



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](#)

2023년 2월  
석사학위 논문

다양한 외부 자기장 조건하에서  
 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광학적 및  
광열변환적 특성 조사

조선대학교 대학원

기계공학과

김혜민

다양한 외부 자기장 조건하에서  
 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광학적 및  
광열변환적 특성 조사

Investigation of optical and photothermal conversion characteristics  
of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanofluid under various external magnetic field

2023년 2월 24일

조선대학교 대학원

기계공학과

김혜민

다양한 외부 자기장 조건하에서  
 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광학적 및  
광열변환적 특성 조사

지도교수            조    흥    현

이 논문을 공학석사 학위신청 논문으로 제출함

2022년 10월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

김    혜    민

# 김혜민의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 오 동 욱



위 원 조선대학교 교수 조 흥 현



위 원 조선대학교 교수 박 설 현



2022년 12월

조선대학교 대학원

## Contents

<b>Contents</b> .....	<b>i</b>
<b>List of Figure</b> .....	<b>iii</b>
<b>List of Table</b> .....	<b>v</b>
<b>Nomenclature</b> .....	<b>vi</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>viii</b>
<b>제 1 장 서론</b> .....	<b>1</b>
제 1 절 연구 배경 .....	1
제 2 절 기존 연구 .....	5
제 3 절 연구 목적 .....	10
<b>제 2 장 나노유체 제조 및 특성</b> .....	<b>12</b>
제 1 절 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 나노입자 합성 및 나노유체 제조 .....	12
제 2 절 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 나노유체의 안정성 및 특성 평가 .....	15
1. Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 나노유체의 안정성 평가 .....	15
2. Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 나노유체의 자기적 특성 평가 .....	21
<b>제 3 장 실험 장치 및 실험 방법</b> .....	<b>23</b>
제 1 절 나노유체의 물성 측정 장치 .....	23
1. 열전도도 측정 장치 .....	23
2. 점도 측정 장치 .....	25
3. 광학적 특성 측정 장치 .....	26

제 2 절 광열변환적 성능 실험 장치 .....	27
1. 광열변환적 성능 실험 장치 .....	27
2. 실험방법 및 조건 .....	30
제 3 절 데이터 분석 기법 .....	31
1. 광학적 특성 분석 기법 .....	31
2. 광열변환적 성능 분석 기법 .....	35
<b>제 4 장 실험 결과 및 고찰 .....</b>	<b>37</b>
제 1 절 $Fe_3O_4$ 나노유체의 광학적 특성 고찰 .....	37
제 2 절 $Fe_3O_4$ 나노유체의 농도별 열물리적 및 광열변환적 특성 고찰 .....	49
1. $Fe_3O_4$ 나노유체의 농도별 열물리적 특성 분석 .....	49
2. $Fe_3O_4$ 나노유체의 농도별 광열변환성능 분석 .....	51
제 3 절 외부 자기장 영향에 따른 $Fe_3O_4$ 나노유체의 열적 및 광열변환적 특성 고찰 .....	57
1. 외부 자기장 세기에 따른 $Fe_3O_4$ 나노유체의 열전도도 분석 ..	57
2. 외부 자기장 세기에 따른 $Fe_3O_4$ 나노유체의 광열변환성능 분석 .....	60
3. 외부 회전자기장 회전 속도에 따른 $Fe_3O_4$ 나노유체의 광열변환 성능 분석 .....	64
4. 편심 외부 회전자기장 적용에 따른 $Fe_3O_4$ 나노유체의 광열변환 성능 분석 .....	71
<b>제 5 장 결 론 .....</b>	<b>80</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>82</b>

## List of Figure

<b>Fig. 1.1</b> Solar collection method .....	2
<b>Fig. 2.1</b> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanoparticle synthesis method .....	14
<b>Fig. 2.2</b> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanofluid manufacturing method .....	14
<b>Fig. 2.3</b> Pictures of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanofluid after synthesis and 1 month .....	15
<b>Fig. 2.4</b> TEM image of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanofluid .....	17
<b>Fig. 2.5</b> Diameter distribution of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanoparticles .....	17
<b>Fig. 2.6</b> Schematic of the distribution of charges around nanoparticle .....	19
<b>Fig. 2.7</b> Zeta potential of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanofluids after synthesis and 1 month .....	20
<b>Fig. 2.8</b> Schematics of vibration sample magnetometer .....	22
<b>Fig. 2.9</b> Saturation magnetization curve of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanoparticles .....	22
<b>Fig. 3.1</b> Thermal conductivity measurement device .....	24
<b>Fig. 3.2</b> Vibro viscometer SV-10 .....	25
<b>Fig. 3.3</b> Schematic of optical transmittance measurement equipment .....	26
<b>Fig. 3.4</b> Photothermal conversion measurement experimental setup .....	28
<b>Fig. 4.1</b> Optical transmittance of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanofluid .....	38
<b>Fig. 4.2</b> Extinction coefficient of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanofluid at optical depth=0.5 and 1 cm .....	40
<b>Fig. 4.3</b> Reflection rate of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanofluid .....	42
<b>Fig. 4.4</b> Absorption rate of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanofluid .....	44
<b>Fig. 4.5</b> Transmission, absorption, and reflection of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanofluid according to the concentration .....	46
<b>Fig. 4.6</b> Solar weight absorbed energy fraction of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanofluid .....	48
<b>Fig. 4.7</b> Photothermal conversion performance of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanofluid .....	53
<b>Fig. 4.8</b> Temperature of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanofluid as a function of location at 9000 sec .....	56
<b>Fig. 4.9</b> Photothermal conversion performance of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanofluid according to magnetic field strength .....	61



**Fig. 4.10** Temperature of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid as a function of location according to magnetic field strength at 9000 sec ..... 63

**Fig. 4.11** Photothermal conversion performance of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid according to rotating magnetic field speed ..... 66

**Fig. 4.12** Temperature of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid as a function of location according to rotating magnetic field speed at 9000 sec ..... 69

**Fig. 4.13** Schematic diagram of magnetic nanoparticles in (a) absence magnetic field, (b) rotating magnetic field speed of 100-200 rpm, and (c) 300 rpm .... 70

**Fig. 4.14** Photothermal conversion performance of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid according to rotating magnetic field axis ..... 73

**Fig. 4.15** Temperature of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid as a function of location according to rotating magnetic field axis at 9000 sec ..... 75

**Fig. 4.16** Non-absorption, absorption, and dissipation ratio of total energy ..... 79

## List of Table

<b>Table 2.1</b> Stability behavior of a colloid depending on zeta potential .....	19
<b>Table 3.1</b> Specifications of the solar simulator .....	29
<b>Table 3.2</b> Operating conditions of experiment .....	30
<b>Table 4.1</b> Thermal conductivity of $\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanofluid .....	49
<b>Table 4.2</b> Viscosity of $\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanofluid .....	50
<b>Table 4.3</b> Thermal conductivity of $\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanofluid according to external magnetic field strength .....	59

## Nomenclature

### Roman symbol

<b>A</b>	:	Area exposed to sunlight ( $m^2$ )
<b>B</b>	:	Rate of loss of heat dissipation to the surrounding
<b><math>c_p</math></b>	:	Specific heat ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )
<b>F</b>	:	Solar weight absorption rate (%)
<b>G</b>	:	Solar irradiance ( $W/m^2$ )
<b>h</b>	:	Heat transfer coefficient ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
<b>I</b>	:	Spectra irradiance
<b><math>I_0</math></b>	:	Transmitted intensity
<b><math>K(\lambda)</math></b>	:	Extinction coefficient ( $1/cm$ )
<b>k</b>	:	Thermal conductivity ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
<b>m</b>	:	Mass (kg)
<b>n</b>	:	Average refractive index
<b><math>Q_{in}</math></b>	:	Heat input (W)
<b><math>Q_{dis}</math></b>	:	Heat dissipated (W)
<b><math>R(\lambda)</math></b>	:	Optical reflectivity
<b><math>T_{amb}</math></b>	:	Ambient temperature ( $^\circ C$ )
<b><math>T_{eq}</math></b>	:	Equilibrium temperature ( $^\circ C$ )
<b><math>T(t)</math></b>	:	Temperature of the working fluid ( $^\circ C$ )
<b><math>T(\lambda)</math></b>	:	Optical transmittance
<b>t</b>	:	Operating time (s)
<b>y</b>	:	Optical depth (mm)

## Greek symbol

$\eta$	:	Photothermal conversion efficiency (%)
$\kappa$	:	Imaginary part of complex refractive index
$\lambda$	:	Wavelength (nm)
$\rho$	:	Reflectance of interface between air and the cuvette

## Abstract

### Investigation of optical and photothermal conversion characteristics of $\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanofluid under various external magnetic field

Hyemin Kim

Advisor: Prof. Honghyun Cho, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering,  
Graduate School of Chosun University

The use of renewable energy as an alternative energy source for fossil fuels is receiving a lot of attention. Among various renewable energy, solar energy is widely used in many fields due to its abundant reserves and low equipment cost compared to other energy sources. However, it is known that when a nanofluid is applied as a working fluid of a direct absorption solar collector applied to use solar energy, heat collection performance can be improved due to enhanced optical and thermal characteristics. However, the enhanced optical and thermal properties due to the nanofluid increase the heat loss to the outside of the working fluid, thus there is a limit to improving the heat collection performance.

To solve this problem, in this study, the light absorption characteristics and photothermal conversion performance of DI-water according to the addition of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles were experimentally investigated under various external magnetic field strengths and rotation speeds.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanofluids were prepared at concentrations of 0.025, 0.05, 0.075, and 0.1wt%, and as a result of the experiment,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanofluids showed higher light absorption characteristics than DI-water, which is a base fluid, at all concentrations. In addition, as  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles were added to DI-water, it was confirmed that the thermal properties were improved by increasing the thermal conductivity and viscosity. The  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanofluid increased solar energy absorption due to its high light absorption and thermal properties, which also improved the equilibrium

temperature of the working fluid and the efficiency of the photothermal conversion performance. At the concentration of 0.075wt% of the  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanofluid, the photothermal conversion efficiency was the highest of 90%. This is a 45.6% improvement compared to that of DI-water. As a result of applying an external magnetic field to the  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanofluid, the thermal heat transfer characteristics are improved. The optimal external magnetic field strength and rotational speed were investigated by applying external magnetic fields with various intensities and rotating magnetic with various speeds at the optimal concentration of 0.075wt%. As a result, when the intensity of the external magnetic field is 500 Gauss and the rotating magnetic field speed was 200 rpm, the photothermal conversion efficiency is remarkably improved to 96.1%. This is about 6.78% higher than that of 0.075wt%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanofluid without applying an external magnetic field. In addition, as a result of increasing the rotation radius by moving the rotation axis of the external rotating magnetic field, the photothermal conversion efficiency of 0.075wt%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanofluid was 97.5%, and it improved as the rotation radius increased. Through this study, the photothermal conversion performance can be improved when an external magnetic field and a rotating magnetic field are applied to the  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanofluid, which indicates that it is suitable for improving the heat collection performance of a direct absorption solar collector.

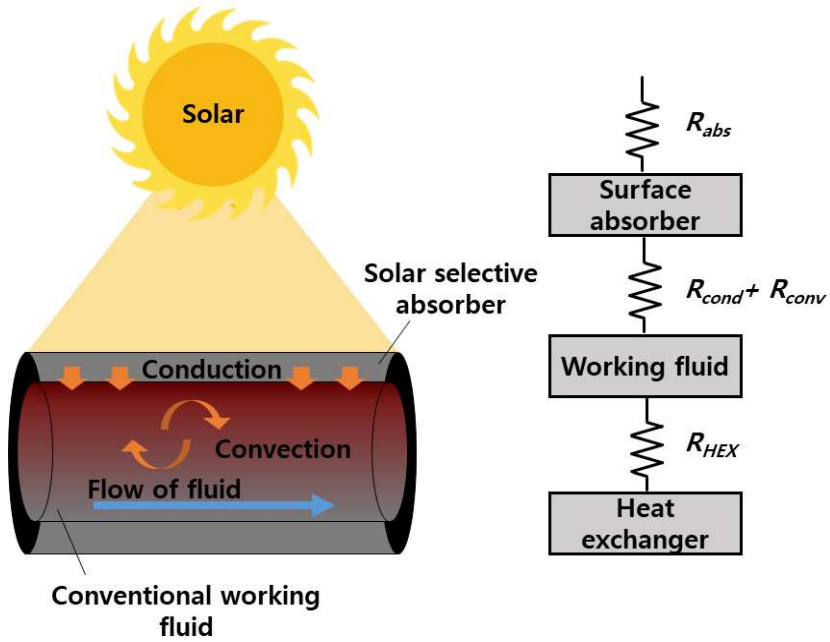
Keyword: Direct absorption solar collector;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles; Optical characteristics; Photothermal conversion efficiency; Rotating magnetic field; Solar energy

# 제 1 장 서 론

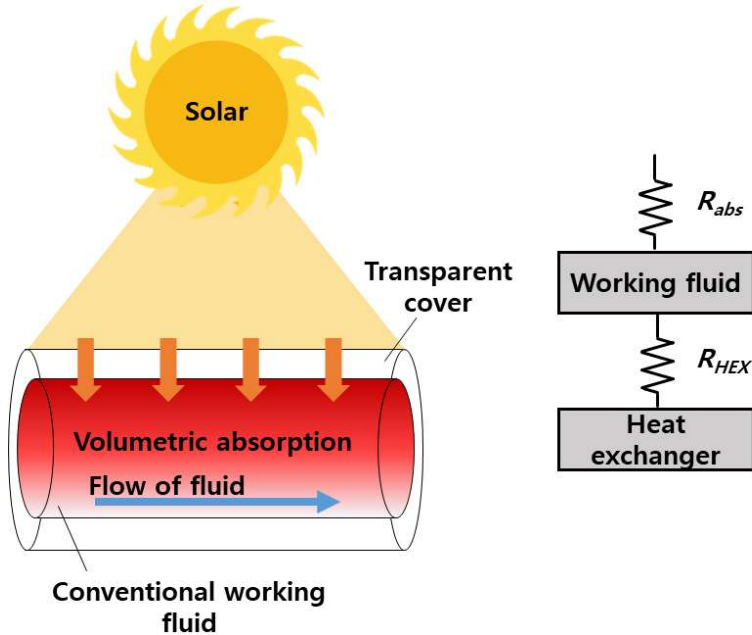
## 제 1 절 연구 배경

산업화에 의하여 경제가 크게 성장된 현대사회는 물질적으로 풍요로워졌지만, 많은 양의 화석연료 사용으로 인해 온실가스 배출량이 증가하여 지구온난화 문제를 가속화하고 대기오염 및 수질오염 등 여러 환경적인 문제를 발생시킨다 [1]. 이를 해결하기 위해 화석연료 사용의 비중을 감소시켜 온실가스 배출을 감축시켜야 한다. 화석연료 사용 비중을 감소시키기 위해 이를 대체할 수 있는 대체 에너지원이 필요하며, 대체 에너지원으로는 자연환경에 미치는 영향이 적고 지속 가능한 신재생에너지가 많은 관심을 받고 있다 [2].

다양한 신재생에너지 중 태양에너지는 태양으로부터 지구로 유입되는 복사에너지로 풍력, 지열, 수력 등의 재생에너지에 비해 지리적 선정의 편이성이 용이하며, 풍부한 매장량과 오염이 없고, 저렴한 설비비용으로 많은 분야에 널리 적용될 수 있는 가장 주요한 에너지 중 하나이다 [3-5]. 태양에너지를 활용하는 방법으로는 태양 복사에너지를 전기에너지로 직접 변환하는 광전지 변환과, 태양 복사에너지를 화학에너지로 변환하는 광화학적 변환, 그리고 태양 복사에너지를 열에너지로 변환하는 광열변환 등이 있다. 이 중 광전지 변환과 광화학적 변환은 널리 사용되는 방법임에도 불구하고 낮은 에너지 변환효율을 가지며, 광열변환 방법은 다른 방법에 비해 상대적으로 높은 효율을 가진다 [6]. 태양에너지를 이용하기 위한 광열변환 방법은 태양열 집열기의 작동 매커니즘으로 태양열 집열기에 사용되는 집열 방법에는 Fig. 1.1과 같이 표면의 흡수체에서 태양에너지를 열에너지로 변환하는 간접흡수(표면흡수) 집열방법과 태양열 집열기에 흐르는 열매체가 흡수체 역할을 동시에 수행하는 직접흡수(체적흡수) 집열방법이 있다. 이 중 직접흡수 집열방법은 열매체가 흡수체 역할과 동시에 열 이송매체의 역할을 수행하기 때문에 표면흡수 집열방법에 비해 열저항 및 열손실이 적어 높은 집열효율을 얻을 수 있다.



(a) Indirect(Surface) absorption solar collection method



(b) Direct(Volumetric) absorption solar collection method

**Fig. 1.1** Solar collection method



직접흡수 태양열 집열기의 작동유체는 열매체 및 흡수체 역할을 수행하기 때문에 작동유체의 광흡수 특성이 매우 중요하다 [7]. 하지만, 기존에 사용된 물, 기름, 부동액 등은 낮은 광흡수 특성으로 인해 직접흡수 태양열 집열기의 작동유체로 적용하기에 어려움이 있다. 이에 대한 해결방안으로는 1995년에 처음으로 개념이 도입된 나노유체를 작동유체로 적용할 수 있다 [8]. 나노유체는 광투과율이 높은 기저유체에 나노크기의 금속 또는 비금속입자를 분산시켜 만든 혼합유체로 우수한 열-물리적 및 광흡수 특성을 가지기에 작동유체로 적용 시 집열성능을 향상시킬 수 있다. 이에 다양한 나노유체를 직접흡수 태양열 집열기의 작동유체로 적용하여 광흡수 특성 및 광열변환성능에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

하지만, 나노유체를 활용한 직접흡수 태양열 집열기의 효율은 수집기 깊이와 나노유체 농도에 매우 민감하다는 단점이 있다 [9-10]. 일반적으로 낮은 농도의 나노유체의 광흡수 능력은 농도에 따라 증가하고 흡수된 빛은 열로 변환된다. 하지만 나노유체의 농도가 높아질수록 나노입자의 높은 비표면적과 표면에너지로 인해 응집체를 형성하며 이는 나노유체의 불균일한 분산으로 광열변환효율에 부정적인 영향을 미친다. 한편, 나노유체의 농도가 점차 증가함에 따라 투과율은 감소하며, 이는 나노유체의 흡수되는 태양복사량이 점점 증가하게 된다 [11-13]. 그러나 나노유체의 농도가 일정 한계를 초과하면 태양복사는 나노유체의 상층부에서 대부분 흡수되어 상층부에서 국부적으로 과열이 발생하고 나노유체의 투과율이 거의 0이 되는 경향이 있다 [14]. 결과적으로, 나노유체의 상층부는 더 높은 온도와 대류에 의해 주변으로 많은 열 손실을 가지며 집열기 전체의 열성능은 감소하게 된다.

작동유체로 나노유체를 적용한 직접흡수 태양열 집열기의 효율을 향상시키기 위해서는 나노유체의 상층에서 흡수된 열이 주변으로 손실되기 전에 하부로 전달하여 나노유체 전반에 고르게 열을 흡수하여 보관해야 한다. 작동유체 상층에서 흡수된 열은 열전도 및 대류를 통해 하부로 전달되지만, 직접흡수 태양열 집열기의 작동유체 상부의 열은 하부로 전달되기 전에 주변으로 대류를 통해 많은 손실을 가진다. 이는 작동유체로 나노유체를 적용하면 향상된 광흡수 특성과 열전달 특성으로 기저유체 보다 높은 광열변환성능이 나타나지만, 상부에서 흡수되어 주변으로 손실되는 양 또한 증가한다. 이는 직접흡수 태양열 집열기의 성능을 향상시키

기에 어려움이 있으며, 이를 해결하기 위한 방안으로 작동유체 내부의 대류를 형성시켜 상부의 열을 하부로 활발히 전달하면 직접흡수 태양열 집열기의 효율이 크게 향상될 것이다.

## 제 2 절 기존 연구

직접흡수 태양열 집열기의 집열 성능 향상을 위해 작동유체의 열적 특성과 광흡수 특성이 매우 중요하다. 따라서 작동유체로 적합한 나노유체를 찾기 위해 이전의 연구에서는 나노입자를 첨가한 나노유체의 열물리적 특성을 분석한 연구가 진행되어 왔다. 우선 기저유체에 비해 나노입자가 첨가된 나노유체는 열전도도, 점도, 대류 열전달, 그리고 광흡수와 같은 열적 특성을 향상시키는 것을 보고하였다. Yasinskiy et al. [15]은  $\text{TiO}_2$  기반 나노유체가 기저유체에 비해 열전도도를 최대 25.8%까지 크게 개선했다고 보고했다. Minakov et al. [16]은 30개 이상의 서로 다른 나노유체의 점도에 대한 체계적인 실험 조사를 수행했으며, 모든 나노유체에서 기저유체에 비해 점도가 증가함을 보였다. Safaei et al. [17]은 자연 대류, 강제 및 혼합 대류에 의한 나노유체의 열전달 개선을 평가하기 위해 제안된 방법으로 대류에 의한 나노유체의 열전달이 크게 향상되었다고 보고하였으며, Choi et al. [18]은 다중벽 탄소 나노튜브(MWCNT)를 포함하는 수성 나노유체가 광 흡수 특성을 향상시킨다고 보고하였다. 게다가 Wang [19]은  $\text{Al}_2\text{O}_3$  나노유체를 준비하고 광 흡수를 조사하기 위해 마이크로 에멀전(Micro emulsion) 초음파 기술을 사용했다. 그들은 2wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  나노유체는 나노입자의 균일한 분포, 우수한 현탁성 및 최적의 광 흡수를 나타냄을 발견하였다. 이와 같이 현재 기저유체 대비 열적 특성이 향상된 나노유체에 대한 관심이 높으며, 특히 직접흡수 태양열 집열기에서 활용을 위해 다양한 연구가 진행되고 있다.

또한, 고효율 직접흡수 태양열 집열기를 개발하기 위해서는 작동유체의 광흡수 특성이 매우 중요하다. 따라서 기존에 사용되는 열전달 매체에 대한 개선이 진행되어야 한다. 직접흡수 태양열 집열기에 의한 태양에너지 포집은 작동제의 광흡수 특성을 개선함으로써 증가 될 수 있으며, 포집된 광에너지가 효과적으로 열로 변환될 때 직접흡수 태양열 집열기의 성능이 향상될 수 있다 [20]. 따라서 직접흡수 태양열 집열기에서 작동제의 광흡수 성능을 향상시키기 위해 나노유체의 광흡수 특성에 대한 연구가 다수 수행되었다. Gupta et al. [21]  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  나노유체는 물보

다 광학적, 열적, 물리적 특성이 더 높다고 보고하였다. Zeng과 Xuan [22]은 하이브리드 나노유체의 서로 다른 조합에서 서로 다른 재료 간의 상호 작용을 구체적으로 분석하였으며, 하이브리드 나노유체는 태양광 흡수 능력을 효과적으로 향상시킨 것으로 보고하였다. Lee et al. [23]은 수성 탄소나노튜브(CNT), Cu 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노유체의 농도에 따라 흡광도가 증가하여 태양광 흡수 성능 향상에 기여할 수 있다고 보고하였으며. Karami et al. [24]은 CuO 나노입자와 혼합된 나노유체의 광학적 특성을 조사하였다. 또한, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 TiO<sub>2</sub> 나노유체 [25]와 금속 나노입자 기반 나노유체 [26-28]의 광학적 특성에 관한 실험적 연구가 수행되었다. 결과적으로 이전 연구 결과를 바탕으로 개발된 대부분의 나노유체는 기존에 사용되었던 기저유체 보다 높은 광학적 특성을 가지고 있음을 확인하였다.

이러한 연구들을 바탕으로 다양한 나노유체를 작동유체로 적용한 직접흡수 태양열 집열기의 성능 특성에 대한 연구 또한 진행되었다. Delfaniet al. [29]은 MWCNT 나노유체를 이용한 주거형 직접흡수 태양열 집열기의 성능 특성을 조사하였고, Qu et al. [30] 및 Guo et al. [31]는 MWCNT-H<sub>2</sub>O 나노유체의 광열변환 특성을 연구하였다. 그들은 MWCNT 나노입자를 기저유체에 첨가하면 빛의 흡수가 증가하여 열로 변환되는 빛의 양이 증가하고 열적 성능이 향상된다고 보고하였다. Gorji et al. [32]는 흑연, 마그네타이트 및 은 나노유체를 작동유체로 사용하여 각 나노유체에 의한 광학적 특성의 향상과 해당 직접흡수 태양열 집열기의 열 수집 효율을 실험적으로 조사하였다. Chen et al. [33]은 다양한 Au 나노입자 크기의 나노유체를 큐브모양과 평판모양의 직접흡수 태양열 집열기에서 태양광 흡수 특성을 실험적으로 조사하였으며, Au 나노입자가 H<sub>2</sub>O에 첨가됨으로 인해 광열변환 특성이 개선되었으며 큐브모양, 평판모양의 직접흡수 태양열 집열기에서 H<sub>2</sub>O에 비해 각각 19.9%, 21.3% 향상됨을 보고하였다. Hazra et al.[34] 은 에틸렌글리콜에 흑연을 혼합시켜 나노유체를 제조하였으며, 광학적 특성 및 광열변환 성능을 평가하였다. 작동유체로 흑연 나노유체를 적용한 결과 입사 복사 조도는 15 ppm일 때 87.3%를 흡수하며 전체 수집기의 효율이 약 27.9% 증가함을 보고하였다. Furió et al. [35]은 수성 탄소 나노유체의 광열변환 효율이 기저유체에 비해 최대 200% 증가했다고 보고했다. 또한, Li et al. [36]은 MXene 나노입자의 첨가가 작동유체의 광흡수를 증가시킨다

고 보고하였다. 반대로 태양복사에 대한 투과율을 감소시켜 광열변환효율을 향상시켰다. Wang et al. [37]은 그래핀 나노유체와 비교할 때 MXene 나노유체의 광열변환효율이 4.34% 더 높다고 보고했다. Phelan et al. [38]은 직접흡수 태양열 집열 방식이 다른 태양열 수집 방식보다 10% 더 높은 열효율을 보장할 수 있다고 보고하였다. 또한, Delfani et al. [39]은 작동유체로 MWCNT를 사용하여 직접흡수 태양열 집열기와 평판형 태양열 집열기의 효율성을 비교하였으며, 직접흡수 태양열 집열기와 평판형 태양열 집열기에서 25, 50, 100ppm 농도의 MWCNT 나노유체를 사용할 때 직접흡수 태양열 집열기의 효율은 평판형 태양열 집열기보다 각각 11.7%, 16.2%, 23% 더 향상되었음을 보였다. Zuo et al. [40]는 광흡수 특성이 우수한 흑색 잉크 나노유체가 우수한 광열 특성으로 인해 에너지 변환에 효율적임을 제시하였으며, 램프 블랙 잉크 나노유체의 최대 광열변환효율은 76.7%에 도달하여 DI-water에 비해 26.4% 향상되었다. Kumar et al. [41]은 직접흡수 태양열 집열기의 작동유체로 Au 플라즈몬 나노유체를 적용한 결과 DI-water에 비해 열효율이 약 33% 향상되었다고 보고하였다. 그 외에도 다양한 나노유체를 작동유체로 적용하면 열전달 특성 및 광학적 특성이 향상되고 작동유체의 광열변환효율이 향상됨을 보고하였다.

하지만, 직접흡수식 태양열 집열기의 작동유체로 나노유체를 적용하는 경우에도 집열성능을 향상시키기 위해서 다음과 같은 한계를 극복해야 한다. 태양조사 시간이 증가함에 따라 상부에서 흡수된 열이 하부까지 전달되기 전에 주변환경으로 열 손실이 발생하여 작동유체의 온도가 평형상태에 도달하게 된다. 또한, 하부까지 열전달이 충분히 발생하지 않아 하부의 온도는 상부의 온도에 비해 큰 온도차를 가진다. 따라서, 집열 성능을 향상시키기 위해서는 집열부의 상부와 하부의 온도차를 감소시켜야 한다. 상부와 하부의 균일한 온도 분포를 위해 Boris et al. [42]은 자성 나노유체 기반 직접흡수 태양열 집열기의 집열효율에 대한 수치적 연구를 수행하였으며, 자성 나노유체 내부에 대류를 형성시킨 결과 전도의 경우보다 더 균일한 온도 분포를 나타냄을 보고하였다. 자성 나노유체는 자성 나노입자를 물, 부동액 등의 기저유체에 분산시킨 작동유체로 자성 나노유체 내의 자성 나노입자의 분포는 외부 자기장에 의해 조절될 수 있다 [43]. 또한, 자성 나노유체 내의 자성

나노입자는 자기장의 방향이나 세기를 조절에 의해 독특한 특성을 발휘할 수 있다. 이러한 특성을 활용하면 열전달, 열변환 등 다양하게 응용할 수 있다. Kharat et al. [44]은  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ /에틸렌글리콜 나노유체를 제조하여 자기장 세기에 따른 열전도도를 연구하였다.  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ /에틸렌글리콜 나노유체의 자기장 세기에 따른 열전도율은 자기장 세기가 증가할수록 향상됨을 보고하였다. Lee et al. [45]은 코발트-아연 페라이트(Cobalt-zinc ferrite) 나노입자를 포함하는 나노유체의 대류열전달 특성에 대한 자기장 효과를 실험적으로 조사하였고 코발트-아연 페라이트 나노유체에 750 Gauss의 자기장 적용 시 대류열전달 계수는 0 Gauss에 비해 약 2.64% 증가됨을 보고하였다.

또한, 일부 기존 연구에서 자성 나노유체에 외부에 자기장을 가하면 작동유체의 태양열 변환성능이 향상됨을 보고하였다. 이와 관련된 연구로 Boldoo et al. [46]은  $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  자성 나노유체의 광열변환효율을 실험적으로 조사하였다.  $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  자성 나노유체에 120분 태양 노출을 진행한 결과 광열변환효율은 물보다 높으며 그 중 0.75wt%일 때 7.1% 향상됨을 보고하였다. He et al.[47]은 다양한 자기강도에서  $\text{Co-H}_2\text{O}$  나노유체의 광열적 특성을 조사하였다.  $\text{Co-H}_2\text{O}$  나노유체에 인가된 자기장은 직접흡수 태양열 집열기의 태양광 흡수능력을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 보고하였다. 또한, Wang et al. [48]은 에틸렌글리콜 기반  $\text{FeNi/C}$  나노유체에 외부 회전 자기장을 적용하여 광열변환효율을 조사한 결과 비외부 회전 자기장에 비해 광열변환효율이 22.7% 향상되었으며, 외부 회전 자기장에 의해 나노유체의 응집 발생을 감소시켜 분산안정성에 도움이 됨을 보고하였다. Shin et al. [49]은  $\text{MWCNT/Fe}_3\text{O}_4$  하이브리드 나노유체에 외부 자기장을 적용하여 열적 및 광열변환 특성을 조사하였으며, 자성을 갖는  $\text{MWCNT/Fe}_3\text{O}_4$  하이브리드 나노유체는 외부 자기장이 적용되지 않았을 때 대비 외부 자기장을 적용했을 때 광열변환효율은 32.8%에서 45.1%로 향상됨을 확인하였다. 또한,  $\text{MWCNT/Fe}_3\text{O}_4$  하이브리드 나노유체에 적용되는 외부 자기장의 세기가 증가함에 따라 열전도도가 향상됨을 보고하였다. 따라서 자성 나노유체에 외부 자기장 형성은 작동유체가 광흡수 매체 및 열 이송매체의 역할을 동시에 수행하는 직접흡수 태양열 집열기의 성능향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

따라서, 기존 연구를 통해 작동유체의 광흡수 특성 및 열전달 특성을 향상시키기 위해 나노입자를 첨가하면 직접흡수 태양열 집열기의 집열성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 직접흡수 태양열 집열기의 작동유체로 자성 나노유체를 적용하여 작동유체에 외부 자기장을 인가한 결과 외부 자기장의 세기 및 방향에 의해 광열변환효율은 기저유체를 적용했을 때 보다 높은 광열변환효율이 나타남을 확인하였다. 이러한 기존 연구를 통해서 자성 나노입자를 기저유체에 혼합시킨 자성 나노유체를 작동유체로 적용하여 외부 자기장을 적용할 경우 작동유체의 광열변환효율은 향상되며, 이는 직접흡수 태양열 집열기의 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

### 제 3 절 연구 목적

본 연구에서는 태양에너지를 효율적으로 사용하기 위해 직접흡수 태양열 집열 방법을 적용하여 작동유체의 광열변환성을 조사하였다. 직접흡수 태양열 집열 방법은 표면 흡수 태양열 집열 방법에 비해 단순화된 열에너지 생산 메커니즘과 열손실 및 열저항을 줄이는 장점이 있다. 직접흡수 태양열 집열 방법의 효율을 향상시키기 위해서는 작동유체의 태양에너지 흡수 및 열전달 성능을 향상시키고 열손실을 억제하는 것이 반드시 필요하다. 하지만 기존에 사용되는 물, 기름, 부동액 등의 작동유체는 높은 투과율로 인해 낮은 태양에너지 흡수 성능을 가지고 있으며, 낮은 열전달 성능으로 인해 직접흡수 태양열 집열기의 집열방법으로 적용하기에 어려움이 있었다. 최근 나노기술의 개발로 나노유체의 개발은 직접흡수 태양열 집열기의 작동유체로 적용 시 태양에너지 흡수 및 열전달 성능과 광열변환성을 향상시킬 수 있게 되었다. 하지만 아직 직접흡수 태양열 집열방법을 적용하기에 작동유체 상층과 주변 환경으로의 열 손실 및 상층과 하부층은 높은 온도차, 낮은 에너지 흡수 성능 등으로 인해 집열 성능을 향상시키기에 한계가 있다.

이를 해결하기 위해 본 연구에서는 작동유체의 빛에너지 흡수 성능을 향상시키고 동시에 작동유체 상층의 열을 하부층으로 대류에 의해 전달하여 집열 성능을 향상시키고자 작동유체 외부에 자기장을 적용하였다. 외부 자기장의 영향을 확인하기 위해 작동유체로는 자기적 특성을 갖는 산화철( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 나노입자를 DI-water와 혼합한  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체를 적용하였다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 높은 자기적 특성을 가지고 있어 외부 자기장 하에서 점도 및 열전도도는 증가하며 [50, 51],  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 내부의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자들은 외부 자기장에 반응하여 대류 열전달계수는 향상된다 [52]. 따라서 본 연구에서는 외부자기장에 의해 열물리적 특성이 향상된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체를 작동유체로 적용하여 자기장 세기에 의한 광열변환실험을 진행하였으며 최적의 자기장 세기를 실험적으로 조사하였다. 또한, 최적의 자기장 세기를 적용하여 용기 내 상부와 하부의 온도차는 더욱 감소시키기 위하여 용기 외부에 자기장을 회전시킨 연구도 동시에 진행하였다. 즉, 외부 자기장의 회전을 통해 상부

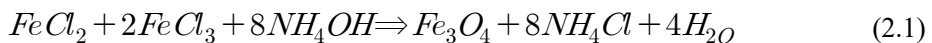


표면에 의해 열손실이 발생하기 전에 하부로 대류열전달을 발생시키고 작동유체의 상부와 하부의 온도차를 감소시키기 위한 실험을 수행하였다. 직접흡수식 태양열 집열기의 성능향상을 위해서는 작동유체의 열적 특성 및 광열변환효율의 향상이 반드시 필요하다. 이를 위해 작동유체의 물적특성의 개선과 자기장의 세기 등과 같은 외부적인 영향을 동시에 개발하여 적용시켜야 한다. 하지만 이전의 연구에서 작동유체의 열물성이나 광열변화 효율의 향상을 위한 체계적인 연구결과를 제시한 연구는 거의 없다. 특히, 자기장의 세기나 회전자기장을 이용하여 자성 나노유체 내부에 대류를 발생시켜 집열부의 상부와 하부의 온도차를 감소시키기 위한 연구가 거의 찾아보기 힘들다. 게다가 이전 연구에서는 작동유체로  $Fe_3O_4$  나노유체를 적용하여 최적의 농도, 그리고 외부 자기장 세기 및 회전자기장의 속도에 대한 연구를 진행된 적이 없다. 따라서 본 연구는 작동유체의 광열변환효율을 향상시키기 위하여  $Fe_3O_4$  나노입자의 첨가, 외부 자기장의 세기 및 회전자기장의 속도를 변화시켰으며 작동유체의 광흡수 특성 및 광열변환성능을 실험적으로 조사하였다. 우선 기저유체에  $Fe_3O_4$  나노입자를 첨가하여  $Fe_3O_4$  나노유체의 농도별 광흡수 특성 및 광열변환성능을 조사하여 최적의 농도를 조사하였다. 또한, 최적의  $Fe_3O_4$  나노유체 농도에 외부 자기장 세기의 변화에 따른 광열변환성능을 고찰하여 최적의 외부자기장 세기를 찾고 성능향상 정도를 고찰하였다. 이후 집열부의 상부와 하부의 온도차를 감소시켜 광열변환성능을 향상시키기 위하여 외부 자기장의 회전 속도 및 회전 반경에 따른 광열변환성능 실험을 진행하였다. 이를 통하여 최대의 광열변환효율을 가지는 최적의 조건을 고찰하였으며 다양한 농도, 외부 자기장 세기, 회전 속도 및 반경에서 작동유체가 얻은 에너지를 흡수되지 않은 에너지, 흡수된 에너지 및 소산된 에너지 비율로 분석하여 성능 고찰을 하였다. 따라서 본 연구결과를 활용하여 직접흡수 태양열 집열기의 성능을 크게 향상시킬 수 있는 안정적인 작동유체를 개발하는데 기여할 것으로 기대한다.

## 제 2 장 나노유체 제조 및 특성

### 제 1 절 $Fe_3O_4$ 나노입자 합성 및 나노유체 제조

본 연구에서 사용된 작동유체는  $Fe_3O_4$  나노유체이며,  $Fe_3O_4$  나노입자는 화학적 공침법을 사용하여 합성하였다 [53]. Fig. 2.1은  $Fe_3O_4$  나노입자의 합성과 계면활성제의 흡착과정을 보여준다. 먼저,  $Fe_3O_4$  나노입자 제조 시 필요한  $Fe^{2+}$  및  $Fe^{3+}$ 염을 얻기 위해 염화제 1철( $FeCl_2$ )과 염화철(III) 염화물( $FeCl_3$ )를 제조하였다.  $Fe_3O_4$  나노입자의 제조 화학식은 식(2.1.1)과 같다.



식(2.1)과 같이 염화제 1철( $FeCl_2$ )(1 ml)과 염화철(III) 염화물( $FeCl_3$ )(4 ml)을 자기교반 장치를 이용하여 150 rpm으로 혼합하고, 혼합물을  $70^\circ C$ 로 가열하였다. 가열 후, 암모니아( $NH_3$ )(6.76 ml)와 DI-water(43.24 ml)가 혼합된 암모니아 수용액( $NH_4OH$ )을 염화철 혼합물에 한 방울씩 연속적으로 첨가하였다. 암모니아 수용액( $NH_4OH$ )이 첨가된 염화철 혼합물의 색은 노란색에서 어두운 갈색으로 변하고, 동시에  $Fe_3O_4$  나노입자가 생성되었다. 생성된  $Fe_3O_4$  나노입자는 자석을 이용하여 회수하였으며, 수집된  $Fe_3O_4$  나노입자는 DI-water로 5회 이상 세척하였다. 그 후,  $Fe_3O_4$  나노입자를 기저유체인 DI-water에 안정적으로 분산시키기 위해  $Fe_3O_4$  나노입자를 폴리아크릴산(Polyacrylic acid)으로 흡착시켰다. 0.01 mol의  $Fe_3O_4$  나노입자와 7.2 ml의 25wt%의 폴리아크리산(PAA) 수용액을 200 ml의 DI-water에 첨가한 후 NaOH 수용액을 사용하여 pH를 7로 조절하였다. 그 후,  $Fe_3O_4$  나노입자 혼합물을  $70^\circ C$ 에서 2시간 동안 반응시켜  $Fe_3O_4$  나노입자의 표면에 폴리아크리산(PAA)을 부착시켰다. PAA와 흡착된  $Fe_3O_4$  나노입자를 자석을 이용하여 수집하였으며 5회 이상 DI-water로 세척한 뒤, 건조기에서  $60^\circ C$ 에서 24시간 동안 건조시켰다.

본 연구에서  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체를 제조하기 위해 제조된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자를 DI-water에 기계적으로 분산시키는 2단계 방법을 사용하였다. Fig. 2.2는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 제조공정을 보여준다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체를 제조하기 위해 0.1g의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자와 계면활성제 그리고 99.9 g의 DI-water를 비커에 채우고 혼합물을 500 rpm으로 1시간 동안 교반하였다. 마지막으로 혼합된 유체를 200,000 Hz의 초음파를 조사하여 분산을 수행하였다. 본 과정을 통해 0.1wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체를 제조하였으며, 제조된 0.1wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체를 DI-water에 희석하여 0.025, 0.05, 0.075wt%의 나노유체를 제조하였다.

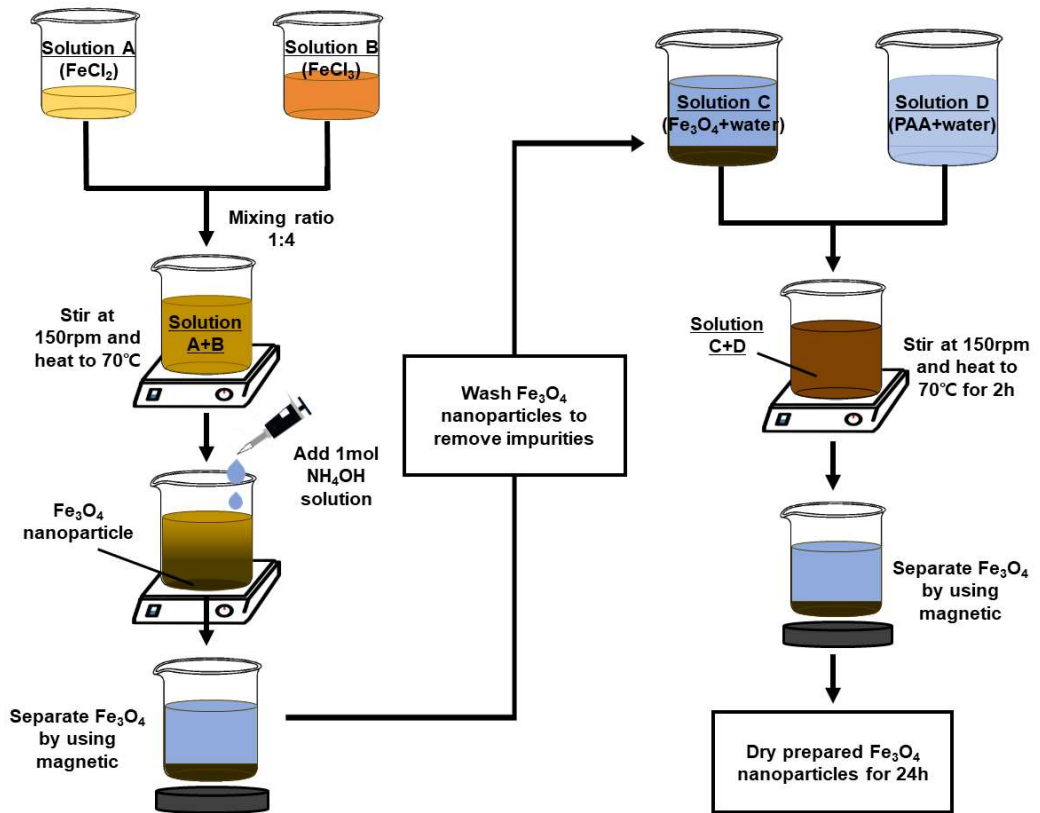


Fig. 2.1  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticle synthesis method

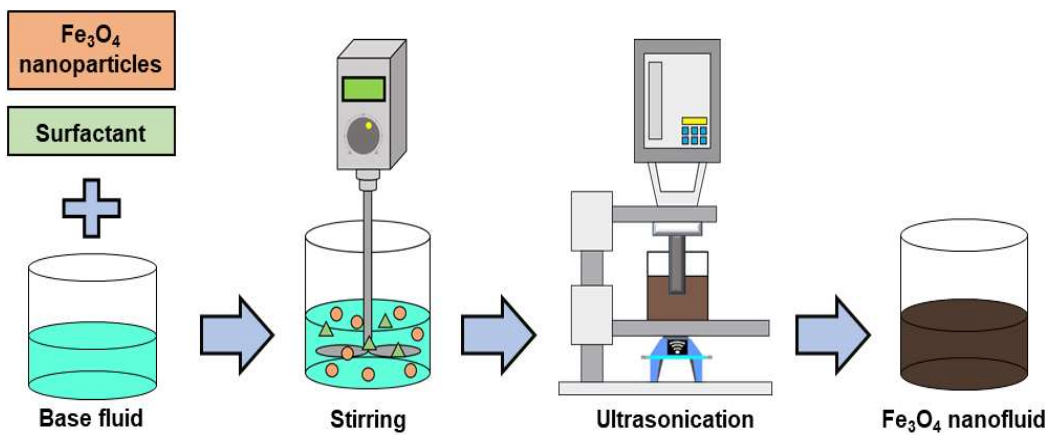
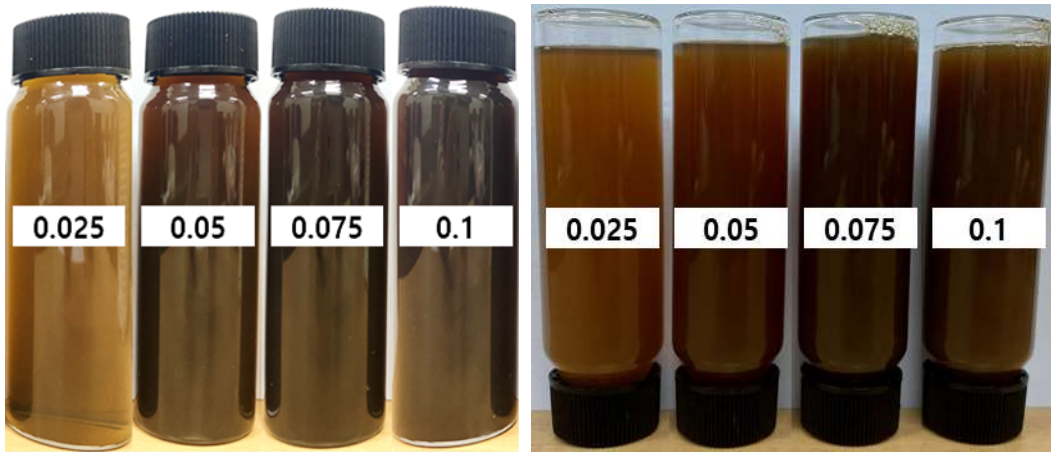


Fig. 2.2  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanofluid manufacturing method

## 제 2 절 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체 안정성 및 특성 평가

### 1. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체 안정성 평가

제조된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 분산안정성을 평가하기 위해 육안 관찰과 함께 투과전자현미경(TEM) 이미지 분석 및 제타 전위 측정을 수행하였다. 육안 관찰은 제조된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 제조 직후와 한달이 지난 뒤를 비교하여 용기 내부의 침전물의 여부를 육안으로 관찰하였다 (Fig. 2.3). 제조 직후 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체는 농도가 0.025wt%에서 0.1wt%로 높아짐에 따라 연한 갈색에서 암갈색으로 변하였다. 또한, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체는 초음파 분산을 통해 기저유체인 DI-water에 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노입자를 분산시켰기 때문에 제조 직후 눈에 띄는 응집물 또는 침전물은 발견되지 않았다. 한 달이 지난 뒤 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도별 사진을 제조 직후와 비교한 결과 육안으로 관찰되는 응집 및 침전물은 발견되지 않았으며, 이는 제조된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체가 장기간 분산안정성을 가짐을 확인하였다.



(a) After synthesis

(a) 1 month after synthesis

**Fig. 2.3** Pictures of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid after synthesis and 1 month

$\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 TEM 이미지 분석은  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 내부의 분산된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자 클러스터를 관찰하는 방법으로 기본 유체에 분산된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자 클러스터의 2차원 이미지를 통해  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자의 크기, 모양, 입자 응집 정도를 확인할 수 있다. Fig. 2.4는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 TEM 이미지를 보여준다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 내부에 존재하는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자는 공침법의 특성에 따라 변형된 형태를 보이며 대부분 입방체 형태로 존재하고 있다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 TEM 이미지를 Image J를 이용하여  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자의 크기를 분석하였다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자의 크기는 Fig. 2.5와 같이 3~10 nm로 다양한 크기로 분포되어 있으며, 평균 직경은 6.8 nm이다.

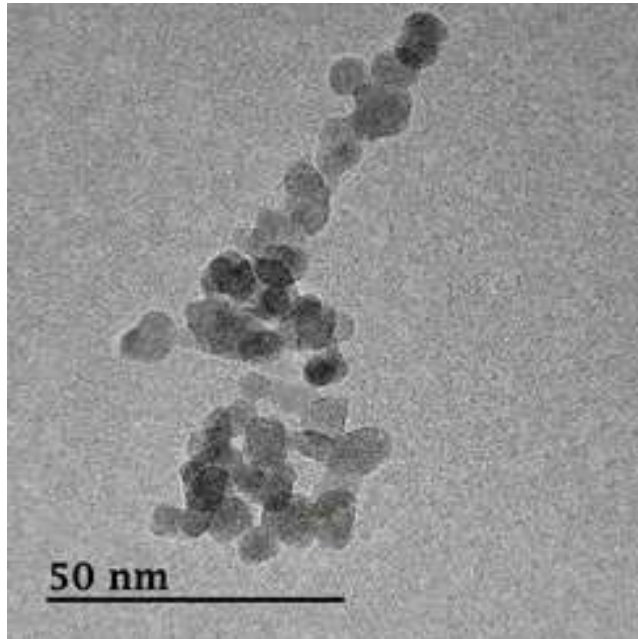


Fig. 2.4 TEM image of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanofluid

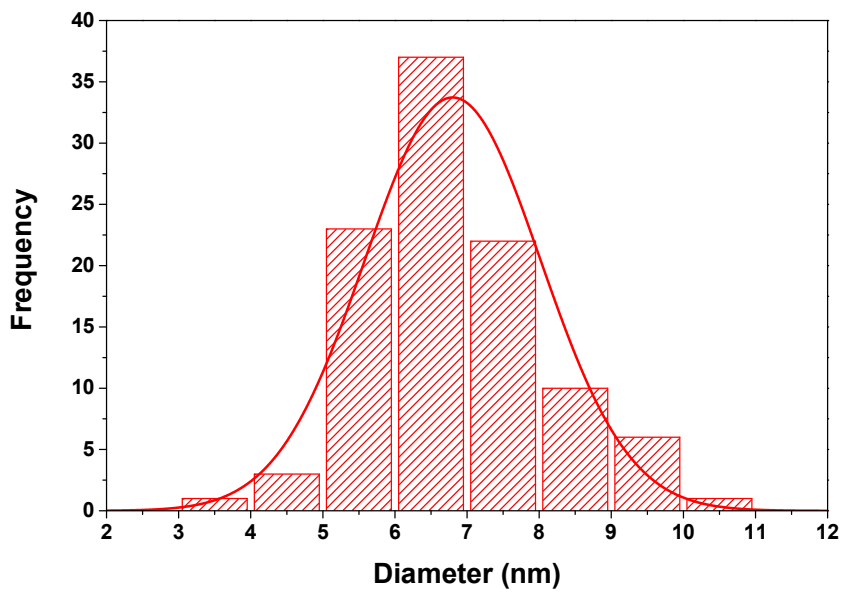
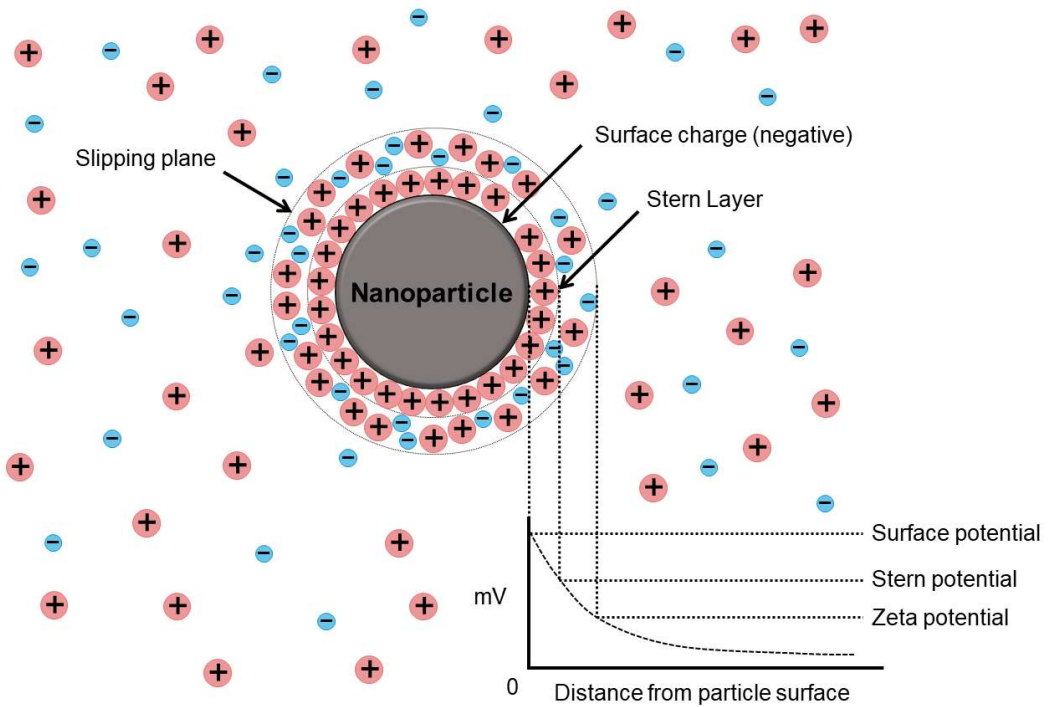


Fig. 2.5 Diameter distribution of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles

제타 전위는 입자 사이의 반발력 및 인력의 크기를 나타내는 단위로  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노 유체의 안정성을 평가하기 위한 중요한 지표로 사용된다. Fig. 2.6과 같이 나노입자가 기본 유체에 현탁되면 나노입자 표면에 반대 전하를 띄는 이온으로 둘러싸이게 되며 흡착이 강하게 되어 상대적으로 움직이지 않는 선미층이 형성되는 반면, 확산층은 선미층과 반대 전하의 이온이 확산 분포되어 전기 이중층을 형성한다. 나노입자에 형성된 전기 이중층에 슬립면이 생성되고, 제타전위는 슬립면에 전위를 의미한다. 제타 전위의 절댓값이 클수록 입자 사이의 반발력이 높아 나노입자의 응집 발생은 작다. Table 2.1은 제타 전위에 따른 콜로이드 안정성 기준을 나타낸다.

제타전위는 제조 직후와 한달이 지난 뒤의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체를 측정하였으며, 각 조건에 대해 5회 측정을 수행하였다. Fig. 2.7은 제조 직후 및 한달이 지난 뒤의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 제타전위를 보여준다. 제조 직후  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 제타 전위는  $46.9 \pm 0.5 \text{ mV}$ 이며, 제조 후 한달이 지난  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 제타전위는  $40.6 \pm 1.2 \text{ mV}$ 였다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 제타전위는 제조 직후에 비해 제조 후 한달이 지났을 때 약간 감소한 결과가 나타났다. 이는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 제조 후 시간이 증가함에 따라  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 내부의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자의 표면의 척력이 증가하였기 때문이다. 하지만, 제타전위가  $30 \text{ mV}$  이상일 때 입자 사이의 반발력이 반데르발스 힘보다 크며, 입자의 덩어리가 방지되며 이는 안정적인 분산성을 갖는 것으로 평가한다. 따라서 본 연구에서는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 제조 직후 및 제조 후 한달이 지났을 때 모두  $30 \text{ mV}$  이상의 제타전위를 충족시켜 제조된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 분산안정성을 만족시켰다.





**Fig. 2.6** Schematic of the distribution of charges around nanoparticle

**Table 2.1** Stability behavior of a colloid depending on zeta potential

The magnitude of zeta potential (mV)	Stability behavior
0 - 5	Rapid coagulation or flocculation
10 - 30	Incipient instability
30 - 40	Moderate stability
40 - 60	Good stability
> 61	Excellent stability

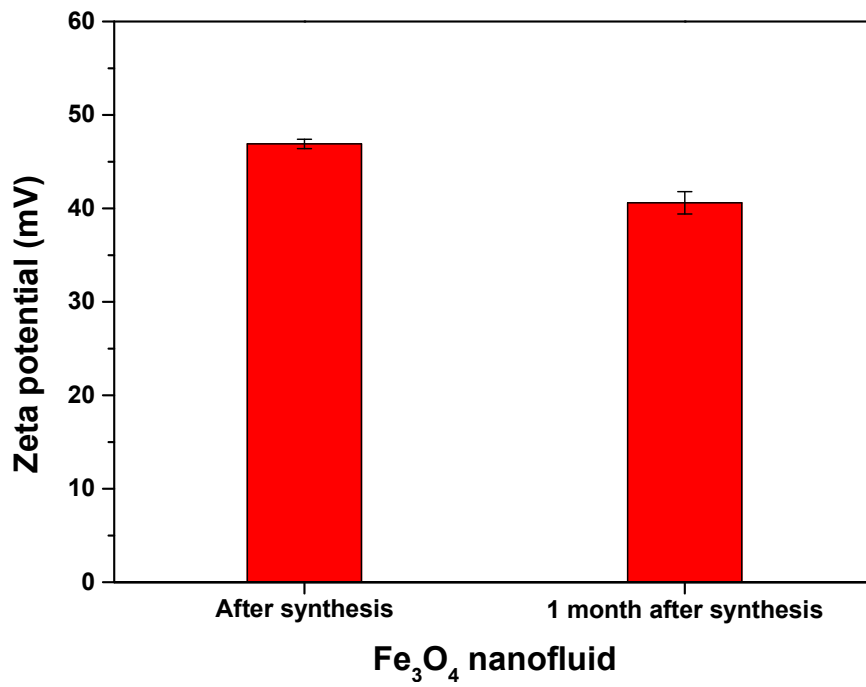


Fig. 2.7 Zeta potential of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids after synthesis and 1 month

## 2. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체 자기적 특성 평가

진동형 시료자력계(VSM)는 패러데이 유도 법칙에 따라 자기 특성을 측정하는 과학기기로 Fig. 2.8과 같이 진동형 시료자력계 내부의 샘플인 나노입자는 자화를 유도하는 일정하고 균일한 외부 자기장에 도입된다. 자화된 나노입자는 진동하는 외부 자기장에 섭동이 발생하며 코일 또는 일부 자기장 센서를 샘플 주위에 배치하여 발생된 섭동을 측정하여 나노입자의 자기적 특성을 평가하였다.

Fig. 2.9는 진동형 시료자력계를 통해 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노입자의 자기적 특성을 평가한 결과이다. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노입자의 포화자화곡선 결과로부터 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노입자의 포화자화(Ms)는 42.55 emu/g였다. 본 연구에 사용된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노입자의 포화자화는 이전 연구에서 합성된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노입자보다 높거나 비슷한 값이 나타났다 [54, 55]. 이는 본 실험에 적용된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노입자가 높은 자기적 특성을 가지며, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체 내부에 분포된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노입자는 외부 자기장을 인가하면 높은 반응성이 나타날 것으로 판단되었다.

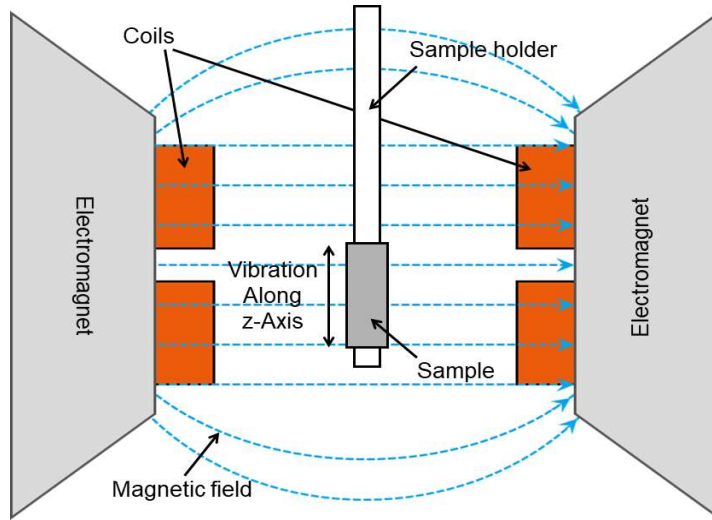


Fig. 2.8 Schematics of vibration sample magnetometer

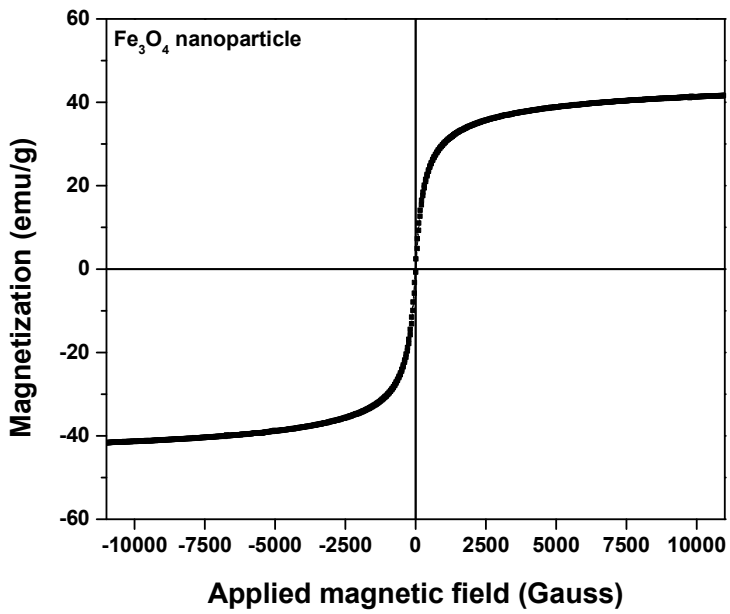


Fig. 2.9 Saturation magnetization curve of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles

## 제 3 장 실험 장치 및 실험 방법

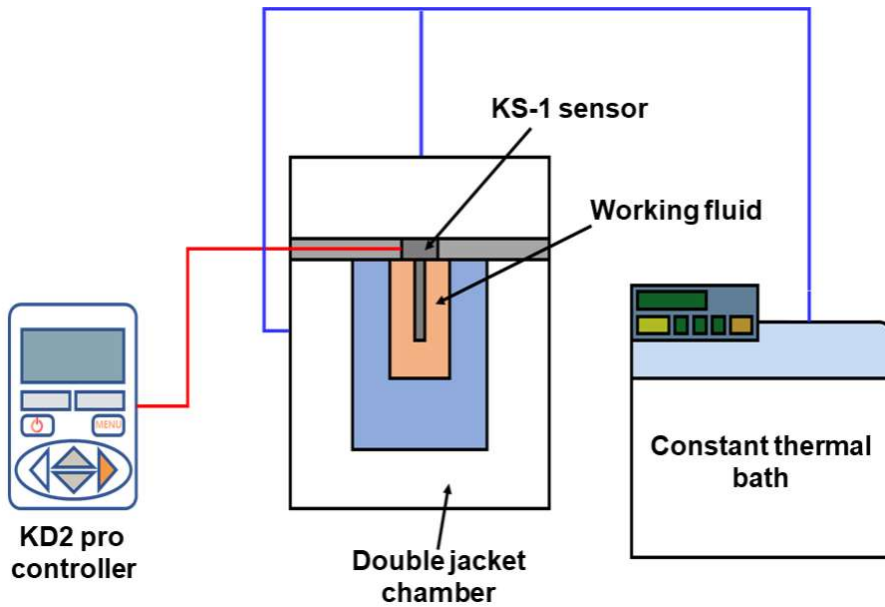
### 제 1 절 나노유체의 물성 측정 장치

#### 1. 열전도도 측정 장치

제조된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도에 따른 열전도도를 평가하기 위해 Fig. 3.1과 같이 KD2 Pro와 KS-1 센서를 이용하였다. KD2 Pro의 열전도도 측정 방식은 과도 열선 방식으로 광범위한 온도와 압력에서 열전도도를 측정하는 정확하고 정밀한 기술이다. 본 연구에서 열전도도 측정 오차는 5%이며, 측정 온도 범위는  $-50\sim 150^\circ\text{C}$ 이다. KD2 Pro 센서 중 KS-1 센서는 저점도 액체의 열전도율 측정에 적합하다. KS-1 센서의 열전도율 측정범위는  $0.02\sim 2 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ 이다. 과도 열선 방식에서는 측정 오차가 커질 수 있기 때문에 유체 내부의 미소 대류를 방지해야 한다. 미소 대류를 방지하기 위해  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 Agar을 첨가하여 젤상태로 만든 뒤 측정을 진행하였다. Agar을  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 첨가하면  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 상태는 고정되며 미소 대류를 억제하여 측정된 열전도도의 정확도를 향상시켰다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 직경 30 mm, 길이 70 mm의 샘플병에 담았고,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체가 담긴 샘플병은 더블자켓 비커 중앙에 설치하였다. KS-1 센서는 샘플병 중앙에 수직으로 위치시켰다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 온도는 항온조에서 더블자켓 비커로 일정한 온도의 유체를 지속적으로 공급하여 유지시켰다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 열전도율은 동일한 온도에서 5 번 반복 측정하여 평균값을 사용하였다.



(a) KD2 Pro thermal conductivity device



(b) Schematic of thermal conductivity measurement equipment

Fig. 3.1 Thermal conductivity measurement device

## 2. 점도 측정 장치

$\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도별 점도 특성을 조사하기 위해 Vibro 점도계 (SW-10, AND Co, Japan)를 이용하여 점도를 측정하였다. Fig. 3.2는 본 연구에서 사용된 Vibro 점도계를 나타낸다. 진동 점도계는 일정한 진폭을 유체에 있는 롤러를 통해 공진 진동시켜 점도 측정 센서의 점성 저항을 진폭시켜  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 점도를 측정하였다. 점도계의 측정범위는 0.3~10,000 mPa·s, 점도계의 정확도는 1%이며, 측정유체의 온도는 160℃이하이다.



**Fig. 3.2** Vibro viscometer SV-10

### 3. 광학적 특성 측정 장치

$\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도별 광흡수 특성은 자외선/가시광선 분광계 (AVANTES-2048, Inc. AVANTES, Netherlands)를 이용하여 측정하였다. Fig. 3.3은 광투과율 측정 장치의 개략도를 나타냈다. 분광기의 광원은 광 케이블을 통과하여  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체가 채워진 큐벳에 노출된다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 투과된 빛 에너지의 세기는 분광기의 검출기를 통해 측정되었으며, 빛의 투과율은 AVANTES에서 제공하는 분석 프로그램인 Avasoft 8을 이용하여 측정하였다.

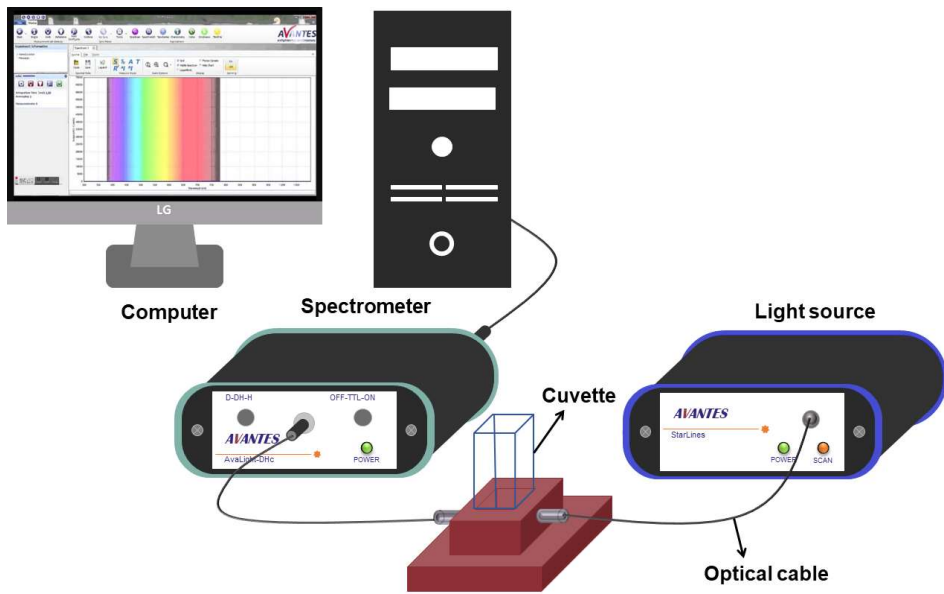


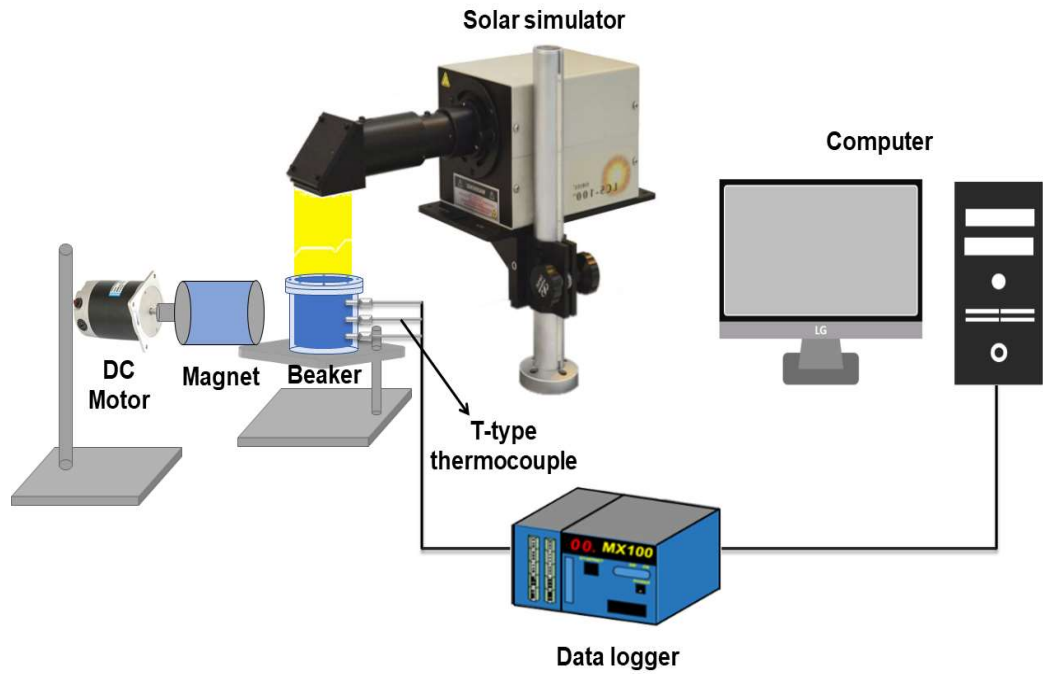
Fig. 3.3 Schematic of optical transmittance measurement equipment



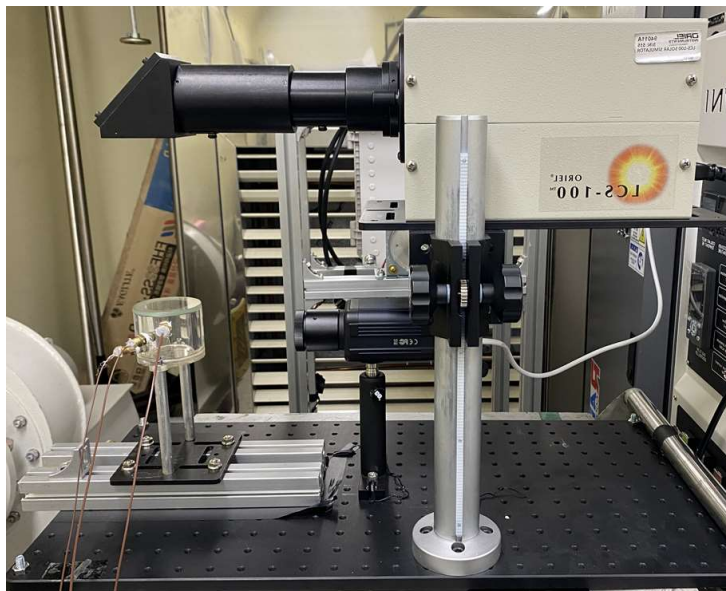
## 제 2 절 광열변환적 성능 실험 장치

### 1. 광열변환적 성능 실험 장치

광열변환 실험에서 주변 온도 및 시간 변화에 따라 작동유체에 균일하게 빛 에너지를 공급하는 것이 중요하다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광열변환적 특성을 평가하기 위해 항온항습실에서 솔라 시뮬레이터(Solar simulator)를 이용하였다. Fig 3.4는 작동유체의 광열변환적 특성에 대한 실험장치 계략도 및 실제 사진을 보여준다. 태양광 시뮬레이터(Oriel Xenon Arc lamp, Newport Co, LCS-100, America)를 이용하여 일정 시간 동안 태양광과 유사한 빛 에너지를  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 조사하였다. 솔라 시뮬레이터의 주요 성능 지표는 Table 3.1과 같다. 작동유체에 태양에너지를 균일하게 조사하기 위해 작동유체가 들어있는 용기를 조명의 중심에 배치하였으며, 이 지점에서 솔라 시뮬레이터의 일조량은 1개의 태양에너지를 확보할 수 있다. 작동유체가 담긴 용기의 상부는 3 mm의 석영 유리로 제작되었으며, 측면은 아크릴로 제작되었다. 작동유체가 들어있는 내부 용기의 크기는 직경 40 mm, 높이 42 mm이다. 용기 내부에는 T형 열전대를 상부, 중간부, 하부에 설치하여 빛에 노출된 작동유체의 온도 변화를 측정하였으며, 측정 오차는 전체 범위 내에서  $\pm 0.75\%$ 이다. 측정된 작동유체의 온도는 데이터 수집기 (MX-100, Yokogawa Inc., Japan)를 이용하여 1초 간격으로 수집되었다. 작동유체에 외부 자기장의 영향을 가하기 위해 최대 1000 Gauss의 세기를 갖는 영구자석을 용기 외부에 설치하였다. 자기장 세기는 영구자석의 거리에 멀어짐에 따라 감소하며 이는 가우스 메타 (Tesla meter, Kanetec Co., Japan)를 이용하여 측정하였다. 외부 자기장을 회전시키기 위해 영구자석에 DC 모터를 연결하였다. DC 모터를 이용하여 영구자석을 회전시켰으며, RPM 측정기 (Tachometer AT-8, Shenzhen Inc., China)를 통해 회전 속도를 조절하였다. 또한, DC 모터와 영구자석을 연결하는 축을 이동시켜 회전자기장의 회전 반경을 변화시켰다.



(a) Schematics of photothermal conversion experimental setup



(b) Photo of the experimental setup

**Fig. 3.4** Photothermal conversion measurement experimental setup

**Table 3.1** Specifications of the solar simulator

<b>Item</b>	<b>Value</b>
Illumination area (inches) [mm]	1.5×1.5 [40×40]
Maximum angle of incidence (°)	< ±6
Variable output control (Irradiance adjustment)	Height: ~0.18 Sun/inch
Nominal working distance (inches) [mm]	7.0 [178]
Light ripple	< 0.5% RMS
Lamp type	100 W, Ozone free xenon
Average lamp lifetime	750 Hours

## 2. 실험 방법 및 조건

본 실험은 항온항습실 내부에서 진행되었으며, 주변의 온도는 25°C로 일정하게 유지하였다. 작동유체가 광흡수 및 열손실이 미치는 영향을 평가하기 위해 태양광 시뮬레이터를 이용하여 작동유체에 2시간 30분 동안 태양광을 노출하였고, 그 후에는 30분 동안 냉각하여 작동유체의 온도 분포를 측정하였다. 작동유체는 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체로 농도별 광열변환성능을 조사하였다. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체 농도별 광열변환성능을 조사한 뒤 최적의 농도의 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체에 외부 자기장을 가하였다. 외부 자기장의 세기에 따른 최적의 농도의 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 광열변환성능을 실험하여, 최적의 외부 자기장 세기를 조사하였다. 또한, 최적의 농도 및 외부 자기장 세기에서 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체 내부에 다양한 회전 속도 및 회전 반경에서의 광열변환성능을 조사하였다. 본 연구에 적용된 실험 조건은 다음 Table 3.2와 같다.

**Table 3.2** Operating conditions of experiment

Item	Specification
Working fluid	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanofluid
Concentration (wt%)	0.025, 0.05, 0.075, 0.1
Magnetic field strength (Gauss)	250, 500, 750
Rotating speed (rpm)	100, 200, 300

## 제 3 절 데이터 분석 기법

### 1. 광학적 특성 분석 기법

자외선/가시광선 분광계를 이용하여  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도별 투과율은 식 (3.1) 과 같이 정의되며, 이는 입사강도와  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 투영된 광 강도의 함수이다.

$$T(\lambda) = \frac{I}{I_0} = \exp^{-K(\lambda)y} \quad (3.1)$$

여기서,  $I_0$ 와  $I$ 는 각각 작동유체의 입사 및 투과된 광 강도를 나타내고,  $K(\lambda)$  및  $y$ 는 각각 흡광계수 및 광학 깊이를 나타낸다.

$\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체로 채워진 큐벳을 광학 경로에서 제거하면서 입사 강도를 측정했다. 큐벳이  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체로 채워진 상태에서 광학 경로의 투과 강도를 측정했다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광학적 특성을 정확하게 측정하기 위해 1회 동안 200개의 데이터를 평균화하여 데이터를 수집하였으며, 3회 반복 측정하여 재현성을 평가하였다.

기존의 이중 두께 투과율은 작동유체의 광흡수, 반사 및 투과와 같은 광학적 특성을 측정했다. 이중 두께 투과율은 광투과 길이가 다른 동일한 유체의 두 가지 광 투과율을 사용하여 작동유체의 광학적 특성을 평가하는 방법이다 [56, 57]. 이중 두께 투과율을 사용하기 위해 본 연구에서 0.5 및 1 cm 광투과 깊이에서 광투과율을 측정하였다. 이중 두께 투과율은 다음과 같은 가정하에 작동유체의 광 반사율을 계산하였다.

- (a) 작동유체와 유리가 균질하여 산란을 일으키지 않는다.
- (b) 석영 큐벳의 영향은 무시할 수 있다.
- (c) 작동유체가 채워진 석영 큐벳의 광학적 특성은 균일하다.
- (d) 작동유체가 채워진 석영 큐벳의 분광 투과율, 반사율 및 흡수율은 동일한

두께에서 독립적이다.

낮은 농도의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 산란의 영향을 받지 않으며  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 균일하게 분포된다. 또한, 본 실험에서 사용된 석영 큐벳은 250~2500 nm 범위에서 균일한 광학적 특성을 갖는다. 석영 큐벳은 물과 유사한 광투과율을 가지며 위의 가정에 부합하는 광학적 영향을 무시할 수 있다.

큐벳에 수직으로 빛은 입사되며 큐벳에 포함된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광흡수율, 반사율 및 투과율은 다음 식 (3.2)부터 (3.4)로 표현된다.

$$A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda) \quad (3.2)$$

$$R(\lambda) = \rho + \frac{(1 - \rho)^2 \exp\left(\frac{-8\pi K(\lambda)y}{\lambda}\right)}{1 - \rho^2 \exp\left(\frac{-8\pi K(\lambda)y}{\lambda}\right)} \quad (3.3)$$

$$T(\lambda) = \frac{(1 - \rho)^2 \exp\left(\frac{-4\pi K(\lambda)y}{\lambda}\right)}{1 - \rho^2 \exp\left(\frac{-8\pi K(\lambda)y}{\lambda}\right)} \quad (3.4)$$

여기서  $\rho$ 는 공기와 큐벳 사이의 반사율,  $K(\lambda)$ 는 작동유체의 흡광계수,  $y$ 는 작동유체의 광학 깊이,  $\lambda$ 는 빛의 파장을 나타낸다.

$\rho$ 는 식 (3.5)를 통해 계산하였다.

$$\rho = \frac{(n - 1)^2 + \kappa^2}{(n + 1)^2 + \kappa^2} \quad (3.5)$$

여기서  $n$ 은 큐벳에서 작동유체의 평균 굴절률이다.

$\rho$ 는 큐벳에서 작동유체의 흡수와 반사율을 추정하는데 필요하다. 또한,  $\rho$ 와  $R$ 을 계산하기 위해 작동유체의  $n$ 과  $\kappa$ 를 이중 두께 투과율을 통해 구할 수 있다. 이중 두께 투과율은 동일한 작동유체에서 서로 다른 광학 깊이를 가진 두 개의 투과율과 식 (3.6)와 식 (3.7)를 통해 작동유체의 광학적 특성을 계산하는 Fresnel 관계를 결합하여 작동유체의 흡수, 반사 및 투과 특성을 계산하였다.

광학 깊이가 다른  $T_1(\lambda)$ 와  $T_2(\lambda)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$T_1(\lambda) = (1 - \lambda)^2 \exp\left(\frac{-4K(\lambda)y_1}{\lambda}\right) \quad (3.6)$$

$$T_2(\lambda) = (1 - \lambda)^2 \exp\left(\frac{-4K(\lambda)y_2}{\lambda}\right) \quad (3.7)$$

식 (3.6)과 식 (3.7)에 의해 계산된  $K(\lambda)$ 는 식 (3.8)를 이용하여 가정한다.

$$K(\lambda) = -\frac{\lambda \cdot \ln\left(\frac{T_1(\lambda)}{T_2(\lambda)}\right)}{4\pi(y_1 - y_2)} \quad (3.8)$$

$\rho$ 와  $\kappa$ 는 식 (3.5), (3.6) 및 (3.7)을 결합하여 식 (3.9)와 식 (3.10)로 표현된다.

$$\rho = \frac{1 - \sqrt{T_1^2 - T_1 \left[ \exp\left(\frac{4\pi K(\lambda)y_1}{\lambda}\right) - \exp\left(\frac{-4\pi K(\lambda)y_2}{\lambda}\right) \right]}}{1 + T_1\left(\frac{-4\pi K(\lambda)y_1}{\lambda}\right)} \quad (3.9)$$

$$\kappa = \frac{\lambda}{4\pi y_2} \ln \left[ \frac{(1 + \sqrt{1 + 4c^2 \rho^2})}{2c} \right] \quad (3.10)$$

식 (3.10)에서  $c$ 는 식 (3.11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$c = \frac{T_2}{(1 - \rho)^2} \quad (3.11)$$

작동유체의 광학적 특성을 정확하게 분석하기 위해 반복계산은 식 (3.9)에서 식 (3.11)까지 순차적으로 수행하였다.

태양에너지는 파장별로 에너지 세기가 다르기 때문에 작동유체의 광투과 거리와 파장별 태양에너지 분포를 평가하여 작동유체의 태양에너지 흡수능력을 평가해야 한다. 파장에 따른 태양에너지 분포를 고려한 태양 가중 흡수계수는 식 (3.12)와 같이 계산할 수 있다.

$$F = \frac{\int I_{AM1.5}(\lambda)(1 - \exp(-K(\lambda)y))d\lambda}{\int I_{AM1.5}(\lambda)d\lambda} \quad (3.12)$$

여기서  $I_{AM1.5}(\lambda)$ 는 AM1.5모델에 기반한 분광 태양복사 조도를 나타낸다.



## 2. 광열변환적 성능 분석 기법

수집 효율( $\eta_{rec}$ )은 태양광 노출 시간과 작동유체의 열에너지 변화량의 비율로 각 태양광 노출 시간에 대한 에너지 변환효율을 나타낸다. 작동유체의 농도는 비열의 변화에 영향을 줄 만큼 높지 않기 때문에 식 (3.13)를 통해 수집 효율을 계산할 수 있다.

$$\eta_{rec} = \frac{(c_{p,w}m_w + c_{p,np}m_{np})(T(t) - T(0))}{GA\Delta t} \approx \frac{c_{p,w}m_w(T(t) - T(0))}{GA\Delta t} \quad (3.13)$$

작동유체의 광열변환효율은 빛의 노출 여부에 따라 가열 및 냉각 과정을 걸쳐 계산할 수 있다 [58, 59]. 작동유체는 지속적인 광노출 동안 열손실을 발생시키기 때문에 작동유체 용기 주변의 열환경은 식 (3.14)와 같은 에너지 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{ab} = \sum_i m_i c_{p,i} \frac{dT}{dt} = Q_{in} - Q_{dis} \quad (3.14)$$

여기서  $m_i$  및  $c_{p,i}$ 는 각각 태양광에 의해 영향을 받은 열시스템(작동유체, 용기 부품)의 질량 및 비열을 나타낸다.  $Q_{in}$ 은 작동유체에 조사되는 태양에너지를 나타내며, 광열변환효율을 고려하면 식 (3.15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{in} = GA\eta \quad (3.15)$$

작동유체의 온도와 주변온도의 차이가 크지 않기 때문에 복사열전달을 무시한다는 가정하에서  $Q_{dis}$ 는 식 (3.16)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{dis} = hA_{dis}(T(t) - T_{amb}) \quad (3.16)$$

식 (3.15)와 식 (3.16)을 통해 식 (3.14)는 다음과 같이 식 (3.17)로 정리할 수 있다.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{GA\eta}{\sum_i m_i c_{p,i}} - \frac{hA_{dis}(T(t) - T_{amb})}{\sum_i m_i c_{p,i}} \quad (3.17)$$

작동유체에 빛이 조사되지 않을 때  $Q_{in}=0$  이므로 식 (3.17)은 식 (3.18)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dT}{dt} = - \frac{hA_{dis}(T(t) - T_{amb})}{\sum_i m_i c_{p,i}} \quad (3.18)$$

식 (3.18)은 적분을 통해 식 (3.19)로 표현될 수 있다.

$$\ln \frac{T(t) - T_{amb}}{T_{eq} - T_{amb}} = - \frac{hA_{dis}}{\sum_i m_i c_{p,i}} t = - Bt \quad (3.19)$$

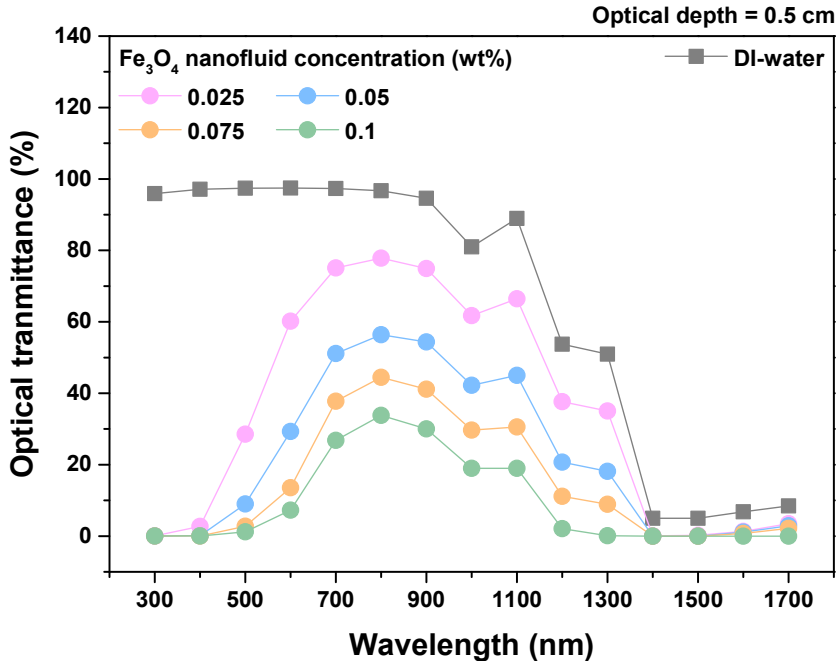
식 (3.19)에서 상수  $B$ 는 주변으로의 열소산 손실률을 나타내며, 정상 조건에서 작동유체가 태양광에 노출됨이 종료될 때 온도 변화를 통계적으로 계산할 수 있다. 상수  $B$ 는 작동유체의 냉각과정 시 온도함수 기울기이며, 본 연구에서 각 작동유체의 상수  $B$ 는  $4.1 \times 10^{-4}$ 에서  $4.5 \times 10^{-4}$ 이다.

## 제 4 장 실험 결과 및 고찰

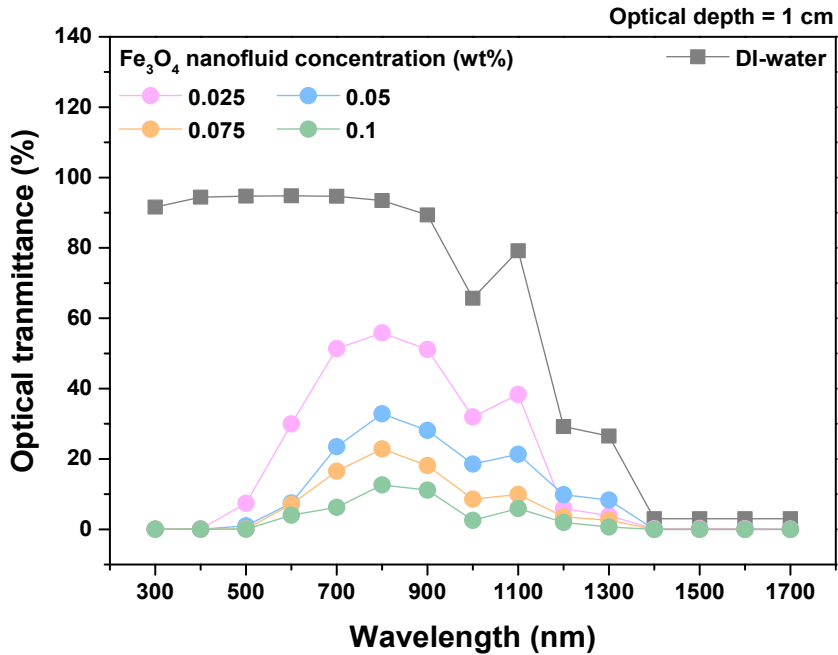
### 제 1 절 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 나노유체의 광학적 특성 고찰

직접흡수 태양열 집열기의 작동유체에서 광학적 특성은 집열 성능을 향상시키기에 매우 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광학적 특성을 조사하기 위해  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 농도별 광학특성을 분석하였다. Fig. 4.1은 0.5 cm와 1 cm의 광투과 깊이에서  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도별 광투과율을 보여주고 있다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광투과율은  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도가 증가할수록 감소하였으며,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도는 광투과율에 영향을 미침을 확인하였다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 기저유체인 DI-water는 광학깊이 0.5 cm와 1 cm에서 파장 800 nm에서 광투과율이 각각 97.7%, 95.4%로 가장 크게 나타났으며, 이는 가시광선에서 적외선으로 빛의 유형이 분리되는 파장 영역에서 입사되는 광원을 대부분 투과시킴을 의미한다. 800 nm 파장에서 광투과 깊이가 0.5 cm일 때 0.025, 0.05, 0.075, 0.1wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광투과율은 각각 77.8%, 56.4%, 44.5%, 33.8%로 DI-water에 비해  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 모든 농도에서 광투과율은 감소하였다. 또한, 광투과 깊이가 1 cm일 때, 0.025, 0.05, 0.075, 0.1wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광투과율은 각각 55.9%, 37.9%, 23.7%, 17.7%로 농도가 증가함에 따라 광투과율은 감소하였다. 또한,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 농도가 증가함에 따라 광투과율 변화가 민감하게 나타났다.

DI-water는 자외선 및 가시광선 영역에서 높은 광투과율로 광흡수가 충분히 나타나지 않았지만, 근적외선 영역에서는 광투과율이 급격히 감소한 것으로 보아 자외선 및 가시광선 영역에 비해 우수한 광흡수 특성을 가지고 있다. 또한, DI-water에  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자가 혼합된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 자외선 및 가시광선 영역에서 광투과율을 감소시켜 DI-water에 비해 광흡수를 증가시켰다. 특히, 광투과 깊이가 1 cm일 때 0.1wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 800 nm 이하의 파장영역에서 광투과율은 15%정도 낮게 나타났다. 이는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자의 광투과율이 분산된 나노입자의 광학적 특성에 영향을 받아 모든 파장대에서 광흡수 특성에 영향을 미쳤음을 의미한다.



(a) Optical depth=0.5 cm



(b) Optical depth=1 cm

Fig. 4.1 Optical transmittance of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid

각 파장 대역에서 광흡수 특성은 서로 다른 광투과 거리에서 측정된 흡광계수를 통해 조사할 수 있다. Fig. 4.2는 0.5 cm와 1 cm의 광투과 깊이에서 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 흡광계수를 나타낸다. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 흡광계수는 광흡수 계수와 산란 계수의 합으로 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 광흡수 능력을 나타낸다. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도가 증가함에 따라 광투과 깊이 0.5 cm와 1 cm에서 흡광계수의 차이는 점점 증가하였다. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도별 흡광계수는 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 가장 높은 광투과율이 나타난 800 nm의 파장에서 비교하였다. DI-water는 0.5 cm와 1 cm의 광투과 거리가 증가됨에 따라 흡광계수는 0.017 cm<sup>-1</sup>에서 0.07 cm<sup>-1</sup>로 증가하였다. 또한, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도별 흡광계수는 농도와 광투과거리가 증가됨에 따라 증가되었다. 광투과 거리가 0.5 cm일 때 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도가 0.025wt%에서 0.1wt%로 증가됨에 따라 흡광계수는 0.13 cm<sup>-1</sup>에서 0.34 cm<sup>-1</sup>로 161.5% 향상되었다. 그리고 광투과 깊이가 1 cm일 때 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도가 0.025wt%에서 0.1wt%로 증가됨에 따라 흡광계수는 0.58 cm<sup>-1</sup>에서 2.07 cm<sup>-1</sup>로 256.9% 향상되었다. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체 농도가 증가함에 따라 흡광계수는 증가하였으며 이는 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체 내부의 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노입자의 분포된 양이 증가하여 표면적 증가 및 광산란특성으로 인해 광흡수 능력이 향상됨을 나타낸다. 또한, 광투과 깊이가 증가됨에 따라 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체에 입사되는 광원을 흡수하는 영역이 증가하여 흡광계수는 증가하였으며, 0.1wt%의 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체를 비교하였을 때 광투과 거리가 0.5 cm에서 1 cm로 증가됨에 따라 흡광계수는 0.34 cm<sup>-1</sup>에서 2.07 cm<sup>-1</sup>로 508.8% 향상되었다.

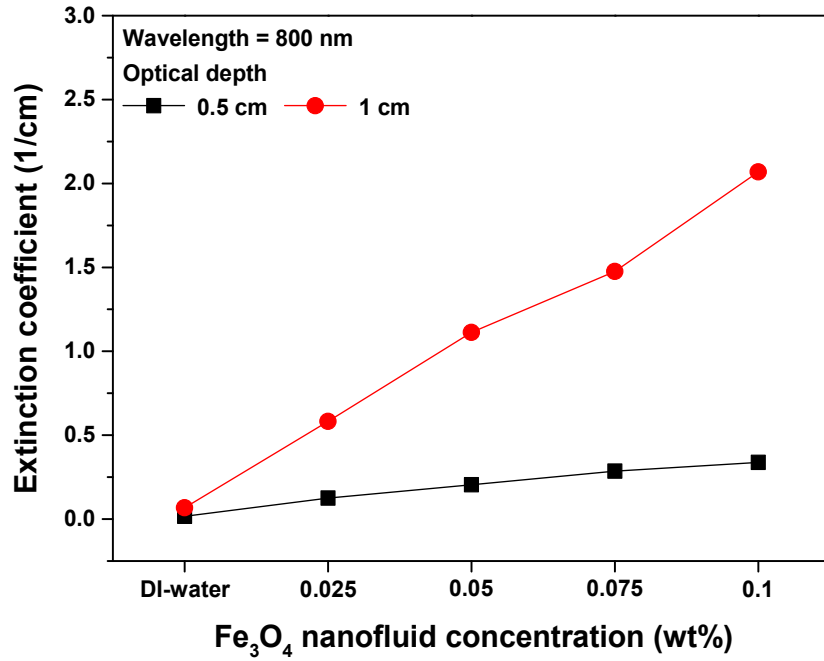


Fig. 4.2 Extinction coefficient of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid at optical depth=0.5 cm and 1 cm

Fig 4.3은 광투과 거리가 1 cm일 때, 각 파장 대역에서  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도 별 광반사율을 조사한 결과이다. 대부분의 파장에서  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 DI-water보다 낮은 광반사율이 나타났다. 이는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 내부의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자로 인해 전체적인 광반사율을 감소시킬 수 있음을 의미한다. 하지만, 전체 파장 대역 중 300~400 nm에서는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체가 DI-water에 비해 높은 광반사율이 나타났다. 이는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 내부의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자가 300~400 nm의 파장에서는 입사되는 광원을 회절시키지 않고 반사하여 높은 광반사율이 나타났음을 확인하였다. 하지만, 그 이상의 파장 영역에서는 DI-water에 비해 낮은 광반사율이 나타났다. DI-water의 경우 자외선, 가시광선 영역의 광반사율은 거의 0에 가까운 값을 가지고 있다. 하지만, DI-water는 1400~1600 nm에서 광반사율이 97%로 입사되는 광원 중 대부분을 반사하였다. 이러한 현상은 광흡수율을 감소시키기 때문에  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자가 DI-water에 첨가시켜 이러한 문제를 개선하였다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자가 혼합된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 1400~1600 nm에서 광반사율을 감소시켰으며, 이는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도가 증가됨에 따라 광반사율은 감소되었다. 특히 0.1wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에서는 1400~1600 nm의 광반사율이 0으로 입사되는 광원을 반사 대신 흡수 또는 투과시켰다. 따라서,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광반사율은 300~400 nm의 파장 영역에서 나타나며 그 이상의 파장에서는 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

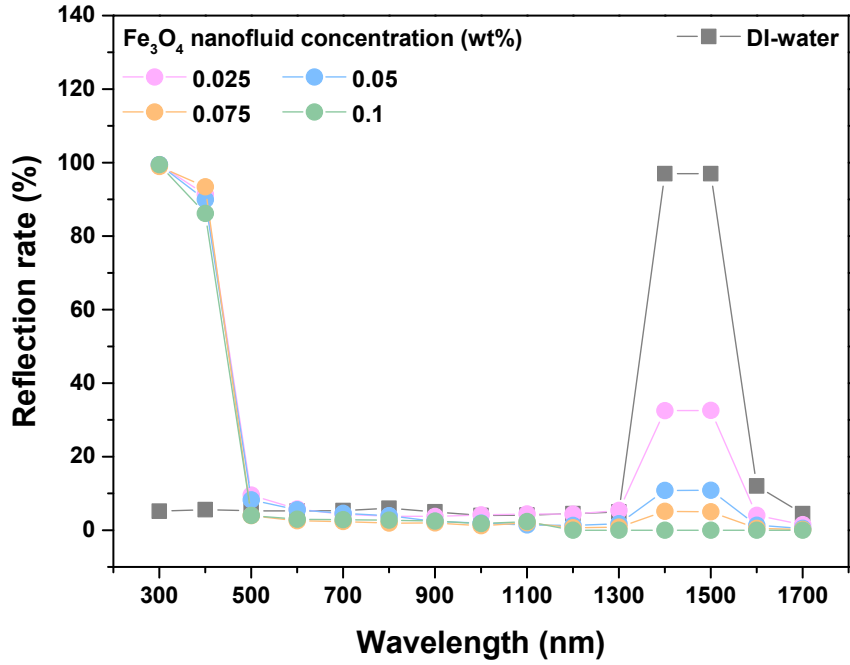


Fig. 4.3 Reflection rate of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid



Fig 4.4는 광투과 거리가 1 cm일 때, 각 파장 대역에서  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도 별 광흡수율을 조사한 결과이다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 모든 파장에서 DI-water 보다 높은 광흡수율이 나타났다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 농도 중 가장 낮은 농도인 0.025wt%에서는 광흡수율은 DI-water에 비해 급격히 증가하였으며, 가장 높은 광투과율이 나타난 800 nm의 파장에서 DI-water와 비교한 결과 0.55%에서 40.3%로 증가하였다. DI-water는 1400~1500 nm에서 광흡수율은 0에 가깝게 나타났다. 이는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체를 통해 보완되었으며, 0.05wt%의 이상 농도부터는 DI-water의 특성이 보완되어 1400~1500 nm의 파장에서 입사되는 광원을 대부분 흡수하였다. 전체 파장 영역에서 모든 농도의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 DI-water에 비하여 광흡수율을 증가시켰으며, 농도가 증가됨에 따라 광흡수율은 향상되었다. 이는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 내  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자로 인해 광흡수 표면적이 증가하기 때문에 DI-water 보다 높은 광흡수율이 나타났으며, 높은 농도일수록 광흡수율이 증가하였다.

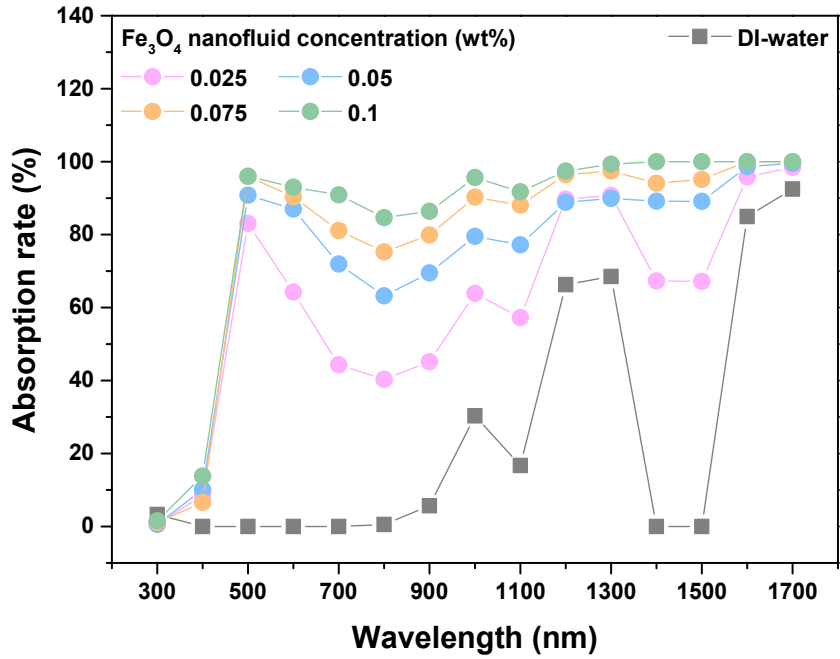
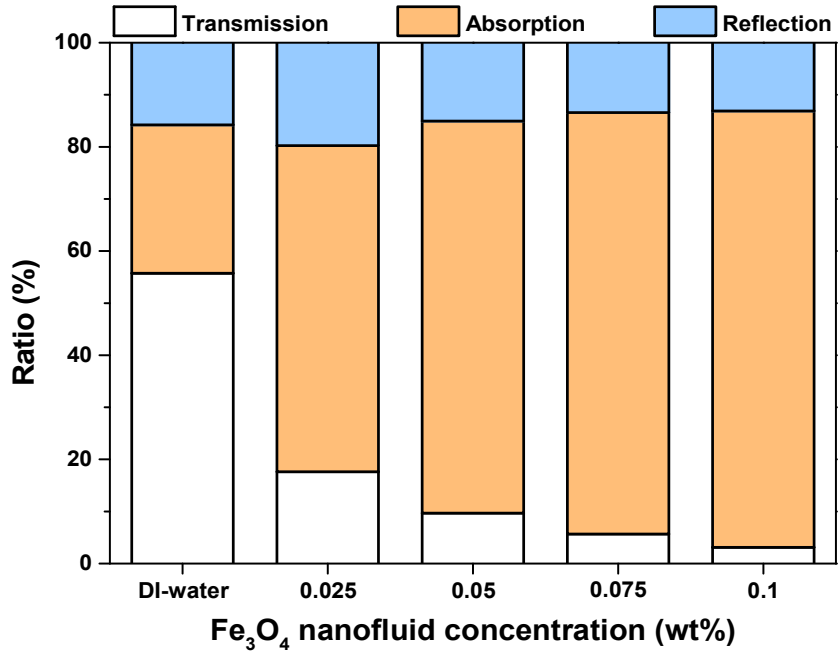


Fig. 4.4 Absorption rate of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid

Fig. 4.5는 DI-water와  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 농도별 입사된 광원에서 투과율, 반사율, 흡수율을 나타냈다. 기저유체인 DI-water의 광투과율은 55.7%로 입사되는 광원의 반이상이 투과되었다. 또한, 투과되지 않은 광원 중 DI-water에 의해 28.5%의 광원이 흡수되었으며, 나머지 15.8%는 반사되었다. DI-water에  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자를 첨가시키면 입사되는 광원의 투과율을 DI-water에 비해 크게 감소시켰다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도가 0.025, 0.05, 0.075, 0.1wt%로 증가됨에 따라 투과율은 각각 17.6%, 9.7%, 5.7%, 3.1%로, DI-water에 비해 각각 68.4%, 82.6%, 89.8%, 94.4% 감소되었다. 이는 DI-water에 비해  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자가 첨가됨에 따라 광원이 흡수 또는 반사되는 양이 증가되어 광투과율이 감소하였다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도가 0.025wt%일 때 광원의 흡수 및 반사율은 각각 62.6% 및 19.8%로 DI-water에 비해 증가하였다. DI-water에  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자가 첨가됨에 따라 광흡수 표면적이 증가하여 광흡수율은 증가하였지만, 광반사율도 DI-water에 비해 증가하였다. 하지만  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도가 증가됨에 따라 광흡수 표면적은 증가하여 흡수되는 광원의 양은 크게 증가하였다. 본 실험에 사용된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 농도 중 0.1wt%에서 가장 많은 광원을 흡수하였으며, 입사되는 광원의 83.8%를 흡수하였다. 또한, 기저유체인 DI-water에 비해 194% 향상된 결과가 나타났다. 기저유체인 DI-water에  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자를 첨가하면 작동유체의 광흡수 표면적이 증가하여 입사되는 광원을 흡수하는 양이 증가되며 이는 작동유체의 태양에너지 흡수특성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.



**Fig. 4.5** Transmission, absorption, and reflection of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid according to the concentration

지표에 도달하는 태양에너지는 적외선 49%, 가시광선 44%, 자외선 7%로 구성되어 있다. 지표면에 도달하는 태양에너지 중 작동유체가 흡수하는 광에너지를 조사하기 위해 지표면에 도달하는 태양에너지의 모델인 AM1.5모델과 작동유체의 흡수계수를 비교하여 작동유체의 광흡수 능력을 평가하였다. Fig. 4.6은  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 태양가중 흡수율을 보여준다. DI-water의 태양가중 흡수율은 22.7%로 전체 지표면에 도달하는 태양에너지 흡수능력이 매우 낮았다. DI-water에 비해  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 모든 농도에서 50% 이상의 높은 태양가중 흡수율이 나타났다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 농도 중 가장 낮은 농도인 0.025wt%의 농도에서 태양가중 흡수율은 74.2%로 DI-water에 비해 크게 향상된 태양에너지 흡수능력이 나타났다. 또한,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도가 증가됨에 따라 태양가중 흡수율은 점점 증가하였다. 이는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도가 높아짐에 따라 광투과율 및 반사율이 감소하였으며, 흡수율이 증가했기 때문에 태양가중 흡수율은 증가한 것으로 보인다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 농도 중 0.1wt%에서 태양가중 흡수율은 88%로 가장 높게 나타났다. 이는 0.025, 0.05, 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 태양 가중 흡수율과 비교했을 때 각각 18.6%, 9.5%, 4.3% 향상된 값을 보였다. 따라서  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자를 DI-water에 첨가하면 작동유체의 광흡수 능력을 향상시키며 이는 태양열 집열기의 작동유체로 적용하기에 적합한 특성을 가지는 것으로 판단된다.

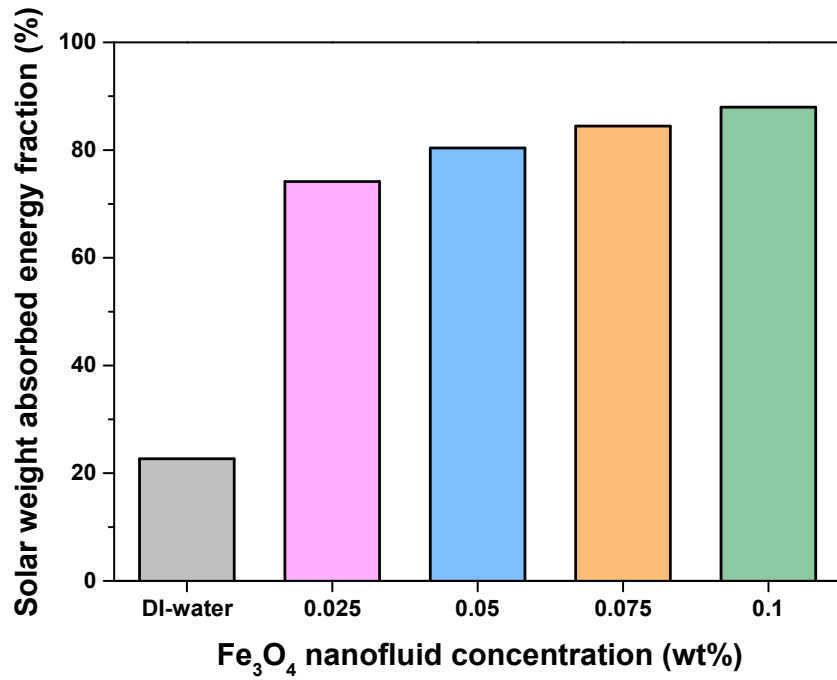


Fig. 4.6 Solar weight absorbed energy fraction of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid

## 제 2 절 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도별 열물리적 및 광열변환적 특성 고찰

### 1. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체 농도별 열물리적 특성 분석

작동유체의 열물리적 특성을 조사하기 위해 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도별 열전도도 및 점도를 실험적으로 특정한 뒤 이들을 서로 고찰하였다. Table 4.1은 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도별 열전도도 측정결과를 보여준다. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체는 온도와 농도가 증가함에 따라 열전도도는 증가하였다. 온도가 20℃일 때 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도가 0wt%에서 0.1wt%로 증가함에 따라 열전도도는 0.603 W/m·℃에서 0.605 W/m·℃로 증가하였다. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 온도가 20℃에서 50℃로 증가함에 따라, 0.1wt%의 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 열전도도는 0.605 W/m·℃에서 0.644 W/m·℃로 증가하였다. 본 연구에서 사용된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도에 따른 열전도도는 농도가 높아짐에 따라 증가하였지만, 크게 향상된 결과는 나타나지 않았다. 하지만, 본 연구에 사용된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도는 광흡수가 개선되는 범위에서 열전도도를 조사하였으며, 이 범위에서 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도 증가에 따라 열전도도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

**Table 4.1** Thermal conductivity of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid

Temperature (°C)	Unit: W/m·°C				
	Concentration (wt%)				
	0	0.025	0.05	0.075	0.1
20	0.603	0.603	0.604	0.604	0.605
30	0.616	0.616	0.617	0.618	0.619
40	0.63	0.631	0.631	0.633	0.634
50	0.64	0.641	0.642	0.642	0.644

Table 4.2는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도별 점도의 측정결과를 보여준다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 점도는 농도의 증가에 따라 증가하는 경향이 나타났다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 온도가  $20^\circ\text{C}$ 일 때  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 점도는 농도가 0wt%에서 0.1wt%로 증가함에 따라  $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 에서  $1.06 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 로  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자에 의해 점도는 6% 증가하였다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 온도가  $20^\circ\text{C}$ 에서  $50^\circ\text{C}$ 로 증가함에 따라  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 모든 농도에서 점도는 감소되었다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 온도가  $50^\circ\text{C}$ 일 때 0.1wt%에서 점도 감소율이 가장 크게 나타났으며  $20^\circ\text{C}$ 에 비해 약 45.3% 감소하였다. 측정결과  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 점도는 온도 및 농도가 증가함에 따라 차이가 크게 나타난다. 하지만 본 연구에 사용된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 온도에 따른 점도는 차이가 크게 나타났지만, 농도 증가에 따른 점도 증가는 상대적으로 미미한 것으로 판단되었다. 이는 광흡수 개선 내의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도 증가가 점도 차이를 나타내기에 낮은 차이기 때문이다. 하지만 본 연구에 사용된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 농도는 증가됨에 따라 점도는 증가되며  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자를 통해  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 점도가 향상됨을 확인하였다.

**Table 4.2** Viscosity of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanofluid

Temperature ( $^\circ\text{C}$ )	Concentration (wt%)				
	0	0.025	0.05	0.075	0.1
	20	1	1.02	1.03	1.04
30	0.8	0.81	0.82	0.83	0.84
40	0.65	0.66	0.67	0.68	0.69
50	0.55	0.55	0.56	0.57	0.58

Unit:  $\text{mPa}\cdot\text{s}$

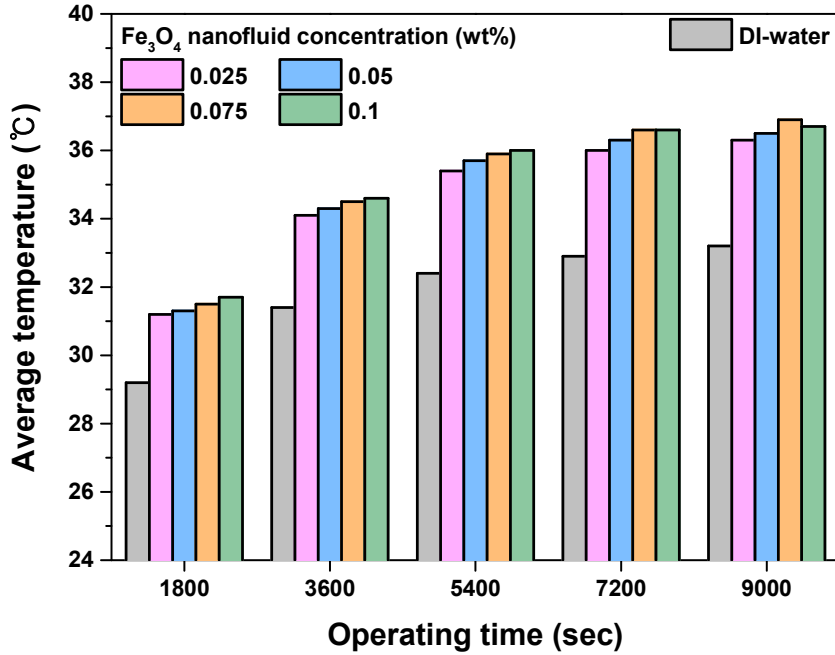


## 2. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체 농도별 광열변환성능 분석

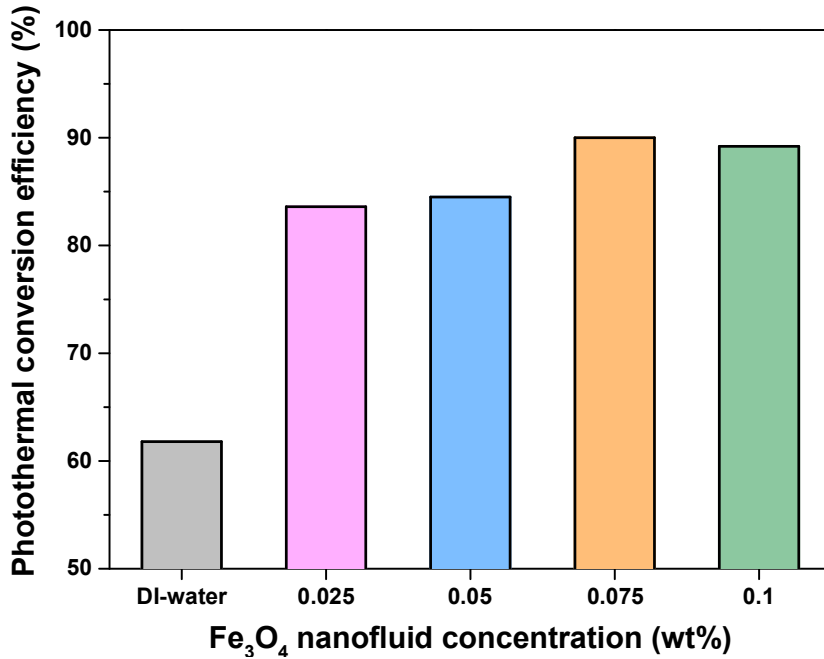
Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 광열변환성능을 분석하기 위해 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체 농도별 광열변환성능 실험을 진행하였다. 광열변환성능 실험은 2시간 30분 동안 진행되었으며, 열환경 챔버 내에서 실험이 진행되었다. 열환경 챔버는 실험이 진행되는 동안 주변의 외기온도를 25℃로 일정하게 유지하기 위해 사용되었다. 작동유체에 실제 태양에너지를 모사하기 위해 AM 1.5 광원 필터가 장착된 태양광 시뮬레이터가 사용되었다. 태양광 시뮬레이터를 이용하여 태양광에 노출된 작동유체의 온도는 작동유체가 흡수한 열과 방출한 열이 동일한 평형상태에 도달할 때까지 증가하게 된다. 작동유체의 온도차는 시간에 의존적이며 태양광에 노출된 시간이 증가함에 따라 작동유체의 온도는 초기온도보다 점차 증가하게 된다. 초기온도와 평형상태에 도달한 온도의 차이가 클수록 작동유체의 태양열 변환 특성은 우수하게 나타난다. Fig. 4.7은 2시간 동안 진행된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 각 농도에 따른 광열변환성능 실험 결과를 나타냈다. Fig. 4.7(a)는 태양광 시뮬레이터를 통해 태양광에 노출된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도별 온도변화를 나타냈다. Fig. 4.7(a)의 그래프 곡선은 태양광 시뮬레이터를 작동시킨 후부터 온도가 급격히 증가한 가열단계와 열전달 평형으로 인해 온도차가 일정하게 나타난 평형단계로 구분된다. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체 모든 농도에서 DI-water보다 빠르게 온도가 상승하였으며, 2시간 30분 뒤에 최종온도는 뚜렷한 차이가 나타났다. DI-water는 초기 시작 온도(25℃)에서 2시간 30분 뒤에 33.2℃로 상승되었다. 반면 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체는 0.025, 0.05, 0.075, 0.1wt%의 농도에서 2시간 30분 뒤에 온도는 각각 36.3℃, 36.5℃, 36.9℃, 36.7℃로 상승되었다. 초기 시작 온도(25℃)에 비해 2시간 30분 뒤 상승된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 온도의 차이는 0.025, 0.05, 0.075, 0.1wt%에서 각각 11.3℃, 11.5℃, 11.9℃, 11.7℃이다. 기저유체인 DI-water의 온도차이와 비교하면 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체는 모든 농도에서 높은 온도 상승 및 온도차이가 나타났다. 이는 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체 안의 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노입자에 의해 향상된 광흡수 특성으로 인해 상부에서 흡수된 태양에너지양이 증가하고 열로 변환되기 때문이다.

작동유체의 초기 온도에 비해 2시간 30분 뒤 상승된 작동유체의 온도를 식 (3.13)에 대입하여 광열변환효율을 계산하였으며 이를 Fig. 4.7(b)에 나타냈다. 기저

유체로 사용된 DI-water의 광열변환효율은 61.8%이다. 반면,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광열변환효율은 0.025, 0.05, 0.075, 0.1wt%에서 각각 83.6%, 84.5%, 90%, 89.2%로 기저유체인 DI-water에 비해 각각 35.3%, 36.7%, 45.6%, 44.3% 향상된 결과를 보였다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 농도가 증가됨에 따라 향상된 광흡수 특성으로 인해 작동유체의 평형온도가 증가하여 초기 시작온도와 온도차 증가로 광열변환효율이 증가하였다. 본 실험에 적용된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도 중 0.075wt%에서 기저유체인 DI-water에 비해 가장 높은 평형온도와 광열변환효율이 나타났다. 이는 DI-water의 광열변환효율과 비교했을 때, 약 45.6% 향상되었다. 반면 0.1wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에서는 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 비해 높은 광흡수 특성을 가지지만 평형온도 및 광열변환효율은 감소된 결과가 나타났다. 이에 대한 원인을 분석하면  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도가 증가됨에 따라 광흡수 특성이 향상되며 상부에서 다수의 태양광을 흡수하여 열로 변환되는 양이 많아지며 이때, 0.1wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 다른 농도보다 상부에서 많은 광에너지를 흡수하여 열로 변환한다. 하지만, 상부에서 흡수된 열에너지는 주변으로 방출되는 열과 동일한 평형온도에 빠르게 도달하게 되며, 하부로 열이 전달되기 전에 상부에서 주변으로 많은 양의 열이 방출되어 작동유체의 내부의 평균온도를 감소시킨다. 따라서 본 연구에 사용된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도 중 0.075wt%의 농도가 최적의 농도로 나타났으며, 이에 가장 높은 광열변환효율이 나타났다.



(a) Average temperature



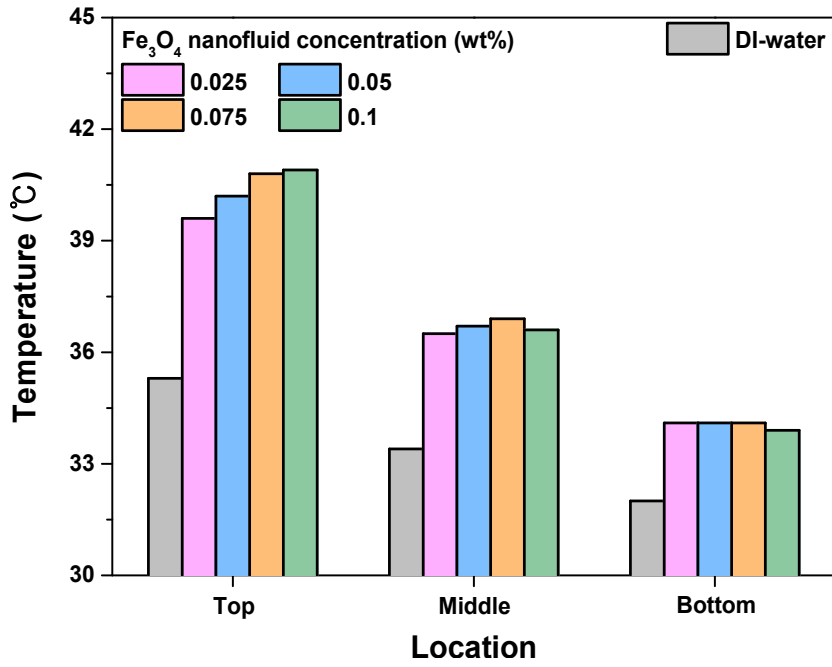
(b) Photothermal conversion efficiency

Fig. 4.7 Photothermal conversion performance of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid

2시간 30분 동안 진행된 광열변환성능 실험은 초기 1시간까지는 급격한 온도상승이 나타났지만, 1시간 이후 작동유체의 온도상승 속도는 감소하였다. 이는 작동유체 상부에서 흡수된 열이 실험시간이 지남에 따라 주변과 온도의 차이가 증가하여 주변으로 열손실이 증가했기 때문이다. 작동유체 상부에서 흡수된 열과 주변으로 손실되는 열이 평형하게 되면 온도상승은 거의 나타나지 않는다. 또한, 작동유체 상부가 평형온도에 도달 시 작동유체의 중간부 및 하부에 열이 전달되기 전에 주변으로 열손실이 나타나며 이는 작동유체 내부의 위치에 따른 온도차를 발생시킨다. Fig. 4.8은 평형에 도달한 DI-water 및  $Fe_3O_4$  나노유체의 위치별 온도를 나타냈다. 2시간 30분 동안 태양광 시뮬레이터에 노출된 DI-water의 상부의 온도는  $35.3^{\circ}C$ 에 도달하였으며, 중간부 및 하부의 온도는  $33.4^{\circ}C$ ,  $32^{\circ}C$ 로 상승하였다. DI-water는 상부에서 흡수된 광에너지는 열로 변환되어 중간부 및 하부로 전달되었지만, 상부에서 평형온도 도달 시 중간부 및 하부로 전달되기 전에 주변으로 열손실로 인해 온도는 상부에 비해 중간부 및 하부는 낮은 온도가 나타났다.  $Fe_3O_4$  나노유체가 평형온도에 도달했을 때 상부의 온도는 0.025, 0.05, 0.075, 0.1wt%에서 각각  $39.6^{\circ}C$ ,  $40.2^{\circ}C$ ,  $40.8^{\circ}C$ ,  $40.9^{\circ}C$ 였다.  $Fe_3O_4$  나노유체의 경우 농도가 증가함에 따라 광흡수 특성이 향상되어 가장 높은 농도인 0.1wt%에서 가장 높은 온도에 도달하였다. 하지만,  $Fe_3O_4$  나노유체의 중간부 및 하부의 온도는 오히려 0.1wt% 보다 낮은 농도에서 더 높은 온도 및 동일한 온도가 나타났다.  $Fe_3O_4$  나노유체의 상부와 하부의 온도차는 0.025, 0.05, 0.075, 0.1wt%에서 각각  $5.5^{\circ}C$ ,  $6.1^{\circ}C$ ,  $6.7^{\circ}C$ ,  $7^{\circ}C$ 로  $Fe_3O_4$  나노유체의 농도가 증가됨에 따라 상부와 하부의 온도차이는 크게 나타났다. 이는 작동유체의 광흡수 특성과 관련이 있다.  $Fe_3O_4$  나노유체의 광흡수 특성의 경우 높은 농도일수록 짧은 광투과 거리에서 높은 광흡수 특성이 나타났다. 따라서 0.1wt%의  $Fe_3O_4$  나노유체의 경우 상부에서 광에너지를 흡수하여 열로 변환하였으며 중간부 및 하부로 광에너지는 전달되지 않고 변환된 열 확산에만 의존하였다. 따라서  $Fe_3O_4$  나노유체의 농도가 증가함에 따라 광흡수 특성은 증가하지만 작동유체의 불균일한 온도분포로 인해 열성층화 역시 증가하였다. 이는 작동유체의 광열변환효율을 향상시키는데 있어 부정적인 요인으로 발생한다.

이를 해결하기 위해 본 연구에서는  $Fe_3O_4$  나노유체에 외부 자기장을 적용하였

다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 강자성 물질로 외부 자기장에 의해 열물리적 특성이 변화하며 이는 광열변환성을 향상시킬 수 있다. Fig. 4.7에서 제시하였듯이 농도별  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광열변환성능 분석을 통해 최적의 농도는 0.075wt%임을 확인하였으며 이 농도조건에서 외부 자기장을 적용하여 광열변환성능 실험을 진행하였다. 본 실험에 적용된 외부 자기장의 세기는 각각 250, 500, 750 Gauss이다.



**Fig. 4.8** Temperature of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid as a function of location at 9000 sec

## 제 3 절 외부 자기장 영향에 따른 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 나노유체의 열물성적 및 광열변환적 특성 고찰

### 1. 외부 자기장 세기에 따른 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 나노유체의 열전도도 분석

$\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 강자성체 물체로 외부 자기장에 의해 열물리적 특성이 향상될 수 있다. 이를 확인하기 위해 본 연구에서는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 다양한 세기의 외부 자기장을 적용하여 열전도도를 분석하였다. 열전도도 측정에 사용된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도는 0.025, 0.05, 0.075, 0.1wt%이며, 특성 결과는 Table 4.3과 같다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 모든 농도에서 외부 자기장을 적용하지 않았을 때보다 외부 자기장을 적용하였을 때 높은 열전도도가 측정되었다. 또한,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도와 온도가 증가됨에 따라 열전도도는 증가하였다. 본 연구에서  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 열전도도는 20℃부터 50℃까지 10℃ 간격으로 측정되었다. 온도가 20℃인  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 250 Gauss의 외부 자기장을 적용하여 열전도도를 측정한 결과 0.025, 0.05, 0.075, 0.1wt%의 농도에서 열전도도는 각각 0.611, 0.616, 0.617, 0.619  $\text{W/m}\cdot\text{℃}$ 로 농도가 증가됨에 따라 높은 열전도도가 나타났으며, 외부 자기장을 적용하지 않았을 때보다 각각 1.33%, 1.66%, 1.99%, 2.31% 향상되었다. 또한,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 온도가 50℃일 때 250 Gauss의 외부 자기장을 적용한 결과 0.025, 0.05, 0.075, 0.1wt%의 농도에서 열전도도는 각각 0.649, 0.652, 0.655, 0.662  $\text{W/m}\cdot\text{℃}$ 로, 외부 자기장을 적용하지 않았을 때보다 각각 1.25%, 1.58%, 2.02%, 2.8% 향상되었다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 열전도도는 농도와 온도가 증가됨에 따라 외부 자기장에 의해 열전도도 향상율은 증가하였으며, 이는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도가 증가됨에 따라 외부 자기장에 반응하는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자들이 증가하면서 열전도도를 향상시키기 때문이다.

$\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 열전도도는 온도 및 농도뿐 아니라 외부 자기장의 세기가 증가함에 따라 열전도도도 증가한다. 0부터 750 Gauss의 외부 자기장을  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 모든 농도에 적용한 결과 외부 자기장이 750 Gauss일 때 가장 높은 열전도도가 나타났다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도별 광열변환성능을 조사한 결과 대부분의 평형온

도는 35℃ 이상에서 나타났으며, 외부 자기장 적용 시 그보다 높은 온도에서 평형 온도가 나타날것으로 예상된다. 따라서 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체가 40℃일 때 농도별 외부 자기장 세기에 따른 열전도도 향상율을 비교하였다. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도가 0.025, 0.05, 0.075, 0.1wt%일 때 외부 자기장의 세기가 0 Gauss에서 750 Gauss로 증가됨에 따라 열전도도는 각각 4.06%, 4.67%, 5.76%, 6.37% 향상되었다. 이는 외부 자기장에 의해 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체 내부의 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노입자가 쌍극자-쌍극자 상호작용 통해 사슬모양의 구조를 형성시키며 이는 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 열전도도를 향상시킨다. 또한, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 농도가 증가됨에 따라 열전도도 향상율은 증가하였으며 이는 외부 자기장에 의해 형성된 사슬모양의 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노입자의 수가 증가하여 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 열전도도를 증가시켰기 때문이다. 본 연구를 통해 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체는 외부 자기장에 의해 열전도도가 향상됨을 확인하였으며, 외부 자기장의 세기가 증가됨에 따라 그 향상율이 증가됨을 확인하였다. 이는 직접흡수 태양열 집열기에 적용 시 집열성능을 향상시키는데 긍정적인 영향을 미칠것으로 예상된다.



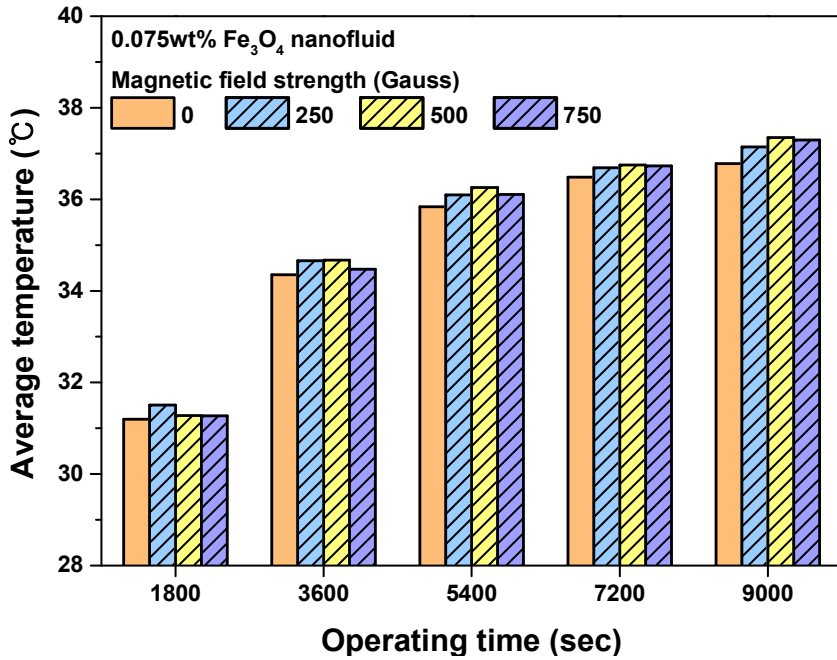
**Table 4.3** Thermal conductivity of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid according to external magnetic field strength

 Unit: W/m<sup>2</sup>°C

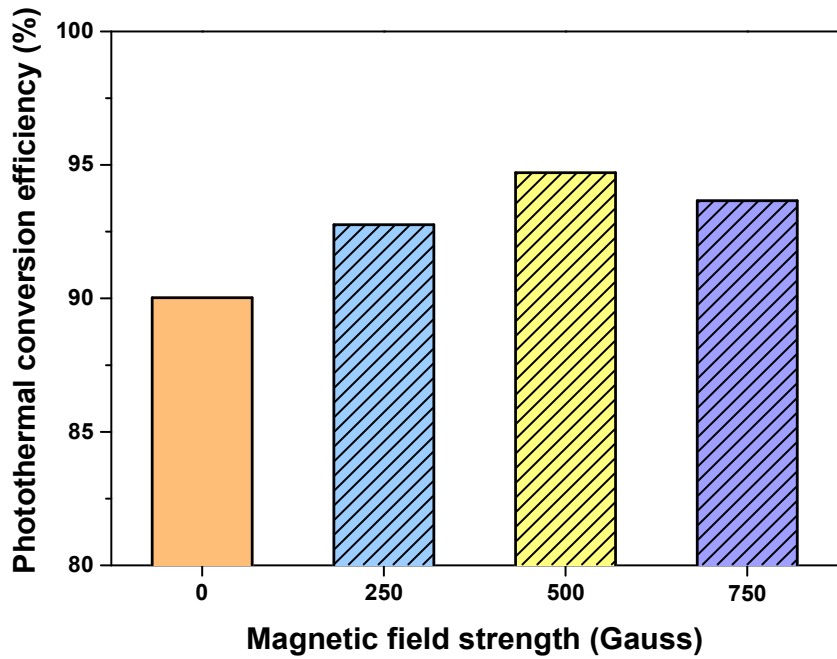
<b>0 Gauss</b>				
Temperature (°C)	Concentration (wt%)			
	0.025	0.05	0.075	0.1
20	0.603	0.604	0.604	0.605
30	0.616	0.617	0.618	0.619
40	0.631	0.631	0.633	0.634
50	0.641	0.642	0.642	0.644
<b>250 Gauss</b>				
Temperature (°C)	Concentration (wt%)			
	0.025	0.05	0.075	0.1
20	0.611	0.614	0.616	0.619
30	0.621	0.627	0.631	0.633
40	0.637	0.641	0.645	0.657
50	0.649	0.652	0.655	0.662
<b>500 Gauss</b>				
Temperature (°C)	Concentration (wt%)			
	0.025	0.05	0.075	0.1
20	0.618	0.624	0.628	0.632
30	0.624	0.637	0.643	0.646
40	0.644	0.651	0.657	0.661
50	0.658	0.662	0.667	0.671
<b>750 Gauss</b>				
Temperature (°C)	Concentration (wt%)			
	0.025	0.05	0.075	0.1
20	0.625	0.634	0.64	0.646
30	0.638	0.647	0.656	0.66
40	0.654	0.661	0.669	0.675
50	0.667	0.672	0.679	0.685

## 2. 외부 자기장 세기에 따른 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 나노유체 광열변환성능 분석

Fig. 4.9는 외부 자기장 세기에 따른 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광열변환효율을 보여주고 있다. 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 외부 자기장을 적용하지 않았을 때 2시간 30분 뒤 온도는 36.9°C로 초기 시작온도인 25°C에 비해 11.9°C 상승되었다. 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 250, 500, 750 Gauss의 외부 자기장을 적용하였을 때 초기 30분은 외부 자기장에  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자들이 쌍극자-쌍극자 상호작용으로 인해 사슬모양의 구조가 형성되는 단계로 외부 자기장이 적용되지 않았을 때와 온도 차이는 크게 나타나지 않았다. 하지만, 광에 노출되는 시간이 증가함에 따라 외부 자기장의 영향으로 사슬모양의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자들은 배열되며 이는 외부 자기장을 적용하지 않았을 때 보다 점차 높은 온도로 상승되었다. 따라서, 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 250, 500, 750 Gauss의 외부 자기장을 적용하였을 때 2시간 30분 뒤 상승된 온도는 각각 37.1°C, 37.4°C, 37.3°C로 외부 자기장을 적용하지 않았을 때 보다 높은 온도로 나타났다. 외부 자기장을 적용하지 않은 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체가 상승된 온도(11.9°C)에 비해 250, 500, 750 Gauss의 외부 자기장을 적용한 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 상승된 온도는 각각 12.1°C, 12.4°C, 12.3°C로 외부 자기장을 적용하지 않았을 때보다 외부 자기장을 적용하였을 때 외부 자기장 세기에 따라 각각 0.2°C, 0.5°C, 0.4°C 향상된 온도를 나타냈다. 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광열변환효율은 외부 자기장을 적용하지 않았을 때 90%이며, 250, 500, 750 Gauss의 외부 자기장을 적용하였을 때 광열변환효율은 각각 92.8%, 94.7%, 93.7%로 외부 자기장을 적용하였을 때 광열변환효율이 향상됨을 확인하였다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 외부 자기장을 적용하면 자성 나노입자인  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자가 외부 자기장에 의해 쌍극자-쌍극자 상호작용이 형성되며 사슬모양의 구조로 배열된다. 이러한 사슬 구조는 작동유체의 열적 특성에 영향을 미치며, 이는 광열변환성능에 영향을 미친다. 본 연구의 결과를 바탕으로 외부 자기장 하에서  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 열전도도는 상승되었으며 이는 광열변환성능에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다.



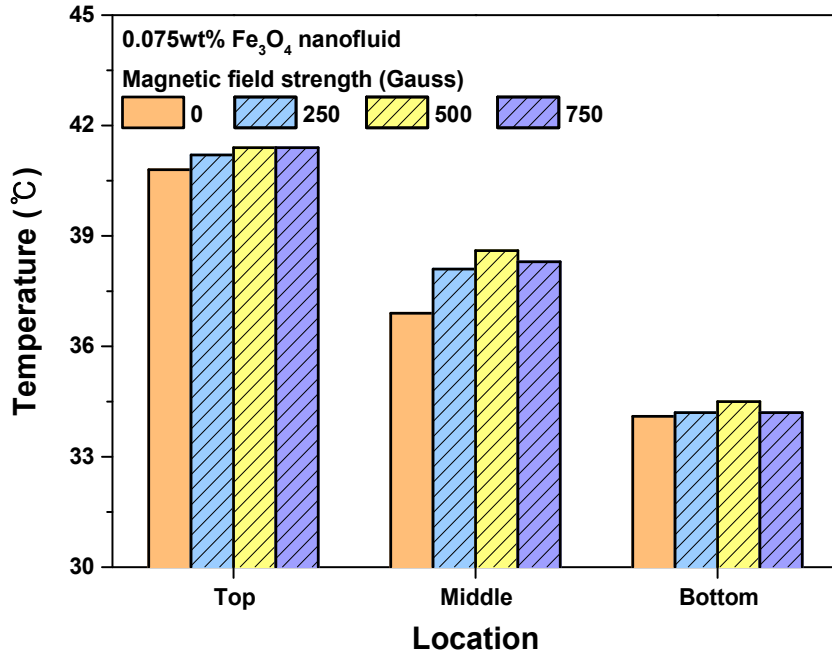
(a) Average temperature



(b) Photothermal conversion efficiency

Fig. 4.9 Photothermal conversion performance of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid according to magnetic field strength

외부 자기장 세기가 0 Gauss에서 500 Gauss로 증가됨에 따라  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 온도 및 광열변환효율은 증가되었다. 하지만, 외부 자기장의 세기가 500 Gauss에서 750 Gauss로 증가되면 500 Gauss에 비해  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 온도 및 광열변환효율은 감소되었다. Fig. 4.10은 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 온도가 평형에 도달했을 때 위치별 온도를 나타냈다. 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 상부, 중간부, 하부에서 외부 자기장을 적용하였을 때가 외부 자기장을 적용하지 않았을 때 보다 높은 온도가 나타났다. 또한, 외부 자기장의 세기가 0 Gauss에서 500 Gauss로 증가됨에 따라 중간부 및 하부의 온도는 증가하였지만, 500 Gauss에서 750 Gauss로 증가됨에 따라 500 Gauss에 비해 중간부 및 하부의 온도는 감소하였다. 이는 외부 자기장의 세기 증가는 쌍극자-쌍극자 상호작용에 의한 사슬모양의 구조로 배열된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자의 수는 증가하게 되고 이는 상부에서 입력된 열을 향상시켜 상부의 온도를 평형상태로 더 빠르게 도달하도록 촉진시킨다. 이 경우 작동유체의 상부에서 평형온도에 더 빠르게 도달하게 되고 하부로 온도가 전달되기 전에 상부 주변에 열이 방출되며 오히려 광열변환효율의 감소를 유발시킨다. 따라서 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 500 Gauss일 때 가장 높은 광열변환효율이 나타났으며, 이는 외부 자기장을 적용하지 않았을 때의 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체와 비교하면 5.2% 향상되었다. 따라서 본 연구에서는 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 최적의 외부 자기장 세기는 500 Gauss로 확인되었다. 하지만, 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 500 Gauss의 외부 자기장을 적용한 경우 상부와 하부의 온도차는  $6.9^\circ\text{C}$ 로 외부 자기장을 적용하지 않았을 때( $6.4^\circ\text{C}$ )보다 크게 나타났다. 이는 작동유체의 전체적인 평균 온도를 상승시키는데 부정적 요인이 되며 광열변환효율을 향상시키는데 한계가 있다. 따라서  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광열변환효율을 향상시키기 위해 상부와 하부의 온도차를 감소시켜야 한다. 작동유체의 평균온도를 증가시키기 위해 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 500 Gauss의 회전자기장을 다양한 속도로 적용하였다. 본 실험에 사용된 500 Gauss의 회전자기장 속도는 각각 100, 200, 300 rpm이다.

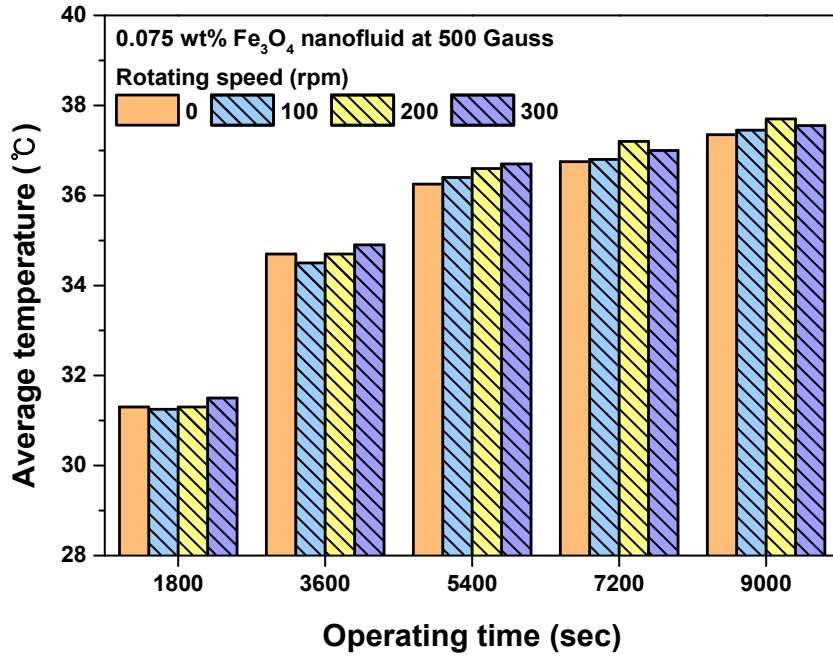


**Fig. 4.10** Temperature of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid as a function of location according to magnetic field strength at 9000 sec

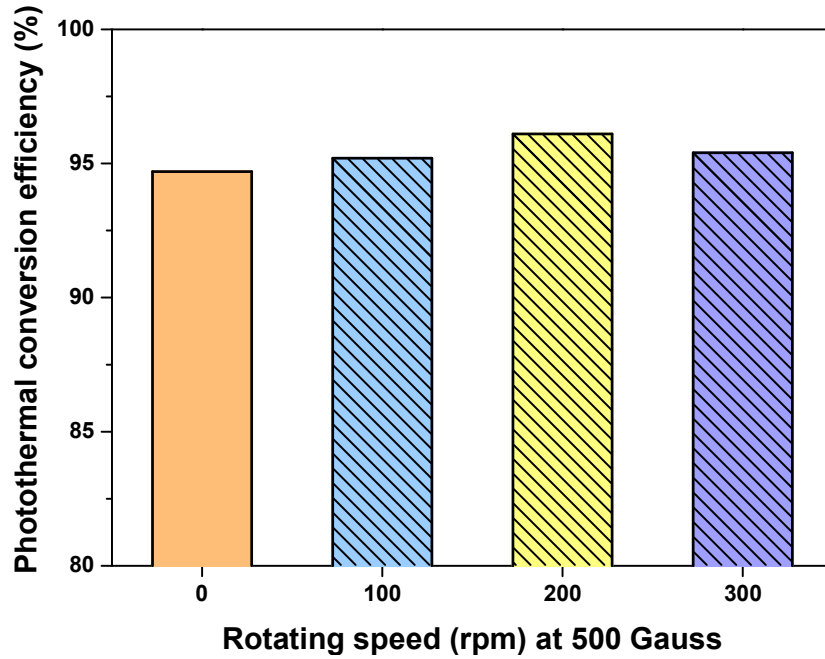
### 3. 외부 회전자기장 회전 속도에 따른 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 나노유체 광열변환 성능 분석

Fig. 4.11은 외부 회전자기장 속도에 따른 광열변환성능의 변화를 보여주고 있다. 외부 회전자기장을 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 적용한 결과, 태양광에 노출된 1시간까지는 회전이 없는 500 Gauss의 외부 자기장을 적용했을 때가 외부 회전 자기장을 적용했을 때보다 높은 온도가 나타났다. 외부 자기장이 형성되었을 때 외부 자기장 선에 따라 쌍극자-쌍극자 상호작용으로 형성된 사슬모양의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자들이 배열되며 외부 자기장이 회전함에 따라 외부 회전자기장의 회전 방향에 따라 나노입자들이 함께 움직인다. (Fig. 4.13) 외부 회전자기장이 존재할 때 외부 회전자기장 선에 따라 배열된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자들은 외부 회전자기장의 회전 방향으로 이동하게 된다. 이동된 사슬모양의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자는 근처에 배열된 회전자기장 선 중 가장 강한 자기장 세기를 갖는 외부 회전자기장 선으로 다시 이동하게 된다. 이러한  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자들의 이동은  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 내부에 대류를 발생시킨다. 또한,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자들의 움직임에 의해 발생한 대류로 인해 상부의 열은 하부로 이동하고 하부의 열은 상부로 이동하면서 초반에는 작동유체의 전체 평균온도의 상승이 회전이 없는 외부 자기장을 적용했을 때 보다 낮게 나타났다. 하지만, 작동유체가 태양광에 노출된 시간이 증가되면서 외부 회전자기장이 적용된 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 온도는 점점 증가되었고, 2시간 이후부터는 외부 자기장을 적용했을 때보다 높은 온도가 나타났다. 실험결과, 외부 회전자기장을 적용하면 상부와 하부의 온도 균일성이 높아지고 이에 따라 작동유체 내의 위치에 따른 온도차가 감소되면서 작동유체의 내부의 상승된 평균온도는 더 증가하게 된다. 따라서 태양광 노출 시간이 2시간 30분에 도달했을 때 외부 회전자기장 속도가 100, 200, 300 rpm일 때 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 온도는 각각 37.5°C, 37.7°C, 37.55°C로 나타났다. 회전이 없는 500 Gauss의 외부 자기장을 적용했을 때 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 온도는 37.4°C로 100, 200, 300 rpm의 외부 회전자기장을 적용했을 때 평형온도는 약간 상승하였다. Fig. 4.11(b)는 각 외부 회전자기장 속도에 따른  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

나노유체의 광열변환효율의 변화를 나타냈다. 외부 회전자기장 속도에 따른 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광열변환효율은 각각 95.35, 96.1%, 95.4%이며, 회전이 없는 외부 자기장을 적용한 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 (94.7%)에 비해 각각 0.57%, 1.43%, 0.76% 향상된 결과가 나타났다. 외부 회전자기장의 속도가 100 rpm 일 때 회전 속도가 200, 300 rpm에 비해 느리게 회전함으로  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자들도 천천히 움직이며 결국 상부에서 하부로 온도가 전달되기 전에 상부표면에서 평형온도에 도달하여 평형온도 및 광열변환효율 상승에 큰 영향은 미치지 못했다. 하지만 100 rpm 이상의 외부 회전자기장을 적용한 경우 평형온도 및 광열변환효율은 회전이 없는 외부 자기장을 적용했을 때 보다 향상되었으며, 이는 상부에서 평형온도에 도달하기 전 하부로 나노입자의 회전에 의해 열전달이 100 rpm일 때 보다 빠르게 나타난다. 이는 작동유체가 평형온도에 도달했을 때 위치별 온도를 통해 설명할 수 있다.



(a) Average temperature



(b) Photothermal conversion efficiency

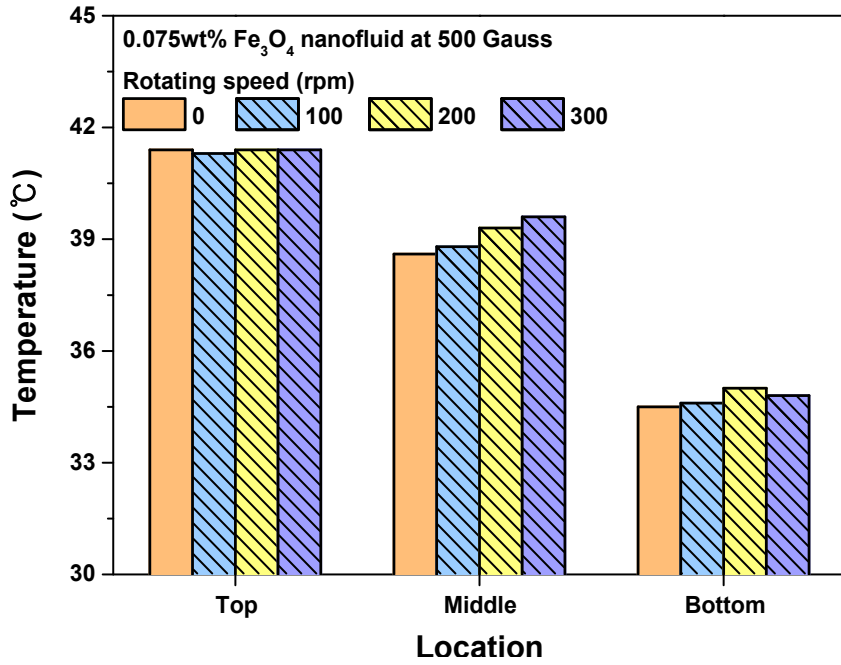
Fig. 4.11 Photothermal conversion performance of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid according to rotating magnetic field speed



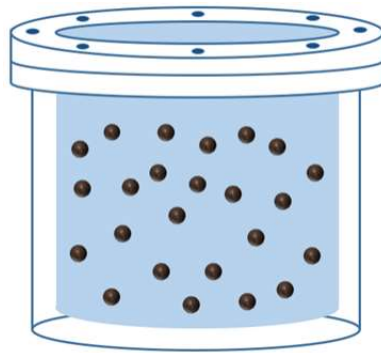
Fig. 4.12은 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 500 Gauss의 외부 회전자기장을 적용했을 때 회전 속도별로 위치에 따른 온도를 나타냈다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체가 평형온도에 도달했을 때 상부에서 흡수된 열이 하부로 전달되기 전에 외부로 열손실이 발생하며 상부와 하부의 온도차는 증가한다. 회전이 없는 500 Gauss의 외부 자기장을 적용했을 때 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 상부와 하부의 온도차이는  $6.9^\circ\text{C}$ 이다. 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 500 Gauss의 외부 회전자기장을 적용한 결과 상부에서는 회전이 없는 외부 자기장을 적용했을 때와 온도는 비슷하게 나타났다. 하지만 작동유체 중간부와 하부의 온도는 외부 회전자기장이 적용된 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에서 회전이 없는 외부 자기장에 비해 높은 온도가 나타났다. 외부 회전자기장의 회전 속도가 100에서 300 rpm으로 증가됨에 따라 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 중간부 및 하부의 온도는 상승되었다. 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 중간부 및 하부의 온도가 상승됨에 따라 상부와 하부의 온도차는 감소하였으며 100에서 300 rpm으로 외부 회전자기장의 회전 속도가 증가됨에 따라 상부와 하부의 온도차이는 각각  $6.7^\circ\text{C}$ ,  $6.4^\circ\text{C}$ ,  $6.6^\circ\text{C}$ 로 회전이 없는 외부 자기장을 적용한 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 상부와 하부의 온도차 ( $6.9^\circ\text{C}$ ) 보다 감소하였다. 이는 외부 회전자기장을 적용했을 때 회전이 없는 외부 자기장을 적용했을 때에 비해 온도 균일성이 향상되었기 때문이다.

Fig. 4.13은 외부 자기장 유무에 따른  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 내부의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자의 배열을 나타냈다. Fig. 4.13(a)는 외부 자기장이 적용되지 않았을 때  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 내부의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자들의 분포된 모습을 나타냈다. 외부 자기장이 적용되지 않았을 때  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 내부의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자들은 브라운 운동으로 인해 무작위로 분포된다.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자가 무작위로 분포된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 외부 자기장을 적용하면 외부 자기장 선에 따라 쌍극자-쌍극자 상호작용으로 형성된 사슬모양의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자들이 배열되며 외부 자기장이 회전함에 따라 외부 회전자기장의 회전 방향에 따라 나노입자들이 함께 움직인다. Fig. 4.13(b)와 같이 외부 회전자기장에 의해  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체 내부의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자가 회전 방향에 따라 회전하여 작동유체 내부에 대류가 형성되며, 형성된 대류로 인해 상부에 흡수된 열이 하부로 원활히 전달되며 이는 작동유체의 위치별 온도 균일성을 증가시켰다. 외부 회전자기

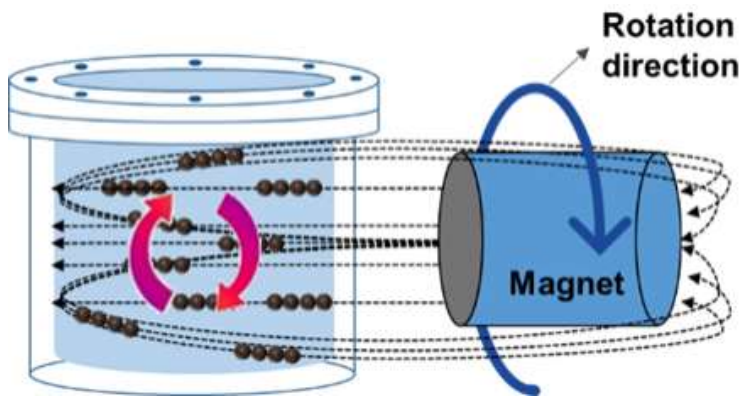
장의 회전 속도 중 가장 작은 상부와 하부의 온도차이는 200 rpm일 때 나타났으며, 300 rpm일 때는 200 rpm일 때 보다 높게 나타났다. 이는 Fig. 4. 13(c)와 같이 외부 자기장에 의해 배열된  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자가 자기장 선에 따라 움직이기 전에 다른 자기장 선에 대체되어  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자가 대류 형태로 회전하기보다는 위아래로 진동하는 형태로 입자들의 움직임은 오히려 감소하게 되기 때문이다. 따라서, 본 연구 결과 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광열변환성능을 향상시키기 위한 500 Gauss의 외부 회전자기장에서의 최적의 속도는 200 rpm으로 확인되었다.



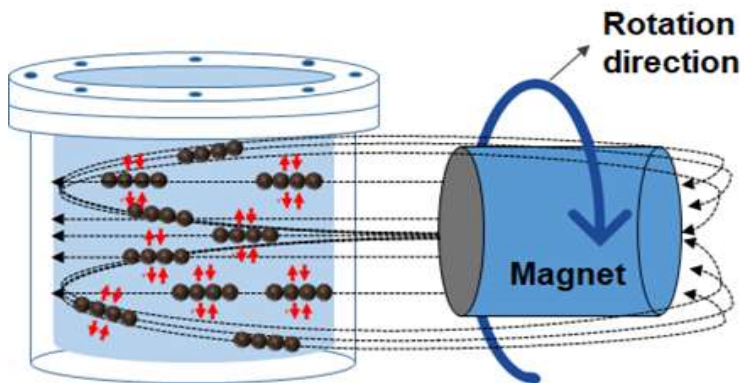
**Fig. 4.12** Temperature of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid as a function of location according to rotating magnetic field speed at 9000 sec



(a) Without magnetic field



(b) With rotating magnetic field at 100-200 rpm



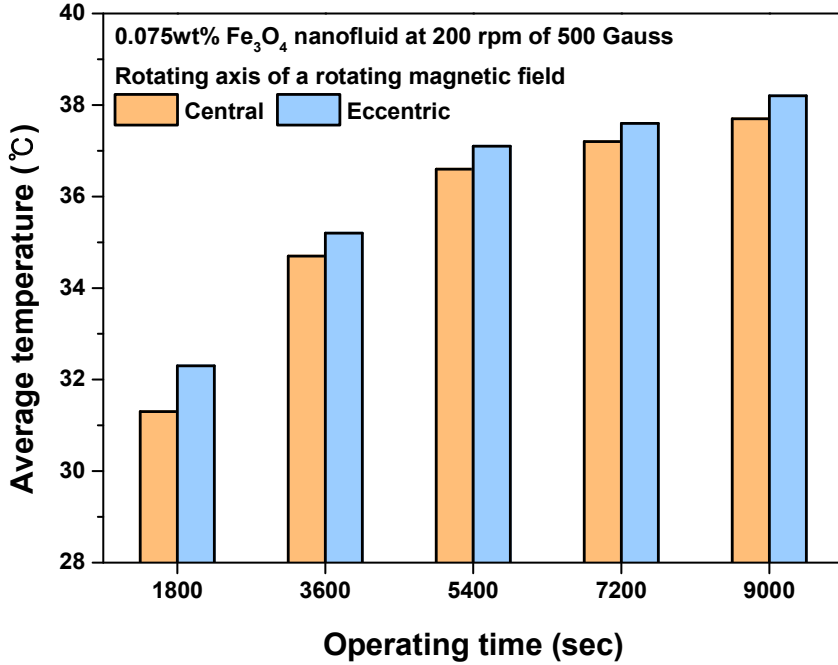
(c) With rotating magnetic field at 300 rpm

**Fig. 4.13** Schematic diagram of magnetic nanoparticles in (a) absence magnetic field, (b) rotating magnetic field speed of 100-200 rpm, and (c) 300 rpm

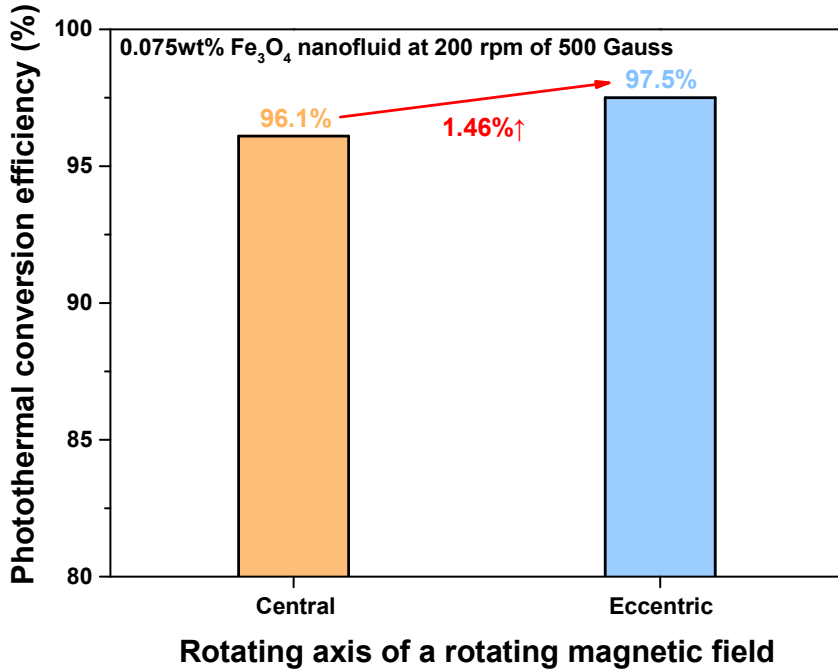
#### 4. 편심 외부 회전자기장 적용에 따른 $Fe_3O_4$ 나노유체 광열변환 성능 분석

이전 절에서 소개한 외부 회전자기장은 회전축이 중심으로 고정된 축을 기준으로 자기장이 회전하는 외부 회전자기장을 작동유체에 적용한 실험이다. 외부 회전자기장의 회전축이 고정된 외부 회전자기장을 적용한 작동유체는 내부의 대류가 형성되어 온도 균일성이 향상됨을 확인하였다. 하지만 작동유체의 내부의 형성되는 대류를 더욱 활발하게 형성시키기 위해 외부 회전자기장의 중심축을 이동시켜 회전 반경을 증가시켜야 한다. 따라서 본 실험에서는 외부 회전자기장의 회전축을 변화시키기 위하여 외부 회전자기장의 회전 반경의 중심을 1 mm 편심을 주었으며, 외부 회전자기장의 자기장 세기 및 회전 속도는 이전에 조사된 최적의 조건인 500 Gauss, 200 rpm으로 고정하였다. Fig. 4.14는 외부 직접흡수 회전 반경에 따른 광열변환성능실험 결과를 나타냈다. 외부 회전자기장의 중심축이 1 mm 이동된 편심 외부 회전자기장과 고정 외부 회전자기장을 비교한 결과 편심 외부 회전자기장에서 작동유체인 0.075wt%의  $Fe_3O_4$  나노유체의 평균온도가 고정 외부 회전자기장에 비해 높게 나타났다. 광노출 시간이 2시간 30분에 도달했을 때 0.075wt%의  $Fe_3O_4$  나노유체의 평균온도는 고정 외부 회전자기장과 편심 외부 회전자기장을 적용한 결과 각각 37.7°C와 38.2°C로 나타났다. 외부 회전자기장의 회전축이 편심일 때 온도는 회전축이 중심으로 고정되어 있을 때에 비해 0.5°C 상승되었다. 또한, 외부 회전자기장의 회전축이 고정되어 있을 때와 편심일 때 광열변환효율은 각각 96.1%와 97.5%로 외부 회전자기장의 회전축이 편심일 때 광열변환효율은 증가하였다. 외부 회전자기장의 회전축이 편심일 때 직접흡수는 97.5%로 대부분의 태양에너지를 흡수하여 열로 변환하는 것으로 나타났다. 이는  $Fe_3O_4$  나노유체 내부의  $Fe_3O_4$  나노입자는 외부 자기장에 의해 형성된 사슬모양의 구조가 형성되며, 형성된 사슬모양의  $Fe_3O_4$  나노입자들이 외부 회전자기장에 의해 회전 방향으로 편심 외부 회전자기장과 함께 이동하게 되기 때문이다. 외부 회전자기장의 회전축이 편심일 때 회전축이 중심으로 고정되어 있을 때에 비해  $Fe_3O_4$  나노유체 내의  $Fe_3O_4$  나노입

자들의 이동 반경이 증가하여 작동유체 내부의 대류 및 열전달을 더 활발히 형성시킬 수 있으며, 이는 작동유체 내부의 온도균일성을 향상시키는 것으로 확인되었다.



(a) Average temperature



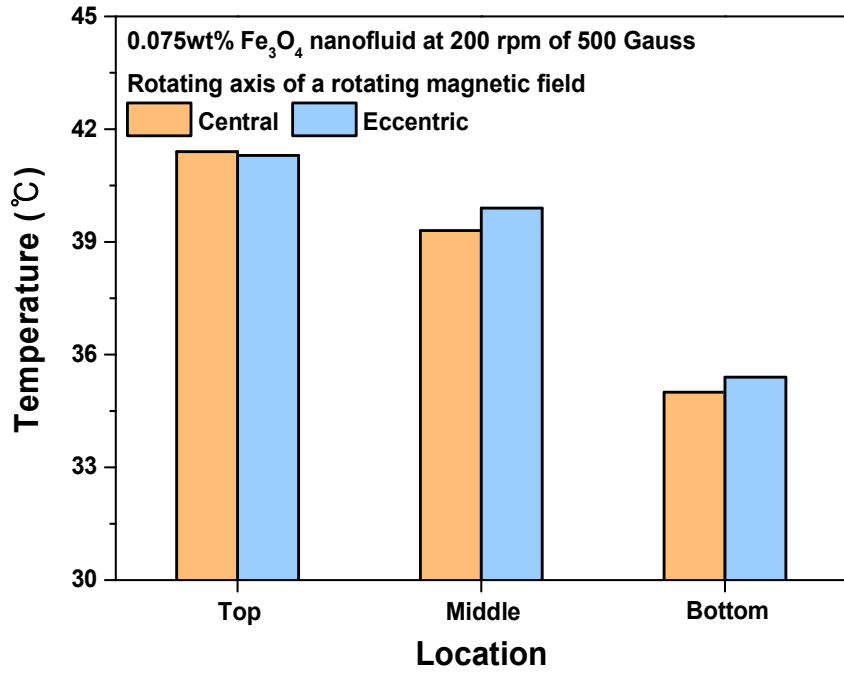
(b) Photothermal conversion efficiency

Fig. 4.14 Photothermal conversion performance of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid according to rotating magnetic field axis

외부 회전자기장의 회전축이 편심일 때 작동유체 내부의 활발해진 대류로 인해 향상된 온도 균일성은 Fig. 4.15로 설명할 수 있다. Fig. 4.15는 외부 회전자기장의 회전축이 중심으로 고정되어 있을 때, 편심일 때 작동유체의 상부, 중간부 및 하부의 온도를 나타냈다. 외부 회전자기장의 회전축이 중심으로 고정되어 있을 때 0.075wt%의  $Fe_3O_4$  나노유체의 상부, 중간부 및 하부의 온도는 각각 41.4°C, 39.3°C, 35°C로 상부와 하부의 온도차이는 6.4°C로 나타났다. 또한, 외부 회전자기장의 회전축이 편심일 때 0.075wt%의  $Fe_3O_4$  나노유체의 상부, 중간부 및 하부의 온도는 각각 41.3°C, 39.9°C, 35.4°C로 상부와 하부의 온도차이는 5.9°C로 나타났다. 외부 회전자기장의 회전축이 중심에서 편심으로 이동함에 따라 작동유체 내에 상부의 열이 하부로 전달되어 편심에서의 상부온도가 약간 감소함을 확인하였다.

하지만 외부 회전자기장의 회전축이 편심되었을 때 작동유체 내부의 상부의 열이 하부로 전달되어 회전축이 중심일 때에 비해 중간부 및 하부의 온도는 각각 0.6°C와 0.4°C 증가하였다. 이는 외부 회전자기장의 회전축이 중심에서 편심으로 이동함에 따라 자기장 선에 따라 배열된  $Fe_3O_4$  나노입자의 움직이는 영역이 증가하여 작동유체 내부의 대류를 활발히 형성시켰으며, 이는 상부의 열을 하부로 전달시키는 데 긍정적인 영향을 미쳤기 때문이다. 외부 회전자기장의 회전축이 중심에서 편심으로 이동됨에 따라 작동유체의 상부와 하부의 온도차이는 33.3% 감소되었다. 결과적으로 본 실험을 통해 외부 회전자기장의 회전축이 편심을 이룸에 따라 내부 대류 형성이 활발하게 형성되며 이는 작동유체 내부의 온도 균일성이 향상됨을 확인하였다.





**Fig. 4.15** Temperature of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid as a function of location according to rotating magnetic field axis at 9000 sec

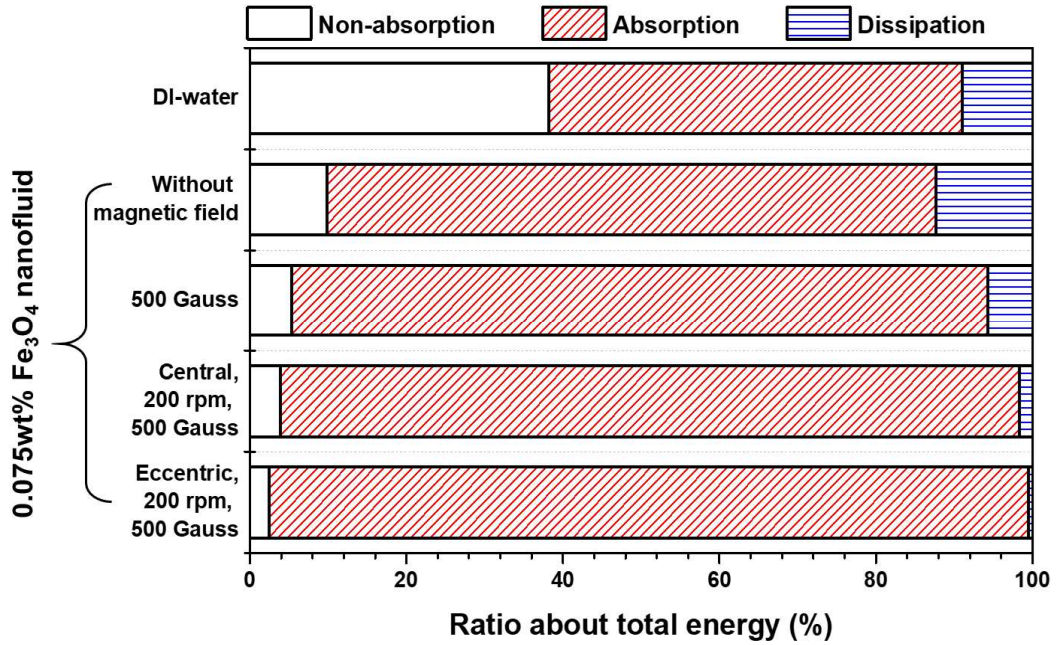
Fig. 4.16은 각 조건에서 얻은 최고의 광열변환효율을 갖는 조건에서 태양광 노출시간이 5분, 150분 지났을 때 전체 에너지에서 작동유체가 비흡수, 흡수, 소산된 에너지 비율을 비교하여 나타내었다. 각 실험조건에 따른 작동유체의 광열변환효율은 작동유체가 수집한 태양에너지와 소산된 태양에너지의 합으로 작동유체가 광노출되는 시간이 증가함에 따라 작동유체의 온도가 상승되면서 작동유체의 수집된 태양에너지는 감소하게 되며, 반면 소산된 태양에너지는 증가한다. 태양광 노출시간이 증가함에 따라 작동유체가 비흡수, 흡수, 소산된 에너지 비율은 5분 단위로 계산한 결과, 가장 큰 에너지 수집효율은 실험 노출 초기인 5분에서 나타났으며 실험조건별로 최고의 광열변환효율 조건에서 각 에너지 비율을 Fig. 4.16(a)에 제시하였다.

기저유체인 DI-water의 흡수된 에너지 비율은 61.8%이며, 0.075wt%의  $Fe_3O_4$  나노유체의 흡수된 에너지 비율은 90.1%로 0.075wt%의  $Fe_3O_4$  나노유체에 흡수된 에너지는 기저유체인 DI-water에 비해 45.6% 증가하여 매우 큰 증가 정도를 보였다. 하지만 작동유체가 흡수한 에너지 중 주변으로 소산된 에너지의 비율은 DI-water에서 9%로 나타났으며, 0.075wt%의  $Fe_3O_4$  나노유체의 경우 12.3%로 주변으로 소산된 에너지 또한 기저유체인 DI-water에 비해 상당히 증가하였다. 이는 0.075wt%의  $Fe_3O_4$  나노유체 내부의  $Fe_3O_4$  나노입자로 향상된 광흡수 특성으로 인해 많은 양의 태양에너지를 흡수하여 열로 변환하기 때문에 흡수한 에너지 비율은 증가하였지만, 상부에서의 높은 열로 인해 주변으로 소산된 에너지 비율 또한 증가하였다. 작동유체에 흡수된 에너지에서 주변으로 소산된 에너지를 감소시키기 위해 0.075wt%의  $Fe_3O_4$  나노유체에 500 Gauss의 외부 자기장을 가한 경우 열적 성능이 향상되며 이에 흡수된 에너지 비율이 94.7%로 외부 자기장을 가하지 않았을 때 보다 5.2% 향상하는 것으로 나타났다. 또한, 주변으로 소산된 에너지 비율은 5.7%로 외부 자기장을 가하지 않았을 때보다 주변으로 손실되는 에너지 비율이 57.7% 감소하였다. 이는 500 Gauss의 외부 자기장에 의해 0.075wt%의  $Fe_3O_4$  나노유체의 에너지 흡수특성이 증가하여 광원의 대부분을 흡수하고 흡수된 에너지를 작동유체 내부나 하부로 원활히 전달하기 때문이다. 게다가, 샘플의 상부에서 급격한 온도 증가에 따른 손실을 줄이기 위해 200 rpm의 중심 외부 회전자기장을 0.075wt%의  $Fe_3O_4$  나노유

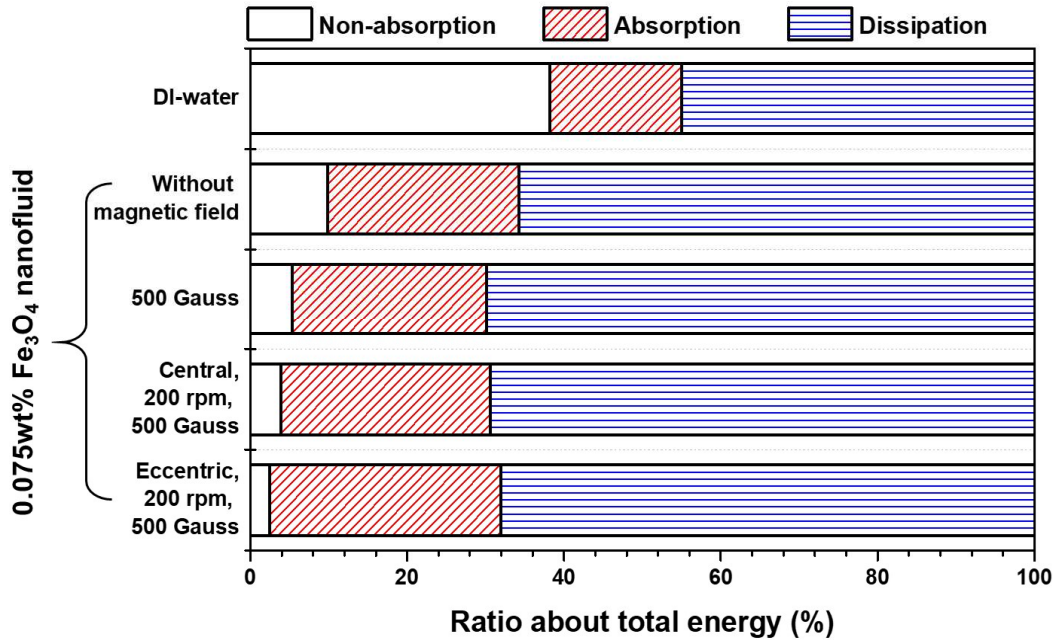
체에 적용하는 경우 입사되는 태양에너지 대부분을 흡수하였으며, 흡수된 에너지 중 주변으로 소산되는 에너지는 1.7%로 회전이 없는 외부 자기장에 비해 소산되는 에너지를 감소시켰다. 또한, 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 200 rpm의 편심 외부 회전자기장을 적용한 결과 입사된 태양에너지 중 97.5%를 흡수하였다. 이는 중심 외부 회전자기장과 비교한 결과 1.14% 향상되었으며, 소산된 에너지 비율은 0.5%로 흡수된 에너지 대부분이 작동유체의 열로 변환됨을 확인하였다. 이는 외부 회전자기장에 의해 상부의 열이 하부로 효율적으로 전달되어 상부 표면에서 열손실이 감소하기 때문에 주변으로 소산된 에너지가 상대적으로 감소되었기 때문이다.

에너지 수집 효율은 태양광의 노출시간이 증가됨에 따라 감소되며 광노출 시간이 2시간 30분이 지났을 때 가장 낮은 수집효율이 나타났다. 이 조건에서 작동유체의 에너지 비율을 Fig. 4.16(b)에 제시하였다. 광노출된 시간이 증가됨에 따라 작동유체의 온도는 증가하여 주변으로 열손실이 증가하며 작동유체가 흡수한 열과 손실로 방출한 열이 동일한 평형상태에 도달할 때 작동유체의 흡수된 에너지 비율은 같지만 외부 환경으로 소산되는 에너지 비율은 상대적으로 증가하였다. 작동유체가 태양광에 노출된 시간이 2시간 30분이 지났을 때 DI-water는 흡수된 에너지 비율에서 주변으로 소산된 에너지 비율은 45%이며, 태양광에 노출된 시간이 5분이 지났을 때 주변으로 소산된 에너지 비율에 비해 크게 증가하였다. 반면, 2시간 30분에서 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체로 흡수된 에너지 비율은 높지만 주변으로 소산된 에너지 비율이 65.7%로 5분인 상태에 비하여 434% 증가하였다. 이는 DI-water에  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자의 추가로 인해 향상된 열전달 특성 개선 효과가 높은 열손실을 초래했음을 간접적으로 확인할 수 있다. 이러한 현상은 500 Gauss의 외부 자기장을 가한 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에서도 동일하게 나타났다. 500 Gauss의 외부 자기장으로 인해 작동유체의 열물리적 특성이 증가하여 열전달특성이 개선되었지만, 동시에 주변으로 많은 열손실을 초래한다. 따라서 150분에서 500 Gauss의 외부 자기장을 가한 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 경우 주변으로 소산되는 에너지 비율은 69.9%로 외부 자기장을 적용하지 않았을 때 주변으로 소산되는 에너지 비율보다 6.4% 증가하였다. 주변으로 소산되는 에너지 비율은 높은 평형온도를 가지는 경우에 더 증가하며 특히 상부 표면에서 주변으로 열손실이 크게 나타난다. 이

는 상부 표면으로부터 태양광을 흡수하여 열로 변환한 뒤 하부로 열을 전달하는 일반적인 과정에서 열이 하부로 전달되기 전에 상부 표면에서 외부로 열손실이 크게 발생하기 때문이며 이에 하부와 온도차가 크게 형성된다. 따라서 작동유체에 흡수된 에너지 중 주변으로 소산된 에너지의 비율을 감소시키기 위해 상부의 온도를 하부로 빠르게 전달하여 상부와 하부의 온도차를 감소시켜야 한다. 본 연구에서는 상부와 하부의 온도차를 효과적으로 감소시키기 위해 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 500 Gauss의 외부 회전자기장을 적용하였다. 500 Gauss의 중심 외부 회전자기장을 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 적용한 결과 흡수된 에너지 비율 중 주변으로 소산된 에너지 비율은 69.4%로 500 Gauss의 외부 자기장을 적용한 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체보다 0.7% 감소되었다. 또한, 500 Gauss의 편심 외부 회전자기장을 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 적용한 결과 주변으로 소산된 에너지 비율은 68%로 중심 외부 회전자기장에 비해 2% 감소되었다. 즉, 500 Gauss의 외부 자기장의 회전에 의한  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자들의 회전이 상부에서 흡수한 열을 조금 더 효과적으로 하부로 이동시킬 수 있음을 확인하였으며, 외부 자기장의 회전 반경이 증가함에 따라 상부의 열을 하부로 더욱 효과적으로 이동시킴을 확인하였다. 상부의 열을 하부로 이동시킴에 따라 상부와 하부의 온도차는 감소되며 흡수된 열에너지 중 주변으로 소산된 에너지를 감소시키고 이는 곧 광열변환효율의 향상으로 이어짐을 확인하였다.



(a) Operating time (t)=5 min



(b) Operating time (t)=150 min

Fig. 4.16 Non-absorption, absorption, and dissipation ratio of total energy

## 제 5 장 결 론

직접흡수식 태양열 집열기의 성능향상을 위해 작동유체의 광열변환성능은 매우 중요한 요소이다. 본 연구는 작동유체의 광열변환성능을 향상시키기 위하여 기저유체인 DI-water에  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자의 첨가, 외부 자기장의 세기 및 회전자기장을 변화시켰으며 이에 따라 작동유체의 광흡수 및 열적 특성, 그리고 광열변환성능을 실험적으로 조사하여 고찰하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

DI-water에  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자를 추가한  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 농도별 광흡수 특성을 분석한 결과  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 농도가 증가됨에 따라 표면적 증가와 광산란 특성으로 인해 광흡수 특성은 향상되었고, 0.1wt%의 농도에서 전체 광원의 83.8%를 흡수하여 우수한 광흡수 특성을 나타냈다. 또한, DI-water에  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자가 첨가되면 열전도도 및 점도는 향상되었으며, 이는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자로 인해 작동유체의 열전달 특성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 광열변환성능은 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에서 90%로 가장 높은 광열변환효율이 나타났다. 이는 기저유체(DI-water)를 적용했을 때 비해 45.6% 향상된 효율이다. 최적의 농도인 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광열변환효율을 향상시키기 위해 다양한 세기의 외부 자기장을 적용하였으며, 그 중 최적의 자기장 세기는 500 Gauss로 나타났다. 500 Gauss의 외부 자기장을 적용했을 때 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체의 광열변환효율은 94.7%로 외부 자기장이 없는 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체에 비해 5.22% 향상되었으며, DI-water에 비하여 53.2% 향상되었다. 500 Gauss의 외부 자기장이 적용된 0.075wt%의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노유체는 높은 광열변환효율을 가지지만, 주변으로 소산되는 에너지로 인해 상부와 하부의 온도차가  $6.9^\circ\text{C}$ 로 상대적으로 크게 나타났다. 작동유체의 광열변환효율을 향상시키기 위해서는 수집기의 상부에서의 열손실을 감소시키고 높은 열전달을 이용하여 상부와 하부의 온도차를 감소시켜야 한다. 이를 위하여 본 연구에서 500 Gauss의 회전자기장을 적용한 결과, 나노입자들의 움직임으로 인하여 열전달이 촉진되었으며 최적의 회전 속도는

200 rpm으로 나타났다. 500 Gauss에서 200 rpm의 회전자기장을 적용하였을 때 상부와 하부의 온도차는 고정 자기장에 비해 0.3℃ 감소하였으며, 이는 주변으로 소산되는 에너지를 감소시켜 광열변환효율을 1.48% 향상되었다. 0.075wt%의 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체에 500 Gauss의 200 rpm의 회전자기장을 적용한 결과 광열변환효율은 96.1%이며, DI-water에 비해 55.5% 향상되었다. 회전자기장의 회전 축을 이동시켜 외부 회전자기장의 회전 반경을 증가시킨 결과 0.075wt%의 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체 내부의 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노입자의 움직이는 이동 반경이 증가하여 대류가 활발해져 유체 내부의 온도균일성이 증가하였다. 0.075wt%의 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체가 평형온도에 도달했을 때 500 Gauss의 외부 자기장이 적용되었을때에 비해 소산되는 에너지가 2.72% 감소되었으며, 흡수되는 에너지는 19% 증가됨을 확인하였다.

본 연구에서 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체의 적용으로 작동유체의 광열변환효율을 크게 향상시킬 수 있었으며 외부자기장과 회전자기장의 적용으로 광열변환효율이 더욱 향상됨을 확인하였다. 따라서 본 연구결과를 활용하여 직접흡수식 태양열에 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 나노유체와 외부 자기장을 적용시킬 경우 집열기의 성능을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

## 참고문헌

- [01] I. Dincer, Energy and environmental impacts: Present and future perspectives, Energy Sources. 20 (1998) 427-453.
- [02] W. Zhou, C. Lou, Z. Li, L. Lu, H. Yang, Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems, Applied Energy 87 (2010) 380-389.
- [03] N.S. Lewis, Introduction: Solar Energy Conversion, Chemical Reviews. 115 (2015) 12631-12632.
- [04] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A.A. Adelodun, K.H. Kim, Solar energy: Potential and future prospects, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 82 (2018) 894-900.
- [05] L. Kumar, M. Hasanuzzaman, N.A. Rahim, Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review, Energy Conversion and Management. 195 (2019) 885-908.
- [06] N.S. Lewis, Research opportunities to advance solar energy utilization, Science (80). 351 (2016).
- [07] M. Valizade, M.M. Heyhat, M. Maerefat, Experimental comparison of optical properties of nanofluid and metal foam for using in direct absorption solar collectors, Solar Energy Materials and Solar Cells. 195 (2019) 71-80.
- [08] Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles (Conference) |



OSTI.GOV, (n.d.).

[09] J. Qu, M. Tian, X. Han, R. Zhang, Q. Wang, Photo-thermal conversion characteristics of MWCNT-H<sub>2</sub>O nanofluids for direct solar thermal energy absorption applications, *Applied Thermal Engineering*. 124 (2017) 486-493.

[10] R. Loni, E.A. Asli-Ardeh, B. Ghobadian, A.B. Kasaeian, S. Gorjianb, Thermodynamic analysis of a solar dish receiver using different nanofluids, *Energy* 133 (2017).

[11] L. Mercatelli, E. Sani, D. Fontani, G. Zaccanti, F. Martelli, P.D. Ninni, Scattering and absorption properties of carbon nanohorn-based nanofluids for solar energy applications, *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*. 6 (1) (2011) 289-293.

[12] E. Sani, N. Papi, L. Mercatelli, G. Zylab, Graphite/diamond ethylene glycolnanofluids for solar energy applications, *Renewable Energy*. 126 (2018) 692-698.

[13] E. Sani, L. Mercatelli, S. Barison, C. Pagurab, F. Agrestib, et al., Potential of carbon nanohorn-based suspensions for solar thermal collectors, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 95 (11) (2011) 2994-3000.

[14] Q. He, S. Wang, S. Zeng, Z. Zheng, Experimental investigation on photothermal properties of nanofluids for direct absorption solar thermal energy systems, *Energy Conversion and Management*. 73 (5) (2013) 150-157.

[15] A. Yasinskiy, J. Navas, T. Aguilar, R. Alcántara, J.J. Gallardo, A. Sánchez-Coronilla, E.I. Martín, D. De Los Santos, C. Fernández-Lorenzo, Dramatically

enhanced thermal properties for TiO<sub>2</sub>-based nanofluids for being used as heat transfer fluids in concentrating solar power plants, *Renewable Energy*. 119 (2018) 809-819.

[16] A.V. Minakov, V.Y. Rudyak, M.I. Pryazhnikov, Systematic Experimental Study of the Viscosity of Nanofluids, *Heat Transfer Engineering*. 42 (2021) 1024-1040.

[17] M.R. Safaei, M.S. Shadloo, M.S. Goodarzi, A. Hadjadj, H.R. Goshayeshi, M. Afrand, S.N. Kazi, A survey on experimental and numerical studies of convection heat transfer of nanofluids inside closed conduits, *Advances in Mechanical Engineering*. 8 (2016) 1-14.

[18] T.J. Choi, S.P. Jang, M.A. Kedzierski, Effect of surfactants on the stability and solar thermal absorption characteristics of water-based nanofluids with multi-walled carbon nanotubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 122 (2018) 483-490.

[19] R.T. Wang, J.C. Wang, Intelligent dimensional and thermal performance analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid, *Energy Conversion and Management*. 138 (2017) 686-697.

[20] T.B. Gorji, A.A. Ranjbar, A review on optical properties and application of nanofluids in direct absorption solar collectors (DASCs), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 72 (2017) 10-32.

[21] H. K. Gupta, G. Das Agrawal, and J. Mathur, Investigations for effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluid flow rate on the efficiency of direct absorption solar collector, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 5, 70-78.

[22] J. Zeng, Y. Xuan, Analysis on interaction between solar light and suspended nanoparticles in nanofluids, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*.

269 (2021) 107692.

[23] Y. Lee, H. Jeong, Y. Sung, Thermal Absorption Performance Evaluation of Water-Based Nanofluids (CNTs, Cu, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) for Solar Thermal Harvesting, *Energies* 2021, Vol. 14, Page 4875. 14 (2021) 4875.

[24] M. Karami, M.A. Akhavan-Behabadi, M. Raisee Dehkordi, S. Delfani, Thermo-optical properties of copper oxide nanofluids for direct absorption of solar radiation, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 144 (2016) 136-142.

[25] Z. Said, R. Saidur, N.A. Rahim, Optical properties of metal oxides based nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 59 (2014) 46-54.

[26] M. Chen, Y. He, J. Zhu, Y. Shuai, B. Jiang, Y. Huang, An experimental investigation on sunlight absorption characteristics of silver nanofluids, *Solar Energy*. 115 (2015) 85-94.

[27] V.R.A. Holm, M.M. Greve, B. Holst, A theoretical investigation of the optical properties of metal nanoparticles in water for photo thermal conversion enhancement, *Energy Conversion and Management*. 149 (2017) 536-542.

[28] V.K. Pustovalov, L.G. Astafyeva, Optical properties of nanoparticles and nanofluids for direct absorption of solar radiation, *Nanotechnology for Environmental Engineering*. 3 (2018) 1-8.

[29] S. Delfani, M. Karami, M.A. Akhavan-Behabadi, Performance characteristics of a residential-type direct absorption solar collector using MWCNT nanofluid, *Renewable Energy*. 87 (2016) 754-764.

- [30] J. Qu, M. Tian, X. Han, R. Zhang, Q. Wang, Photo-thermal conversion characteristics of MWCNT-H<sub>2</sub>O nanofluids for direct solar thermal energy absorption applications, *Applied Thermal Engineering*. 124 (2017) 486-493.
- [31] C. Guo, C. Liu, S. Jiao, R. Wang, Z. Rao, Introducing optical fiber as internal light source into direct absorption solar collector for enhancing photo-thermal conversion performance of MWCNT-H<sub>2</sub>O nanofluids, *Applied Thermal Engineering*. 173 (2020) 115207.
- [32] T.B. Gorji, A.A. Ranjbar, A numerical and experimental investigation on the performance of a low-flux direct absorption solar collector (DASC) using graphite, magnetite and silver nanofluids, *Solar Energy*. 135 (2016) 493-505.
- [33] M. Chen, Y. He, J. Zhu, D.R. Kim, Enhancement of photo-thermal conversion using gold nanofluids with different particle sizes, *Energy Conversion and Management*. 112 (2016) 21-30.
- [34] S.K. Hazra, S. Ghosh, T.K. Nandi, Photo-thermal conversion characteristics of carbon black-ethylene glycol nanofluids for applications in direct absorption solar collectors, *Applied Thermal Engineering*. 163 (2019) 114402.
- [35] A. Gimeno-Furió, R. Martínez-Cuenca, R. Mondragón, A.F.V. Gasulla, C. Doñate-Buendía, G. Mínguez-Vega, L. Hernández, Optical characterisation and photothermal conversion efficiency of a water-based carbon nanofluid for direct solar absorption applications, *Energy*. 212 (2020) 118763.
- [36] X. Li, H. Chang, L. Zeng, X. Huang, Y. Li, R. Li, Z. Xi, Numerical analysis of

photothermal conversion performance of MXene nanofluid in direct absorption solar collectors, *Energy Conversion and Management*. 226 (2020) 113515.

[37] H. Wang, X. Li, B. Luo, K. Wei, G. Zeng, The Mxene/water nanofluids with high stability and photo-thermal conversion for direct absorption solar collector: A comparative study, *Energy*. 227 (2021) 120483.

[38] P. Phelan, T. Otanicar, R. Taylor, H. Tyagi, Trends and opportunities in direct-absorption solar thermal collectors, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 5 (2013).

[39] D. Shahr, K. M., A.B. M.A., Experimental investigation on performance comparison of nanofluid based direct absorption and flat plate solar collectors, *International Journal of Nano Dimension*, 7 (2015) 85-96.

[40] X. Zuo, W. Yang, M. Shi, H. Yan, C. Guan, S. Wu, Z. Zhang, X. Li, Z. Li, Experimental investigation on photothermal conversion properties of lampblack ink nanofluids, *Solar Energy*. 218 (2021) 1-10.

[41] S. Kumar, V. Sharma, M.R. Samantaray, N. Chander, Experimental investigation of a direct absorption solar collector using ultra stable gold plasmonic nanofluid under real outdoor conditions, *Renewable Energy*. 162 (2020) 1958-1969.

[42] B. V. Balakin, O. V. Zhdaneev, A. Kosinska, K. V. Kutsenko, Direct absorption solar collector with magnetic nanofluid: CFD model and parametric analysis, *Renewable Energy*. 136 (2019) 23-32.

[43] S. Doganay, R. Alsangur, A. Turgut, Effect of external magnetic field on thermal

conductivity and viscosity of magnetic nanofluids: a review, *Materials Research Express*. 6 (2019) 112003.

[44] P.B. Kharat, S.B. Somvanshi, P.P. Khirade, K.M. Jadhav, Effect of Magnetic Field on Thermal Conductivity of the Cobalt Ferrite Magnetic Nanofluids, *Journal of Physics: Conference Series*. 1644 (2020) 012028.

[45] A. Lee, Y. Jeon, V. Chinnasamy, H. Cho, Investigation of forced convective heat transfer with magnetic field effect on water/ethylene glycol-cobalt zinc ferrite nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 128 (2021) 105647.

[46] T. Boldoo, J. Ham, H. Cho, Comprehensive Experimental Study on the Thermophysical Characteristics of DI-Water Based  $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  Nanofluid for Solar Thermal Harvesting, *Energies* 2020, Vol. 13, Page 6218. 13 (2020) 6218.

[47] Q. He, G. Yan, S. Wang, Experimental Investigation on Solar Thermal Properties of Magnetic Nanofluids for Direct Absorption Solar Collector, *ASME 2016 5th Int. Conf. Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer*, 2016. 1 (2016).

[48] D. Wang, Y. Jia, Y. He, L. Wang, J. Fan, H. Xie, W. Yu, Enhanced photothermal conversion properties of magnetic nanofluids through rotating magnetic field for direct absorption solar collector, *Journal of Colloid and Interface Science*. 557 (2019) 266-275.

[49] Y. Shin, J. Ham, T. Boldoo, H. Cho, Magnetic effect on the enhancement of photo-thermal energy conversion efficiency of MWCNT/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  hybrid nanofluid, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 215 (2020) 110635.

- [50] A. Karimi, S.S.S. Afghahi, H. Shariatmadar, M. Ashjaee, Experimental investigation on thermal conductivity of  $MFe_2O_4$  (M=Fe and Co) magnetic nanofluids under influence of magnetic field, *Thermochimica Acta*. 598 (2014) 59–67.
- [51] M. Hajiyan, S. Ebadi, S. Mahmud, M. Biglarbegan, H. Abdullah, Experimental investigation of the effect of an external magnetic field on the thermal conductivity and viscosity of  $Fe_3O_4$ -glycerol, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018 1352. 135 (2018) 1451–1464.
- [52] L. Sha, Y. Ju, H. Zhang, The influence of the magnetic field on the convective heat transfer characteristics of  $Fe_3O_4$ /water nanofluids, *Applied Thermal Engineering*. 126 (2017) 108–116.
- [53] S. Rajput, C.U. Pittman, D. Mohan, Magnetic magnetite ( $Fe_3O_4$ ) nanoparticle synthesis and applications for lead ( $Pb^{2+}$ ) and chromium ( $Cr^{6+}$ ) removal from water, *Journal of Colloid and Interface Science*. 468 (2016) 334–346.
- [54] C. Prasad, P. Krishna Murthy, R.H. Hari Krishna, R. Sreenivasa Rao, V. Suneetha, P. Venkateswarlu, Bio-inspired green synthesis of RGO/ $Fe_3O_4$  magnetic nanoparticles using *Murrayakoenigii* leaves extract and its application for removal of Pb(II) from aqueous solution, *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 5 (2017) 4374–4380.
- [55] C. Li, Y. Wei, A. Liivat, Y. Zhu, J. Zhu, Microwave-solvothermal synthesis of  $Fe_3O_4$  magnetic nanoparticles, *Materials Letters*, 107 (2013) 23–26.
- [56] Li D, Zheng Y, Li Z, Qi H. Optical properties of a liquid paraffin-filled double glazing unit. *Energy Build* 2015;108:381–6.

- [57] Wang Q, Wei W, Li D, Qi H, Wang F, Arıcı M. Experimental investigation of thermal radiative properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -paraffin nanofluid. *Solar Energy*, 2019;177:420–6.
- [58] N. Chen, H. Ma, Y. Li, J. Cheng, C. Zhang, D. Wu, H. Zhu, Complementary optical absorption and enhanced solar thermal conversion of CuO-ATO nanofluids, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 162 (2017) 83–92.
- [59] H. Kim, J. Ham, H. Cho, Evaluation of solar energy absorption and photo-thermal conversion performance of SiC/ITO hybrid nanofluid, *Case Studies in Thermal Engineering*. 35 (2022)