0.015vol% Fe ₃ O ₄)	0.735	14.45	0.94
Case 3 (0.005vol%-MWCNT & 0.01vol% Fe ₃ O ₄)	0.803	15.74	0.89
Case 4 (0.005vol%-MWCNT & 0.015vol% Fe ₃ O ₄)	0.759	16.08	0.86
Water	0.627	21.64	0.88

Table 4.12 Efficiency parameters in the evacuated tube solar collector using the MWCNT-Fe₃O₄ binary nanofluid and water

Working fluid	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
Case 1 (0.003vol%-MWCNT & 0.01vol% Fe ₃ O ₄)	0.761	23.16	0.92
Case 2 (0.003vol%-MWCNT & 0.015vol% Fe ₃ O ₄)	0.736	23.14	0.92
Case 3 (0.005vol%-MWCNT & 0.01vol% Fe ₃ O ₄)	0.798	26.77	0.96
Case 4 (0.005vol%-MWCNT & 0.015vol% Fe ₃ O ₄)	0.762	25.34	0.95
Water	0.549	20.61	0.98

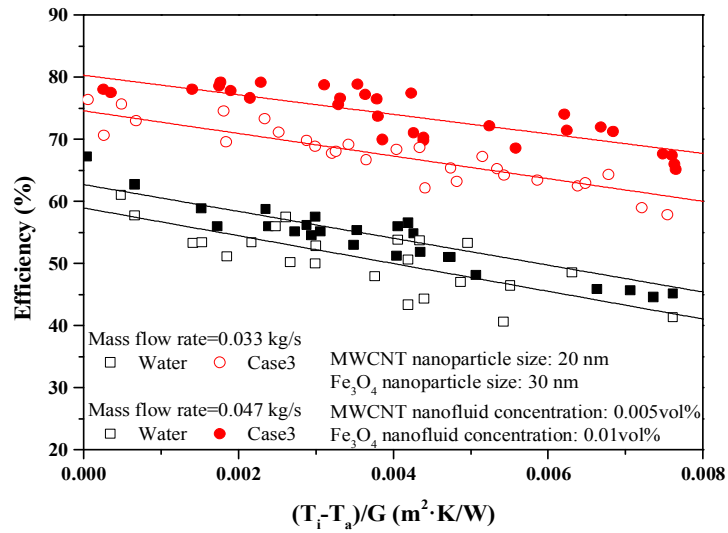
2. MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체 질량유량 변화에 따른 태양열 집열기의 성능 고찰

Fig. 4.7은 평판형과 진공관형 태양열 집열기의 작동유체 질량유량 변화에 따른 성능을 보여준다. Fig. 4.7(a)은 평판형 태양열 집열기에 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체의 질량유량 변화에 따른 성능을 보여준다. 이때 사용된 작동유체의 질량유량은 0.033 kg/s와 0.047 kg/s가 사용되었으며 Case3의 경우에 대하여 실험을 실시하였다. 평판형 태양열 집열기의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 Case3의 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체의 최대 효율은 74.5%로 나타났으며 0.047 kg/s일 때 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체의 최대 효율은 80.3%로 확인되었다. 이는 작동유체의 질량유량을 0.033 kg/s 사용하였을 때보다 0.047 kg/s를 사용하였을 때 집열기의 효율이 약 7.8% 향상됨을 확인하였다.

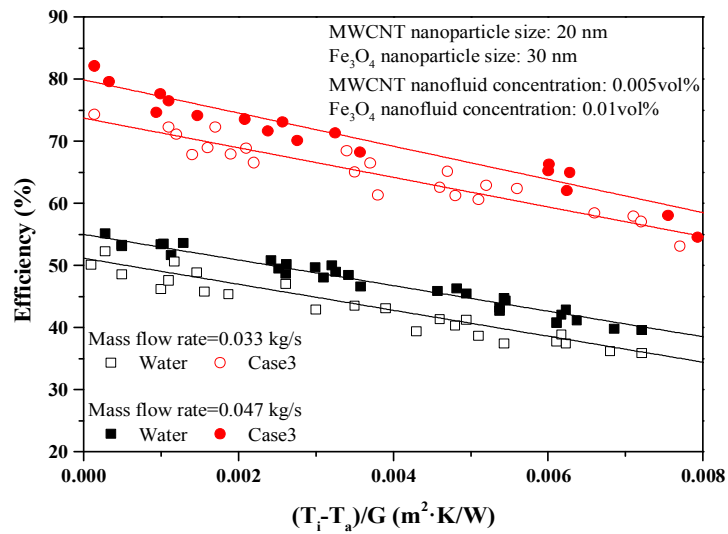
Fig. 4.7(b)은 진공관형 태양열 집열기에 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체의 질량유량 변화에 따른 성능을 보여준다. 진공관형 태양열 집열기의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체의 최대 효율은 73.7%로 나타났으며 0.047 kg/s일 때 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체의 최대 효율은 79.8%로 나타났다. 이때 작동유체의 질량유량을 0.033 kg/s 사용하였을 때보다 0.047 kg/s를 사용하였을 때 효율이 약 8.3% 향상됨을 확인하였다. 평판형과 진공관형 태양열 집열기에서 작동유체의 질량유량을 증가시킴에 따라 효율이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

Table 4.13과 Table 4.14는 평판형과 진공관형 태양열 집열기의 물과 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 적용하였을 때 집열기의 효율과 관련된 매개변수를 보여준다. 평판형 태양열 집열기의 경우 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 Case3인 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 적용하였을 때 열획득계수는 0.745로 나타났으며 열손실계수는 18.21로 나타났다. 그리고 작동유체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 평판형 태양열 집열기의 열획득계수는 0.803이고 열손실계수는 15.74로 확인되었다. 진공관형 태양열 집열기의 경우 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s일 때 열획득계수는 0.737이며 열손실계수는 23.85로 나타났다. 그리고 작동유

체의 질량유량이 0.047 kg/s일 때 열획득계수는 0.798이며 열손실계수는 26.77로 나타났다.



(a) Flat plate solar collector



(b) Evacuated tube solar collector

Fig. 4.7 Variation of thermal efficiency in the solar collector as a function of mass flow rate of working fluid (MWCNT&Fe₃O₄ particle size: 20 nm&30 nm, Concentraion: 0.005vol%&0.015vol%)

Table 4.13 Efficiency parameters in the flat plate solar collector for different mass flow rates (Case3: 0.005vol%-MWCNT & 0.015vol%-Fe₃O₄)

Mass flow rate (kg/s)	Working fluid	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
0.033	Case3	0.745	18.21	0.96
	Water	0.589	22.36	0.88
0.047	Case3	0.803	15.74	0.89
	Water	0.627	21.64	0.88

Table 4.14 Efficiency parameters in the evacuated tube solar collector for different mass flow rates (Case3: 0.005vol%-MWCNT & 0.015vol%-Fe₃O₄)

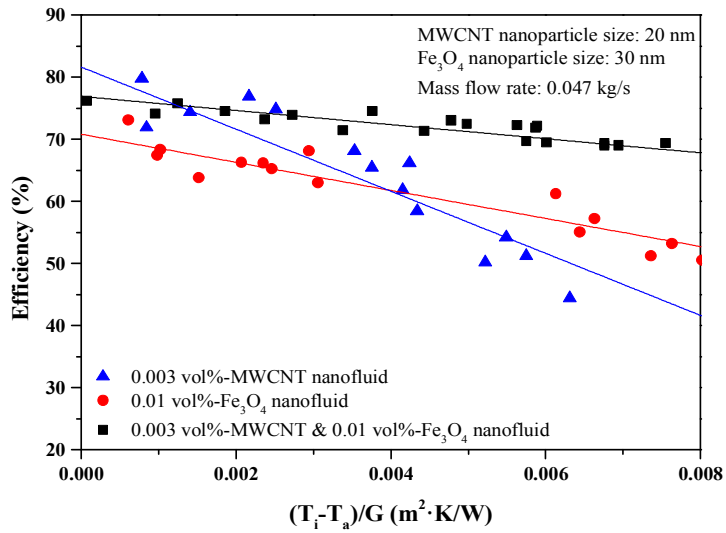
Mass flow rate (kg/s)	Working fluid	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$	R^2
0.033	Case3	0.737	23.85	0.92
	Water	0.511	20.93	0.89
0.047	Case3	0.798	26.77	0.96
	Water	0.549	20.61	0.98

3. MWCNT와 Fe₃O₄ 나노유체, MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체 적용에 따른 태양열 집열기의 성능 비교 분석

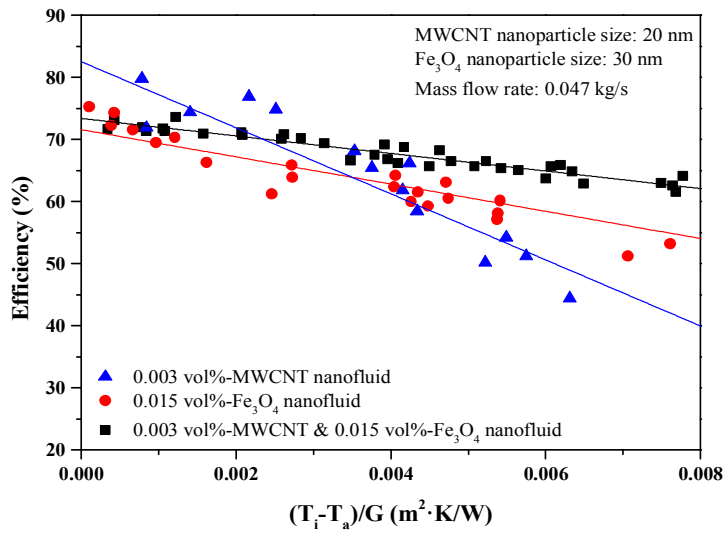
본 연구에서는 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 적용된 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체의 성능 특성을 분석하기 위하여 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체 제작에 사용된 MWCNT와 Fe₃O₄ 이성분 나노유체의 농도를 Case 별로 비교 분석하였다. Fig. 4.8은 평판형 태양열 집열기에 적용된 MWCNT, Fe₃O₄ 나노유체, MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 적용한 태양열 집열기의 성능을 비교하여 보여주고 있다. 이때 MWCNT, Fe₃O₄ 나노유체와 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 적용한 태양열 집열기의 성능이 가장 높았던 농도인 0.005vol%, 0.015vol%, Case3(0.005vol%-MWCNT & 0.01vol% Fe₃O₄)가 사용되었다. 평판형 태양열 집열기에 작동유체로 MWCNT, Fe₃O₄ 나노유체, MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 적용하였을 때 최대 효율은 각각 87.5%, 71.6%와 80.3%로 나타났다. 평판형 태양열 집열기에 작동유체로 MWCNT 나노유체를 적용하였을 경우 3가지 나노유체 중에서 가장 높은 최대 효율을 보이지만 저온 영역으로 갈수록 성능 곡선이 급격히 감소함을 확인할 수 있다. Fe₃O₄ 나노유체를 평판형 태양열 집열기에 작동유체로 적용하였을 경우 3가지 나노유체 중에서 가장 낮은 최대 효율을 가지지만 저온 영역에서도 높은 성능을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 저온 영역에서 MWCNT 나노유체의 급격한 성능 감소로 인하여 Fe₃O₄ 나노유체의 성능이 MWCNT 나노유체보다 성능이 역전되는 현상을 보인다. 이는 MWCNT 나노유체의 열손실이 Fe₃O₄ 나노유체보다 크기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 이러한 MWCNT 나노유체의 단점은 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 적용하여 극복할 수 있는데 평판형 태양열 집열기에 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 적용하였을 때 집열기의 효율이 향상됨을 확인하였으며 저온 영역에서 MWCNT와 Fe₃O₄ 나노유체를 적용하였을 때보다 높은 성능을 유지함을 확인하였다.

Fig. 4.9는 진공관형 태양열 집열기에 MWCNT, Fe₃O₄ 나노유체, MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 적용하였을 때 집열기의 성능을 보여준다. MWCNT, Fe₃O₄ 나노유체, MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 적용하였을 때 최대 효율은 각각

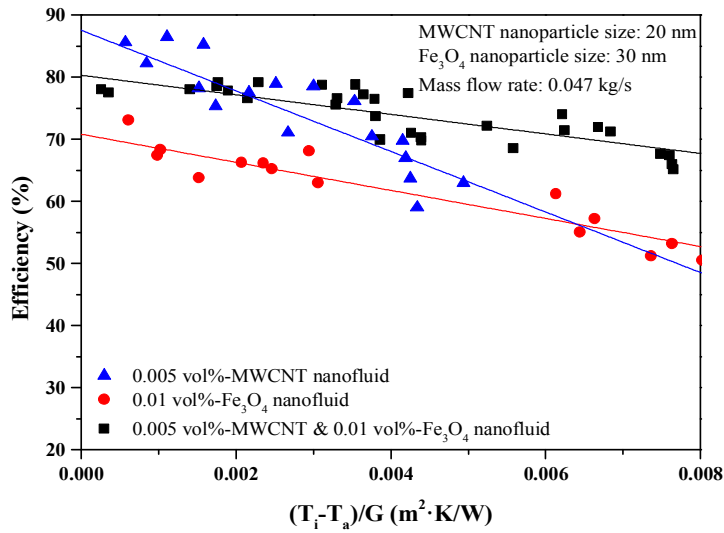
75.6%, 69.8%와 79.8%로 나타났다. 진공관형 태양열 집열기에 MWCNT와 Fe_3O_4 단일 나노유체를 작동유체로 적용하였을 경우 평판형 태양열 집열기와 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 하지만 MWCNT- Fe_3O_4 이성분 나노유체를 진공관형 태양열 집열기에 적용하였을 때 성능이 크게 향상됨을 확인하였다. 또한 고온과 저온 영역에서 높은 성능을 유지할 수 있기 때문에 평판형 태양열 집열기에 적용하였을 때보다 진공관형 태양열 집열기에 MWCNT- Fe_3O_4 이성분 나노유체를 적용하였을 때 더 높은 성능을 유지할 수 있을 것으로 판단된다.



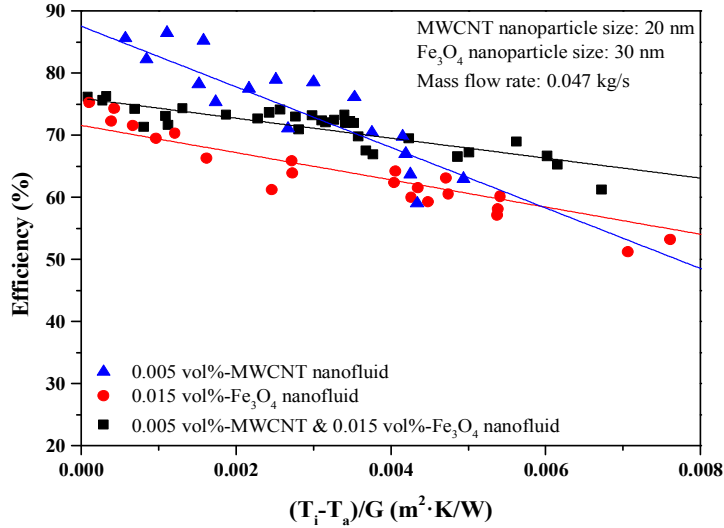
(a) Case1



(b) Case2

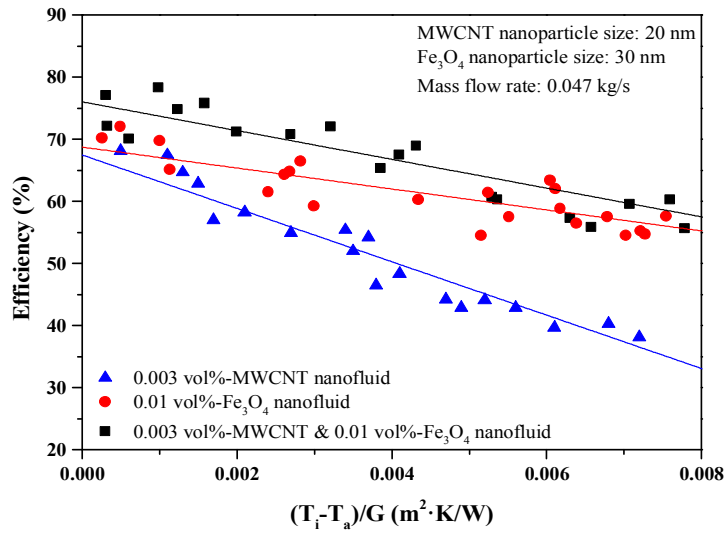


(c) Case3

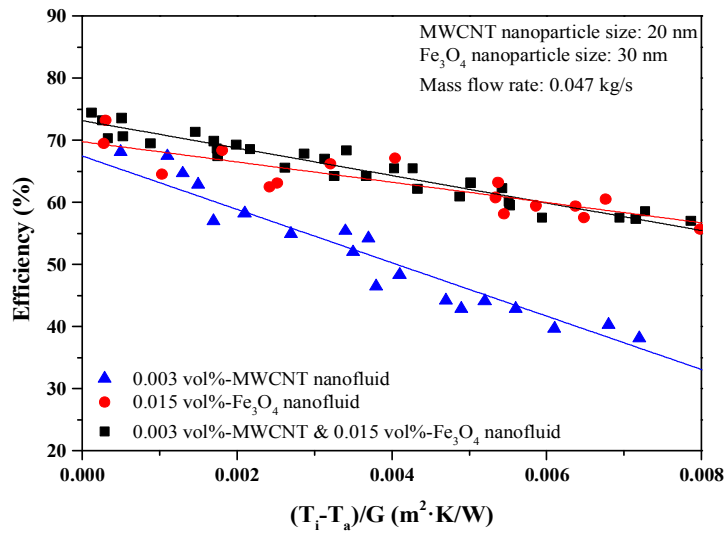


(d) Case4

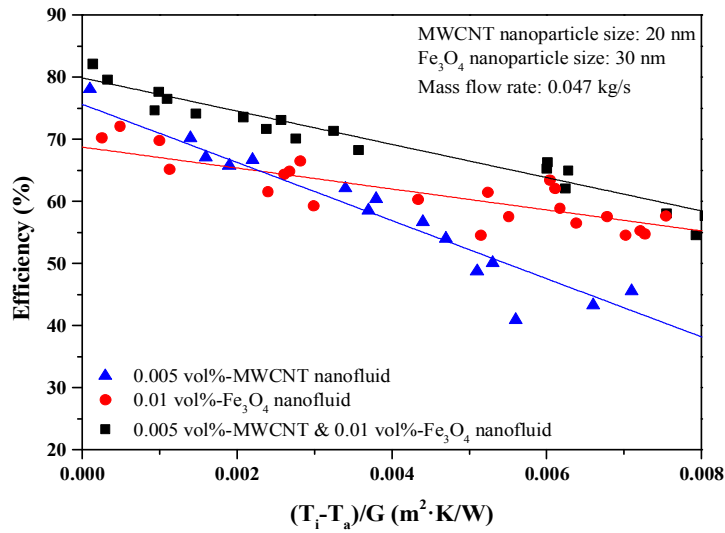
Fig. 4.8 Efficiency comparison for the flat plate solar collector using MWCNT, Fe_3O_4 nanofluid and MWCNT- Fe_3O_4 binary nanofluid



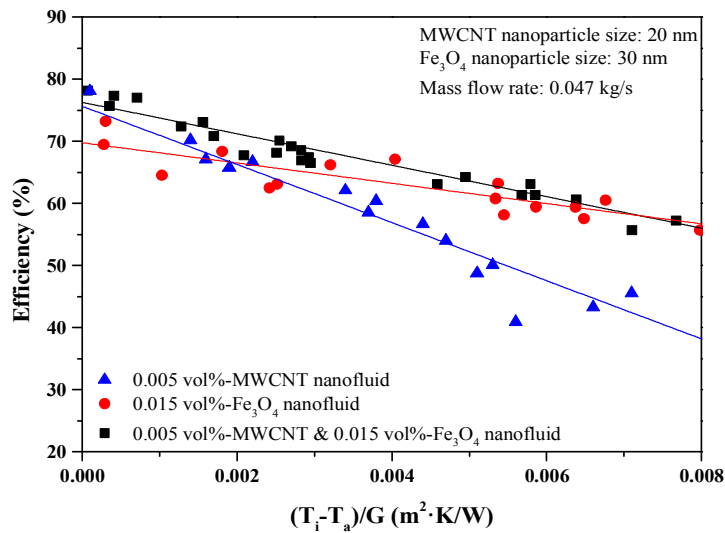
(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3



(d) Case4

Fig. 4.9 Efficiency comparison for the evacuated tube solar collector using MWCNT, Fe₃O₄ nanofluid and MWCNT-Fe₃O₄ binary nanofluid

제 5장 다양한 나노유체 적용 태양열 집열기의 운전변수에 따른 성능 민감도 고찰

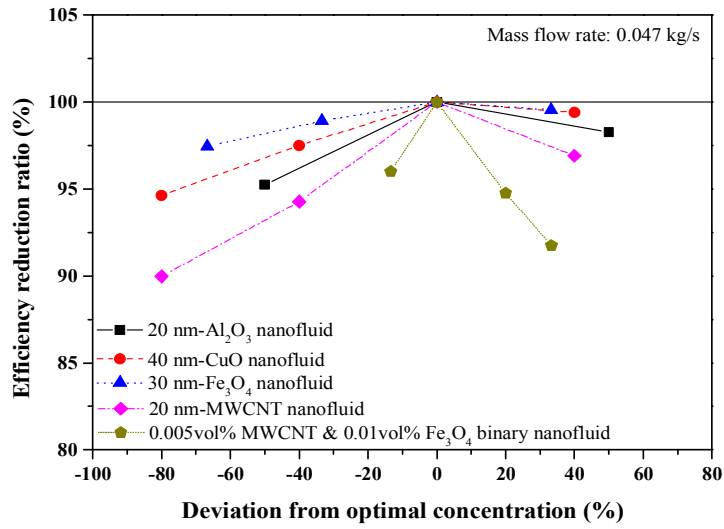
제 1 절 다양한 나노유체를 적용한 태양열 집열기의 운전변수 변화에 따른 성능 민감도 고찰

본 연구에서는 다양한 나노유체를 적용하여 평판형 태양열 집열기에 성능 특성을 분석하기 위하여 작동유체로 물, MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체, Al₂O₃, CuO, MWCNT, Fe₃O₄ 나노유체를 사용하여 실험을 진행하였으며 다양한 조건에서 성능의 변화를 고찰하여 변수변화에 따른 나노유체별 성능 민감도를 분석하였다.

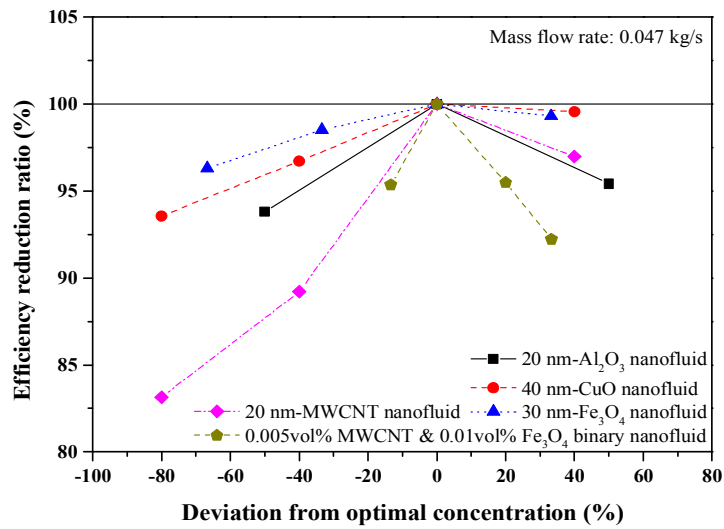
Fig. 5.1(a)은 평판형 태양열 집열기에 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체, Al₂O₃, CuO, MWCNT, Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율을 보인 농도를 기준으로 농도 변화에 따른 집열기의 효율 민감도를 비교하여 보여주고 있다. 평판형 태양열 집열기에 20 nm-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율을 보인 농도에서 농도를 80% 감소시켰을 때 효율 감소가 10.1%로 가장 많이 감소함을 보였다. 반면에 30 nm-Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율을 보인 농도에서 농도를 66.6% 감소시켰을 때 효율 감소가 2.5%로 가장 작게 감소함을 확인하였다. 그리고 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분, 20 nm-Al₂O₃, 40 nm-CuO 나노유체의 경우 최대 효율을 보인 농도에서 농도를 각각 14%, 50%, 80%를 감소시켰을 때 집열기의 효율이 4%, 4.8%, 5.3% 감소함을 확인하였다. Al₂O₃, CuO, Fe₃O₄, MWCNT 나노유체의 농도를 약 50% 감소되었을 때 평판형 태양열 집열기의 성능 감소폭은 각각 4.8%, 3.2%, 1.8%, 6.8%였으며, MWCNT-Fe₃O₄ 이성분, Al₂O₃, CuO, Fe₃O₄, MWCNT 나노유체의 농도가 약 35% 증가하였을 때 성능은 각각 5.2%, 1.4%, 0.6%, 0.5%, 3.1% 감소함을 예측할 수 있다. 평판형 태양열 집열기에 나노유체를 적용하여 실험한 결과, 최대 효율이 나타난 최적의 농도에서 나노유체의 농도를 감소시키거나 증가시키게 되면 효율이 감소함을 확인하였다. 특히 농도가 최적의 농도보다 증가한 경우 집열기의 성능이 감소되었는데, 이는 나노유체의 농도가 증가함에 따라 열전

도도는 증가하지만 나노유체의 분산안정성이 낮아짐에 따라 열전달 및 흡수력이 감소하기 때문이다. 또한 나노유체의 분산안정성 감소로 나노입자의 뭉침 현상이 증가하게 되어 나노입자의 상호작용이 감소하고 브라운 운동이 감소하여 전반적으로 대류열전달이 감소하고 이에 집열기의 효율이 증가하지 않고 감소함을 확인하였다.

Fig. 5.1(b)은 진공관형 태양열 집열기에 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체, Al₂O₃, CuO, MWCNT, Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율을 보인 농도를 기준으로 농도 변화에 따른 집열기의 효율 민감도를 비교하여 보여주고 있다. 진공관형 태양열 집열기에 20 nm-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율을 보인 농도에서 농도를 80% 감소시켰을 때 집열기의 효율 감소가 16.8%로 가장 많이 감소함을 보였으며 30 nm-Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율을 보인 농도에서 66% 감소시켰을 때 효율 감소가 3.7%로 가장 낮음을 확인하였다. 그리고 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분, 20 nm-Al₂O₃, 40 nm-CuO 나노유체의 경우 최대 효율을 보인 농도에서 농도를 각각 14%, 50%, 80%를 감소시켰을 때 효율이 4.6%, 6.2%, 6.4% 감소함을 확인하였다. 평판형과 진공관형 태양열 집열기에서도 20 nm-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 나노유체의 농도 변화에 따른 성능 민감도가 가장 크게 나타나는 것을 확인하였다.



(a) Flat plate solar collector



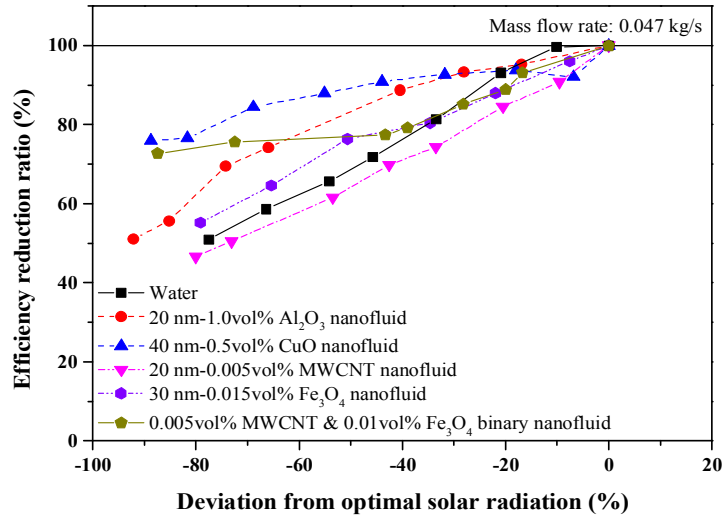
(b) Evacuated tube solar collector

Fig. 5.1 Efficiency reduction ratio according to the deviation from optimal concentration

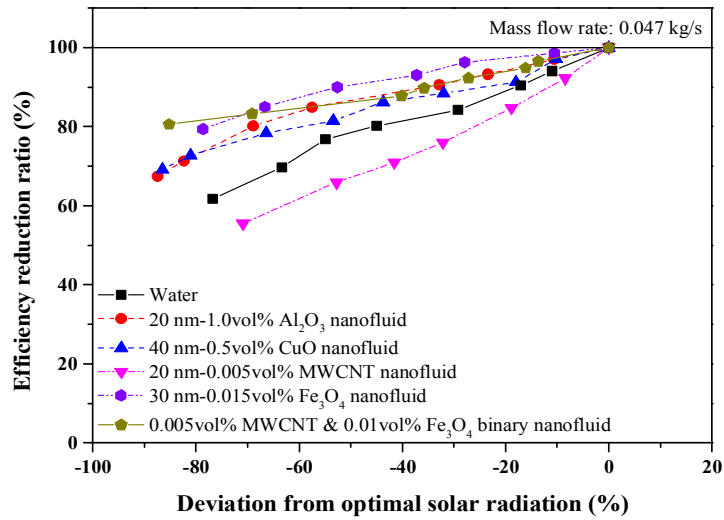
Fig. 5.2(a)는 평판형 태양열 집열기에 다양한 나노유체를 사용하였을 때 최대효율을 보인 일사량에서 일사량 변화율에 따른 평판형 태양열 집열기의 효율 민감도를 나타내었다. 평판형 태양열 집열기에 20 nm-0.005vol% MWCNT 나노유체의 경우 최대 효율을 보인 일사량에서 일사량이 73% 감소하였을 때 집열기의 효율은 49.5%로 본 연구에서 제시한 나노유체 중에 가장 많이 감소함을 확인하였다. 반면에 40 nm-0.5vol% CuO 나노유체의 경우 최대 효율을 보인 일사량에서 일사량이 88.7% 감소하였을 때 효율 감소가 24%로 가장 적게 감소함을 확인하였다. 또한 물, MWCNT-Fe₃O₄ 이성분, 20 nm-1.0vol% Al₂O₃, 30 nm-0.015vol% Fe₃O₄ 나노유체의 경우 최대 효율을 보인 일사량에서 일사량이 각각 77.5%, 87%, 92%, 79.1% 감소하였을 때 평판형 집열기의 효율은 49%, 27.3%, 48.9%, 44.8% 감소함을 확인하였다. 또한 동일한 조건인 약 80% 태양열 일사량이 감소하였을 때 성능의 감소정도는 MWCNT, water, Fe₃O₄, Al₂O₃, MWCNT-Fe₃O₄ 이성분, CuO 순으로 큰 것으로 나타났으며 감소정도는 23.2%~53.4% 정도로 각 나노유체별로 다르게 나타났다. 평판형 태양열 집열기에 작동유체로 물과 나노유체를 사용하였을 때 일사량이 감소함에 따라 태양열 집열기의 성능도 크게 저하되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5.2(b)는 진공관 태양열 집열기에 다양한 나노유체를 사용하였을 때 최대효율을 보인 일사량에서 일사량 변화율에 따른 평판형 태양열 집열기의 효율 민감도를 나타내었다. 동일한 조건인 약 80% 태양열 일사량이 감소하였을 때 물, Al₂O₃, CuO, MWCNT, MWCNT-Fe₃O₄ 이성분, Fe₃O₄ 나노유체의 성능 감소정도는 각각 39.1%, 27.5%, 27.2%, 48.5%, 18.6%, 21.1% 감소함을 확인하였다.

나노유체를 사용하는 경우 대부분 물을 사용하는 것보다 성능의 감소폭이 줄어들어 다양한 일사량조건에서 평판형 태양열 집열기의 높은 성능을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 또한 이를 통하여 일사량이 평판형 태양열 집열기의 성능에 영향을 미치는 중요한 요소인 것을 확인할 수 있다.



(a) Flat plate solar collector

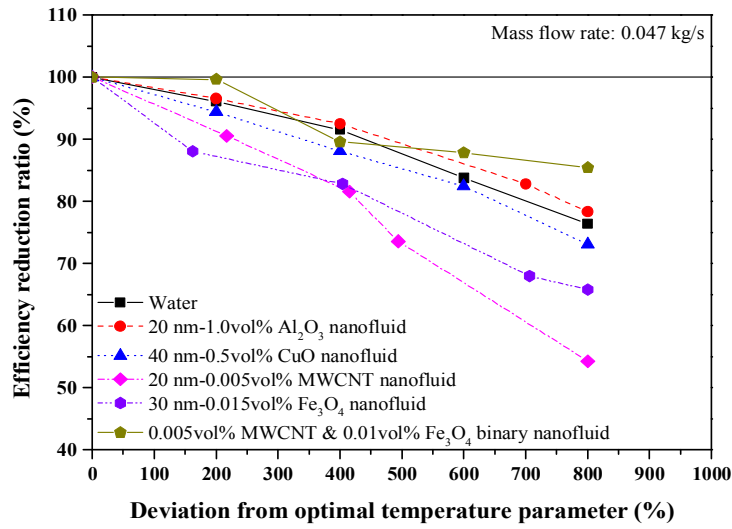


(b) Evacuated tube solar collector

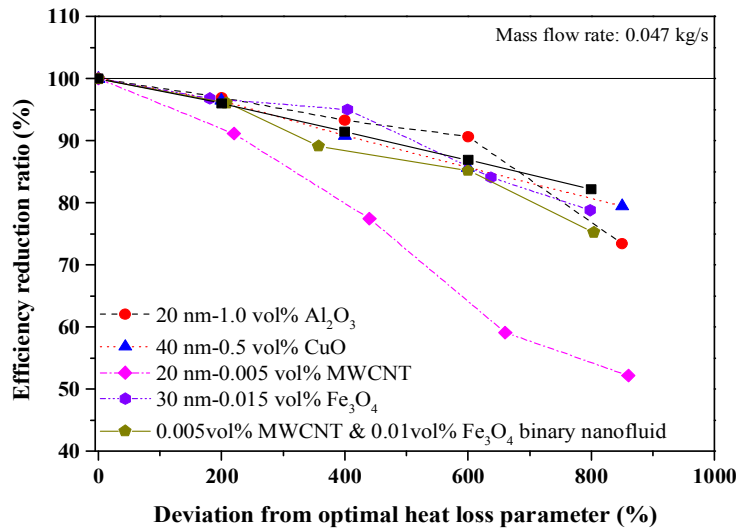
Fig. 5.2 Efficiency reduction ratio according to the deviation from optimal solar radiation

Fig. 5.3(a)은 평판형 태양열 집열기에 작동유체로 물, Al_2O_3 , CuO , MWCNT, MWCNT- Fe_3O_4 이성분, Fe_3O_4 나노유체를 사용하였을 때 온도매개변수 $[(T_i - T_o)/G]$ 에 따른 집열기의 효율 민감도를 나타내었다. 평판형 태양열 집열기에 작동유체로 0.005vol% MWCNT 나노유체를 사용하였을 경우 최대효율을 보인 온도매개변수가 800% 향상되었을 때 효율의 감소폭이 45.7%로 가장 많이 감소함을 확인하였다. 반면 평판형 태양열 집열기에 작동유체로 MWCNT- Fe_3O_4 이성분 나노유체를 사용하였을 경우 최대효율을 보인 온도매개변수가 800% 증가되었을 때 효율의 감소폭이 14.6%로 가장 적게 감소함을 확인하였다. 물, 1.0vol% Al_2O_3 , 0.5vol% CuO , 0.015vol% Fe_3O_4 나노유체를 작동유체로 사용하였을 경우 최대효율을 보인 온도매개변수가 800%로 증가하였을 때 효율의 감소폭은 각각 23.6%, 21.7%, 26.9%, 34.2%로 확인하였다. 특히, 물을 사용한 경우 감소폭이 상대적으로 적은 것으로 확인되었다. 전반적으로 평판형 태양열 집열기에서 온도매개변수가 증가함에 따라 성능이 크게 감소함을 확인하였다. 이는 평판형 태양열 집열기는 저온에서 반사판과 작동유체와의 온도차가 증가하여 많은 열을 효과적으로 전달할 수 있어 상대적으로 높은 효율을 나타내고 고온에서는 외부와의 온도차의 증가로 인한 열손실이 증가하여 태양열 집열기의 성능이 상대적으로 감소함을 확인할 수 있었다.

Fig. 5.3(b)은 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 물, Al_2O_3 , CuO , MWCNT, MWCNT- Fe_3O_4 이성분, Fe_3O_4 나노유체를 사용하였을 때 온도매개변수 변화에 따른 집열기의 효율 민감도를 나타내었다. 물, 1.0vol% Al_2O_3 , 0.5vol% CuO , 0.005vol% MWCNT, MWCNT- Fe_3O_4 이성분, 0.015vol% Fe_3O_4 나노유체를 작동유체로 사용하였을 경우 최대효율을 보인 온도매개변수가 800%로 증가하였을 때 효율의 감소폭은 각각 17.8%, 26.1%, 20.5%, 46.8%, 24.7%, 21.2%로 나타남을 확인하였다. 0.005vol% MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 평판형 태양열 집열기에 적용하였을 때보다 성능 민감도가 크게 나타는 것을 확인하였다.



(a) Flat plate solar collector



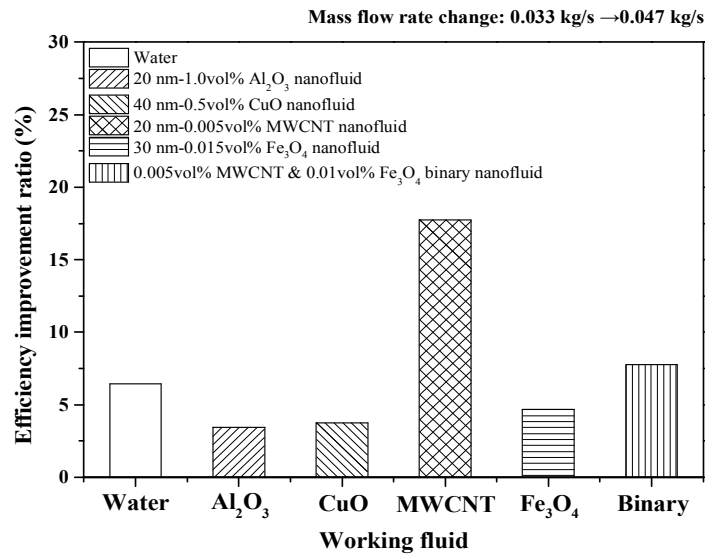
(b) Evacuated tube solar collector

Fig. 5.3 Efficiency reduction ratio according to the deviation from optimal temperature parameter

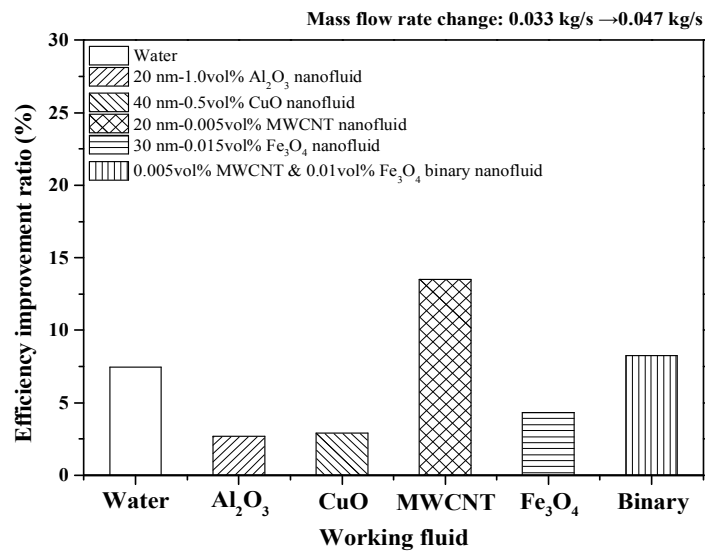
Fig. 5.4(a)는 평판형 태양열 집열기에 다양한 나노유체를 적용하였을 때 작동유체의 질량유량 변화에 따른 집열기 효율의 증가 정도를 비교하여 보여주고 있다. 본 연구에서는 작동유체의 질량유량은 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 증가시켜 성능 실험을 진행하였으며 이때 집열기 성능의 증가 정도를 비교하였다. 평판형 태양열 집열기에 20 nm-0.005vol% MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 효율의 증가 정도는 17.8%로 가장 높은 향상율을 보였으며, 20 nm-1.0vol% Al₂O₃ 나노유체를 사용하였을 때 3.4%로 가장 낮은 향상율을 보였다. 또한 물, 40 nm-0.5vol% CuO, MWCNT-Fe₃O₄ 이성분, 30 nm-0.015vol% Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 질량유량 향상에 따른 효율 향상율은 각각 6.5%, 3.4%, 7.8%, 4.7% 향상됨을 확인하였다. 평판형 태양열 집열기에 작동유체로 MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 질량유량 변화에 따른 효율 향상율이 가장 높았는데 이는 MWCNT 나노입자의 열전도도가 다른 나노입자의 열전도도보다 높기 때문에 효율이 크게 향상된 것으로 판단된다.

Fig. 5.4(b)는 진공관형 태양열 집열기에 다양한 나노유체를 적용하였을 때 작동유체의 질량유량 변화에 따른 집열기 효율의 증가 정도를 비교하여 보여주고 있다. 물, 20 nm- 1.0vol% Al₂O₃, 40 nm-0.5vol% CuO, 20 nm-0.005vol% MWCNT, MWCNT-Fe₃O₄ 이성분, 30 nm-0.015vol% Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 질량유량 향상에 따른 효율 향상율은 각각 7.4%, 2.7%, 2.9%, 13.5%, 8.3%, 4.3%로 나타났으며 평판형 태양열 집열기와 비슷한 경향을 보이는 것을 확인하였다.

실험결과 평판형 태양열 집열기에서 작동유체의 질량유량을 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 향상시킴에 따라 모든 작동유체에서 집열기 효율이 향상됨을 확인하였다. 이는 작동유체의 질량유량이 증가함에 따라 평판형 태양열 집열기의 입구와 출구에서 작동유체의 온도차이가 감소하지만, 집열기 전체에서 작동유체와 집열판의 온도차이가 증가하게 되고 이에 따라 작동유체로의 열전달량이 증가하게 되어 많은 열량이 효과적으로 전달되어 효율이 향상된 것이다. 반면 평판형 태양열 집열기 작동유체의 유량증가는 집열기 출구에서 작동유체의 온도를 감소시킴으로 작동유체의 출구측 태양열 집열기의 엑서지 및 유용도는 다소 감소하게 된다.



(a) Flat plate solar collector



(b) Evacuated tube solar collector

Fig. 5.4 Efficiency improvement ratio according to the increase of mass flow rate in working fluid ($\dot{m}=0.047$ kg/s)

제 6장 결론

본 논문에서는 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 MWCNT와 Fe_3O_4 나노유체를 적용하였을 때 나노유체의 농도와 나노입자의 크기 변화에 따른 실험을 진행하였으며 최적의 성능을 보이는 조건을 분석하였다. 그리고 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 MWCNT와 Fe_3O_4 나노유체를 적용하였을 때 최적의 성능을 보이는 조건들을 사용하여 MWCNT- Fe_3O_4 이성분 나노유체를 제작하여 성능 분석을 진행하였다. 또한 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 다양한 나노유체를 적용하였을 때 다양한 운전변수 조건에 대한 성능 민감도를 분석하였다.

먼저 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 나노유체의 농도, 나노입자의 크기, 질량유량 변화에 따른 성능 실험을 진행하였다. 그 결과, 평판형 태양열 집열기의 질량유량이 0.047 kg/s이고 20 nm-0.005vol% MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율은 87.5%로 나타났으며 진공관형 태양열 집열기의 경우 20 nm-0.005vol% MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율이 75.6%로 나타났다. 이때 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 20 nm-0.005vol% MWCNT 나노유체를 사용하였을 경우 물을 사용하였을 때보다 효율이 각각 39.6%와 37.7% 향상됨을 확인하였다. 또한 평판형 태양열 집열기에 작동유체로 농도가 각각 0.001vol%-, 0.003vol%-, 0.007vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 최대효율은 각각 78.8%, 82.5%, 84.9%로 나타났으며 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 0.001vol%-, 0.003vol%-, 0.007vol%-MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 최대효율은 각각 62.9%, 67.5%, 73.4%로 나타났다.

Fe_3O_4 나노유체를 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 사용하여 실험을 진행한 결과 평판형 태양열 집열기의 경우 0.015vol%- Fe_3O_4 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율은 71.6%로 가장 높게 나타났으며 진공관형 태양열 집열기의 경우 0.015vol%- Fe_3O_4 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율은 69.8%로 나타났다. 이때 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 0.015vol%- Fe_3O_4 나노유체를 사용하였을 때 물을 사용하였을 때보다 효율이 각각 14.2%와 27.1% 향상됨을 확인하였다. 그리고 평판형 태양열 집열기에 0.005vol%-, 0.01vol%-, 0.02vol%- Fe_3O_4 나노유체를

사용하였을 때 최대 효율은 각각 69.7%, 70.8%, 71.2%로 나타났으며 진공관형 태양열 집열기에 0.005vol%-, 0.01vol%-, 0.02vol%-Fe₃O₄ 나노유체를 사용하였을 때 최대 효율은 각각 67.2%, 68.7%, 69.2%로 나타났다.

MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 사용하여 실험을 진행하였다. 평판형 태양열 집열기에 Case3 (0.005vol%-MWCNT & 0.01vol%-Fe₃O₄) 이성분 나노유체를 적용하였을 때 80.3%로 가장 높은 최대 효율이 나타났으며 물을 적용하였을 때보다 효율이 약 28.1% 향상됨을 확인하였다. 진공관형 태양열 집열기에 Case3 (0.005vol%-MWCNT & 0.01vol%-Fe₃O₄) 이성분 나노유체를 적용하였을 때 79.8%로 가장 높은 효율을 보였으며 이는 물을 적용하였을 때보다 45.4%향상됨을 확인하였다. 그리고 최적 농도인 0.005vol%-MWCNT와 0.015vol%-Fe₃O₄ 나노유체를 사용한 Case4보다 Case3을 사용할 때보다 효율이 더 낮게 나타남을 확인하였다. 이는 Fe₃O₄ 나노유체의 농도가 높아짐에 따라 MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체의 분산안정성이 감소되고 열전달 및 흡수력이 감소하기 때문에 효율이 가장 높게 나타난 것으로 판단된다.

그리고 평판형과 진공관형 태양열 집열기 시스템에서 성능의 요인을 결정하는 다양한 운전 변수에 대하여 조사하기 위해 다양한 나노유체를 적용하였을 때 성능 민감도를 비교 분석하였다. 사용된 작동유체는 물, Al₂O₃, CuO, MWCNT, Fe₃O₄, MWCNT-Fe₃O₄ 이성분 나노유체를 사용하였으며 분석에 사용된 운전 변수는 나노유체의 농도, 일사량, 온도매개변수, 질량유량 변화에 따른 성능 민감도를 분석하였다. 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 작동유체의 농도변화에 따른 성능 민감도를 분석한 결과 MWCNT 나노유체를 사용하였을 때 가장 큰 성능 감소를 보였다. 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 물과 다양한 나노유체를 사용하였을 때 일사량이 감소함에 따라 태양열 집열기의 성능도 크게 저하되는 것을 확인할 수 있었으며 나노유체를 사용하는 경우 대부분 물을 사용하는 것보다 성능의 감소폭이 줄어들어 다양한 일사량조건에서 태양열 집열기의 높은 성능을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 전반적으로 태양열 집열기에서 온도매개변수가 증가함에 따라 성능이 크게 감소함을 확인하였다. 마지막으로 질량유량 변화에 따른 성능 민감도는 모든 작동유체의 질량유량이 0.033 kg/s에서 0.047 kg/s로 증가함

에 따라 효율이 향상됨을 확인하였다.

본 연구에서는 평판형과 진공관형 태양열 집열기에 작동유체로 다양한 나노유체를 적용하여 실험을 진행하였으며 다양한 작동조건에서 태양열 집열기에 다양한 운전 변수 변화에 따른 성능 민감도를 비교 고찰하여 최적의 작동조건을 찾아 태양열 집열기 설계에 필요한 데이터를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Lins C. REN21 Renewables 2017 Global Status Report. 2017. p. 1-31.
- [2] Chiam HW, Azmi WH, Usri NA, Mamat R, Adam NM. Thermal conductivity and viscosity of Al_2O_3 nanofluids for different based ratio of water and ethylene glycol mixture. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2017;81:420-9.
- [3] Sundar LS, Farooky MH, Sarada SN, Singh MK. Experimental thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based low volume concentration of Al_2O_3 and CuO nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013;41:41-6.
- [4] Charab AA, Movahedirad S, Norouzbeigi R. Thermal conductivity of $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2/\text{water}$ nanofluid: Model development and experimental validation. *Applied Thermal Engineering*. 2017;119:42-51.
- [5] Pryazhnikov MI, Minakov AV, Rudyak VY, Guzei DV. Thermal conductivity measurements of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;104:1275-82.
- [6] Abareshi M, Goharshadi EK, Mojtaba Zebarjad S, Khandan Fadafan H, Youssefi A. Fabrication, characterization and measurement of thermal conductivity of Fe_3O_4 nanofluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010;322:3895-901.

- [7] Soltanimehr M, Afrand M. Thermal conductivity enhancement of COOH-functionalized MWCNTs/ethylene glycol - water nanofluid for application in heating and cooling systems. *Applied Thermal Engineering*. 2016;105:716-23.
- [8] Jouybari HJ, Saedodin S, Zamzamian A, Nimvari ME, Wongwises S. Effects of porous material and nanoparticles on the thermal performance of a flat plate solar collector: An experimental study. *Renewable Energy*. 2017;114:1407-18.
- [9] Azad E. Experimental analysis of thermal performance of solar collectors with different numbers of heat pipes versus a flow-through solar collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;82:4320-5.
- [10] Jiandong Z, Hanzhong T, Susu C. Numerical simulation for structural parameters of flat-plate solar collector. *Solar Energy*. 2015;117:192-202.
- [11] Saedodin S, Zamzamian SAH, Nimvari ME, Wongwises S, Jouybari HJ. Performance evaluation of a flat-plate solar collector filled with porous metal foam: Experimental and numerical analysis. *Energy Conversion and Management*. 2017;153:278-87.
- [12] Gunjo DG, Mahanta P, Robi PS. Exergy and energy analysis of a novel type solar collector under steady state condition: Experimental and CFD analysis. *Renewable Energy*. 2017;114:655-69.
- [13] Nikolić N, Lukić N. Theoretical and experimental investigation of the

thermal performance of a double exposure flat-plate solar collector. *Solar Energy*. 2015;119:100-13.

[14] Abuşka M, Şevik S. Energy, exergy, economic and environmental (4E) analyses of flat-plate and V-groove solar air collectors based on aluminium and copper. *Solar Energy*. 2017;158:259-77.

[15] Said Z, Saidur R, Rahim NA. Energy and exergy analysis of a flat plate solar collector using different sizes of aluminium oxide based nanofluid. *Journal of Cleaner Production*. 2016;133:518-30.

[16] Noghrehabadi A, Hajidavaloo E, Moravej M. Experimental investigation of efficiency of square flat-plate solar collector using SiO₂/water nanofluid. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2016;8:378-86.

[17] He Q, Zeng S, Wang S. Experimental investigation on the efficiency of flat-plate solar collectors with nanofluids. *Applied Thermal Engineering*. 2015;88:165-71.

[18] Moghadam AJ, Farzane-Gord M, Sajadi M, Hoseyn-Zadeh M. Effects of CuO/water nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014;58:9-14.

[19] Kang W, Shin Y, Cho H. Economic Analysis of Flat-Plate and U-Tube Solar Collectors Using an Al₂O₃ Nanofluid. *Energies*. 2017;10:1911.

- [20] Said Z, Sabiha MA, Saidur R, Hepbasli A, Rahim NA, Mekhilef S, et al. Performance enhancement of a Flat Plate Solar collector using Titanium dioxide nanofluid and Polyethylene Glycol dispersant. *Journal of Cleaner Production*. 2015;92:343-53.
- [21] Yousefi T, Shojaeizadeh E, Veysi F, Zinadini S. An experimental investigation on the effect of pH variation of MWCNT-H₂O nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector. *Solar Energy*. 2012;86:771-9.
- [22] Faizal M, Saidur R, Mekhilef S, Alim MA. Energy, economic and environmental analysis of metal oxides nanofluid for flat-plate solar collector. *Energy Conversion and Management*. 2013;76:162-8.
- [23] Kiliç F, Menlik T, Sözen A. Effect of titanium dioxide/water nanofluid use on thermal performance of the flat plate solar collector. *Solar Energy*. 2018;164:101-8.
- [24] Mirzaei M, Hosseini SMS, Moradi Kashkooli AM. Assessment of Al₂O₃ nanoparticles for the optimal operation of the flat plate solar collector. *Applied Thermal Engineering*. 2018;134:68-77.
- [25] Michael JJ, Iniyar S. Performance of copper oxide/water nanofluid in a flat plate solar water heater under natural and forced circulations. *Energy Conversion and Management*. 2015;95:160-9.
- [26] Sharafeldin MA, Gróf G. Experimental investigation of flat plate solar

collector using CeO_2 -water nanofluid. Energy Conversion and Management. 2018;155:32-41.

[27] Sharafeldin MA, Gróf G, Mahian O. Experimental study on the performance of a flat-plate collector using WO_3 /Water nanofluids. Energy. 2017;141:2436-44.

[28] Anin Vincely D, Natarajan E. Experimental investigation of the solar FPC performance using graphene oxide nanofluid under forced circulation. Energy Conversion and Management. 2016;117:1-11.

[29] Verma SK, Tiwari AK, Chauhan DS. Performance augmentation in flat plate solar collector using MgO /water nanofluid. Energy Conversion and Management. 2016;124:607-17.

[30] Verma SK, Tiwari AK, Chauhan DS. Experimental evaluation of flat plate solar collector using nanofluids. Energy Conversion and Management. 2017;134:103-15.

[31] Salavati Meibodi S, Kianifar A, Niazmand H, Mahian O, Wongwises S. Experimental investigation on the thermal efficiency and performance characteristics of a flat plate solar collector using SiO_2 /EG - water nanofluids. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2015;65:71-5.

[32] Mahian O, Kianifar A, Sahin AZ, Wongwises S. Entropy generation during Al_2O_3 /water nanofluid flow in a solar collector: Effects of tube roughness,

nanoparticle size, and different thermophysical models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014;78:64-75.

[33] Genc AM, Ezan MA, Turgut A. Thermal performance of a nanofluid-based flat plate solar collector: A transient numerical study. *Applied Thermal Engineering*. 2018;130:395-407.

[34] Said Z, Saidur R, Rahim NA, Alim MA. Analyses of exergy efficiency and pumping power for a conventional flat plate solar collector using SWCNTs based nanofluid. *Energy and Buildings*. 2014;78:1-9.

[35] Hajabdollahi F, Premnath K. Numerical study of the effect of nanoparticles on thermoeconomic improvement of a solar flat plate collector. *Applied Thermal Engineering*. 2017;127:390-401.

[36] Farajzadeh E, Movahed S, Hosseini R. Experimental and numerical investigations on the effect of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ nanofluids on thermal efficiency of the flat plate solar collector. *Renewable Energy*. 2018;118:122-30.

[37] Hawwash AA, Abdel Rahman AK, Nada SA, Ookawara S. Numerical Investigation and Experimental Verification of Performance Enhancement of Flat Plate Solar Collector Using Nanofluids. *Applied Thermal Engineering*. 2018;130:363-74.

[38] Caliskan H. Energy, exergy, environmental, enviroeconomic, exergoenvironmental (EXEN) and exergoenvironomic (EXENEC) analyses of

solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;69:488-92.

[39] Shojaeizadeh E, Veysi F, Kamandi A. Exergy efficiency investigation and optimization of an Al_2O_3 - water nanofluid based Flat-plate solar collector. *Energy and Buildings*. 2015;101:12-23.

[40] Ge Z, Wang H, Wang H, Zhang S, Guan X. Exergy Analysis of Flat Plate Solar Collectors. *Entropy*. 2014;16:2549-67.

[41] Sokhansefat T, Kasaeian A, Rahmani K, Heidari AH, Aghakhani F, Mahian O. Thermoeconomic and environmental analysis of solar flat plate and evacuated tube collectors in cold climatic conditions. *Renewable Energy*. 2018;115:501-8.

[42] Rybár R, Beer M, Cehlár M. Thermal power measurement of the novel evacuated tube solar collector and conventional solar collector during simultaneous operation. *Measurement*. 2016;88:153-64.

[43] Tong Y, Kim J, Cho H. Effects of thermal performance of enclosed-type evacuated U-tube solar collector with multi-walled carbon nanotube/water nanofluid. *Renewable Energy*. 2015;83:463-73.

[44] Ghaderian J, Sidik NAC. An experimental investigation on the effect of Al_2O_3 /distilled water nanofluid on the energy efficiency of evacuated tube solar collector. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;108:972-87.

[45] Mahendran M, Lee GC, Sharma KV, Shahrani A. Performance of

Evacuated Tube Solar Collector using Water-Based Titanium Oxide Nanofluid. Journal of Mechanical Engineering and Sciences. 2012;3:301-10.

[46] Sabiha MA, Saidur R, Hassani S, Said Z, Mekhilef S. Energy performance of an evacuated tube solar collector using single walled carbon nanotubes nanofluids. Energy Conversion and Management. 2015;105:1377-88.

[47] Kim H, Kim J, Cho H. Experimental study on performance improvement of U-tube solar collector depending on nanoparticle size and concentration of Al_2O_3 nanofluid. Energy. 2017;118:1304-12.

[48] Kim H, Ham J, Park C, Cho H. Theoretical investigation of the efficiency of a U-tube solar collector using various nanofluids. Energy. 2016;94:497-507.

[49] Ersöz MA. Effects of different working fluid use on the energy and exergy performance for evacuated tube solar collector with thermosyphon heat pipe. Renewable Energy. 2016;96:244-56.

[50] Delfani S, Karami M, Behabadi MAA. Performance characteristics of a residential-type direct absorption solar collector using MWCNT nanofluid. Renewable Energy. 2016;87:754-64.

[51] Menbari A, Alemrajabi AA, Rezaei A. Heat transfer analysis and the effect of CuO/Water nanofluid on direct absorption concentrating solar collector. Applied Thermal Engineering. 2016;104:176-83.

[52] Karami M, Akhavan-Bahabadi MA, Delfani S, Raisee M. Experimental investigation of CuO nanofluid-based Direct Absorption Solar Collector for residential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;52:793-801.

[53] Gorji TB, Ranjbar AA. Thermal and exergy optimization of a nanofluid-based direct absorption solar collector. *Renewable Energy*. 2017;106:274-87.

[54] Hatami M, Mosayebidorcheh S, Jing D. Thermal performance evaluation of alumina-water nanofluid in an inclined direct absorption solar collector (IDASC) using numerical method. *Journal of Molecular Liquids*. 2017;231:632-9.

[55] Chen L, Liu J, Fang X, Zhang Z. Reduced graphene oxide dispersed nanofluids with improved photo-thermal conversion performance for direct absorption solar collectors. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017;163:125-33.

[56] Turkyilmazoglu M. Performance of direct absorption solar collector with nanofluid mixture. *Energy Conversion and Management*. 2016;114:1-10.

[57] Moffat RJ. Using Uncertainty Analysis in the Planning of an Experiment. *Journal of Fluids Engineering*. 1985;107:173-8.